

ROMÂNIA



Ministerul Educației Naționale și Cercetării Științifice

Universitatea Tehnică de Construcții București

Facultatea de Construcții Civile, Industriale și Agricole

## **TEZĂ DE DOCTORAT**

# **CERCETĂRI ASUPRA PROPRIETĂȚILOR MECANICE ALE BETOANELOR CU CIMENTURI COMPOZITE**

Doctorand,

Ing. Anca P. IONESCU

Conducător științific,

Prof. Univ. Dr. Ing. Dan Paul  
GEORGESCU

BUCUREȘTI, 2019

Un sentiment special de mulțumire adresez conducătorului științific al tezei de doctorat, Domnului Profesor Dan Paul Georgescu pentru îndrumarea științifică competentă, sprijinul permanent și ajutorul valoros oferit pe parcursul elaborării tezei de doctorat.

Deosebite mulțumiri Domnilor Profesori Liviu Crainic și Radu Pascu, pentru îndrumările, sugestiile și sprijinul acordat. Aceleași mulțumiri și Doamnei Dr. Fiz. Adelina Apostu pentru tot ajutorul dat pe parcursul cercetării experimentale.

Mulțumesc colegilor din Departamentul Construcții de Beton Armat pentru toată încrederea și bunăvoința acordată, în special Domnilor Profesori Radu Văcăreanu, Viorel Popa și Eugen Lozincă.

Mulțumesc părinților mei minunați.

---

## CUPRINS

|                                                                                                        |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>INTRODUCERE. TEMA ȘI OBIECTIVELE LUCRĂRII.....</b>                                                  | <b>7</b>  |
| <b>CAPITOLUL I – CIMENTUL.....</b>                                                                     | <b>15</b> |
| I.1. Ciment Portland.....                                                                              | 15        |
| I.1.1. Istoria cimentului Portland și a betonului.....                                                 | 15        |
| I.1.2. Compoziția chimică (oxidică) și mineralogică a clincherului de ciment Portland.....             | 17        |
| I.1.3. Modulii caracteristici ai cimentului.....                                                       | 24        |
| I.1.4. Factori caracteristici pentru comportarea cimenturilor.....                                     | 25        |
| I.1.4.1. Hidratarea cimentului Portland.....                                                           | 25        |
| I.1.4.2. Priza cimentului.....                                                                         | 26        |
| I.1.4.3. Finețea de măcinare a cimentului.....                                                         | 27        |
| I.1.4.4. Căldura de hidratare a cimentului.....                                                        | 27        |
| I.1.4.5. Rezistența mecanică.....                                                                      | 28        |
| I.1.4.6. Influența alcaliilor ( $\text{Na}_2\text{O}$ și $\text{K}_2\text{O}$ ).....                   | 28        |
| I.2. Materiale cimentoide suplimentare (Supplementary Cementing Materials - SCM).....                  | 28        |
| I.2.1. Clasificarea materialelor cimentoide suplimentare.....                                          | 28        |
| I.2.2. Cenușa zburătoare (volantă).....                                                                | 33        |
| I.2.2.1. Descriere generală.....                                                                       | 33        |
| I.2.2.2. Caracteristicile unor cenuși de termocentrală românești (conform EN 197-1 și SR 3832-10)..... | 34        |
| I.2.2.3. Caracteristicile unor cenuși zburătoare clasa F și clasa C - (prevederi ASTM C 618).....      | 37        |
| I.2.2.4. Caracteristicile unor cenuși zburătoare conform SR 405-1.....                                 | 39        |
| I.2.3. Zgura granulată de furnal măcinată.....                                                         | 42        |
| I.2.3.1. Descriere generală.....                                                                       | 42        |
| I.2.3.2. Caracteristicile zgurii granulate de furnal măcinată utilizată ca material cimentoid.....     | 43        |
| I.2.3.3. Caracteristicile zgurii granulate de furnal măcinată conform prevederilor ASTM C 989.....     | 44        |

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I.2.3.4. Caracteristicile zgurii granulate de furnal măcinată conform prevederilor SR EN 15167-1 ..... | 46 |
| I.2.4. Calcar .....                                                                                    | 48 |
| I.2.4.1. Descriere generală.....                                                                       | 48 |
| I.2.4.2. Caracteristicile fizico-chimice ale calcarului.....                                           | 49 |
| I.2.4.3. Efectele prezenței calcarului în ciment.....                                                  | 49 |

## **CAPITOLUL II - CARACTERISTICI ALE CIMENTURILOR SI BETOANELOR, FACTORI DE INFLUENTA, METODE SI PROCEDEE DE INCERCARE, NIVELURI DE PERFORMANTA.....51**

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.1. Încercări pe paste de ciment.....                                                                                   | 51 |
| II.2. Încercări pe beton în stare proaspătă. Determinări asupra proprietăților fizice.....                                | 52 |
| II.2.1. Lucrabilitatea (consistența).....                                                                                 | 53 |
| II.2.2. Grad de compactare.....                                                                                           | 55 |
| II.2.3. Densitate aparentă.....                                                                                           | 57 |
| II.2.4. Conținutul de aer.....                                                                                            | 57 |
| II.2.5. Timp de priză.....                                                                                                | 58 |
| II.3. Încercări pe beton întărit.....                                                                                     | 59 |
| II.3.1. Densitatea aparentă.....                                                                                          | 60 |
| II.3.2. Compactitatea (porozitatea).....                                                                                  | 61 |
| II.3.3. Permeabilitatea betonului (adâncimea de pătrundere a apei sub presiune).....                                      | 65 |
| II.3.4. Con tracția axială a betonului (metoda cu aparat tip Graf).....                                                   | 67 |
| II.3.5. Modulul de elasticitate la compresiune.....                                                                       | 69 |
| II.3.6. Rezistența la compresiune a betonului.....                                                                        | 72 |
| II.3.7. Rezistența la întindere a betonului (întindere directă, întindere din încovoiere și întindere din despicare)..... | 79 |
| II.3.8. Aderența dintre beton și armătură. Metoda prin smulgere.....                                                      | 82 |
| II.4. Încercări pentru aprecierea durabilității betoanelor.....                                                           | 84 |
| II.4.1. Carbonatarea betonului.....                                                                                       | 88 |
| II.4.2. Penetrarea clorurilor în beton.....                                                                               | 91 |
| II.4.3. Rezistența la îngheț-dezgeț.....                                                                                  | 93 |

|                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| II.4.4. Solicitarea mecanică a betonului prin uzură (abraziune).....                                                                                     | 96  |
| II.4.5. Atacuri chimice de deteriorare a betonului (coroziunea betonului).....                                                                           | 97  |
| II.4.5.1. Atacul acizilor.....                                                                                                                           | 97  |
| II.4.5.2. Atacul sulfatic.....                                                                                                                           | 97  |
| II.4.5.3. Reacția alcalii-agregate.....                                                                                                                  | 100 |
| II.4.5.4. Atacul biologic.....                                                                                                                           | 100 |
| II.5 Impactul caracteristicilor betonului proaspăt și întărit asupra activităților specifice realizării elementelor și structurilor din beton armat..... | 100 |

### **CAPITOLUL III - INFLUENȚA ADAOSURILOR DIN CIMENT ASUPRA PROPRIETĂȚILOR BETOANELOR.....105**

|                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| III.1. Influența adaosului de cenușă zburătoare asupra pastei de ciment și betonului .....                                  | 105 |
| III.1.1. Caracteristicile mortarelor preparate cu cimenturi compozite cu cenușă zburătoare.....                             | 106 |
| III.1.2. Efectele adaosului de cenușă zburătoare asupra proprietăților betonului proaspăt.....                              | 109 |
| III.1.3. Efectele adaosului de cenușă zburătoare asupra proprietăților betonului întărit.....                               | 114 |
| III.1.4. Efectele adaosului de cenușă zburătoare asupra durabilității betonului.....                                        | 116 |
| III.1.5. Optimizarea conținutului de cenușă zburătoare din beton în funcție de proprietatea selectată.....                  | 122 |
| III.2. Influența adaosului de zgură granulată de furnal măcinată asupra pastei de ciment și betonului .....                 | 126 |
| III.2.1. Efectele adaosului de zgură granulată de furnal măcinată asupra proprietăților betonului proaspăt.....             | 127 |
| III.2.2. Efectele adaosului de zgură granulată de furnal măcinată asupra proprietăților betonului întărit.....              | 131 |
| III.2.3. Efectele adaosului de zgură granulată de furnal măcinată asupra durabilității betonului .....                      | 136 |
| III.2.4. Optimizarea conținutului de zgură granulată de furnal măcinată din beton în funcție de proprietatea selectată..... | 139 |
| III.3. Influența adaosului de calcar asupra pastei de ciment și betonului .....                                             | 143 |
| III.3.1. Efectele adaosului de calcar asupra proprietăților betonului proaspăt.....                                         | 144 |
| III.3.2. Efectele adaosului de calcar asupra proprietăților betonului întărit.....                                          | 146 |
| III.3.3. Efectele adaosului de calcar asupra durabilității betonului .....                                                  | 151 |

|                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| III.3.4. Optimizarea conținutului de adaos de calcar din beton în funcție de proprietatea selectată..... | 158 |
| III.4. Efectele adaosurilor minerale din ciment/beton asupra proprietăților betonului proaspăt.....      | 161 |
| III.5. Efectele adaosurilor minerale din ciment/beton asupra proprietăților betonului întărit.....       | 162 |

## **CAPITOLUL IV - METODE DE PERFORMANTA PENTRU EVALUAREA DURABILITATII SI A EVOLUTIEI REZISTENTEI BETOANELOR PREPARATE CU ADAOSURI.....165**

|                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| IV.1. Aspecte generale ale durabilității betonului.....                                                      | 165 |
| IV.1.1. Durabilitatea și factorii care influențează durabilitatea betonului.....                             | 165 |
| IV.2. Metode de dozare pentru adaosuri minerale.....                                                         | 171 |
| IV.2.1. Determinarea experimentală a valorii coeficientului k.....                                           | 172 |
| IV.3. Conceptul de performanță echivalentă a betonului în normativul european CEN/TC104/SC1.....             | 175 |
| IV.3.1. Aspecte generale legate de conceptul de performanță echivalentă a betonului.....                     | 176 |
| IV.3.2. Principiile metodei.....                                                                             | 179 |
| IV.3.3. Metode de testare asociate performanței care au fost sau sunt standardizate la nivel european.....   | 180 |
| IV.3.4. Determinarea performanțelor de încercare asociate cu durabilitatea echivalentă.....                  | 181 |
| IV.4. Conceptul de performanță echivalentă a betonului în codul olandez CEN / TR 16563: 2013 (VC12 WG4)..... | 184 |
| IV.5. Conceptul de performanță echivalentă a betonului în metoda belgiana.....                               | 187 |
| IV.6. Evoluția în timp a rezistenței la compresiune a betoanelor preparate cu cimenturi compozite.....       | 189 |

## **CAPITOLUL V - CERCETARI EXPERIMENTALE PENTRU STABILIREA PARTICULARITATILOR LEGATE DE COMPORTAREA BETOANELOR CU CIMENTURI COMPOZITE.....193**

|                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| V.1. Rezistențele la compresiune ale betoanelor preparate cu același tip de ciment compozit provenit din surse diferite..... | 193 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

---

V.2. Identificarea timpului de referință pentru determinarea valorii rezistenței la compresiune a betonului conform prevederilor actuale din standardul european SR EN 1992-1-1 și a proiectului noului standard prEN 1992-1-1 pentru diferite tipuri de cimenturi.....214

V.3. Aplicarea conceptului de performanță echivalentă a betonului pentru determinarea caracteristicilor de rezistență și durabilitate a betoanelor preparate cu cimenturi tip II/A-S 42.5 R, III/A 42.5 N-LH și respectiv cu ciment tip I 42.5R și adaosuri de 10% și 37% zgură.....242

## **CAPITOLUL VI - PROPUNERI DE REVIZUIRE A PROCEDEELOR EXPERIMENTALE PENTRU STABILIREA DOMENIILOR DE UTILIZARE A CIMENTURILOR FABRICATE IN ROMANIA.....301**

VI.1. Analiza actualelor reglementări naționale privind asigurarea durabilității.....301

VI.1.1. Identificarea claselor de expunere relevante.....301

VI.1.2. Masuri necesare in vederea asigurării durabilității.....305

VI.2. Necesitatea revizuirii actualelor prevederi ale reglementarilor naționale privind asigurarea durabilității.....309

VI.2.1. Particularități ale betoanelor preparate cu cimenturi compozite.....309

VI.2.2. Sinteza asupra rezultatelor experimentale obținute.....318

VI.3. Propuneri de revizuire a reglementarilor naționale.....319

## **CAPITOLUL VII - CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE STUDIU.....325**

VII.1. Concluzii.....323

VII.2. Contribuții personale.....328

VII.3. Direcții de cercetare viitoare.....330

## **Bibliografie selectivă.....333**



---

## INTRODUCERE. TEMA ȘI OBIECTIVELE LUCRĂRII

Betonul este cel mai utilizat material de construcție din lume. Betonul a fost folosit pentru realizarea unor construcții deosebite care au devenit prin vechimea și rezistența lor în timp monumente istorice. Multe dintre structurile construcțiilor au fost supuse agresivității mediului, unele au rezistat testului timpului, altele au suferit degradări importante. Care sunt cauzele acestor comportări diferite?

Tehnologia betonului a progresat rapid, inclusiv în țara noastră, mai ales după anii 1950, datorită dezvoltării științei materialelor, în special a cercetărilor întreprinse pentru caracterizarea cimenturilor și betoanelor. Progresele înregistrate în tehnologia betonului se datorează și schimbării perspectivei cercetării - astăzi cercetătorii studiază betonul interdisciplinar, combinând științele fundamentale, matematica, chimia și știința materialelor cu ingineria civilă.

În ciuda numeroaselor cercetări și a experienței acumulate, betonul ridică multiple probleme proiectanților și executanților. Deteriorarea prematură, fisurarea neașteptată și necontrolată, aspectul necorespunzător sunt fenomene răspândite. S-au acumulat în prezent cunoștințe care pot explica în mare parte starea de degradare a unor construcții din beton, dar pentru a preveni pe viitor această situație este necesar să dezvoltăm și să aplicăm cunoștințele disponibile.

Alte probleme majore legate de realizarea structurilor din beton armat și a menținerii numeroaselor avantaje ale acestora, sunt protecția mediului, reducerea emisiilor de carbon și conservarea resurselor naturale, găsirea unor soluții legate de eliminarea deșeurilor și a produselor secundare ale industriei.

Motivele pentru care s-a recurs la utilizarea cimenturilor cu adaosuri au fost inițial economice deoarece aceste adaosuri sunt mai ieftine decât clincherul de cimentul Portland (provenind din zăcămintele naturale, subproduse sau deșeuri ale proceselor industriale), reduc costul energiei necesare producției cimentului Portland dar apoi și ecologice (legate de depozitarea/reutilizarea produselor industriale). S-a demonstrat că la producerea unei tone de ciment se degajă în atmosfera aproximativ o tonă de dioxid de carbon.

Pentru a se respecta angajamentul de sustenabilitate a sectorului construcțiilor s-au dezvoltat noi tipuri de cimenturi cu conținut mai redus de clincher, care datorită calităților lor îmbunătățite vin în întâmpinarea cerințelor tot mai complexe ale arhitecților, proiectanților, constructorilor și beneficiarilor.

Totuși, producția de ciment generează foarte multă poluare, sub forma emisiilor de dioxid de carbon. Chiar și ultimele tehnologii de protecție a mediului nu pot reduce emisiile decât cu 20%. Deja, fabricile de ciment generează 5-8% din totalul emisiilor de dioxid de carbon de pe

---

mapamond, noxe responsabile de încălzirea globală. Analizând această problemă s-a constatat că cimentul Portland în sine nu are un potențial de reciclare.

"Producerea cimentului este una dintre sursele importante de dioxid de carbon din lume, iar cererea pentru acest produs crește", a declarat Julian Allwood, profesor în inginerie la Universitatea Cambridge. Per ansamblu, emisiile de dioxid de carbon/tona de ciment se reduc, dar producția de ciment crește de cele mai multe ori, ceea ce se traduce într-un grad de poluare mai ridicat. Mulți dintre producătorii de profil sunt conștienți de aceasta problemă. "Industria cimentului se află în centrul disputei privind schimbările climatice, dar lumea are nevoie de materiale de construcții pentru spitale și case", a spus Olivier Luneau, vicepreședinte în cadrul grupului francez Lafarge-Holcim.

Lafarge-Holcim, liderul în introducerea de tehnologie verde în unitățile de producție, a reușit să reducă cantitatea de noxe la 274 de kilograme de emisii/tona de ciment în anul 2010, față de 347 kg/tona în anul 1990. Aproximativ 80% din cimentul fabricat la nivel mondial este produs și folosit de țările din Asia și Europa de Est.

Dintre acestea, numai în China se fabrică și se folosește 45% din producția globală de ciment. În Ucraina, un alt stat care a traversat un boom economic, producția s-a dublat la fiecare patru ani. În fiecare an producția mondială de beton se ridică la 6 miliarde de metri cubi.

Se pune foarte stringent problema realizării unor materiale de construcție durabile și de înaltă calitate rezultate în urma unor cercetări experimentale avansate, a unor concepții noi privind proiectarea, executarea și investigarea construcțiilor din beton armat, în vederea atingerii dezideratului major de utilizare a unor materiale reciclate în beton, astfel încât toate aceste acțiuni să aibă un impact pozitiv atât asupra mediului și sănătății, cât și asupra caracteristicilor de rezistență și durabilitate ale betonului.

## **Obiectivul lucrării**

Materialele cimentoide suplimentare (Supplementary Cementing Materials), cum ar fi cenușa zburătoare silicioasă sau calcică, zgura granulată de furnal măcinată sau filerul de calcar modifică proprietățile betonului față de cel preparat numai cu ciment Portland. Aceste adaosuri minerale pot influența proprietățile mecanice ale betonului și pot îmbunătăți durabilitatea acestuia în medii agresive.

Materialele cimentoide suplimentare din beton prin proprietățile lor chimice, fizice și mineralogice influențează reacțiile de hidratare, evoluția structurii porilor și a compoziției soluțiilor din pori determinând modificări în microstructura betonului care la rândul său, influențează performanțele structurilor de beton în anumite condiții de expunere ale mediului.

Cu toate acestea, adaosurile de fabricație din ciment nu sunt o soluție universală pentru beton, iar utilizarea necorespunzătoare poate dăuna anumitor proprietăți. Obținerea unor avantaje prin utilizarea acestor adaosuri de fabricație din ciment necesită o înțelegere a materialelor și a impactului asupra proprietăților betonului în diferite condiții de expunere.

---

Având în vedere particularitățile de comportare ale betoanelor cu cimenturi compozite, teza de doctorat și-a propus în principal să analizeze și să răspundă la o serie de probleme actuale și importante legate de durabilitate, argumentând teoretic și practic răspunsurile:

- necesitatea determinării, în anumite situații a clasei betonului la un timp de referință mai mare de 28 de zile;
- stabilirea compoziției betonului utilizând metode de testare asociate performanței;
- studiul comportării betonului la diferite tipuri de acțiuni de mediu prin adăugarea adaosului mineral în ciment sau în beton la același raport a/c echivalent.

Pe baza unor date din literatura tehnică de specialitate, a unor rezultate experimentale ale autoarei și ale colectivului Laboratorului de cercetări și încercări al Departamentului de Construcții de beton armat din U.T.C.B., pe baza unor rezultate obținute de specialiști de la Heidelberg Cement Romania S.A., în această teză se oferă informații utile specialiștilor care lucrează în domeniul construcțiilor și al fabricării betoanelor pentru optimizarea utilizării materialelor cimentoide suplimentare în vederea îmbunătățirii performanțelor betonului.

Lucrarea descrie/analizează compoziția chimică și mineralogică a cimentului Portland, caracteristicile fizico-chimice ale adaosurilor minerale și influențele prezenței acestor adaosuri asupra rezistențelor mecanice și durabilității betoanelor preparate cu cimenturi compozite. Se analizează, de asemenea, prevederile standardelor naționale și internaționale privind adăugarea adaosurilor minerale de tipul zgurilor granulate de furnal măcinate, cenușilor zburătoare silicioase sau calcice și calcarelor în ciment și beton, precum și experiența internațională în domeniu.

În lucrare se prezintă detaliat impactul adăugării de aditivi minerali în beton și referitor la rezistența și durabilitatea betonului se explică mecanismele, modelele și metodele de determinare legate de deteriorarea betonului și modul de reducere a efectelor carbonatării, a reacțiilor alcalii-agregate, a atacului cu cloruri și a coroziunii armăturii, a atacului sulfatic interior și exterior, decalcificării și acțiunii de îngheț-dezghet.

Studiul experimental, parte importantă a tezei, cuprinde teste referitoare la evoluția în timp a rezistenței la compresiune a betoanelor cu diferite cimenturi compozite propunând considerarea altor termene de determinare a clasei betonului și a celorlalte proprietăți ale betonului. Pe baza rezultatelor experimentale obținute s-a făcut o comparație între criteriile prescriptive naționale și criteriile prevăzute de metodele de testare asociate performanței betonului date în normele europene.

Rezultatele cercetărilor experimentale efectuate demonstrează capacitatea cimenturilor compozite pentru utilizare economică și ecologică în elemente structurale de beton armat, în anumite clase de expunere, respectând anumite limitări și exigente.

Lucrarea oferă o înțelegere mai profundă asupra condițiilor de utilizare a adaosurilor din ciment, oferă soluții concrete și crează condițiile necesare înțelegerii de către specialiștii din construcții a necesității utilizării acestor materiale în scopul creșterii sustenabilității industriei cimentului și construcțiilor.

Obiectivele principale ale tezei sunt constituite din evidențierea tendințelor actuale europene în ceea ce privește proiectarea durabilității betonului armat preparat cu adaosuri în cimenturi sau betoane, analiza critică a situației actuale, inclusiv pe plan internațional și utilizarea cercetării experimentale în scopul demonstrării superiorității abordării de performanță față de cea prescriptivă și asigurării aceleiași durate de viață a structurilor din beton armat indiferent de materialele utilizate la prepararea betonului.



#### Materiale cimentoide suplimentare

- Cenușă zburătoare
- Zgură
- Praf de silice
- Puzzolane naturale



#### Aditivi chimici

- Antrenori de aer
- Reducători de apă
- Modificatori de priză și întărire
- Inhibitori de coroziune
- Reducători de contracție

---

## Structura tezei

Teza de doctorat se încadrează în domeniul științific Inginerie Civilă și este structurată în șapte capitole, succesiunea acestora fiind stabilită pentru atingerea scopului principal al lucrării, astfel:

În „**INTRODUCERE**” se prezintă importanța lucrării, obiectivele prevăzute, motivele pentru care s-a recurs la utilizarea cimenturilor cu adaosuri minerale, fiind acceptat faptul că este dificil să se proiecteze compozitii de beton performante realizate numai din ciment, agregate și apa, capabile să satisfacă exigențele tehnico-economice, de rezistență și durabilitate ale betoanelor. Acestea sunt motive intemeiate pentru care folosirea diferitelor adaosuri a devenit o practică curentă.

În ultimii ani s-au efectuat cercetări ample pe plan mondial pentru clarificarea aspectelor practice referitoare la efectele adaosurilor minerale conținute în ciment sau introduse în beton și la influența acestora asupra comportării în timp a structurilor de beton supuse la diferite acțiuni mecanice și de mediu.

**Capitolul 1 „CIMENTUL”** prezintă un scurt istoric al apariției și utilizării betonului ca material de construcții, descrierea compoziției chimice (oxidice) și mineralogice a clincherului de ciment Portland și o clasificare a materialelor cementoide suplimentare conținând caracteristicile cenușilor zburătoare, zgurilor granulate de furnal măcinate și calcarelor utilizate în industria construcțiilor.

**Capitolul 2 „CARACTERISTICI ALE CIMENTURILOR SI BETOANELOR, FACTORI DE INFLUENTA, METODE SI PROCEDEE DE INCERCARE, NIVELURI DE PERFORMANTA”** cuprinde o clasificare a principalelor încercări și procedee de laborator utilizate în prezent la testarea proprietăților mecanice și de durabilitate ale cimenturilor și betoanelor, factorii care influențează aceste proprietăți și nivelurile de performanță atinse. În acest capitol în final este prezentată o sinteză a principalelor caracteristici ale betonului proaspăt și întărit și impactul pe care îl au acestea asupra activităților esențiale în domeniul construcțiilor din beton armat, proiectare/producere beton/execuție/cercetare.

Amploarea problematicii, numărul foarte mare de parametrii care intervin în evaluarea proprietăților acestui conglomerat artificial, ca și complexitatea deosebită a modelării răspunsului vis-a-vis de durabilitatea betonului cu cimenturi compozite, fac dificilă pentru moment stabilirea unor metode experimentale și teoretice unanim acceptate care să reflecte cât mai fidel răspunsul structural real și în același timp să fie suficient de simple pentru aplicarea în practică.

În **Capitolul 3 „INFLUENTA ADAOSURILOR DIN CIMENT SI BETON ASUPRA PROPRIETATILOR BETOANELOR”** este studiat efectul materialelor cementoide suplimentare de tipul cenușilor zburătoare, zgurilor granulate de furnal măcinate și calcarelor asupra proprietăților betonului proaspăt sau întărit și optimizarea conținutului de adaos mineral din masa cimentului pentru a îmbunătăți comportarea betonului în funcție de proprietatea selectată.

---

În final a fost propusă o clasificare a influențelor adaosurilor minerale din cimenturile compozite/beton asupra proprietăților betonului proaspăt și întărit evidențiind particularitățile și eficiența adaosurilor minerale în funcție de efectele acestora și respectiv de procentele utilizate.

**În Capitolul 4 „METODE DE PERFORMANȚA PENTRU EVALUAREA DURABILITĂȚII ȘI A EVOLUTIEI REZISTENȚEI BETOANELOR PREPARATE CU ADAOSURI”** sunt detaliate procedurile pentru evaluarea durabilității echivalente care sunt proceduri bazate pe încercări, prin care se compară, pentru o anumită clasă de expunere, performanțele unui beton candidat cu cele ale unui beton de referință.

În prezent se pot aplica două tipuri de specificații pentru beton: prescriptive și bazate pe performanță. Specificațiile prescriptive au în vedere procedeele prin care, din experiență, se pot atinge anumite performanțe ale betonului, precizându-se tipurile și proporțiile materialelor, regulile de amestecare, transport, turnarea și tratarea ulterioară în funcție de o anumită clasă de expunere. Specificațiile de performanță nu precizează modul în care ar trebui să fie produs betonul ci se bazează pe verificarea atingerii performanței dorite aplicând diverse metode.

În cadrul conceptului de performanță echivalentă a betonului, betonul este definit în termeni măsurabili ai proprietăților betonului proaspăt și întărit și de durabilitate și întrucât nu există restricții privind materialele și proporțiile, pot fi utilizate soluții inovatoare pentru a atinge cerințele de performanță. În prezent, cele mai multe specificații pentru beton sunt predominant prescriptive, cu unele cerințe de performanță. Reglementările viitorului pentru prepararea betonului se vor baza cu siguranță pe metodele de performanță, și în orice caz vor sta la baza elaborării viitoarelor prevederi mai simple de aplicat de tip prescriptiv.

**Capitolul 5 „CERCETARI EXPERIMENTALE PENTRU STABILIREA PARTICULARITĂȚILOR LEGATE DE COMPORTAREA BETOANELOR CU CIMENTURI COMPOZITE”** arată necesitatea testării materialelor și a betonului armat, în special în cazul utilizării unor cimenturi noi cu adaosuri și/sau în cazul unor compoziții speciale. Betonul trebuie să fie supus unor încercări experimentale reglementate și/sau larg recunoscute, de dorit accelerate care să reflecte însă comportarea pe termen lung înainte de a le permite utilizarea în structuri.

Programul de cercetare dezvoltat în cadrul tezei a constatat în determinarea performanțelor betonului preparat cu adaosuri minerale și respectiv a betoanelor preparate cu cimenturi cu adaosuri, pentru a putea evalua influența adaosurilor și a cimenturilor cu adaosuri asupra caracteristicilor de rezistență și de durabilitate ale betoanelor.

În cadrul tezei s-au conceput trei programe de cercetare, primul program constând în determinarea influenței surselor din care provin două tipuri de cimenturi compozite (CEM II/A-S 42.5 și CEM III/A 42.5N-LH) asupra unor caracteristici ale betonului proaspăt și întărit, în special asupra clasei betonului și a evoluției rezistenței la compresiune în funcție de care se stabilește și durata de tratare.

Cel de-al doilea program de cercetare a constatat în analiza rezistenței la compresiune pentru betoane cu vârste mai mari de 28 de zile. S-au comparat valorile experimentale cu valorile calculate ale rezistenței la compresiune pentru patru tipuri de betoane cu cimenturi compozite cu

---

zgură, în conformitate cu standardul SR EN 1992-1-1 [33] și a proiectului de revizuire, prSR EN 1992-1-1 [66].

În cadrul celui de-al treilea program, s-au proiectat două compoziții de betoane (de referință) utilizând două tipuri de cimenturi compozite (CEM II/A-S 42.5R și CEM III/A 42.5N-LH) și două amestecuri de betoane (candidat) cu procente similare de adaos mineral și s-au evidențiat diferențele dintre rezultatele obținute între aceste două tipuri de betoane, de referință și candidat, pentru anumite caracteristici de durabilitate, prin aplicarea metodelor prescriptive și de performanță.

**Capitolul 6 „PROPUNERI DE REVIZUIRE A PROCEDEELOR EXPERIMENTALE PENTRU STABILIREA DOMENIILOR DE UTILIZARE A CIMENTURILOR FABRICATE ÎN ROMANIA”** tratează problema generală a durabilității betoanelor preparate cu materiale cimentoide suplimentare care este influențată în principal de: tipul și procentele adaosului, de raportul a/c, dozajul de ciment, durata și eficiența tratării, grosimea și calitatea stratului de acoperire cu beton.

Neasigurarea durabilității betonului în special în condiții de expunere mai severe, este încă o problemă la nivel mondial, chiar dacă există un număr însemnat de rezultate ale cercetărilor experimentale, numeroase informații despre structuri deteriorate prematur în special datorită coroziunii armăturii provocate de carbonatarea betonului și/sau penetrării clorurilor în beton.

Cerințele privind durabilitatea, așa cum sunt prevăzute în mod obișnuit în reglementări (conținutul minim de ciment, raportul maxim apă/ciment, clasa de rezistență minimă), se dovedesc uneori insuficiente și nu se corelează întotdeauna bine cu performanța reală de durabilitate a structurilor în cazul utilizării unor noi compoziții/tipuri de ciment. Noile concepte de performanță echivalentă a betonului oferă o soluție reală care ia în considerare performanța de durabilitate a betonului ce va fi utilizat în structură.

**Capitolul 7 „CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE”** prezintă concluziile generale rezultate în urma studiului literaturii de specialitate, precum și a celor rezultate în urma cercetărilor experimentale efectuate în cadrul tezei. Totodată, acest capitol cuprinde și enumerarea principalelor contribuții personale aduse în domeniul studiat, recomandări privind cercetări viitoare, precum și valorificarea rezultatelor obținute prin articole ale autoarei, publicate în reviste de specialitate.



---

## CAPITOLUL I.

### CIMENTUL

#### I.1. Ciment Portland

##### I.1.1. Istoria cimentului Portland și a betonului

Civilizațiile lumii antice au avut un aport important în evoluția științei și în acea perioadă în orașele Greciei Antice respectiv ale Imperiul Roman au apărut științele fundamentale și ingineresti importante cum ar fi: Matematica, (Geometria), Topografia (Topometria), Mecanica, Hidraulica, și Ingineria civilă. Cele mai folosite materiale de construcție erau: lemnul, zidăria de piatră, zidăria ceramică și mortarul dar și betonul (simplu). Romanii cunoșteau probabil tehnologia costisitoare a calcinării calcarului la temperaturi foarte ridicate pentru obținerea clincherului care se macină, însă de preferință foloseau cenușa vulcanică, foarte rară în natură însă existentă în zona vulcanică a localității Pouzzolli de lângă Vezuviu și care în combinație cu apa și varul obțineau produșii de hidratare asemănători celor rezultați din amestecarea cimentului Portland cu apa. Odată cu decăderea Imperiului Roman, secretul rețetei betonului roman a fost pierdut, cupola Panteonului rămânând dovada perfectă a utilizării betonului în construcțiile romane.

Când zidarul Joseph Aspdin ardea calcar pulbere și argilă în soba de bucătărie la domiciliul său din Leeds, Anglia, în anii 1820, nu putea cunoaște impactul pe care experimentul îl va avea asupra lumii. Era puțin probabil să știe că se află în centrul construirii fundației pentru o industrie masivă care produce acum un miliard de tone de ciment pe an în toată lumea. Cimentul Portland a evoluat și include multe alte substanțe minerale și chimice care îi sporesc performanța și eficiența fabricării. Cu toate acestea, această evoluție nu a eliminat utilizarea celor doi constituenți principali ai lui Aspdin: calcar și argilă. Din acea perioadă și până în prezent numeroși cercetători din domeniul construcțiilor și chimiei din toată lumea au încercat să elaboreze o tehnologie de fabricație performantă a cimentului, culminând, în final, cu crearea celui mai folosit material de construcție din lume: betonul.

Betonul armat a fost realizat pentru prima dată de grădinarul francez Joseph Monier care a confecționat un ghiveci de flori mai rezistent și a încercat printre altele și turnarea betonului într-o formă în care se găsea o carcasă din sârmă. Folosirea betonului armat ca material structural se dezvoltă rapid în ultimele două decenii ale secolului al XIX-lea și începutul secolului XX. Primele prescripții au apărut în Elveția în anul 1903-Norme provizorii pentru calculul betonului armat. În 1911 apar norme similare în Germania, în 1904-Prima circulară prusacă, în Franța în 1906-Circulara franceză, în Marea Britanie în anul 1911-Circulara engleză, în Statele Unite ale Americii și Rusia în 1908- Condiții tehnice pentru construcțiile de beton armat. În aceeași perioadă se pun bazele calculului cu rezistențe admisibile, care se utilizează până în anii 1950.

---

Din anii 1930 betonul armat devine materialul preferat pentru structuri. Pentru construcții cu deschideri mari și aspect deosebit se utilizează plăci curbe subțiri din beton armat. În anul 1928 inginerul francez Emile Freyssinet realizează primele elemente din beton precomprimat cu principalul sau avantaj de a se putea folosi pentru deschideri mai mari decât cele pentru betonul armat.

În anii 1940, cercetătorii sovietici elaborează metoda de calcul la rupere. În ultimii cincizeci de ani, s-au înregistrat progrese semnificative în tehnologia betonului, în principal datorită manifestării interesului pentru folosirea materiale cimentoide suplimentare, precum și datorită apariției aditivilor chimici pentru beton. Odată cu alegerea materialelor disponibile astăzi, este posibilă proiectarea de betoane adaptate pentru orice tip de construcție sau executate în condiții deosebite.

În anii 1950 apare necesitatea studiului comportării structurilor din beton armat la acțiuni seismice. Profesorul Thomas Paulay din Noua Zeelanda elaborează în anii 1980 metoda proiectării capacității de rezistență.

În ziua de azi construcțiile de beton armat au ajuns la performanțe tehnice foarte înalte, fiind utilizate și în mediile foarte agresive pentru platformele de foraj marin sau pentru anvelopele de reactoare nucleare. În prezent betonul a devenit materialul de construcție fără de care nu ne mai putem imagina lumea. Totuși există o mare problemă a producerii acestui material minunat: poluarea, emisiile de dioxid de carbon din atmosferă, aproape o tonă pentru fiecare tonă de ciment, care contribuie la încălzirea globală. Producția de ciment are drept rezultat aproximativ 5% din totalul emisiilor de carbon produse de omul modern. Ecologiștii propun soluția clădirilor "verzi" în care să se reducă factorul clinker și să se înlăture aceste neajunsuri iar specialiștii în domeniu din toate colțurile lumii fac studii promițătoare, uneori cu riscul unor probleme colaterale care nu pot fi mereu prevăzute. În plus există și reticența beneficiarului, deoarece în istoria cimentului Portland există construcții care durează de aproape două secole în schimb noile materiale cimentoide cer timp pentru a-și dovedi credibilitatea. Și în România, industria cimentului este mai veche de 100 de ani, prima fabrică de ciment a intrat în funcțiune în 1890 în Brăila. Ulterior au fost construite mai multe fabrici de ciment și la sfârșitul anului 1989 numărul lor era de 10 fabrici.

În prezent, în România există următoarele unități de producție a cimentului:

- S.C CRH CIMENT (ROMANIA) S.A (CRH – Irlanda) deține 2 fabrici de ciment la Medgidia și Hoghiz și o stație de măcinare la Tg-Jiu
- S.C. Heidelberg Cement Romania S.A (Heidelberg Cement Group Germania), deține 3 fabricile de ciment la Bicăz, Deva și Fieni
- S.C Holcim (Romania) S.A (membru al grupului Lafarge Holcim), deține 2 fabrici de ciment la Aleșd și Câmpulung Muscel și o stație de măcinare la Turda
- S.C Ceminter International S.A (Ceminter Hispania) – deține o instalație de descărcare și o instalație de omogenizare ciment în portul Constanța
- S.C Cemrom S.A – deține o stație de măcinare la Corbu, în județul Constanța.

---

Progresele semnificative în tehnologia betonului în lume, alături de multitudinea avantajelor acestui conglomerat artificial performant care oferă: economie, rezistență, eficiență, funcționalitate, modernitate, simplitate, eleganță, performanță, estetică, durabilitate, sustenabilitate, versatilitate asigură că betonul va fi un material preferat pentru multe decenii și secole în viitor.

### **I.1.2. Compoziția chimică (oxidică) și mineralogică a clincherului de ciment Portland**

Cimentul este un material pulverulent, de natură bazică, hidrofil, instabil din punct de vedere chimic. Amestecat cu apa formează paste tixotrope, care fac priză și se întăresc în timp atât în aer, cât și sub apă, formând “piatra de ciment”.

Cimentul Portland (silicios), reprezintă un amestec de silicați și aluminați de calciu și este obținut prin măcinarea fină a clincherului de ciment Portland cu un adaos de 2...7 % ghips pentru reglarea timpului de priză.

Clincherul de ciment Portland este obținut prin arderea unui amestec de materii prime în cuptoare speciale, de cele mai multe ori rotative, la o temperatură de 1400-1500°C.

Materiile prime utilizate la fabricarea clincherului de ciment Portland sunt: calcare, marne, argile, loessuri, subproduse industriale (zguri, cenuși, șisturi), adaosuri de corecție (silicioase, aluminoase, feruginoase etc.), ghipsuri.

Compoziția mineralogică a clincherului de ciment Portland poate să varieze, în funcție de compoziția chimică a materiilor prime utilizate și a tehnologiilor de fabricație.

Prescripția europeană SR EN 197/1,2 [8], [87] impune pentru clincherul Portland următoarele cerințe:

- minimum 2/3 din masa totală să fie constituită de silicați (alit + belit) – cimenturi silicaticice;
- relația procentuală dintre oxidul de calciu  $\text{CaO}$  și dioxidul de siliciu  $\text{SiO}_2$  din compoziție să fie mai mare decât 2;
- conținutul procentual în masa de oxid de magneziu să fie mai mic de 5%;
- conținutul de filer de 5%;
- limitează reziduu insolubil la 5% în raport cu masa cimentului, exclusiv filerul.

Reziduu insolubil este determinat prin tratarea cu acid clorhidric care reprezintă un indiciu asupra degradării calității cimentului, datorită în mare măsură impurităților din ghips.

Tipuri de ciment fabricate conform cu prevederile SR EN 197/1,2 sunt prezentate în tabelul I.1.

Tabelul I.1. - Tipuri de cimenturi uzuale conform SR EN 197/1 [8], [72]

| Tipuri principale | Tipuri de cimenturi uzuale           |            | Compoziție (procente de masă) |                     |                      |                        |                         |                   |             |                   |               |                              |
|-------------------|--------------------------------------|------------|-------------------------------|---------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|-------------------|-------------|-------------------|---------------|------------------------------|
|                   |                                      |            | Componente principale         |                     |                      |                        |                         |                   |             |                   |               | Compo-nente auxiliare minore |
|                   |                                      |            | Clin-cher (K)                 | Zgură de furnal (S) | Silice ultrafină (D) | Puzzolană naturală (P) | Puzzolană calcinată (Q) | Cenușă zburătoare |             | Șist calcinat (T) | Calcar (L/LL) |                              |
|                   |                                      |            |                               |                     |                      |                        |                         | Silicioasă (V)    | Calcică (W) |                   |               |                              |
| CEM I             | Ciment portland                      | CEM I      | 95-100                        | -                   | -                    | -                      | -                       | -                 | -           | -                 | -             | 0-5                          |
| CEM II            | Ciment portland cu zgură             | CEM II/A-S | 80-94                         | 6-20                | -                    | -                      | -                       | -                 | -           | -                 | -             | 0-5                          |
|                   |                                      | CEM II/B-S | 65-79                         | 21-35               | -                    | -                      | -                       | -                 | -           | -                 | -             | 0-5                          |
|                   | Ciment portland cu silice ultrafină  | CEM II/A-D | 90-94                         | -                   | 6-10                 | -                      | -                       | -                 | -           | -                 | -             | 0-5                          |
|                   | Ciment portland cu puzzolană         | CEM II/A-P | 80-94                         | -                   | -                    | 6-20                   | -                       | -                 | -           | -                 | -             | 0-5                          |
|                   |                                      | CEM II/B-P | 65-79                         | -                   | -                    | 21-35                  | -                       | -                 | -           | -                 | -             | 0-5                          |
|                   |                                      | CEM II/A-Q | 80-94                         | -                   | -                    | -                      | 6-20                    | -                 | -           | -                 | -             | 0-5                          |
|                   |                                      | CEM II/B-Q | 65-79                         | -                   | -                    | -                      | 21-35                   | -                 | -           | -                 | -             | 0-5                          |
|                   | Ciment portland cu cenușă zburătoare | CEM II/A-V | 80-94                         | -                   | -                    | -                      | -                       | 6-20              | -           | -                 | -             | 0-5                          |
|                   |                                      | CEM II/B-V | 65-79                         | -                   | -                    | -                      | -                       | 21-35             | -           | -                 | -             | 0-5                          |
|                   |                                      | CEM II/A-W | 80-94                         | -                   | -                    | -                      | -                       | -                 | 6-20        | -                 | -             | 0-5                          |
|                   |                                      | CEM II/B-W | 65-79                         | -                   | -                    | -                      | -                       | -                 | 21-35       | -                 | -             | 0-5                          |
|                   | Ciment portland cu șist calcinat     | CEM II/A-T | 80-94                         | -                   | -                    | -                      | -                       | -                 | -           | 6-20              | -             | 0-5                          |
|                   |                                      | CEM II/B-T | 65-79                         | -                   | -                    | -                      | -                       | -                 | -           | 21-35             | -             | 0-5                          |
|                   | Ciment portland cu calcar            | CEM II/A-L | 80-94                         | -                   | -                    | -                      | -                       | -                 | -           | -                 | 6-20          | 0-5                          |
|                   |                                      | CEM II/B-L | 65-79                         | -                   | -                    | -                      | -                       | -                 | -           | -                 | 21-35         | 0-5                          |
|                   | Ciment portland compozit             | CEM II/A-M | 80-94                         | ← 6-20 →            |                      |                        |                         |                   |             |                   | -             | 0-5                          |
|                   |                                      | CEM II/B-M | 65-79                         | ← 21-35 →           |                      |                        |                         |                   |             |                   | -             | 0-5                          |
| CEM III           | Ciment de furnal                     | CEM III/A  | 35-64                         | 36-65               | -                    | -                      | -                       | -                 | -           | -                 | -             | 0-5                          |
|                   |                                      | CEM III/B  | 20-34                         | 66-80               | -                    | -                      | -                       | -                 | -           | -                 | -             | 0-5                          |
|                   |                                      | CEM III/C  | 5-19                          | 81-95               | -                    | -                      | -                       | -                 | -           | -                 | -             | 0-5                          |
| CEM IV            | Ciment puzzolanic                    | CEM IV/A   | 65-89                         | -                   | ← 11-35 →            |                        |                         |                   |             | -                 | -             | 0-5                          |
|                   |                                      | CEM IV/B   | 45-64                         | -                   | ← 36-55 →            |                        |                         |                   |             | -                 | -             | 0-5                          |
| CEM V             | Ciment compozit                      | CEM V/A    | 40-64                         | 18-30               | -                    | ← 18-30 →              |                         |                   | -           | -                 | -             | 0-5                          |
|                   |                                      | CEM V/B    | 20-38                         | 31-50               | -                    | ← 31-50 →              |                         |                   | -           | -                 | -             | 0-5                          |

---

Din tabelul I.1. și în scopul înțelegerii comportamentului diferit al cimentului, putem distinge cinci categorii diferite de ciment, conform tipurilor și procentelor de adaos de fabricație pe care cimentul le conține. La toate tipurile de ciment cifra romană indică tipul de ciment. Pentru fiecare tip de ciment cu adaosuri există litere de identificare a procentelor de clincher/adaosuri și a tipurilor de adaosuri.

i) Cimenturile descrise ca CEM II care reprezintă un ciment cu un singur constituent secundar majoritar (excepția fiind cimentul compozit din Portland) au o literă de identificare imediat după notația CEM pentru a indica nivelul cimentului Portland conținut în ciment:

Materiale cementoide

A = nivel ridicat (conținut clincher 80-94%) - CEM II/A

B = nivel mediu (conținut clincher 65-79%) - CEM II/B

ii) cimenturile CEM III sunt cimenturi care conțin un nivel mai ridicat de zgură granulată de furnal măcinată decât este permisă într-un ciment de tip CEM II, pentru a indica conținutul cimentului Portland se utilizează o literă de identificare:

A = conținut clincher 35-64% - CEM III/A

B = conținut clincher 20-34% - CEM III/B

C = conținut clincher 5-19% - CEM III/C

iii) cimenturile CEM IV conțin un nivel mai ridicat de material puzzolanic decât este permis într-un ciment de tip CEM II, pentru a indica conținutul cimentului Portland se utilizează o literă de identificare:

A = conținut clincher 65-89% - CEM IV/A

B = conținut clincher 45-64% - CEM IV/B

iv) Cimenturile CEM V sunt cimenturi compozite, dar conțin un nivel mai ridicat al constituenților secundari decât cimenturile CEM II (este permis și mai mult de un constituent secundar major). Gama de conținut de clincher din ciment Portland este indicată și prin utilizarea unei litere de referință:

A = conținut 40-64% clincher - CEM V/A

B = conținut 20-39% clincher - CEM V/B

Materiile prime utilizate la fabricarea cimentului conțin, în principal CaO notat C, SiO<sub>2</sub> notat S, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> notat A, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> notat F. Limitele normale sunt prezentate în Tabelul I.2.

Tabelul I.2. - Limitele normale ale compoziției oxidice a cimentului Portland

| Oxidul                         | Conținutul % |
|--------------------------------|--------------|
| CaO                            | 66-67        |
| SiO <sub>2</sub>               | 17-25        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3-8          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.5-6        |
| MgO                            | 0.5-4        |
| Alcalii (Na <sub>2</sub> O)    | 0.3-1.2      |
| SO <sub>3</sub>                | 2-3.5        |

Acești compuși interacționează la temperatura de calcinare formând o serie de compuși mai complecși. Constituenții mineralogici principali ai cimentului Portland sunt:

- 3CaOSiO<sub>2</sub> notat C<sub>3</sub>S – alit (silicatul tricalcic);
- 2CaOSiO<sub>2</sub> notat C<sub>2</sub>S – belit (silicatul bicalcic);
- 3CaOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> notat C<sub>3</sub>A – celit (aluminatul tricalcic);
- 4CaOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> notat C<sub>4</sub>AF – brownmillerit (feroaluminatul tetracalcic).

În cazul clincherului de ciment Portland, compușii mineralogici se pot regăsi, de regulă, în limitele următoarelor procente:

- C<sub>3</sub>S 40...73%;
- C<sub>2</sub>S 2...35%;
- C<sub>3</sub>A 1...18%;
- C<sub>4</sub>AF 2...20%.
  - C<sub>3</sub>S este constituentul conținut în general în cea mai mare proporție și se prezintă sub formă de granule incolore, echidimensionale.
  - C<sub>2</sub>S sunt granule rotunjite, îngemănate.
  - C<sub>3</sub>A sunt granule rectangulare, de culoare închisă, corespunzătoare clincherelor cu conținut ridicat de fier
  - C<sub>4</sub>AF reprezintă o soluție solidă (existentă în clincherele mai puțin bogate în oxizi de fier, în care predomină soluțiile solide cu un caracter aluminatic mai pronunțat, având un conținut de alumină sporit) [77].

Produsul de hidratare al cimentului are o solubilitate foarte redusă în apă și sunt geluri și cristale inclusiv Ca(OH)<sub>2</sub> numit și portlandit.

Tipuri de ciment fabricate conform cu prevederile ASTM C150 [121] sunt:

Tip I - Normal

Tip II - Rezistență moderată la sulfați (sau căldură de hidratare moderată și rezistență moderată la sulfați)

Tip III - Rezistență inițială mare

Tip IV - Căldură de hidratare redusă

Tip V - Rezistență ridicată la sulfați

ASTM a desemnat cinci tipuri de ciment Portland, tipurile I-V. Din punct de vedere fizic și chimic, aceste tipuri de ciment diferă în principal prin conținutul lor de  $C_3A$  și prin finețea lor de măcinare. Din punct de vedere al performanței, ele diferă în principal în ceea ce privește viteza de hidratare timpurie și capacitatea lor de a rezista atacului sulfatic.

Tabelul I.3. - Caracteristicile generale ale tipurilor de ciment conform ASTM C150 [121]

|            | Clasificare                                 | Caracteristici                                                                | Domenii de utilizare                                                                                                                        |
|------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tip I      | Scop general                                | Conținut destul de ridicat de $C_3S$ pentru o dezvoltare rapidă a rezistenței | Construcții (majoritatea clădirilor, podurilor, autostrăzilor, prefabricatelor etc.)                                                        |
| Tip II     | Rezistență moderată la sulfați              | Conținut scăzut de $C_3A$ (<8%)                                               | Structuri expuse la sol sau apă care conține ioni de sulfați                                                                                |
| Tip III    | Rezistență inițială mare                    | Zgură mai fină, poate avea puțin mai mult $C_3S$                              | Construcție rapidă, betonare pe vreme rece                                                                                                  |
| Tip IV     | Căldură de hidratare redusă (reacție lentă) | Conținut scăzut de $C_3S$ (<50%) și $C_3A$                                    | Structuri masive, cum ar fi barajele                                                                                                        |
| Tip V      | Rezistență ridicată la sulfați              | Conținut foarte scăzut de $C_3A$ (<5%)                                        | Structurile expuse la niveluri ridicate de ioni de sulfați                                                                                  |
| Ciment alb | Culoare alba                                | Nu există $C_4AF$ , cu conținut scăzut de $MgO$                               | Decorative (cu proprietăți similare tipului I). Lipsa fierului îmbunătățește rezoluția măsurătorilor de rezonanță magnetică nucleară (RMN). |

Toate cele cinci tipuri de ciment conțin aproximativ 75% din greutate minerale de silicat de calciu, iar proprietățile betoanelor mature realizate cu toate cele cinci sunt similare.

Principalele proprietăți ale cimentului, legate de influența componenților mineralogici sunt: viteza de hidratare, căldura de hidratare, rezistențele mecanice și evoluția lor, rezistența la agresivități chimice, cantitatea de apă legată chimic, stabilitatea dimensională (constanța de volum) și stabilitatea chimică (decisivă pentru rezistența la coroziune a betonului) etc.

Variația compoziției mineralogice a clincherului de ciment Portland, permite obținerea unei game foarte largi de cimenturi cu proprietăți diferite conferite betonului, atât în stare proaspătă, cât și în stare întărită.

Tabelul I.4. – Condiții mecanice și fizice definite ca valori caracteristice conform standardului european EN 197-1 [8].

| Clasa de rezistență                                              | Rezistența la compresiune<br>MPa |        |                     |        | Timp inițial<br>de priză<br><br>min | Stabilitate<br>(expansiune)<br><br>mm |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------------|--------|---------------------|--------|-------------------------------------|---------------------------------------|
|                                                                  | Rezistența inițială              |        | Rezistența standard |        |                                     |                                       |
|                                                                  | 2 zile                           | 7 zile | 28 zile             |        |                                     |                                       |
| 32,5 L <sup>a</sup>                                              | -                                | ≥ 12,0 | ≥ 32,5              | ≤52,5  | ≥ 75                                | ≤ 10                                  |
| 32,5 N                                                           | -                                | ≥ 16,0 |                     |        |                                     |                                       |
| 32,5 R                                                           | ≥ 10,0                           | -      |                     |        |                                     |                                       |
| 42,5 L <sup>a</sup>                                              | -                                | ≥ 16,0 | ≥ 42,5              | ≤ 62,5 | ≥ 60                                |                                       |
| 42,5 N                                                           | ≥ 10,0                           | -      |                     |        |                                     |                                       |
| 42,5 R                                                           | ≥ 20,0                           | -      |                     |        |                                     |                                       |
| 52,5 L <sup>a</sup>                                              | ≥ 10,0                           | -      | ≥ 52,5              | -      | ≥ 45                                |                                       |
| 52,5 N                                                           | ≥ 20,0                           | -      |                     |        |                                     |                                       |
| 52,5 R                                                           | ≥ 30,0                           | -      |                     |        |                                     |                                       |
| a Clasă de rezistență definită numai pentru cimenturile CEM III. |                                  |        |                     |        |                                     |                                       |

Pentru cimenturi, cu excepția cimentului CEM III, sunt definite următoarele clase de rezistență: 32,5, 42,5, 52,5 (N sau R), unde cifrele (32,5, 42,5 și 52,5) reprezintă clasa de rezistență la compresiune exprimată în N/mm<sup>2</sup>, iar literele, N este simbolul pentru rezistență inițială normală și R este simbolul pentru rezistență inițială mare. (Tabelul I.3)

Pentru fiecare clasă de rezistență standard sunt definite trei clase de rezistență inițială, o clasă cu rezistență inițială uzuală, notată cu N și o clasă cu rezistență inițială mare, notată cu R (a se vedea Tabelul 3). Clasa L este aplicabilă numai pentru cimenturile CEM III. Acestea sunt cimenturi de furnal cu rezistență inițială mică. Aceste cimenturi sunt caracterizate printr-o finețe la măcinare normală (min. 2500 cm<sup>2</sup>/g), constanță bună de volum și o priză normală. Cimenturile Portland cu întărire rapidă au finețea de măcinare mai mare (suprafața specifică Blaine de 4500...6000cm<sup>2</sup>/g) decât cimentul Portland normal (suprafața specifică Blaine de 3000...4000cm<sup>2</sup>/g).

Ponderea componentelor mineralogici, împarte cimenturile după denumirea și proprietățile lor astfel:

- Cimenturi alitice – au degajare mare de căldură, priză normală și întărire rapidă fiind recomandate pentru obținerea de rezistențe inițiale mari, betonări pe timp friguros, elemente prefabricate, fără exploatare în medii cu agresivitate chimică;
- Cimenturi belitice – au degajare mică de căldură, priză normală și viteză mică de întărire indicate pentru construcții masive, execuție în medii cu temperaturi mai ridicate sau cu agresivitate chimică (coroziune tip I);
- Cimenturi aluminoase - au priză rapidă, viteză de hidratare mare, degajare mare de căldură, rezistențe inițiale mari care se plafonează în timp, folosite la betoane turnate și torcretate care cer întărire rapidă, cu rezistențe inițiale foarte mari, betonare pe timp friguros, elemente prefabricate sau rezistențe la atacul sulfaților și acizilor slabi;
- Cimenturi brownmilleritice – au priză normală, întărire normală, utilizate pentru elemente expuse la îngheț – dezgheț repetat sau cu agresivitate chimică sulfatică;
- Cimenturi feritice (cele de tip feroportand) - au priză normală, întărire normală și sunt indicate pentru elemente exploatate în medii cu agresivitate chimică sulfatică ridicată;
- Cimenturi normale - priză normală, întărire normală recomandate pentru lucrări curente de beton și beton armat în medii fără agresivitate chimică.

Procentele - orientative pentru un ciment Portland utilizat la construcțiile din beton armat (care nu se găsesc în medii agresive chimic) sunt:  $C_3S=50\%$ ,  $C_2S=24\%$ ,  $C_3A=8\%$ ,  $C_4AF=14\%$ .

Tabelul I.5. - Componenții mineralogici ai cimentului Portland și cimenturilor speciale [88]

| Componenții mineralogici ai clincherului ( % ) | Cimentul Portland | Cimentul alitic | Cimentul belitic | Cimentul brownmilleritic |
|------------------------------------------------|-------------------|-----------------|------------------|--------------------------|
| Alit, $C_3S$                                   | 30-60             | 50-80           | 50-25            | 20-30                    |
| Belit, $C_2S$                                  | 15-37             | 25-5            | 25-50            | 30-40                    |
| Celit (celit II), $C_3A$                       | 7-15              | 15-5            | 15-5             | 0-1                      |
| Brownmillerit (celit I), $C_4AF$               | 8-10              | 10-5            | 10-5             | 20-25                    |

Tabelul I.6. - Efectele componenților mineralogici principali asupra caracteristicilor cimentului Portland [38]

| Caracteristica cimentului    | Component mineralogic principal |              |               |         |
|------------------------------|---------------------------------|--------------|---------------|---------|
|                              | $C_3S$                          | $C_2S$       | $C_3A$        | $C_4AF$ |
| Rezistența mecanică          | Foarte mare                     | Inițial mică | Mică          | Medie   |
| Contractia                   | Mică                            | Medie        | Mare          | Medie   |
| Rezistența la îngheț-dezgheț | Foarte bună                     | Bună         | Foarte slabă  | Slabă   |
| Rezistența la uzura          | Bună                            | Scăzută      | Medie         | Medie   |
| Modul de elasticitate        | Foarte mare                     | Medie        | Medie         | Mare    |
| Viteza de hidratare          | Moderată                        | Foarte lentă | Foarte rapidă | Rapidă  |
| Căldura de hidratare         | Mare                            | Mică         | Foarte mare   | Medie   |

### I.1.3. Modulii caracteristici ai cimentului

Compoziția cimentului poate fi caracterizată având în vedere valorile unor rapoarte pe baza cărora rezultă informații/concluzii despre, de exemplu, rezistența betonului la atacul chimic.

*Modulul de silice  $M_{Si}$*  este definit prin relația:

$$M_{Si} = \frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3} \quad (I.1)$$

Valoarea să se încadrează în limitele 1,5–4, oferind informații referitoare la ponderea fazelor silicatică în compoziția clincherului, precum și referitoare la comportarea la ardere a amestecurilor brute (pentru amestecuri cu  $M_{Si}=1,5-2$ , arderea este ușoară, pentru valori  $M_{Si}=2-3$ , arderea se consideră normală, iar pentru  $M_{Si}> 3$ , arderea este dificilă). Din clinchere având  $M_{Si} < 1,5$  rezultă cimenturi cu priză rapidă, excepție făcând compozițiile cu conținut mai ridicat de faze feritaluminatice, la care modulul de silice poate avea valori de 1,2–1,5, fără a determina scurtarea nepermisă a prizei cimentului. După unii autori, valorile optime pentru modulul de silice se situează, pentru cimenturile portland normale, în domeniul 2,3–2,8 [15], [38].

*Modulul de alumină  $M_{Al}$*  este dat de relația:

$$M_{Al} = \frac{\%Al_2O_3}{\%Fe_2O_3} \quad (I.2)$$

și reprezintă determinarea aproximativă a rezistenței la sulfați. Cu cât este mai mic conținutul în aluminat și cu cât este mai mare conținutul în oxid de fier din amestecul de materii prime, cu atât rezistența cimentului este mai mare.

Pentru clincherele Portland normale, valoarea modulului de alumină se încadrează în limitele 1,0–2,5, valoarea 1 se referă la cimenturi speciale [15].

Pe baza corelației dintre modulul de alumină și rezistența la sulfați, S. Solacolu [15] a clasificat cimenturile în 5 grupe:

- 1) cimenturi foarte stabile:  $M_{Al} = 0-0.7$  (cimentul feroportland)
- 2) cimenturi stabile:  $M_{Al} = 0.7-1.0$
- 3) cimenturi acceptabile:  $M_{Al} = 1.0-1.4$
- 4) cimenturi nestabile:  $M_{Al} = 1.4-2.4$  (cimentul Portland obișnuite)
- 5) cimenturi nestabile:  $M_{Al}$  peste 2.4 (cimentul Portland aluminos)

*Modulul de agresivitate* este dat de raportul de mai jos și este introdus de R. Grun pentru a putea descrie rezistența cimenturilor Portland la agenții agresivi:

$$\text{Modulul de agresivitate} = \frac{Fe_2O_3 + SiO_2}{CaO + MgO + Al_2O_3} \quad (I.3)$$

Valoarea numerică a acestui modul este cuprinsă între 0.25 și 0.4, în cazul cimenturilor feroportland fiind chiar mai mare decât 0.4. Cu cât valoarea acestui raport este mai mare, cu atât rezistența chimică a cimentului este mai mare [15], [38].

---

Un alt modul caracteristic este indicele hidraulic:

$$I_H = \frac{Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3}{CaO + MgO} \quad (1.4)$$

care reprezintă o măsură a rezistenței cimentului la ape dedurizate, acide și sulfatate.

Pentru un ciment Portland se consideră ca indicele de hidraulicitate Vicat trebuie să depășească cu cel puțin 30% dublul procentului în alumină:

$$\frac{Al_2O_3 + SiO_2}{CaO + MgO} > 0.30 + 2(Al_2O_3) \quad (1.5)$$

Un ciment cu indice Vicat ridicat are o rezistență chimică bună. În cazul în care această condiție nu este îndeplinită se va limita conținutul de silicat tricalcic ( $C_3S$ ) la maxim 50% [15], [38]. Pentru a determina rezistența față de atacul apei de mare se propune raportul următor, numit și indicele Vicat:

$$Factorul\ de\ agresivitate = \frac{Al_2O_3 + SiO_2}{CaO} \quad (1.6)$$

Analizând valorile diversilor moduli caracteristici s-a constatat că, în multe cazuri, rezistența la acțiunile agresive nu este influențată atât de mult de compoziția oxidică sau de compoziția mineralogică a cimentului cât este de complexitatea diferitelor efecte.

#### **I.1.4. Factori caracteristici pentru comportarea cimenturilor**

##### **I.1.4.1. Hidratarea cimentului Portland**

Procesele fizice și chimice care au loc la priza și întărirea cimentului Portland prezintă un interes deosebit și influențează în mare măsură rezistența și durabilitatea betonului. Hidratarea și hidroliza componentilor mineralogici ai clincherului au loc simultan, sub acțiunea apei și se deosebesc între ele prin tipul reacției care se produce între componentii cimentului. Faza inițială de formare a pietrei de ciment poate fi privită la început ca hidratare (un proces chimic în cursul căruia se absoarbe apa cu degajare simultană de căldură), în timp ce procesele următoare pot fi considerate ca hidroliză.

Valoarea hidraulică a cimentului depinde de o multitudine de factori cum ar fi: compoziția chimică a clincherului, temperatura de clincherizare, procesul de calcinare, procesul de răcire, raportul dintre fazele sticloase și cristaline, metoda de măcinare, finețea măcinării (suprafața specifică). Componentii mineralogici din cimentul Portland (ciment silicios) se hidratează la temperaturi cuprinse între 20 și 40°C.

Pentru a hidrata complet, cimentul are nevoie de o cantitate de apă de cel mult 25% din greutatea sa, iar betoanele cele mai vârtoase de obicei de cel puțin 35% apa din greutatea cimentului. Diferența dintre cele două procente este necesară pentru umezirea agregatelor și lucrabilitatea betonului.

- Viteza de hidratare se diminuează continuu, dar chiar după un timp îndelungat rămâne o cantitate apreciabilă de ciment nehidratat. Piatra de ciment are aspectul unui microbeton.
- Hidrosilicatul de calciu și hidroaluminatul tricalcic sunt considerați principalii hidrocompuși.

- Ambii silicați  $C_3S$  și  $C_2S$  necesită pentru hidratare aproximativ aceeași cantitate de apă, dar  $C_3S$  produce prin acest proces o cantitate de  $Ca(OH)_2$  de 2 ori mai mare decât se formează la hidratarea  $C_2S$ . Hidrosilicații de calciu și hidroxidul de calciu reprezintă aproximativ 75% din cimentul hidratat și influențează proprietățile de întărire.
- Proprietățile fizice ale hidrosilicaților de Ca sunt determinante în procesele de priză și întărire ale cimentului.
- Reacția  $C_3A$  pur cu apa este foarte violentă și duce la întărirea instantanee a pastei și pentru a preveni un asemenea fenomen la măcinarea clincherului de ciment se adaugă ghips.
- $C_3A$  necesită pentru hidratare o cantitate de apă mai mare decât cea necesară pentru hidratarea silicaților.
- $C_3A$  nu contribuie decât puțin sau chiar deloc la rezistența cimentului, cu excepția perioadei inițiale.
- Când pasta de ciment întărită este atacată de sulfati, expansiunea provocată de formarea hidrosulfataluminatului de Ca, prin reacția acestora cu  $C_3A$ , poate conduce la distrugerea pietrei de ciment (prezența  $C_3A$  în ciment nu este de dorit).
- Un efect pozitiv al  $C_3A$  constă în capacitatea sa de a lega clorurile.

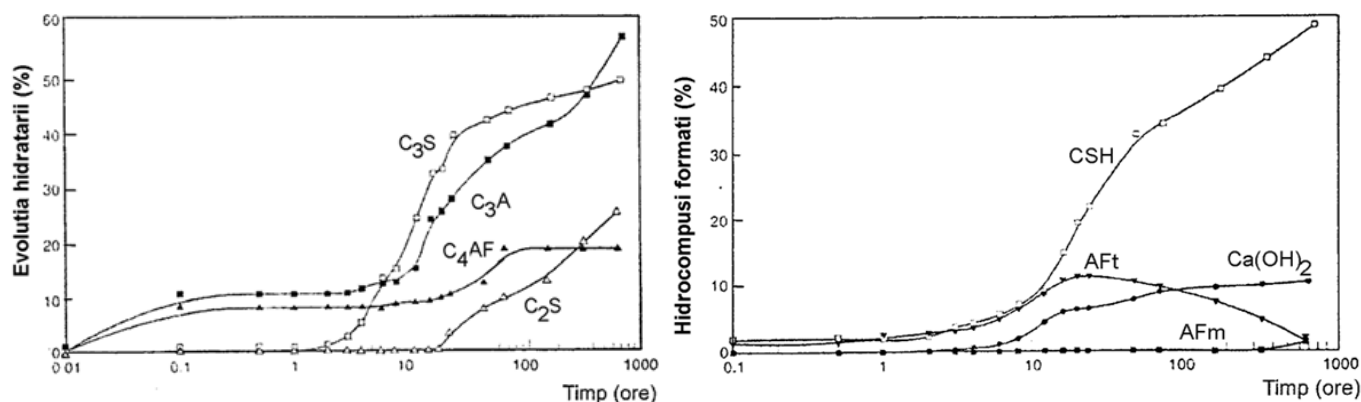


Figura I.1. - Evoluția în timp a hidratării (în pastă) pentru constituenții minerali dintr-un ciment Portland normal, la temperatură normală [15].

Hidratarea aluminatilor în prezența ghipsului produc sulfoaluminatii de calciu hidratați numiți etringită (faza AFt) care în continuare reacționează cu aluminatii ( $C_3A$  și  $C_4AF$ ) și faza AFt se transformă în faza AFm (hidroaluminatul monosulfatat).

#### I.1.4.2. Priza cimentului

- Reacția  $C_3A$  pur cu apa este foarte violentă și duce la întărirea instantanee a pastei numită și priză instantanee, fenomen prevenit prin adăugarea ghipsului la măcinarea clincherului de ciment. Cantitatea de ghips necesară crește cu conținutul de  $C_3A$  precum și cu conținutul de alcalii din ciment. Cantitatea de ghips adăugată la clincherul de ciment trebuie să fie atent controlată, deoarece un exces de ghips provoacă expansiune și în consecință distrugerea pietrei de ciment întărită.

- $C_3S$  pur (compusul din ciment care face priză primul), amestecat cu apă, prezintă o priză inițială scurtă, iar  $C_2S$  se rigidizează lent.
- Timpul de priză al cimentului se diminuează cu creșterea temperaturii, dar peste aproximativ  $30^{\circ}C$  se poate constata un efect invers. La temperaturi joase, priza este întârziată.

#### I.1.4.3. Finețea de măcinare a cimentului

- Viteza de hidratare depinde de finețea particulelor de ciment și pentru a realiza o dezvoltare rapidă a rezistenței este necesară o finețe avansată.
- Costul măcinării la o finețe mai mare este considerabil mărit și cu cât un ciment este măcinat mai fin cu atât se degradează mai ușor la expunerea în aer.
- Un ciment mai fin determină o reacție mai puternică a agregatelor reactive cu alcaliile și face ca pasta de ciment, dar nu neapărat și betonul, să prezinte o contracție mai mare și o tendință de fisurare mai mare.
- O creștere a fineții cimentului implică o creștere a necesarului de ghips pentru o mai bună întârziere a prizei, deoarece într-un ciment mai fin, avem o cantitate mai mare de  $C_3A$  disponibilă pentru hidratarea timpurie
- Cantitatea de apă pentru pasta de consistență standard este mai mare cu cât cimentul este mai fin măcinat.
- Creșterea fineții de măcinare a cimentului îmbunătățește relativ puțin lucrabilitatea betonului.

#### I.1.4.4. Căldura de hidratare a cimentului

Căldura de hidratare este cantitatea de căldură, exprimată în Jouli pe gramul de ciment anhidru, degajată prin hidratarea completă, la o temperatura dată. Pentru scopuri practice, nu contează neapărat căldura totală de hidratare ci viteza ei de degajare. Pentru o serie de cimente Portland normale s-a observat că aproximativ jumătate din căldura totală este degajată între 1 și 3 zile, aproximativ  $3/4$  în 7 zile și 83-91% din valoarea ei în șase luni. Valoarea căldurii de hidratare depinde de compoziția cimentului și este apropiată de suma căldurilor de hidratare ale compuşilor individuali, când ei hidratează separat.

Tabelul I.7. - Căldura de hidratare a cimentului pentru componenții mineralogici ai clincherului [31]

| Compusul | Căldura de hidratare |       |
|----------|----------------------|-------|
|          | J/g                  | cal/g |
| $C_3S$   | 502                  | 120   |
| $C_2S$   | 260                  | 62    |
| $C_3A$   | 867                  | 207   |
| $C_4AF$  | 419                  | 100   |

---

Prin diminuarea proporției de compuși care hidratează cel mai rapid ( $C_3A$  și  $C_3S$ ) poate fi redusă viteza mare de degajare de căldură la vârste timpurii ale betonului. O creștere a fineții de măcinare intensifică reacțiile de hidratare și prin urmare amplifică degajarea de căldură. Compoziția determină viteza de evoluție a căldurii de hidratare și rezistența la atac sulfatic, fapt pentru care compoziția oxidică și mineralogică a diferitelor cimenturi este prevăzută în prescripții.

#### I.1.4.5. Rezistența mecanică

Este unanim recunoscut că proprietatea principală a cimentului este reprezentată de rezistența mecanică. O regulă aproximativă, convenabilă, admite că  $C_3S$  contribuie în special la dezvoltarea rezistențelor mecanice în primele 4 săptămâni, iar  $C_2S$  influențează dezvoltarea rezistențelor după perioade mai mari de 4 săptămâni. Pentru o perioadă de aproximativ un an, cei doi compuși contribuie în măsură comparabilă la rezistența finală.

În termeni generali, se poate considera că o creștere a conținutului de  $C_3S$  determină creșteri ale rezistențelor mecanice până la 28 de zile, conținutul de  $C_2S$  are o influență pozitivă asupra rezistențelor mecanice după 5 și 10 ani,  $C_3A$  influențează pozitiv rezistența până la 7 sau 28 zile și negativ după aceea, iar rolul  $C_4AF$  în dezvoltarea rezistenței mecanice este discutabil, dar este cert că el nu are o contribuție favorabilă.

#### I.1.4.6. Influența alcaliilor ( $Na_2O$ și $K_2O$ )

Cu cât conținutul de alcalii este mai mare cu atât mai mică va fi creșterea rezistenței mecanice. Se poate considera că alcaliile determină creșteri ale rezistenței inițiale și diminuări ale rezistențelor pe perioade îndelungate de timp.

### I.2. Materiale cimentoide suplimentare (Supplementary Cementing Materials - notate SCM)

#### I.2.1. Clasificarea materialelor cimentoide suplimentare

**SCM-urile** sunt materiale cimentoide suplimentare / adaosuri minerale / materiale hidraulic latente - materiale anorganice care contribuie la modificarea proprietăților unui ciment prin reacție hidraulică sau puzzolanică sau ambele. Câteva exemple de materiale cimentoide suplimentare sunt: cenușa zburătoare (clasa C sau clasa F), zgura granulată de furnal măcinată, silicea ultrafină și puzzolanele naturale. În practică toate aceste materiale sunt folosite în combinație cu cimentul Portland.

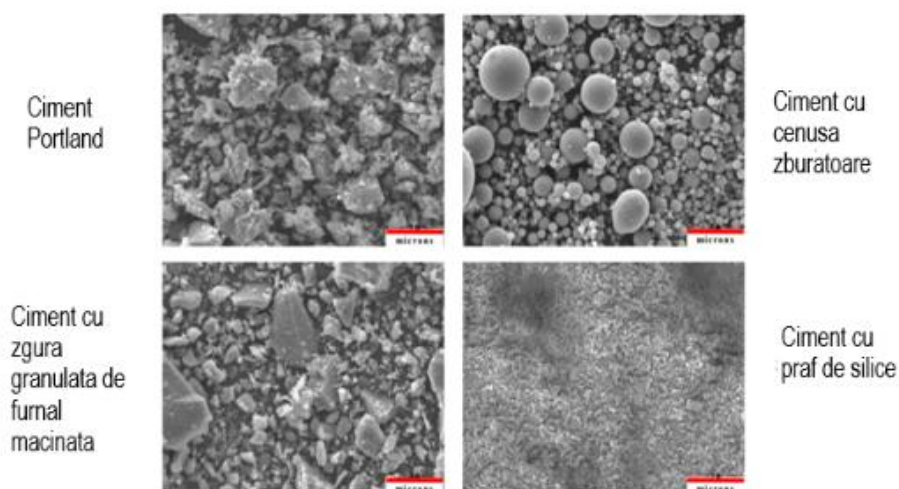


Figura I.2. - Imagine de microscopie electronică prezentând forma și dimensiunile granulelor de ciment Portland, ciment cu cenușă zburătoare, ciment cu zgură granulată de furnal măcinată și ciment cu praf de silice.

Tabelul I.8. - Compoziția specifică a adaosurilor minerale [31]

| Procente din masa, %           | Cimentul Portland | Zgura granulată de furnal măcinată | Cenușa zburătoare de clasa F | Cenușa zburătoare de clasa C | Silicea ultrafină |
|--------------------------------|-------------------|------------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 21                | 35                                 | 50                           | 35                           | 90                |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5                 | 8                                  | 25                           | 20                           | 2                 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2                 | 3                                  | 10                           | 5                            | 2                 |
| CaO                            | 65                | 40                                 | 1                            | 20                           | -                 |

Figura I.3. prezintă compozițiile de ciment și materiale cimentoide suplimentare reprezentate pe o diagramă ternară C-S-A.

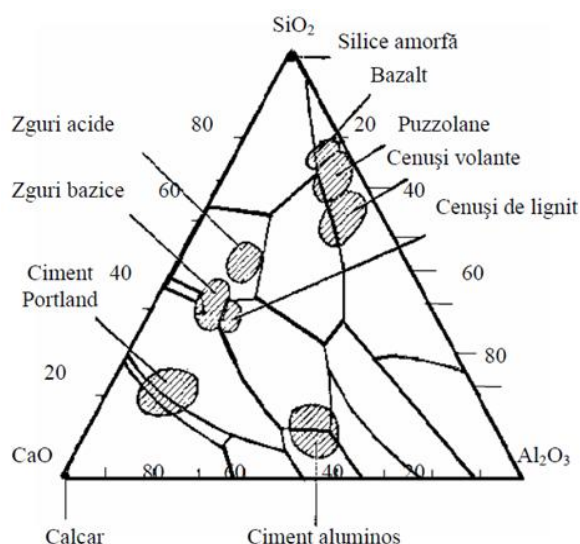


Figura I.3. - Poziția cimentului Portland și a adaosurilor minerale în sistemul CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> [89]

---

Adaosul mineral este o materie primă fin măcinată care respectă următoarele cerințe:

- menționată ca un constituent principal al cimentului în EN 197-1 [8] (cu excepția clincherului de ciment Portland),
- proprietățile fizice și chimice sunt bine definite și documentate,
- controlul dovedit al calității,
- îndeplinește cerințele din standardele sau ghidurile relevante ale produsului pentru utilizarea în ciment și beton.

Recomandările specifice pentru utilizarea în betoane în conformitate cu EN 206 [17] se referă numai la adaosurile minerale pentru care există un standard european, național sau o dispoziție valabilă de utilizare. Cimenturile cu adaosuri, la care o parte din clincher este înlocuit de aceste materiale cu proprietăți hidraulice asemănătoare clincherului, au proprietăți modificate, având o degajare mai mică de căldură și o rezistență mai ridicată la agresiunile chimice. Cimentul compozit are, în general, un ritm mai lent de dezvoltare a rezistenței, iar cu o întărire adecvată, poate fi obținut un beton impermeabil și durabil cu rezistență mai mare decât cea al cimentului normal. Aceste cimenturi sunt mai economice.

Adaosurile din ciment pot fi clasificate în trei grupe:

- a) Adaosuri cementoide (zgura bazaltică, zgură granulată de furnal măcinată și cenușă zburătoare calcică) care atunci când sunt măcinate fin și amestecate cu apa, se întăresc, deși într-un timp îndelungat;
- b) Adaosurile puzzolanice, sau adaosurile hidraulice, sau adaosurile active (tufuri vulcanice, cenușa de termocentrală, argila calcinată, diatomita, silicea ultrafină, trasul), care amestecate cu apa nu se întăresc decât în prezența hidroxidului de calciu;
- c) Adaosurile inactive sau adaosuri inerte (filerile) care nu participă la întărirea hidraulică. Aceste adaosuri reprezintă un înlocuitor parțial al părții fine din agregate, caz în care se reduce cu circa 10% cantitatea de nisip 0-4 mm din agregate. Folosirea adaosului inert conduce la îmbunătățirea lucrabilității și compactării betonului.

În standardul EN 197-1 [8] conținutul de filer de calcar din ciment este limitat la 5%, dar se admite utilizarea unui conținut de filer de calcar de maxim 35% în cimentul Portland cu calcar tip II/B-L, cu condiția ca restul materialului liant să fie numai ciment Portland.

Puzzolanele sunt materiale silicioase sau silicioase și aluminoase care, în sine, posedă proprietăți cementoide mici sau deloc, dar sub formă de pulbere fin măcinată și în prezența apei, reacționează cu hidroxidul de calciu la temperaturi obișnuite pentru a forma compuși cu proprietăți cementoide. Clasificarea adaosurilor minerale de către RILEM (Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Construction et Ouvrages) este următoarea:

- materiale cementoide;

- materiale intens puzzolanice: silica ultrafină, cenușă din coji de orez;
- materiale puzzolanice normale: cenușă de clasă F (cenușă de natură silicioasă);
- materiale cimentoide și puzzolanice: zgura granulată fin măcinată, cenușă de clasă C (cenușă de natură calcică).

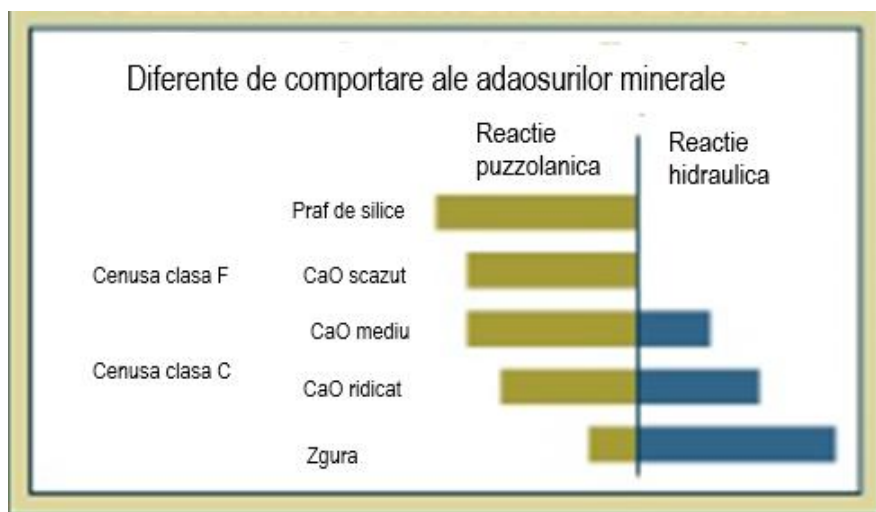
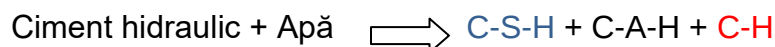


Figura I.4. - Efectele hidraulice/puzzolanice calitative ale adaosurilor minerale

Reacția hidraulică:

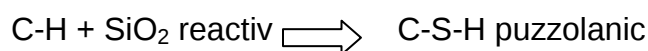
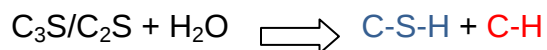
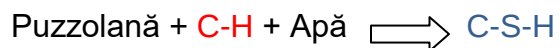
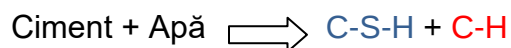
- în reacția dintre un material cimentoid hidraulic și apă rezultă produși de hidrosilicat de calciu (C-S-H) și hidroxid de calciu (C-H), de asemenea etringită și alți hidroalumiinați (C-A-H) ( de ex: cimentul Portland, cimentul cu zgură granulată de furnal, cimentul cu cenușă zburătoare clasa C).



C-S-H asigură rezistența betonului - un produs favorabil

C-H asigură o rezistență mică betonului și este un reactant în multe mecanisme fizice și chimice - un produs nefavorabil

Reacția puzzolanică:



C-S-H puzzolanic este în general mai poros decât C-S-H normal și are, de asemenea, un raport C/S mai scăzut. Un adaos puzzolanic poate avea, de asemenea,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  reactiv, caz în care reacția cu CH conduce la formarea C-A-H, care nu se comportă satisfăcător la atacul sulfatic.

Activitatea puzzolanică este evaluată prin indicele de activitate puzzolanică, care definește astfel:

$$\text{PAI (\%)} = \frac{\text{Rezistență (ciment Portland / adaos puzzolanic)} \cdot 100}{\text{Rezistență (ciment Portland)}}$$

În acest test, proiectarea amestecului se face folosind o înlocuire volumetrică a cimentului cu adaos puzzolanic (ASTM C311 [124]), spre deosebire de testul indicelui de activitate al zgurii (ASTM C989 [95]), unde se utilizează o înlocuire a masei cimentului cu zgură.

Caracteristicile reacției puzzolanice:

- Consumul de var
- Reducerea dimensiunilor porilor (deși nu există o scădere semnificativă a volumului total de pori);
- Îmbunătățește aderența agregat-piatră de ciment care conduce la rezistențe mai mari;
- Viteză lentă de reacție; căldură scăzută de hidratare. Timpul pentru a obține aceeași rezistență ca și a cimentului Portland poate fi numit timpul efectiv ( $t_{\text{eff}}$ ). Figura I.5 prezintă câteva valori ale  $t_{\text{eff}}$  pentru diferite cimenturi cu adaosuri minerale observând că la vârste relativ mici cimenturile cu adaosuri au rezistențe mai mici decât cimenturile Portland iar la vârste mai mari depășesc rezistența cimenturilor Portland;
- O mai bună durabilitate, datorită permeabilității reduse și conținutului redus de CH;
- Alkaliile și ghipsul accelerează reacția puzzolanică.

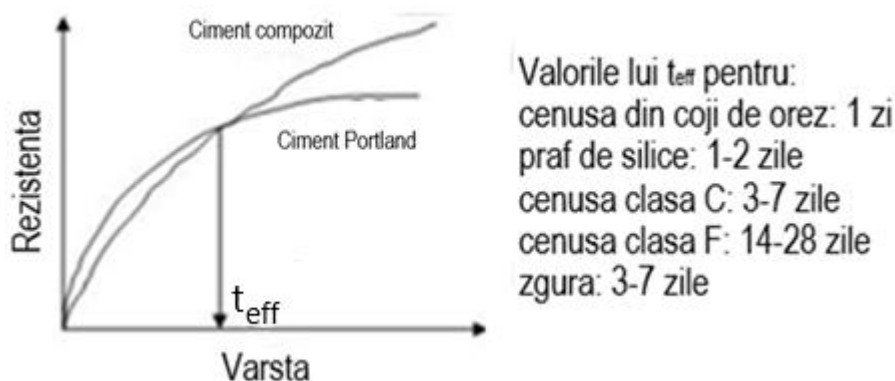


Figura I.5. - Evoluția rezistențelor cimenturilor cu diverse adaosuri minerale

Procentul de geluri în faza hidratată a cimenturilor cu adaosuri este mai ridicat: aceste cimenturi se comportă asemănător celor belitice (cu procente mai mari de  $C_2S$ ). Materiale cimentoide suplimentare consumă CH prin reacție puzzolanică și față de cimenturile Portland prezintă următoarele facilități:

- îmbunătățesc lucrabilitatea și rezistența betonului;
- reduc permeabilitatea;

- 
- cresc densitatea pastei de ciment;
  - reduc alcaliile;
  - reduc căldura de hidratare datorată reacției de hidratare a cimentului;
  - măresc rezistența la agenți chimici agresivi;
  - măresc intervalul de evoluție al rezistenței betonului în timp.

Adaosul mineral este un material fin măcinat utilizat la fabricarea cimentului sau adăugat la prepararea betonului pentru a influența proprietățile mecanice ale betonului și poate îmbunătăți durabilitatea acestuia în medii agresive. Standardul european EN 206 [17] se referă la două tipuri de adaosuri anorganice:

- adaosuri cvasi inerte (tip I);
- adaosuri cu activitate puzzolanică sau hidraulică latentă (tip II).

TIPUL I cuprinde materiale inerte (fîlerul de calcar și pigmenți de culoare) și pulberi de rocă (praf de cuarț, calcar pudră). Amestecurile cu finețe redusă pot fi îmbunătățite prin adăugarea de pulberi de rocă pentru a îmbunătăți curba de granulozitate. Cerința de apă este mai mare, în special la calcarul sub formă de pulbere.

Pigmenții, constituiți în principal din oxizii de fier, sunt utilizați pentru colorarea betonului și se adaugă în procente de 0.5 - 5% din greutatea cimentului, trebuind să rămână colorate și stabile în mediul de ciment alcalin. La unele tipuri de pigmenți, cerința de apă a amestecului poate crește.

TIPUL II cuprinde materialele hidraulic latente sau puzzolanele, cum ar fi puzzolanele naturale (trasul), cenușa zburătoare, praful de silice și zgura granulată de furnal măcinată.

Cenușa zburătoare este o cenușă fină de la centralele electrice pe bază de cărbune, utilizată ca adaos atât pentru ciment, cât și pentru beton. Compoziția sa depinde în principal de tipul de cărbune și originea sa și de condițiile de ardere (EN 450 [62]).

Praful de silice se prezintă sub formă de particule sferice de dioxid de siliciu amorf și se obține din producția de siliciu și aliaje de siliciu. Are o suprafață specifică de 18 - 25 m<sup>2</sup> pe gramul de ciment și este o puzzolana foarte reactivă (SR EN 13263 [79]). Dozajul prafului de silice este de la 5% la maxim 10% din greutatea cimentului.

## **I.2.2. Cenușa zburătoare (volantă)**

### **I.2.2.1. Descriere generală**

Cenușa zburătoare, cel mai utilizat adaos de fabricație din ciment din S.U.A., este un reziduu mineral fin care rezultă din arderea cărbunelui măcinat sau pulverizat. Cenușa zburătoare este, în general, colectată din coșurile de fum ale centralelor electrice pe bază de cărbune.

Compoziția chimică a cenușii zburătoare este diferită în funcție de cărbunele ars:

- pentru antracit sau cărbune bituminos: 20-60%  $\text{SiO}_2$ , 5-35%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 10-40%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 1-12%  $\text{CaO}$ ;
- pentru cărbune sub-bituminos: 40-60%  $\text{SiO}_2$ , 20-30%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 4-10%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 5-30%  $\text{CaO}$ ;
- pentru lignit: 15-45%  $\text{SiO}_2$ , 20-25%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 4-15%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 15-40%  $\text{CaO}$  (Rotaru și Boboc, 2010).

Cenușa zburătoare are proprietăți puzzolanice și include cantități substanțiale de dioxid de siliciu ( $\text{SiO}_2$ ) (amorf și cristalin) și oxid de calciu ( $\text{CaO}$ ). Componentii toxici includ arsenic, beriliu, bor, cadmiu, crom, cobalt, plumb, mangan, mercur, molibden, seleniu, stronțiu, talii și vanadiu.

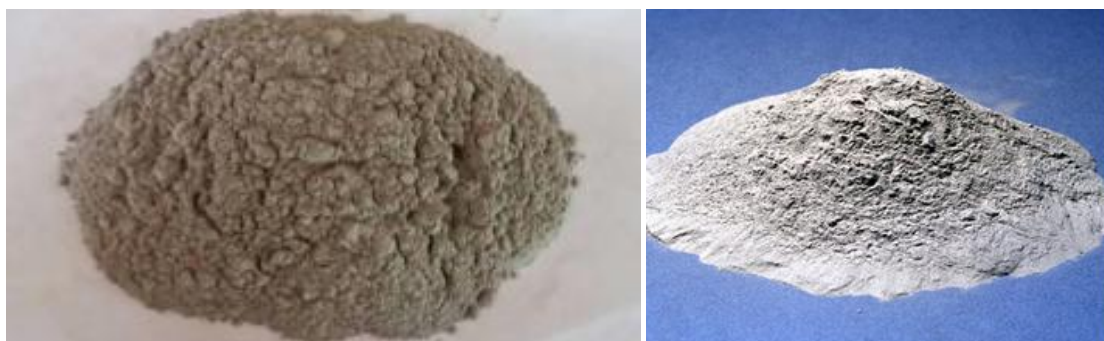


Figura I.6. - Cement cu cenușă zburătoare, prezentare generală.

### **I.2.2.2. Caracteristicile unor cenuși de termocentrală românești (conform EN 197-1 [8] și SR 3832-10 [91])**

Cenușa zburătoare se obține prin depunerea electrostatică sau mecanică a particulelor pulverulente conținute în gazele de ardere de la arzătoarele cazanelor alimentate cu praf de cărbune. Cenușa zburătoare poate fi de natură silicioasă sau calcică. Prima are proprietăți puzzolanice; a doua poate avea, în plus, și proprietăți hidraulice. Pierdere la calcinare a cenușii zburătoare determinată în conformitate cu EN 196-2 [6], utilizând un timp de calcinare de 1 h, trebuie să se încadreze în una din următoarele limite:

- a) 0 % la 5.0% din masă - categoria A
- b) 2,0% la 7.0% din masă - categoria B
- c) 4,0% la 9.0% din masă - categoria C

Scopul cerinței pentru pierdere la calcinare este de a limita reziduul de carbon nears în cenușa zburătoare.

### **Cenușa zburătoare silicioasă (V)**

Cenușa zburătoare silicioasă este o pulbere fină de particule în majoritate sferice, având proprietăți puzzolanice. Ea constă în principal din dioxid de siliciu reactiv ( $\text{SiO}_2$ ) și oxid de aluminiu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). În rest conține oxid de fier ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) și alți compuși. Proporția de oxid de calciu reactiv ( $\text{CaO}$ ) trebuie să fie mai mică de 10,0 % din masă, iar conținutul de oxid de calciu liber, determinat prin metoda descrisă în EN 451-1 [62] trebuie să fie de maximum 1,0% din masă.

---

Cenușa zburătoare având un conținut de oxid de calciu liber mai mare de 1,0% din masă, dar mai mic de 2,5% din masă, este acceptată ca adaos, cu condiția ca expansiunea (stabilitatea) să fie de maximum 10 mm, atunci când încercarea se efectuează conform EN 196-3 [7] folosind un amestec de 30 % din masă cenușă zburătoare silicioasă și 70% din masă ciment CEM I conform EN 197-1 [8]. Conținutul de dioxid de siliciu reactiv nu trebuie să fie mai mic de 25,0% din masă.

### **Cenușă zburătoare calcică (W)**

Cenușa zburătoare calcică este o pulbere fină, având proprietăți hidraulice și/sau puzzolanice. Ea constă în principal din oxid de calciu reactiv ( $\text{CaO}$ ), dioxid de siliciu (reactiv  $\text{SiO}_2$ ) și oxid de aluminiu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), precum și oxid de fier ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) sau alți compuși. Cenușa zburătoare calcică poate conține între 10.0 % și 15.0% din masă oxid de calciu reactiv și minimum 25.0% din masă oxid de siliciu reactiv.

Cenușa zburătoare calcică conținând oxid de calciu reactiv mai mult de 15.0% din masă, este măcinată corespunzător și trebuie să aibă o rezistență la compresiune de minimum 10.0 MPa la 28 zile atunci când încercarea se efectuează în conformitate cu EN 196-1 [5]. Înainte de încercare cenușa zburătoare trebuie să fie măcinată și finețea sa exprimată ca proporție din masa cenușii rămasă pe sita cu ochiuri de 40  $\mu\text{m}$ , prin procedeul umed, trebuie să fie între 10% și 30%. Mortarul de încercare trebuie să fie preparat numai cu cenușă zburătoare calcică în loc de ciment. Epruvetele de mortar trebuie să fie decofrate la 48 h după preparare și apoi păstrate în atmosferă umedă cu umiditatea relativă de minimum 90% până la încercare.

Expansiunea (stabilitatea) cenușii zburătoare calcice trebuie să fie de maximum 10 mm atunci când încercarea se efectuează în conformitate cu EN 196-3 [7], utilizând un amestec de 30% din masă cenușă zburătoare calcică măcinată așa cum este descris mai sus și 70% din masă ciment CEM I conform EN 197-1 [8]. Dacă cenușa zburătoare conține sulfat ( $\text{SO}_3$ ) peste limita superioară admisă atunci trebuie ca producerea cimentului să se reducă corespunzător componentele conținând sulfat de calciu.

În funcție de raportul  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , de conținutul în  $\text{CaO}$  și  $\text{SO}_3$ , cenușile pot fi clasificate astfel:

- cenuși aluminosilicioase –  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 2$  și  $\text{CaO} < 15\%$ ;
- cenuși silicoaluminoase –  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 2$  și  $\text{CaO} > 15\%$ ;
- cenuși sulfocalcice –  $\text{CaO} > 15\%$  și  $\text{SO}_3 > 3\%$ ;
- cenuși calcice –  $\text{CaO} > 15\%$  și  $\text{SO}_3 < 3\%$ .

Cenușile românești se încadrează în tipurile silicoaluminoase și aluminosilicioase.

Tabelul I.9. - Valorile unor indici de calitate (conform standardelor EN 197-1[8] și SR 3832/10 [91]) specifici pentru cenuși de termocentrală românești [15]

| Caracteristici                                        | Cenușă<br>Ișalnița | Cenușă<br>Doicești | Cenușă<br>Rovinari | Cenușă<br>Mintia | EN 197-1<br>SR 3832/10 |
|-------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------------|
| Pierdere la<br>calcinare (%)                          | 2,4                | 1,38               | 1,55-4,54          | 0,68-2,4         | $\leq 5\%^a$           |
| SiO <sub>2</sub> (%)                                  |                    |                    |                    |                  |                        |
| - total                                               | 48,54              | 54,45              | 48,6-50,24         | 23,19-23,47      | $\geq 50^b$            |
| - reactiv                                             | 42,54              | 48,11              | 38,92-42,5         | 38-40,97         | $\geq 25^{a,b}$        |
| CaO (%)                                               | 8,74               | 5,77               | 6,19-8,43          | 3,52-3,94        | $\leq 15^a$            |
| Alcalii                                               |                    |                    |                    |                  | -                      |
| - Na <sub>2</sub> O (%)                               | 0,48               | 0,63               | 0,39-0,53          | 0,58-0,79        |                        |
| - K <sub>2</sub> O (%)                                | 2,09               | 2,0                | 1,59-1,72          | 2,27-2,37        | -                      |
| Indice fizic de<br>activitate (I)                     | 114,38             | 99,30              | 81,58-99,65        | 73,33-<br>101,75 | $\geq 85^b$            |
| Indice chimic<br>de activitate<br>(RI)                | 17                 | 18,14              | 16,05-17,93        | 26,82-36,25      | $\leq 35^b$            |
| Dimensiunea<br>particulelor:                          |                    |                    |                    |                  |                        |
| $\leq 16 \mu\text{m}$                                 | 16,1               | 16,5               | 8,7-15,5           | 20,6             | -                      |
| $\leq 32 \mu\text{m}$                                 | 34,6               | 31,6               | 15,9-35,4          | 37,2             | -                      |
| $\leq 48 \mu\text{m}$                                 | 54,9               | 46,8               | 26,0-55,4          | 52,7             | -                      |
| Suprafața<br>specifică<br>Blaine (cm <sup>2</sup> /g) | 3035               | 3300               | 2380-2850          | 2010             | -                      |

Aprecierea calității de liant a cenușilor de termocentrală se face prin indicele de activitate puzzolanică, definit în modul următor:

$$I_{ap} = \frac{A-B}{B} \quad (1.7)$$

în care: A este rezistența la compresiune la 7 zile (28 zile) determinată pe epruvete cilindrice preparate din cenușă de termocentrală 90 % și ciment sau var 10 %;

B – rezistența la compresiune la 7 zile (28 zile) determinată pe epruvete cilindrice preparate din nisip 90 % și ciment sau var 10 %.

În funcție de valoarea indicelui de activitate puzzolanică, cenușile de termocentrală se clasifică conform tabelului următor. În general, cenușile de termocentrală de la noi din țară au indice de activitate puzzolanică mai mic de 0,50.

Tabelul I.10. - Clasificarea cenușilor după indicele de activitate puzzolanică

| Indicele de activitate puzzolanică | Tipul cenușii             |
|------------------------------------|---------------------------|
| $0 < I_{ap} < 0,5$                 | Cenușă slab puzzolanică   |
| $I_{ap} < 0$                       | Cenușă nepuzzolanică      |
| $0,5 < I_{ap} < 1,0$               | Cenușă mediu puzzolanică  |
| $1,0 < I_{ap} < 1,5$               | Cenușă puzzolanică        |
| $I_{ap} > 1,5$                     | Cenușă intens puzzolanică |

### I.2.2.3. Caracteristicile unor cenuși zburătoare clasa F și clasa C - (prevederi ASTM C618 [92])

Există două tipuri principale de cenușă zburătoare:

#### Cenușa zburătoare Clasa F:

Arderea antracitului mai dur, mai vechi și a cărbunelui bituminos produce în mod obișnuit cenușă zburătoare clasa F. Această cenușă zburătoare este de natură puzzolanică și conține mai puțin de 10% var (CaO). Silicea și alumina vitrificată a cenușii zburătoare de clasă F necesită un agent de cimentare, cum ar fi cimentul Portland, varul sau hidroxidul de calciu, care în prezența apei reacționează și produce compuși pe bază de ciment.

Cenușa zburătoare "Clasa C", se întărește când este hidratată în prezența unui procent obișnuit de oxid de calciu de 10% -30%.

$$\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3 \geq 50 \% \quad (I.8)$$

#### Cenușa zburătoare Clasa C:

Cenușa zburătoare produsă din arderea lignitului mai tânăr sau a cărbunelui sub-bituminos, pe lângă faptul că are proprietăți puzzolanice, are și unele proprietăți de auto-cimentare. În prezența apei, cenușa de clasă C se va întări și va câștiga rezistență în timp. Cenușa zburătoare de clasa C conține, în general, mai mult de 20% calcar (CaO). Spre deosebire de cenușa zburătoare clasa F, cenușa zburătoare clasă C nu necesită un activator. Conținutul de alcalii și sulfati ( $SO_4$ ) este, în general, mai mare în cenușă zburătoare clasa C.

Cenușa zburătoare "Clasa F", se întărește numai atunci când este hidratată în prezența cimentului sau a varului, în mod obișnuit, conține mai puțin de 10% oxid de calciu în funcție de conținut.

$$\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3 \geq 70 \% \quad (I.9)$$

Indice de activitate al cenușii [92]:

$$SAI = \frac{FP}{P} 100 \geq 75\% \text{ (Strength Activity Index, \%)} \quad (I.10)$$

pentru toate clasele de cenușă testate la 7 și 28 de zile.

FP - rezistența medie la compresiune a cuburilor de mortar cu ciment Portland 80% și 20% cenușă zburătoare, psi;

P - rezistența medie la compresiune a cuburilor de mortar cu 100% ciment Portland, psi.

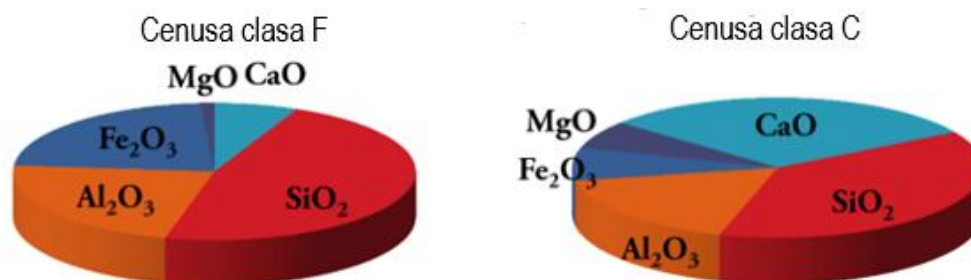


Figura I.7. - Compoziția mineralogică a cenușilor clasa F și clasa C.

Cenușa zburătoare folosită ca adaos în ciment sau adăugată la prepararea betonului îmbunătățește performanța produsului finit - cum ar fi lucrabilitatea, rezistența și durabilitatea - deși caracteristicile pot varia în mod semnificativ în funcție de sursa de cărbune. Cu toate acestea, în anumite condiții, cenușa zburătoare poate duce la scăderea performanței, în special atunci când proporția de înlocuire a cimentului depășește practica standard de 20-30%. Cantitatea de cenușă zburătoare rezultată ca produs secundar al producției de energie electrică depinde foarte mult de conținutul de cenușă al cărbunelui ars, care de obicei variază între 5-10%.

Cenușa de clasă C, în mod normal, provine din cărbuni care pot produce o cenușă cu conținut de var mai mare - în general, mai mult de 15% adesea până la 30%; cenușa de clasa F are de obicei o proporție scăzută de var, sub 15%. CaO ridicat poate da cenușilor din clasa C caracteristici unice de auto-întărire. Cerințele de calitate pentru cenușa zburătoare variază în funcție de destinația dorită. Calitatea cenușii este afectată de caracteristicile combustibilului (cărbuni bituminoși și sub-bituminoși) și de diferite aspecte ale proceselor de combustie și de curățare / colectare a gazelor de ardere. Cele patru caracteristici mai relevante ale cenușii zburătoare pentru utilizarea în beton sunt pierderile prin ardere (Loss on Ignition - LOI), finețea, compoziția chimică și uniformitatea.

LOI reprezintă o cantitate de cărbune nears care rămâne în cenușă și este o caracteristică critică a cenușii zburătoare, în special pentru aplicațiile din beton. Nivelurile ridicate de carbon, tipul de carbon și variabilitatea conținutului de carbon nears pot duce la probleme semnificative de antrenare a aerului în betonul proaspăt care poate afecta negativ durabilitatea betonului. Normele AASHTO [38] și ASTM [93], [94] specifică limite pentru LOI.

---

Unele utilizări ale cenușii zburătoare nu sunt afectate de valoarea LOI, ca de exemplu: unele straturi de rezistență și de uzură ale îmbrăcămintei părții carosabile ale drumurilor, terasamente, galerii de mine și blocuri masive structurale pot accepta cenușă zburătoare cu conținut ridicat de carbon nears.

Conținutul de cărbune nears, LOI poate varia până la cinci la sută după prevederile AASHTO [38] și până la șase la sută după prevederile ASTM [93], [94]. În proporție mai mare, carbonul nears poate absorbi aditivii de antrenare a aerului și poate crește necesarul de apă. De asemenea, o parte a carbonului nears din cenușa zburătoare poate fi încorporată în produsele vitrificate și altfel să fie mai puțin activă, neafectând amestecul. În schimb, o anumită cenușă zburătoare cu valori scăzute ale LOI poate avea un tip de carbon nears cu o suprafață specifică mare, ceea ce va crește cantitatea aditivilor antrenatori de aer. Variațiile LOI pot contribui la fluctuațiile conținutului de aer și necesită o monitorizare mai atentă în situ a aerului antrenat în beton. În plus, dacă cenușa zburătoare are un conținut foarte ridicat de carbon nears, particulele de carbon pot să plutească în partea superioară în timpul procesului de finisare a betonului și pot produce la suprafață dungii colorate în culori închise.

Cenușa de clasa C poate fi folosită ca un material autonom datorită proprietăților sale auto-cimentare, iar cenușa de clasa F poate fi utilizată în lucrările de stabilizare a solului cu adăugarea unui agent cimentoid (var și ciment). Comportamentul auto-cimentoid al cenușii zburătoare este determinat de norma ASTM D 5239 [93]. Acest test oferă o metodă standard pentru determinarea rezistenței la compresiune a cuburilor făcute cu cenușă zburătoare și apă (raportul apă/ cenușa zburătoare este de 0,35), testat la șapte zile de întărire umedă.

Caracteristicile auto-cimentoide sunt clasificate după cum urmează:

Intens auto-cimentoide: > 3400 kPa;

Moderat auto-cimentoide: 700 - 3400 kPa;

Fără proprietăți auto-cimentoide: < 700 kPa.

Pe lângă beneficiile economice și ecologice, utilizarea cenușii zburătoare în beton îmbunătățește lucrabilitatea, reduce segregarea, tasarea, evoluția căldurii de hidratare și permeabilitatea, inhibă reacția alcalii-agregate și îmbunătățește rezistența la sulfați. Folosirea adaosurilor de cenușă volantă este interzisă în cazul betoanelor utilizate la realizarea elementelor din beton precomprimat. Chiar dacă utilizarea cenușii zburătoare în beton a crescut în ultimii 20 de ani, mai puțin de 20% din cenușa zburătoare colectată a fost utilizată în industria cimentului și betonului.

#### **1.2.2.4. Caracteristicile cenușilor zburătoare conform SR EN 450-1 [62]**

**Indicele de activitate** este raportul (în procente) dintre rezistența la compresiune a epruvetelor de mortar standard, preparat cu 75% ciment plus 25% cenușă zburătoare în masă, și

---

rezistența la compresiune a epruvetelor de mortar standard pregătite cu ciment 100% determinate la aceeași vârstă.

**Pierdere prin ardere ( Loss on ignition - LOI )** se determină în conformitate cu principiile metodei descrise în EN 196-2 [6], care utilizează un timp de ardere de o oră și se încadrează în limitele categoriilor specificate mai jos:

- categoria A: nu mai mult de 5,0% din masă;
- categoria B: nu mai mult de 7,0% din masă;
- categoria C: nu mai mult de 9,0% din masă.

Reziduul de carbon nears din cenușa zburătoare se determină în conformitate cu ISO 10694 [78].

Deoarece mărimea pierderii prin aprindere poate avea o influență asupra efectului aditivilor antrenatori de aer pentru fabricarea betonului rezistent la îngheț și dezgheț, se va ține seama de acest lucru pentru fiecare lucrare și clasa de expunere, respectând astfel standardele și / sau reglementările pentru betonul din locul de utilizare.

### **Finețe**

Finețea cenușii zburătoare trebuie exprimată ca proporție de masă, în procente, de cenușă reținută prin cernere umedă pe o sită cu ochiuri de 0,045 mm, determinată în conformitate cu EN 451-2 și trebuie să rămână între limitele categoriilor specificate mai jos:

Pentru categoria N, finețea nu trebuie să depășească 40 % din masă, și nu trebuie să varieze cu mai mult de  $\pm 10$  procente din valoarea declarată.

Pentru categoria S, finețea nu trebuie să depășească 12 % de masă. Limitele variației de finețe de  $\pm 10$  procente nu sunt aplicabile.

### **Conceptul referitor la coeficientul k**

Conceptul referitor la coeficientul k permite luarea în considerare a adaosurilor de tip II menționate în EN 206-1 [17] prin înlocuirea termenului "raport apă/ciment" cu "raport (apă+aditiv)/(ciment + k x adaos)".

În conformitate cu SR EN 450-1 [62], conceptul referitor la coeficientul k pentru cenuși volante limitează cantitatea maximă de cenușă volantă, care trebuie să respecte cerința:  $\text{cenușa volantă/ciment} \leq 0,33$  (în masă).

Dacă se utilizează o cantitate mai mare de cenușă volantă, excedentul nu poate fi luat în considerație, pentru calculul raportului  $(\text{apă+aditiv})/(\text{ciment} + k \times \text{cenușă volantă})$ , și nici pentru stabilirea dozajului minim de ciment.

Xu [15] arată că se poate stabili următoarea relație între raportul apă/liant  $(a/c+f)$  și raportul apă/ciment  $(a/c)$ :

$$a/(c+f) = (a/c)[1-f/(c+f)] \quad (I.11)$$

în care:  $a$ = dozajul de apă [ $\text{l/m}^3$ ];  $c$ = dozajul de ciment [ $\text{kg/m}^3$ ];  $f$ =dozajul de cenușă de termocentrală [ $\text{kg/m}^3$ ].

Tabelul I.11. - Valori limită pentru rezultate încercărilor individuale conform SR EN 450-1 [62]

| Nr. crt. | Proprietate                                                                                                                                                                   | Valori limită pentru un singur rezultat                                                    |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.       | LOI (valoare limită superioară)                                                                                                                                               | 7% din masă ( categoria A )<br>9% din masă ( categoria B )<br>11% din masă ( categoria C ) |
| 2.       | Finețe (valoare limită superioară)                                                                                                                                            | 45% din masă ( categoria N )<br>13% din masă ( categoria S )                               |
| 3.       | Variația fineței (valoare limită inferioară și superioară)                                                                                                                    | $\pm 15\%$ din valoarea declarată<br>( numai pentru categoria N )                          |
| 4.       | Conținut de cloruri (valoare limită superioară)                                                                                                                               | 0.10% din masă                                                                             |
| 5.       | Oxid de calciu liber (valoare limită superioară)                                                                                                                              | 1.6% din masă                                                                              |
| 6.       | Oxid de calciu reactiv (valoare limită superioară)                                                                                                                            | 11.0% din masă                                                                             |
| 7.       | Conținut de sulfați $\text{SO}_3$ (valoare limită superioară)                                                                                                                 | 3.5% din masă                                                                              |
| 8.       | Conținut de dioxid de siliciu, oxid de aluminiu și oxid de fier<br>( $\% \text{SiO}_2 + \% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{Fe}_2\text{O}_3$ )<br>(valoare limită inferioară) | 65% din masă                                                                               |
| 9.       | Conținut total de alcalii (valoare limită superioară)                                                                                                                         | 5.5% din masă                                                                              |
| 10.      | Conținut total de fosfați ( $\text{P}_2\text{O}_5$ )<br>(valoare limită superioară)                                                                                           | 5.5% din masă                                                                              |
| 11.      | * Stabilitate (expansiune)<br>(valoare limită superioară)                                                                                                                     | 11 mm                                                                                      |
| 12.      | Indice de activitate la 28 zile (valoare limită inferioară)<br>Indice de activitate la 90 zile (valoare limită inferioară)                                                    | 70%<br>80%                                                                                 |
| 13.      | Limitele de variație ale densității particulelor (valoare limită inferioară și superioară)                                                                                    | $\pm 225 \text{ kg/m}^3$ din valoarea declarată                                            |
| 14.      | * Timpul inițial de priză (valoare limită superioară)                                                                                                                         | 2.25 ori timpul de priza al testului cu ciment Portland                                    |
| 15.      | Necesarul de apa (valoare limită superioară)                                                                                                                                  | 97% ( numai pentru categoria S )                                                           |

---

Nota:\* Stabilitatea (expansiunea) se determină pe epruvete confecționate cu 30% cenușă zburătoare și 70% ciment (ambele în funcție de masă), în conformitate cu EN 196-3 [7] și nu trebuie să fie mai mare de 10 mm.

\* Timpul inițial de priza se determină pe o pastă cu 25% cenușă zburătoare și 75% ciment (ambele în funcție de masă) în conformitate EN 196-3 [7] și nu trebuie să depășească de două ori mai mult decât timpul inițial de priza pe o pastă cu 100% ciment.

Utilizarea cenușii nu este foarte frecventă din următoarele motive:

1. Asigurarea dificilă a calității
2. Marketing slab
3. Atitudini conservatoare
4. Probleme de stocare
5. Prezența substanțelor chimice toxice în interiorul cenușii zburătoare
6. Se numește "deșeu" în loc de material pouzzolanic sau cimentoid.

Se recomandă utilizarea cenușii zburătoare la următoarele tipuri de lucrări:

- la betonul compactat cu cilindrul compresor, cenușa zburătoare facilitează aderența între straturile turnate succesiv;
- în materialele cu rezistență scăzută controlată, cum sunt mortare fluide utilizate la ramblee, umpluturi din spatele unui zid de sprijin sau a unei fundații;
- la betonul cu cenușă zburătoare cu procent ridicat de substituție al cimentului: beton cu 50% din cimentul Portland înlocuit cu cenușă de clasă F, cu un conținut scăzut de apă, în general mai mic de  $130 \text{ l / m}^3$  și tasări de 150-200 mm necesită obligatoriu utilizarea unui aditiv superplastifiant.

Intervalul de rezistențe la compresiune care poate fi obținut folosind acest beton este de 20-50 MPa. Betonul cu conținut ridicat de cenușă are o excelentă pompabilitate, prezintă o capacitate redusă de separare a apei (prin urmare, este predispus la fisurarea din contracție plastică) și contracție scăzută la uscare. Are aplicații în blocuri masive din beton, coloane și fundații, chesoane și infrastructuri de tip pile de pod, baraje, autostrăzi, beton torcretat și beton autocompactant.

### **I.2.3. Zgura granulată de furnal măcinată**

#### **I.2.3.1. Descriere generală**

Zgura de furnal este produsul nemetalic, constând în principal din silicați și alumino-silicați de calciu, care se formează în stare topită simultan cu fierul într-un cuptor de furnal. În urma răcirii zgurii fluide la temperatura mediului ambiant se pot obține următoarele tipuri de zgura:

1. Zgura de furnal cu răcire cu aer este materialul rezultat din solidificarea zgurii topite de furnal în condiții atmosferice; răcirea ulterioară poate fi accelerată prin aplicarea apei pe suprafața solidificată.
2. Zgura expandată de furnal este materialul celular ușor, obținut prin prelucrarea controlată a zgurii topite de furnal cu apă sau apă și alți agenți, cum ar fi aburul sau aerul comprimat, sau ambele.
3. Zgura granulată de furnal măcinată este materialul granular vitrificat, asemănător cu nisipul, format atunci când zgura topită de furnal este răcită rapid, prin imersare în apă. Granulele sunt apoi măcinate la o dimensiune a particulelor mai mică de 45 microni, care este inferioara pentru cele mai multe cimente Portland.

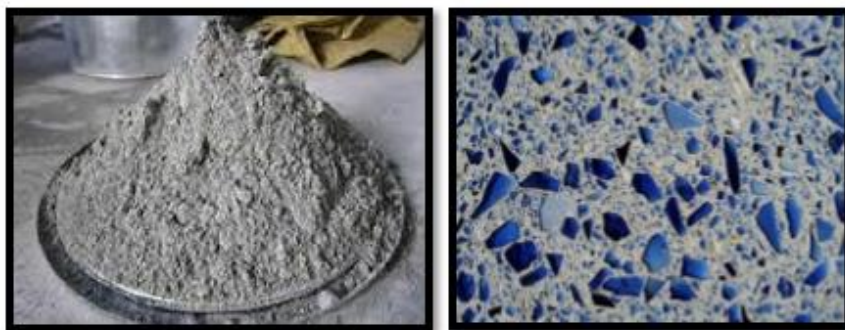


Figura I.8. - Cement si beton cu zgura granulată de furnal măcinată, prezentare generală.

Clarificarea principiilor de bază ale hidratării zgurii face posibilă identificarea factorilor primari care, în practică, vor influența eficiența utilizării zgurii granulate de furnal măcinată în cimentul hidraulic. Acești factori sunt:

- a) compoziția chimică a zgurii granulate de furnal măcinată
- b) concentrația de alcalii
- c) conținutul de produse vitrificate în zgura granulată de furnal măcinată
- d) finețea zgurii granulate de furnal măcinată și a cementului Portland
- e) temperatura în fazele timpurii ale procesului de hidratare.

### **I.2.3.2. Caracteristicile zgurii granulate de furnal măcinată utilizată ca material cimentoid**

În literatura de specialitate și în prevederile standardelor în vigoare există relații cantitative care caracterizează activitatea zgurii granulate de furnal măcinată, sub aspectul reactivității față de cement, folosite ca adaos mineral în funcție de compoziția oxidică a lor prin:

- indici de bazicitate [38]:

$$I_{b1} = \frac{\%CaO}{\%SiO_2} \quad I_{b2} = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2 + Al_2O_3} \quad (I.12 \text{ și } I.13)$$

Dacă  $I_{b1}$  și  $I_{b2} > 1.0$  zgura este reactivă și aptă pentru utilizare în amestec cu cimentul. Dacă  $0.9 \geq I_{b2} < 1.0$  zgura este moderat reactivă [15], [38].

- modulul de alumină:

$$M_{AI} = \frac{\%Al_2O_3}{\%SiO_2} \quad (I.14)$$

Valorile lui  $M_{AI}$  trebuie să se încadreze în intervalul 0.3-0.45, depășind limita maximă de 0.18 admisibilă utilizării zgurii în ciment [15], [38].

- indicele  $i_k$ :

$$i_k = \frac{\%CaO + \%MgO + \%Al_2O_3}{\%SiO_2} \quad (I.15)$$

Valorile lui  $i_k$  trebuie să se încadreze în intervalul 1.55-1.75, pentru o zgură suficient de reactivă și aptă din punct de vedere compozițional pentru a fi folosită ca material cimentoid suplimentar [15], [38].

- indicele F:

$$F = \frac{\%CaO + 0.5\%MgO + \%Al_2O_3}{\%SiO_2 + \%MnO} \quad (I.16)$$

Valorile lui F trebuie să se încadreze în intervalul 1.50-1.70, valori admisibile utilizării zgurii în ciment. Dacă  $F > 1.50$  zgura este considerată reactivă, iar dacă  $F > 1.90$  intens reactivă [15], [38].

- raportul R conform prevederilor EN 197-1 [8]:

$$R = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2} \quad (I.17)$$

Valorile lui  $R > 1.0$  permit folosirea zgurii în amestec cu cimentul.

- suma principalilor oxizi conform prevederilor EN 197-1 [8]:

$$S = \%CaO + \%MgO + \%SiO_2 > 66.6\% \quad (I.18)$$

Diferenții indici de bazicitate sau de activitate pot furniza doar informații orientative privind reactivitatea față de apă și proprietățile liante ale zgurilor. O măcinare mai avansată a zgurilor poate accentua manifestarea caracterului cimentoid al acestora [15].

### **I.2.3.3. Caracteristicile zgurii granulate de furnal măcinată conform prevederilor ASTM C 989 [95]**

Pentru a fi utilizată ca adaos în ciment și beton, zgura granulată de furnal măcinată trebuie să îndeplinească următoarele cerințe, conform ASTM C 989 [95]:

- 90-100% material amorf;

- material vitros cu particule neregulate;
- conținutul ridicat de CaO (30-50%): material hidraulic latent
- indicele hidraulic (raport masic între ozixi):  $(CaO + MgO) / SiO_2 > 1$
- reactivitatea crescută în prezenta varului, a alcaliilor sau a sulfaților
- înlocuirea în proporție de 30-70% a cimentului Portland.

Proprietăți fizice și chimice din ASTM C 989 [95] și AASHTO M 302-00 [96] evidențiază trei clase de zgură în funcție de rezistențele mortarelor atunci când sunt amestecate cu o masă egală de ciment Portland și zgură și comparativ cu rezistența mortarului numai cu ciment Portland. Gradele 120, 100 și 80 sunt exprimate în funcție de indicele de activitate SAI:

$$SAI = \frac{SP}{P} 100 \quad (\%) \quad (I.19)$$

în care:

SP - rezistența medie la compresiune a cuburilor de mortar cu 50% ciment Portland și 50% zgură granulată de furnal încercate la 28 zile, psi;

P - rezistența medie la compresiune a cuburilor de mortar cu 100% ciment Portland încercate la 28 zile, psi.

Gradele sunt determinate când indicele de activitate SAI al probei de mortar se încadrează în intervalele admise din tabelul I.12.

Tabelul I.12. - Indici de activitate (SAI) pentru zguri [95], [96]

| Indici de activitate SAI                   | Termen de întărire |     |     |         |     |     |
|--------------------------------------------|--------------------|-----|-----|---------|-----|-----|
|                                            | 7 zile             |     |     | 28 zile |     |     |
| Clase de zguri în funcție de SAI mediu (%) | 80                 | 100 | 120 | 80      | 100 | 120 |
| SAI minim (%) admis de ASTM C989           | —                  | —   | 95  | 75      | 95  | 115 |

Zgura Grad 80 - Zgura granulată de furnal cu un indice de activitate scăzut;

Zgura Grad 100 - Zgura granulată de furnal cu un indice de activitate mediu;

Zgura Grad 120 - Zgura granulată de furnal cu un indice de activitate ridicat.

Proprietățile liante și latente ale zgurilor depind de reactivitatea zgurilor conform SR 648 [97] care presupune determinarea rezistenței la compresiune conform SR EN 196-1 [5], pe mortare conținând ca liant un amestec 1:1 din ciment CEM I 42,5 și zgură măcinată la o suprafață specifică egală cu aceea a cimentului. Se consideră corespunzătoare pentru a fi utilizate în

cimenturi compozite, zgurile care, în condițiile precizate, dezvoltă după 7 zile, rezistențe la compresiune mai mari de  $12,5 \text{ N/mm}^2$ , iar după 28 de zile, cel puțin  $32,5 \text{ N/mm}^2$ .

O metodă alternativă care poate fi aplicată la orice tip de ciment utilizează așa-numitul *indice de activitate al zgurii SAI (Slag Activity Index)*, definit prin rezistența la compresiune relativă, a probelor cu ciment și zgură (1:1), raportată la rezistența la compresiune a probelor cu ciment unitar. În funcție de acest criteriu sunt definite cele trei clase de zguri, prezentate în tabelul de mai sus, împreună cu valorile minime admise de ASTM C989 [5]. Standardul francez NF P 18-506 [15] împarte zgurile granulate de furnal capabile să înlocuiască o parte din cimentul folosit la prepararea betoanelor, în trei clase, în funcție de indicele de eficacitate hidraulică la diferite vârste de întărire. Acest indice este definit ca raportul  $h$  dintre rezistența la compresiune a probelor conținând un amestec ciment și zgură 1:1 și rezistența probelor conținând numai ciment.

Tabelul I.13 - Clase de zguri conform NF P 18-506 [15]

| $h_{7,\text{minim}}$ |      |      | $h_{28,\text{minim}}$ |      |      |
|----------------------|------|------|-----------------------|------|------|
| h1                   | h2   | h3   | h1                    | h2   | h3   |
| —                    | 0,60 | 0,70 | 0,60                  | 0,77 | 0,85 |

O metodă propusă de Keil în 1954 se bazează pe aprecierea reactivității zgurii, prin raportul între diferența de rezistență la compresiune pe mortare la înlocuirea cimentului cu zgură, față de înlocuirea cimentului cu nisip cuarțos și aceeași diferență între mortare cu ciment respectiv ciment cu nisip, conform relației:

$$I_R = \frac{R_{cz} - R_{cn}}{R_c - R_{cn}} 100 \quad (I.20)$$

în care:  $R_{cz}$  - rezistența cimentului cu adaos de zgură;

$R_{cn}$  - rezistența cimentului cu adaos de nisip;

$R_c$  - rezistența probelor conținând numai ciment.

O zgură este acceptabilă dacă  $I_R$  are valori mai mari de 50%, care pot fi însă diferite, în funcție de ponderea sa în cimentul compozit.

#### **I.2.3.4. Caracteristicile zgurii granulate de furnal măcinată conform prevederilor SR EN 15167-1 [63]**

În standardul românesc pentru zgura granulată de furnal măcinată se face referire la următoarele cerințe în legătură cu:

- Compoziția sa chimică trebuie să conste în cel puțin două treimi din masă, alcătuită din suma dintre oxidul de calciu ( $\text{CaO}$ ), oxidul de magneziu ( $\text{MgO}$ ) și oxidul de siliciu ( $\text{SiO}_2$ ). Restul trebuie să fie oxid de aluminiu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) asociat cu cantități mici de alte componente.

$$\frac{\text{CaO}+\text{MgO}}{\text{SiO}_2} > 1 \quad (\text{I.21})$$

- Finețea de măcinare: Suprafața specifică, determinată conform metodei permeabilității la aer indicată în EN 196-6, nu trebuie să fie mai mică de 275 m<sup>2</sup>/kg. Pentru finețe, cantitatea reținută (exprimată ca proporție de masă, în procente) atunci când este reținută prin cernere umedă pe o sită cu ochiuri de 45 μm (nr. 325??) nu trebuie să depășească 20%. Conținutul de aer al mortarului cu zgură nu trebuie să depășească 12%. Condițiile de compoziție chimică sunt de maximum 2,5% sulfură de sulf (S) și un maxim de 4,0% ion sulfat, raportat ca SO<sub>3</sub>.

- Timpul de priză inițial al unui amestec de 50% zgură granulată de furnal măcinată și 50% ciment de încercat (în masă), în conformitate EN 196-3, nu trebuie să depășească dublul timpului de priză al cimentului.

- Indicele de activitate este raportul (în procente) dintre rezistența la compresiune a prismelor de mortar realizate cu 50% din masa cimentului și 50% din masă zgură granulată de furnal măcinată, și rezistența la compresiune a prismelor de mortar echivalente realizate din 100% ciment, încercate la aceeași vârstă. Rezistența la compresiune trebuie determinată conform EN 196-1 [5], și raportul apa/amestec precum și raportul apa/ciment trebuie să fie 0.50. Indicele de activitate la 7 zile și 28 zile nu trebuie să fie mai mic de 45%, respectiv 70%.

Indicele de activitate nefurnizând nici o indicație directă privind contribuția zgurii granulate de furnal măcinată asupra rezistenței betonului, nici utilizarea zgurii granulate de furnal măcinată nu este limitată la raportul de amestecare utilizat la încercarea indicelui de activitate.

Tabelul I.14. - Criterii de conformitate pentru un rezultat individual [63]

| Nr crt.                                                                                                                                       | Proprietatea                      | Valorile limită pentru rezultatele individuale |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------|
| 1.                                                                                                                                            | Oxid de magneziu                  | 19%                                            |
| 2.                                                                                                                                            | Sulfura                           | 2.5%                                           |
| 3.                                                                                                                                            | Sulfat                            | 3.0%                                           |
| 4.                                                                                                                                            | Pierdere la calcinare             | 3.5%                                           |
| 5.                                                                                                                                            | Clorura*                          | 0.10%                                          |
| 6.                                                                                                                                            | Conținut de umiditate             | 1.5%                                           |
| 7.                                                                                                                                            | Finețe                            | 250                                            |
| 8.                                                                                                                                            | Timp de priza inițial             | De 2.25 ori valoarea cimentului de încercat    |
| 9.                                                                                                                                            | Indicele de activitate la 7 zile  | 40%                                            |
| 10.                                                                                                                                           | Indicele de activitate la 28 zile | 65%                                            |
| * Zgura granulată de furnal măcinată poate conține mai mult de 0.10% clorură, dar în acest caz, trebuie declarat conținutul maxim de clorură. |                                   |                                                |

- Puterea de hidraulicitate a zgurilor se determină prin coeficientul de activitate (α) cu următoarea relație:

$$\alpha = S \times P \times 10^{-3} \quad (\text{I.22})$$

în care: S este suprafața specifică Blaine a părților fine din zgură ( $< 0,08 \text{ mm}$ ), în  $\text{cm}^2/\text{g}$ ;  
P – procentul de părți fine după măcinarea în mori cu bile, în %.

În funcție de valoarea coeficientului  $\alpha$ , zgura se clasifică în clasele prezentate în tabelul I.15.

Tabelul I.15. - Coeficientul de activitate pentru diferite clase de zguri [63]

| Coeficientul de activitate | Tipul zgurii                           |
|----------------------------|----------------------------------------|
| $0 < \alpha < 20$          | Zgură cu reactivitate redusă - clasa 1 |
| $20 < \alpha < 40$         | Zgură reactivă – clasa 2               |
| $40 < \alpha < 60$         | Zgură reactivă – clasa 3               |
| $\alpha > 60$              | Zgură reactivă – clasa 4               |

- Conceptul referitor la coeficientul k

Valoarea coeficientului k este 0,6 fiind recomandată pentru betonul cu zgură granulată măcinată în conformitate cu EN 206 [17], în cazul în care betonul este preparat cu CEM I și CEM II/A în conformitate cu EN 197-1[8]. Se recomandă ca dozajul maxim de zgură granulată de furnal măcinată să fie astfel încât raportul dintre cantitatea de zgură și cantitatea de ciment  $\leq 1,0$  în masă. Dacă se adaugă o cantitate mai mare de zgură granulată de furnal măcinată, cantitatea suplimentară nu va fi luată în considerare nici la calculul raportului (apă+aditiv) / (ciment+ k  $\times$  zgură) și nici pentru dozajul minim de ciment.

## I.2.4. Calcar

### I.2.4.1. Descriere generală



Figura I.9. - Cariera de calcar și calcar brut, prezentare generală.

Calcarul este o rocă sedimentară compusă în mare parte din calcit mineral și/sau aragonit, care sunt forme cristaline de carbonat de calciu ( $\text{CaCO}_3$ ), cu diferite culori (albă, gălbuie sau cenușie). Compoziția mineralogică a calcarului este diferită de la o cariera la alta și chiar în cadrul aceleiași cariere pe zone de zăcămint sau straturi. Conform EN 197-1 [8], adaosul de calcar

---

dozat sub 5% si reprezentând un "component auxiliar minor" intră în componența tuturor tipurilor de ciment, mai puțin la cimenturile CEM II/A, respectiv CEM II/B, și nu este necesară menționarea tipului de calcar "L" de calitate inferioară sau "LL" de calitate superioară în clasele de expunere la îngheț-dezghet (XF), în special.

#### **1.2.4.2. Caracteristicile fizico-chimice ale filerului de calcar**

Calcarul (L,LL) trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- a) Conținutul de carbonat de calciu ( $\text{CaCO}_3$ ) calculat din conținutul de oxid de calciu ( $\text{CaO}$ ) trebuie să fie minimum 75% din masă.
- b) Conținutul de argilă, determinat prin testul cu albastru de metilen în conformitate cu EN 933-9 [15], nu trebuie să depășească 1,20g/100g. Pentru această încercare calcarul trebuie măcinat la o finețe de aproximativ 5000cm<sup>2</sup>/g determinată ca suprafață specifică în conformitate cu EN 196-6 [98].
- c) Conținutul de carbon organic total (TOC), când este determinat în conformitate cu EN 13639 [99], trebuie să respecte unul din următoarele criterii:
  - 1) pentru filerul de calcar LL: trebuie să nu depășească 0,20% din masă;
  - 2) pentru filerul de calcar L: trebuie să nu depășească 0,50% din masă.

Proprietățile fizice ale tuturor cimenturilor EN 197-1 [8] (cu conținut de calcar sau nu) se încadrează în trei clase de rezistență inițială, 32.5, 42.5 și 52.5, care se referă la valoarea inferioară a rezistenței la 28 de zile (Clasa L este aplicabilă numai pentru cimenturile CEM III. Acestea sunt cimenturi de furnal cu rezistență inițială mică). Cimenturile de calcar îndeplinesc aceleași cerințe fizice ca și celelalte tipuri de ciment.

#### **1.2.4.3. Efectele prezentei calcarului in ciment**

Ultimele cercetări din domeniu indică faptul că adaosul de filer de calcar din ciment nu trebuie considerat doar "inert", deoarece s-au constatat consecințe fizice și chimice ale prezenței acestui material în ciment.

- **efectul de filer** sau efectul de umplere (efect fizic) se datorează faptului că particulele cu finețe mare (sub 10μm) din adaosul de filer de calcar se repartizează între granulele de clincher și determinând o altă distribuție granulometrică a amestecului schimbă structura betonului, reducând-i porozitatea, permeabilitatea și absorbția și crescând rezistențele la compresiune și contracțiile acestuia.

- **efectul de generare de centre de nucleație** (efect fizic) este dat tot de particulele minerale fine (între 1...10μm) care înconjoară granulele de clincher ale cimentului și produșii de hidratare ai

---

clincherului precipită pe aceste granule de calcar, determinând o accelerare a reacțiilor clincherului și o viteză mai mare de întărire pe termen scurt.

- **efectul de accelerare a hidratării cimentului** pe termen scurt dat de reacția dintre filerul de calcar LL și aluminatul tricalcic  $C_3A$  (efect chimic) care este reprezentat în procesele de hidratare-hidroliză printr-o creștere a cantității de căldură de hidratare degajată, în prezența carbonatului de calciu (în primele aproximativ 24 ore). Reacția este mai puternică cu cât finețea de măcinare a calcarului este mai mare, cu creșterea proporției de filer calcaros din liant și este practic nesemnificativă la clincherele cu un conținut redus de  $C_3A$  (sub 8%), ca în cazul cimenturilor rezistente la sulfat. Se consideră astfel, că dacă în betonul de ciment Portland, cimentul poate atinge, teoretic, un grad de hidratare de 95%, în cazul cimenturilor compozite, cu calcar, hidratarea fracțiunii de ciment poate fi totală. Dacă efectul de intensificare a hidratării cimentului are ca rezultat pozitivă creșterea rezistențelor mecanice, în corelare cu gradul de hidratare mai mare, prin efectul de diluție a fracțiunii de ciment – componentul activ al liantului - filerul calcaros poate influența negativ rezistențele mecanice ale liantului [15].

---

## CAPITOLUL II.

### CARACTERISTICI ALE CIMENTURILOR SI BETOANELOR, FACTORI DE INFLUENTA, METODE SI PROCEDEE DE INCERCARE, NIVELURI DE PERFORMANTA

Importanța și necesitatea testării betonului rezultă din faptul că se pot confirma/verifica ipotezele de calcul adoptate, se poate verifica respectarea regulilor/procedurilor de execuție și reprezintă un instrument esențial în dezvoltarea programelor de cercetare experimentală pentru noi tipuri de materiale menite să îmbunătățească comportarea elementelor/structurilor. Încercările în construcții pot pune în evidență rezerve de rezistență, pot furniza valori ale unor caracteristici în completarea/verificarea celor care se adoptă în mod convențional, pot confirma sau stabili valori ale unor parametri, pot clarifica concordanța între deducțiile teoretice și comportarea reală. Încercările betonului sunt necesare în faza de proiectare și de concepție, în faza de execuție, cât și în faza finală de verificare confirmând per ansamblu calitatea elementului de beton armat realizat.

Încercările de laborator reprezintă instrumentul ajutor indispensabil în cercetarea comportării betonului armat și fără acestea nu ar fi fost posibil progresul în știința materialelor de construcție și a structurilor. Cercetarea experimentală presupune un număr foarte mare de teste pentru a face posibilă prelucrarea statistică a diverselor încercări, respectarea anumitor reguli de timp și de calitate foarte precise și implică cheltuieli materiale mari.

#### II.1. Încercări pe paste de ciment

Cimentul își manifesta influența asupra proprietăților betonului prin calitate (compoziție mineralogică, suprafață specifică, rezistențe mecanice) și prin dozaj ( $\text{kg ciment/m}^3$  beton proaspăt).

##### Consistența pastei de ciment

Conform prevederilor EN 196-3 [7] se consideră că o pastă de ciment are consistența standard când acul plonjorului aparatului Vicat pătrunde în pasta până la o distanță de  $6+1\text{mm}$  de partea inferioară a formei. Conținutul de apă al pastei de ciment standard se exprimă în procente din greutatea pulberii de ciment uscat, între 26 și 33%.

##### Timpul de priză

**Priza inițială** (timpul scurs din momentul amestecării apei cu cimentul)

- când pasta s-a rigidizat parțial astfel încât acul aparatului Vicat pătrunde numai până la o distanță de  $5+1\text{mm}$  de partea inferioară a formei se consideră că s-a consumat timpul de priză inițială [90];

---

- standardul EN 197-1 [8] prescrie pentru cimenturi cu rezistențe mecanice până la 42.5 MPa un timp de minim 60 minute pentru cimentul Portland normal și de minim 45 minute pentru cimenturi cu rezistențe inițiale mari.

**Priza finală** (timpul scurs din momentul amestecării apei cu cimentul)

- priza finală se consideră că a avut loc dacă acul aparatului Vicat pătrunde în pasta de ciment numai 0.5 mm [90]. Întrucât timpul de priza al cimentului este influențat de temperatura și umiditatea mediului înconjurător, aceste condiții sunt specificate în EN 196-3 [7] temperatura de  $20 \pm 2$  °C și o umiditate relativă a aerului de minimum 65%.

**Constanța de volum**

- este important că o pastă de ciment, odată ce a făcut priza să nu sufere schimbări mari de volum, nu trebuie să apară fenomene de expansiune, care în anumite condiții duc la deteriorarea pietrei de ciment.

- o astfel de expansiune poate avea loc datorită hidratării lente sau întârziate dar și a altor reacții ale unor constituenți prezenți în cimentul întărit, cum sunt calcea liberă CaO, magnezia MgO și sulfatul de calciu (sare a calciului cu acidul sulfuric cu formula chimică  $\text{CaSO}_4$ ).

**Rezistența mecanică a cimentului**

În standarde sunt indicate diferite tipuri de solicitări pentru aprecierea rezistenței mecanice a cimentului dintre care se precizează: compresiune centrică, întindere centrică și încovoiere (se determină rezistența la întindere din încovoiere). EN 196-1 [5] prevede o metoda de determinare a rezistenței la compresiune pe epruvete de mortar sub forma de cuburi cu dimensiunea laturii de 40 mm confecționate cu raportul ciment/nisip de 1/3 și raportul apa/ciment 0.5. Conform aceleiași prescripții EN 196-1 [5] rezistența minimă reprezintă o valoare caracteristică care să fie depășită de un număr de încercări reprezentând 95% din totalul rezultatelor.

## **II.2. Încercări pe beton în stare proaspătă. Determinări asupra proprietăților fizice**

Betonul proaspăt reprezintă starea acestuia din momentul amestecării componentelor până la punerea în lucrare, care se consideră încheiată înainte de începutul prizei. Pe betonul proaspăt se pot efectua încercări în laborator cu scopul de a se determina:

- consistența (lucrabilitatea);
- gradul de compactare, determinare în conformitate cu SR EN 12350-4 [9];
- densitatea aparentă, determinare în conformitate cu SR EN 12350-6 [11] ;
- conținut de aer, determinare în conformitate cu SR EN 12350-7 [12];
- timpul de priză.

---

Pentru betonul autocompactant se poate determina vâscozitatea aparentă, abilitatea de trecere și rezistența la segregare conform standardelor specifice din seria de standarde SR EN 12350. Determinările enumerate se vor efectua la un interval de timp de maxim o oră de la prepararea betonului, excepție făcând determinarea consistenței care trebuie efectuată după maximum 20 de minute din momentul terminării operațiunii de amestecare a betonului. Pentru evaluarea proprietăților betoanelor în special cele ale betonului proaspăt, trebuie luate în considerare diferențele dintre tipul de amestecare și condițiile de amestecare utilizate pentru încercările inițiale și cele utilizate pentru producția curentă.

În funcție de locul unde se prepară betonul (laborator, șantier sau stație de betoane) probele analizate vor fi reprezentative, luate din puncte diferite, omogene și ferite de acțiunea directă a agenților atmosferici.

### **II.2.1. Lucrabilitatea (consistența)**

Lucrabilitatea – exprimă proprietatea betonului de a umple cofrajele sau tiparele și de a îngloba armăturile bine și ușor cu ajutorul unui mijloc de compactare cu o cheltuială minimă de energie și forță de muncă, precum și aptitudinea de a conserva omogenitatea amestecului în timpul transportului, manipulării și punerii sale în lucrare [90].

Factorii de influență ai lucrabilității betonului sunt:

- ✓ forma, mărimea granulelor și compoziția granulometrică a agregatelor, inclusiv volumul de materiale pulverulente (cu dimensiuni sub 0.125 mm);
- ✓ natura, compoziția mineralogică (proporția de silicat tricalcic  $C_3S$ ) finețea de măcinare a cimentului, dozajul de ciment și de adaos (kg ciment/m<sup>3</sup> beton proaspăt) și raportul a/c;
- ✓ aditivii utilizați cum ar fi: super plastifianți, reducători de apă și antrenatori de aer;
- ✓ volumul de aer antrenat.

Consistența este capacitatea de mobilitate a betonului proaspăt sub acțiunea masei proprii sau a unor forțe exterioare și reprezintă un criteriu de apreciere a lucrabilității.

Lucrabilitatea este apreciată convențional și aproximativ prin metode de determinare a consistenței betonului proaspăt cum ar fi:

- metoda răspândirii, determinare în conformitate cu SR EN 12350-5 [10];
- metoda tasării trunchiului de con, determinare în conformitate cu SR EN 12350-5 [10];
- metoda vâscozimetrului tip Powers, determinare în conformitate cu SR EN 12350-2 [13];
- metoda vâscozimetrului tip VEBE, determinare în conformitate cu SR EN 12350-3 [14].

*Metoda răspândirii* se utilizează la betoanele preparate cu agregate având dimensiunea maximă a granulelor de 40 mm și cu consistența slab plastică, plastică, fluidă și foarte fluidă. Încercarea propriu-zisă constă în umplerea trunchiului de con (cu dimensiuni standardizate) cu

beton, așezat pe masa de răspândire în interiorul cercului trasat și, după îndepărtarea tiparului, măsurarea diametrului turtei de beton rezultat după ce în prealabil au fost efectuate 15 ridicări și căderi libere de la înălțimea de 4 cm, la interval de o secundă. Media celor două valori ( $d$  și  $d_1$ ) exprimată în cm reprezintă răspândirea betonului. În timpul efectuării încercării, la marginea turtei de beton nu trebuie să se separe granulele mari de agregat sau laptele de ciment și trunchiul de con din beton nu trebuie să se fragmenteze ci să se răspândească uniform.

În metoda *tasării*, consistența se exprimă prin diferența ( $h$ , în cm) între înălțimea unui trunchi de con (din tablă) cu înălțimea de 30 cm umplut cu betonul de încercat și înălțimea betonului tasat sub greutatea proprie, după ce tiparul a fost ridicat. Metoda tasării se utilizează la betoanele preparate cu agregate cu dimensiunea maximă a granulelor de 40 mm și cu consistența foarte vâtoasă, vâtoasă, slab plastică, plastică și fluidă. (Dacă se folosesc agregate cu dimensiunea maximă a granulelor de 100 mm se utilizează trunchiul de con cu înălțimea de 45 cm).

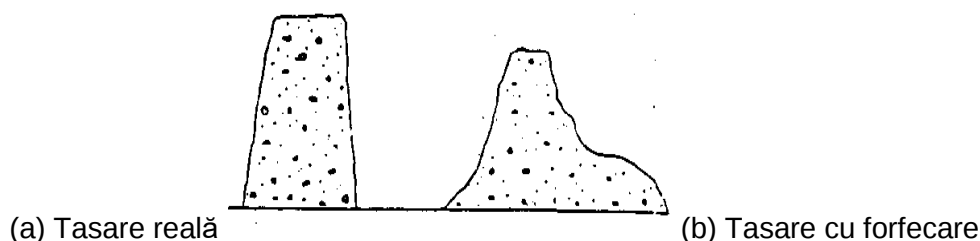


Figura II.1. - Forme de tasare [16]

Dacă se produce o prăbușire sau o rupere parțială a betonului pe o porțiune din masa epruvetei, nu se ia în considerare încercarea și se repetă determinarea pe o nouă probă de beton. Dacă și la a doua încercare se produce același fenomen, sau dacă tasarea este mai mică de 10 mm, lucrabilitatea betonului se apreciază prin altă metodă.

*Metoda vâscozimetrlui de tip Powers* se utilizează la betoanele preparate cu agregate cu dimensiunea maximă a granulelor de 40 mm și cu consistența foarte vâtoasă, vâtoasă, slab plastică și plastică. Metoda vâscozimetrlui de tip Powers presupune aprecierea lucrabilității în funcție de numărul de șocuri sau secunde necesare pentru modificarea formei unei probe de beton aflată pe o masa de împrăștiere. În această încercare, forma betonului se modifică din trunchi de con în cilindru, iar efortul necesar pentru a obține această reformare este reprezentat de numărul de căderi aplicate de platan.

*Metoda vâscozimetrlui de tip VE-BE* este o perfecționare a metodei reformării în care compactarea se realizează prin vibrare în loc de cădere liberă a platanului. În metoda remodelării VE-BE, consistența se exprimă prin durata de vibrare (în secunde) necesară unui volum de beton proaspăt, cu forma de trunchi de con și apăsător de un disc cu masa normată, să se remodeleze la forma cilindrică, umplând complet un recipient cilindric.

Lucrabilitatea influențează direct caracteristicile mecanice ale betonului întărit, omogenitatea, comportarea la îngheț-dezgheț, aderența la armătură, etc.

## II.2.2. Grad de compactare

Gradul de compactare reprezintă raportul între densitățile aparente maximă (după compactare) și minimă (la turnare) ale betonului.

Gradul de compactare Walz reprezintă raportul dintre înălțimea unui recipient paralelipipedic (cu secțiunea  $S$  constantă), umplut cu beton și înălțimea betonului după compactarea prin vibrare, până când nivelul acestuia în vas nu mai scade și la suprafață numai apar bule de aer [90].

$$G_c = \frac{\rho_{a \max}}{\rho_{a \min}} = \frac{\frac{m}{V_{a \min}}}{\frac{m}{V_{a \max}}} = \frac{V_{a \max}}{V_{a \min}} = \frac{SH}{Sh} = \frac{H}{H-\Delta h} \quad (\text{II.1.})$$

unde:  $\rho_{a \max}$  și  $\rho_{a \min}$  - densitatea aparentă maximă și respectiv minimă a betonului;

$V_{a \min}$  și  $V_{a \max}$  - volumul minim și maxim ocupat de beton;

$H$  - înălțimea recipientului umplut cu beton;

$h$  - înălțimea betonului din recipient după compactarea prin vibrare.

Gradul de compactare  $G_c$  este, întotdeauna, supraunitar, cu atât mai mic cu cât betonul este mai fluid, deci, cu cât acesta poate fi compactat cu consum de energie mai mic.

Clasificarea betoanelor în funcție de caracteristica fizico-mecanică numită consistență presupune următoarele nivele de performanță: - beton foarte vârtos

- beton vârtos

- beton plastic

- beton slab plastic

- beton fluid

- beton foarte fluid.

1) Betonul vârtos care, strâns în mână, umezește palma, formând un cocoloș consistent; frecat cu mistria prezintă un luciu caracteristic, cu aspect de pământ umed, se desface ușor la manipulare, nu separă apa de amestecare și umple cofrajul numai printr-o compactare energetică. Acest beton este greu lucrabil, însă compactat printr-o vibrare puternică, capătă rezistențe mecanice foarte mari el poate fi utilizat în fundații de beton simplu, elemente masive de beton armat și la îmbracămințile de drumuri.

2) Betonul plastic - strâns în mână, formează un cocoloș care se împrăștie după ce se desface palma, având o bună coeziune își păstrează omogenitatea în timpul transportului și manipulării și umple cofrajul în urma compactării adecvate. Acest beton are utilizarea cea mai largă în suprastructura construcțiilor din beton armat monolit și la execuția prefabricatelor.

3) Betonul fluid - strâns în mână curge, segregându-se, curge pe jgheaburi înclinate, iar la turnarea în cofraje pentru compactare este necesară numai înțeparea cu vergeaua sau o ușoară

batare în cofraje. Din cauza conținutului mare de apă se lucrează ușor, însă excesul de apă, după evaporare, lasă în beton goluri care-i măresc porozitatea și îi reduc rezistența mecanică. Utilizarea lui nu este recomandabilă decât în elemente cu solicitări reduse și neexpuse la intemperii.

Tabelul II.1. - Nivelurile de performanță pentru determinarea lucrabilitatii betonului [17]

| Tasarea, încercare în conformitate cu EN 12350-2 [13] |           | Remodelare Ve-Be |               | Compactare, încercare în conformitate cu EN 12350-4 [9] |                      | Răspândire, încercare în conformitate cu EN 12350-5[10] |                          |
|-------------------------------------------------------|-----------|------------------|---------------|---------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------|
| Clasa de tasare                                       | Tasare mm | Clasa Ve-be      | Ve-be secunde | Clasa de compactare                                     | Indice de compactare | Clasa de răspândire                                     | Diametrul răspândirii mm |
| S <sub>1</sub>                                        | 10...40   | V <sub>0</sub>   | >31           | C <sub>0</sub>                                          | >1.46                | F <sub>1</sub>                                          | ≤340                     |
| S <sub>2</sub>                                        | 50...90   | V <sub>1</sub>   | 30...21       | C <sub>1</sub>                                          | 1.45...1.26          | F <sub>2</sub>                                          | 350...410                |
| S <sub>3</sub>                                        | 100...150 | V <sub>2</sub>   | 20...11       | C <sub>2</sub>                                          | 1.25...1.11          | F <sub>3</sub>                                          | 420...480                |
| S <sub>4</sub>                                        | 160...210 | V <sub>3</sub>   | 10...6        | C <sub>3</sub>                                          | 1.10...1.04          | F <sub>4</sub>                                          | 490...550                |
| S <sub>5</sub>                                        | >210      | V <sub>4</sub>   | 5...3         | C <sub>4</sub>                                          | <1.04                | F <sub>5</sub>                                          | 560...620                |
|                                                       |           |                  |               |                                                         |                      | F <sub>6</sub>                                          | ≥630                     |

Nota: Clasa de compactare C4 se aplică numai betonului cu agregate ușoare.

În normativul NE 012-1 [3] sunt menționate explicit valorile toleranțelor admisibile în funcție de metoda folosită pentru a determina consistența betonului.

Tabelul II.2. - Toleranțe ale valorilor specificate pentru consistență [3]

| Tasare                                |                |                         |        |
|---------------------------------------|----------------|-------------------------|--------|
| Interval de valori specificate        | ≤ 40           | de la 50 până la 90     | ≥ 100  |
| Toleranțe, în mm                      | ± 10           | ± 20                    | ± 30   |
| Timp Vebe                             |                |                         |        |
| Interval de valori specificate, în s  | ≥ 11           | de la 10 până la 6      | ≤ 5    |
| Toleranțe, în s                       | ± 3            | ± 2                     | ± 1    |
| Grad de compactare                    |                |                         |        |
| Interval de valori specificate        | ≥ 1,26         | de la 1,25 până la 1,11 | ≤ 1,10 |
| Toleranțe                             | ± 0,10         | ± 0,08                  | ± 0,05 |
| Răspândire (întindere)                |                |                         |        |
| Interval de valori specificate, în mm | toate valorile |                         |        |
| Toleranțe, în mm                      | ± 30           |                         |        |

---

### II.2.3. Densitate aparentă

Densitatea aparentă se determină prin măsurarea masei unui volum cunoscut ( $1\text{m}^3$ ) de beton proaspăt compactat în condiții similare punerii în lucrare. Constituie parametrul de proiectare pentru cofraje și susținerile tehnologice, care trebuie să suporte greutatea betonului până când acesta ajunge la rezistențe suficiente pentru ca elementul realizat să poată prelua încărcarea din greutate proprie [90].

$$\rho_a = \frac{m_1 - m}{V} \text{ (kg/m}^3 \text{ sau g/cm}^3 \text{)}, \quad (\text{II.2.})$$

unde:  $m_1$  - masa tiparului umplut cu beton (kg);

$m$  - masa tiparului gol (kg);

$V$  - volumul tiparului ( $\text{m}^3$ ).

Densitatea aparentă constituie, de asemenea, unul dintre parametrii de verificare a rețetei betonului: între valoarea experimentală și valoarea teoretică a acesteia (calculată ca sumă a dozajelor materialelor componente) se admite o diferență de cel mult  $50 \text{ kg/m}^3$ , diferențe mai mari indicând erori în calculul compoziției betonului. Raportând valoarea densității aparente a betonului, compactat printr-o metodă oarecare, la valoarea obținută ca la metoda Walz, se calculează un factor de compactare prin care se poate aprecia eficacitatea metodei de compactare aplicată. Densitatea aparentă a betonului proaspăt este un indice important de calitate, întrucât se corelează cu alte caracteristici cum ar fi: compactitatea, rezistențele mecanice, permeabilitatea, gelivitatea.

### II.2.4. Conținut de aer, metoda volumetrică cu presiune

Conținutul de aer reprezintă aerul antrenat în structura betonului în timpul preparării și care, după compactare, rămâne sub formă de bule fine, dispersate în matrice. Conținutul de aer influențează favorabil formarea structurii betonului întărit în condițiile în care, după compactare, volumul lui nu depășește proporția de (5 ... 7)% din volumul aparent al betonului; peste această proporție, influențele defavorabile ale reducerii compactității asupra caracteristicilor betonului întărit devin preponderente, în special asupra rezistențelor mecanice ale betonului.

Verificarea este necesară mai ales în cazul utilizării unui aditiv plastifiant antrenor de aer, care poate antrena o cantitate de aer mai mare decât cea admisibilă. Determinarea cantității de aer oclus se poate face prin mai multe metode: metoda volumetrică cu presiune sau metoda gravimetrică, metoda volumetrică fără presiune. Metoda de determinare a conținutului de aer oclus se bazează pe echilibrarea presiunilor dintre două incinte, măsurând scăderea presiunii aerului dintr-o cameră de presiune când acesta este pusă în legătură cu un vas de volum cunoscut, umplut cu beton proaspăt, compactat.

Aerul antrenat se stabilește conform fiselor tehnice ale aditivilor și funcție de diametrul maxim al agregatului.

Tabelul II.3. - Valori minime ale aerului antrenat funcție de dimensiunea maxima a agregatelor [3]

|                              |   |   |    |    |    |     |    |     |     |     |
|------------------------------|---|---|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|
| $\Phi_{\max}$ agregat (mm)   | 4 | 8 | 10 | 16 | 20 | 31  | 40 | 63  | 80  | 90  |
| Aer antrenat ( $\pm 0.5\%$ ) | 3 | 6 | 6  | 5  | 5  | 4.5 | 4  | 3.6 | 3.4 | 3.3 |

## II.2.5. Timp de priză

Priza betonului este o caracteristică neconvențională a amestecului proaspăt, fiind definită ca perioada de tranziție între „starea de beton proaspăt” și „starea rigidă” a materialului. Priza betonului este determinată de creșterea vâscozității așa cum rezultă din figura II.2. Începutul prizei corespunde timpului la care betonul nu mai răspunde compactării.

Sfârșitul prizei corespunde timpului la care devine posibilă determinarea rezistențelor mecanice; în acest moment betonul capătă formă și volum practic constante. Priza betonului este controlată de priza cimentului. Timpul de început de priză este marcat de începutul degajării căldurii de hidratare-hidroliza a cimentului, iar sfârșitul de priză coincide cu momentul maximului de căldură degajată. Practic, aprecierea prizei se poate realiza prin determinarea aderenței beton-armatură pe baza forțelor necesare smulgerii.

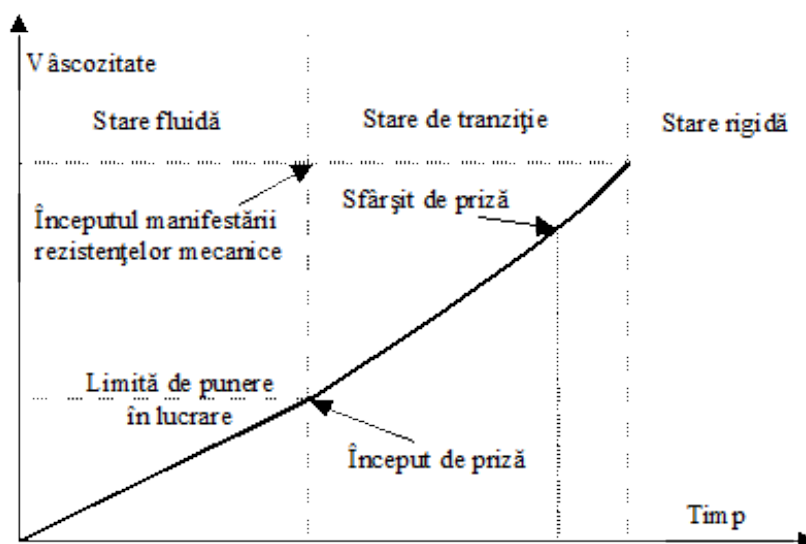


Figura II.2. - Evoluția în timp a betonului proaspăt [18]

După terminarea prizei, betonul se consideră în curs de întărire, stare ce durează, convențional, până la atingerea rezistențelor nominale (28 zile). În aceasta perioadă factorii de mediu (temperatură, umiditate, acțiuni mecanice) au o influență pronunțată asupra evoluției ulterioare a proprietăților, atât pozitivă cât și negativă, în funcție de natura lor.

Durata maximă posibilă de transport depinde în special de compoziția betonului, condițiile atmosferice și timpul de priză. Durata de transport se consideră din momentul încărcării mijlocului de transport și sfârșitul descărcării acestuia și nu poate depăși valorile orientative prezentate în tabelul de mai jos, pentru cimenturi de clasa 32,5/42,5 decât dacă se utilizează aditivi întârziatori

de priză. Se recomandă că durata maximă de transport a betonului în bene cu auto agitatoare să nu depășească valorile indicate în tabelul II.4.

Tabelul II.4. - Durata maximă de transport a betonului cu auto agitatoare [4].

| Temperatura amestecului de beton ( °C)        | Durata maximă de transport (minute) |                         |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
|                                               | Cimenturi cu clasa 32.5             | Cimenturi cu clasa 42.5 |
| $10^{\circ}\text{C} < t < 30^{\circ}\text{C}$ | 50                                  | 35                      |
| $t < 10^{\circ}\text{C}$                      | 70                                  | 50                      |

La transportul betonului se vor lua măsuri pentru limitarea la minimum a pierderilor de căldură ale betonului prin: evitarea distantelor mari de transport, a staționărilor, a transbordărilor betonului, iar în cazul transportului cu bene sau autobasculante, acestea vor fi acoperite cu prelate.

### II.3. Încercări pe beton întărit

Betonul întărit este un material compozit, cu o structură complexă, compusă din matrice și agregat. Multe din aspectele comportării betonului pot fi explicate numai prin tratarea interfeței agregat - pastă de ciment ca o a treia fază din structura betonului - zona de tranziție. Structura betonului nu este stabilă, deoarece atât structura pastei de ciment, cât și cea a zonei de tranziție suferă schimbări în timp, datorită condițiilor de mediu - temperatură și umiditate.

Betonul întărit are o structură complexă formată din:

- Faza solidă - compusă din agregate și piatra de ciment, care la rândul ei este formată din produși cristalini și gelici cât și din nuclee de ciment nehidratate.
- Faza lichidă - compusă din apa din betonul întărit care se găsește ca: apa de hidratare, apa absorbită în geluri, apa din porii capilari.
- Faza gazoasă - se găsește în porii capilari sub forma de aer sau alte gaze.

Pentru determinarea proprietăților betonului întărit se folosesc epruvete de forme cubice, cilindrice, prismatice, în funcție de determinare.

#### 1. Verificarea proprietăților fizice:

- determinarea densității aparente a betonului - metoda prin cântărire, determinare conform SR EN 12390-7 [23];
- determinarea compactității (porozității aparente) betonului;
- determinarea permeabilității betonului (adâncimea de pătrundere a apei sub presiune), determinare conform SR EN 12390-8 [22];

#### 2. Determinări asupra proprietăților de deformare ale betonului:- determinarea contracției axiale a betonului (metoda cu aparat tip Graf), determinare în conformitate cu SR 2833 [24];

---

- determinarea modului de elasticitate secant la compresiune, determinare în conformitate cu SR EN 12390-13 [25];

3. Stabilirea rezistentelor mecanice ale betonului:

- rezistența la compresiune a betonului, determinare în conformitate cu SR EN 12390-3 [21];

- rezistența la întindere prin încovoiere a betonului, determinare în conformitate cu SR EN 12390-5 [26];

- rezistența la întindere prin despicare a betonului, determinare în conformitate cu SR EN 12390-6 [27].

4. Determinarea aderenței dintre beton și armatură. Metoda prin smulgere, determinare în conformitate cu SR 5511 [28] și SR EN 12504-3 [29].

### II.3.1. Densitatea aparentă

Materialele poroase cum ar fi betoanele sunt caracterizate prin densitatea aparentă sau masa volumică:

$$\rho_a = \frac{m}{V_a} \text{ (kg/m}^3 \text{ sau g/cm}^3\text{)} - \text{densitatea aparentă} \quad (\text{II.3.})$$

$$\gamma = \frac{G}{V} \text{ (kN/m}^3\text{)} - \text{greutatea specifică} \quad (\text{II.4.})$$

unde  $V_a$  este volumul aparent al materialului uscat care conține pori închiși (impermeabili) și pori deschiși (permeabili);

$$V_a = V + V_{\text{pori}} \quad (\text{II.5.})$$

$V$  - volumul fazei solide

$$\rho_a = \frac{m}{m_1 - m_2} \rho_w \text{ (kg/m}^3 \text{ sau g/cm}^3\text{)} \quad (\text{II.6.})$$

unde:  $m$  este masa probei în stare uscată;

$m_1$  - masa probei saturată cu apă, cântărită în aer;

$m_2$  - masa proba saturată cu apă, cântărită în apă;

Densitatea aparentă a betonului întărit,  $\rho_a$ , se determină pe corpurile de probă pregătite pentru determinarea rezistențelor mecanice, epruvete cubice sau cilindrice realizate conform SR EN 12390-1[19]. Deoarece betonul are capacitatea de a ceda sau absorbi apă, densitatea aparentă se poate determina atât în stare uscată cât și de umiditate naturală. Densitatea betonului este deci influențată de densitatea agregatelor, a cimentului și de volumul de goluri — care este funcție de raportul a/c, de modul de compactare și, eventual, de unele tratamente speciale care sporesc volumul de goluri pentru a-i mări capacitatea de izolare termică.

Astfel, cantitatea de ciment folosită la preparare influențează densitatea aparentă și implicit compactitatea și porozitatea. Se constată că densitatea aparentă are valoarea maximă la dozajul de ciment de 300...400 kg/mc când pasta de ciment și respectiv piatra de ciment umplu toate golurile dintre granulele de agregat. În situația în care dozajele de ciment sunt mai mici decât cele optime, pasta (piatra) de ciment este insuficientă și nu umple toate golurile dintre granule, rezultând un beton poros și cu densitate aparentă mai mică. Când dozajul de ciment îl depășește pe cel optim, pasta (piatra) este în cantitate mare și se interpune în spațiile dintre granule, reducând cantitatea de agregat ce revine pe 1 mc de beton. Cum pasta (piatra) de ciment are o densitate aparentă mai mică decât a agregatelor, rezultă un beton cu o densitate aparentă mai mică.



Figura II.3. - Variația densității aparente a betonului cu dozajul de ciment [31]

Nivelurile de performanță pentru densitatea aparentă a betonului întărit la 28 de zile în stare uscată sunt:

- betoane foarte grele ( $\rho > 2500 \text{ kg/mc}$ )
- betoane grele ( $2201 \text{ kg/mc} < \rho < 2500 \text{ kg/mc}$ )
- betoane semi-grele ( $2001 \text{ kg/mc} < \rho < 2200 \text{ kg/mc}$ )
- betoane ușoare ( $1001 \text{ kg/mc} < \rho < 2000 \text{ kg/mc}$ )
- betoane foarte ușoare ( $\rho < 1000 \text{ kg/mc}$ ).

### II.3.2. Compactitatea (porozitatea)

O mare importanță trebuie acordată dimensiunilor porilor prezenți în structura pietrei de ciment deoarece la porozități egale, dimensiunea diferită a porilor face ca și comportarea betonului față de agenții agresivi să prezinte diferențe notabile. Astfel, cu cât porii sunt mai fini, cu atât apa penetrează mai greu în structura betonului. Proprietățile betonului sunt influențate în mod esențial de valoarea porozității totale, precum și de natura, mărimea (diametre cuprinse între  $0.003\mu\text{m}$  și  $1\text{mm}$ ) și distribuția porilor.

Porozitatea betonului este formată din:

- ❖ pori de geluri (microporii datorati efectului aditivilor antrenori de aer) – cu dimensiunea de regula sub  $0.1\mu\text{m}$ , greu accesibili apei lichide;
- ❖ pori capilari (deschiși, de trecere) – cu dimensiuni mai mari de  $1\mu\text{m}$ , cu proprietăți hotărâtoare asupra tuturor caracteristicilor betonului; ei sunt uniform răspândiți în piatra de ciment, iar pe parcursul întăririi se vor umple parțial cu noile produse de hidratare. Sunt pori deschiși și iau naștere prin evaporarea surplusului de apă de amestecare, care nu participă la procesul de hidratare și reprezintă circa 10-15% din volumul betonului. Porozitatea aparentă a betonului este data de "porii de trecere" care comunica între ei prin canale sinuoase suficient de largi prin care să poată pătrunde fluidele și au legătură și cu suprafața exterioară a betonului;
- ❖ pori sferici - cu aer antrenat la amestecarea betonului sau datorită aditivilor antrenori de aer au dimensiuni de  $10\text{-}300\mu\text{m}$ , sunt pori închiși sau în legătură cu porii capilari, reprezentând 1-3% din volumul masei de beton. Acest volum de pori poate fi sporit cu ajutorul aditivilor, care dau pori sferici închiși în proporție de 3-7% din volumul betonului.
- ❖ porii de sub agregate –sunt pori închiși și rezultă din evaporarea apei de sub agregate, care cuprind eventual goluri de aer.
- ❖ Cavernele-sunt goluri deschise, putând comunica între ele, volumul lor poate atinge 5% din volumul betonului.
- ❖ Porii mari de sub agregate și cavernele reprezintă goluri mai mari de 1 mm care pot ajunge și pana la 10 mm și aparțin defectelor de structură; volumul lor trebuie limitat prin proiectarea compoziției și prin tehnologia de punere în operă a betonului.
- ❖ Microfisurile și fisurile –apar în structura fazei hidratate și iau naștere ca urmare a modificărilor de volum a betonului în timpul prizei (contractia la uscare) și întăririi care se amplifică în timp datorită variațiilor de temperatura și umiditate (modificări care creează eforturi interne).

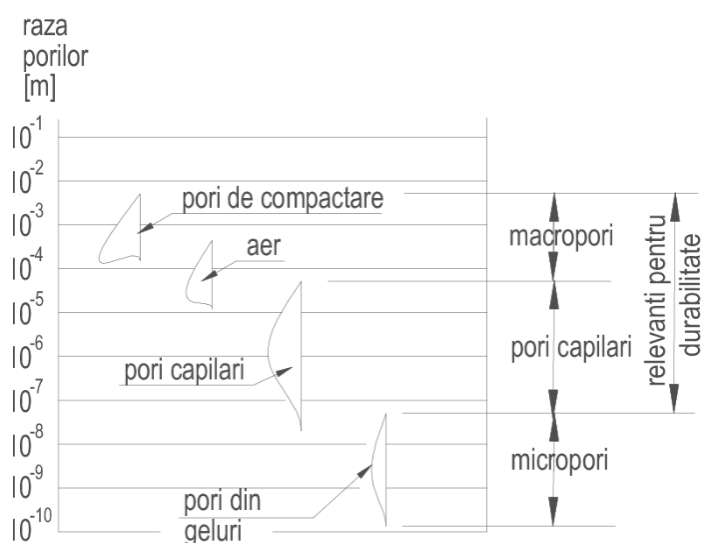


Figura II.4. - Clasificarea porilor din piatra de ciment [30]

Prin folosirea aditivilor antrenori de aer se poate dirija, în mod corespunzător, volumul, dimensiunea și distribuția aerului antrenat, cu consecințe favorabile asupra gradului de impermeabilitate, a rezistenței la îngheț-dezgheț repetat, a rezistenței la acțiuni chimice agresive, conductivitate termică, etc. Toate încercările de a stabili relații de dependență a rezistenței mecanice de factori de compoziție și structură ajung, într-o formă simplificată, la stabilirea unor relații între rezistența și porozitate. Pentru asigurarea unei compactități maxime și a unei structuri cât mai omogene, condiții esențiale pentru betoane de rezistență, compoziția betonului judicios stabilită, trebuie corelată cu mijloacele optime de compactare și cu măsuri pentru asigurarea condițiilor favorabile de întărire.

Porozitatea betonului întărit reprezintă volumul de goluri din unitatea de volum și se deosebesc astfel două categorii de porozitate:

- porozitatea totală  $P$ , este dată de volumul ocupat de porii impermeabili (închiși, care nu comunică cu exteriorul, discontinui, inactivi, pori ai gelurilor sau cei rezultați din antrenarea aerului) care reprezintă porozitatea închisă  $P_i$  și de porii permeabili (deschiși, care comunică cu exteriorul) care reprezintă porozitatea aparentă  $P_{ap}$ .

$$P = P_i + P_{ap}$$

$$P = \frac{V_{pori}}{V_a} 100 = \frac{V_a - V}{V_a} 100 \quad (II.7.)$$

$$P = \left(1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{C}{100}\right) 100 = 100 - C \quad (II.8.)$$

unde:  $\rho = \frac{m}{V}$  și reprezintă densitatea absolută a materialului solid;

$(V_a - V)$  - volumul tuturor porilor (închiși și deschiși);

$V_a$  - volumul aparent al materialului solid ( $V_a = V + V_{pori}$ );

$V$  - volumul fazei solide;

$\rho_a$  - densitatea aparentă a materialului solid;

$C$  - compactitatea materialului solid.

$$P_{ap} = \frac{m_2 - m_1}{\rho_{apa} m_1} \rho_{ap} 100 \quad (II.9.)$$

în care:  $m_1$  - masă beton uscat (g)

$m_2$  - masa betonului saturat cu apă (g)

$\rho_{apa}$  - densitatea apei ( $1 \text{ g/cm}^3$ )

$\rho_{ap}$  - densitatea aparentă a betonului ( $\text{g/cm}^3$ )

Din punct de vedere al rezistențelor mecanice, al impermeabilității la apă, al gelivității și al durabilității, cea mai mare importanță o are porozitatea aparentă care trebuie să fie cât mai

---

redușă. Porozitatea capilară a pietrei de ciment influențează în mod esențial durabilitatea și valoarea ei trebuie asociată neapărat cu cele ale permeabilității și absorbției betonului.

În practică nu se pot realiza betoane cu compactitate 100% datorită structurii microporoase și microfisurate a betonului. În mod convențional, un beton se consideră compact când porozitatea totală este 5–7%. Porozitatea totală a unui beton bine realizat este în jur de 12% din volumul său repartizată astfel:

|                                                  |     |
|--------------------------------------------------|-----|
| - porii agregatelor                              | 8%  |
| - porii datorati tasării                         | 1%  |
| - porii datorati capilarității și apei evaporate | 3%. |

Finețea porilor betonului întărit este influențată de diverși factori ce țin de compoziția betonului sau de mediul exterior:

- ✓ Cantitatea de ciment folosită la preparare și tipul cimentului (dozajul de adaos mineral) influențează densitatea aparentă și implicit compactitatea și porozitatea.

Ca și densitatea aparentă, porozitatea are o valoare minimă la un dozaj optim de ciment de 300-400 Kg/m<sup>3</sup> când pasta de ciment umple toate golurile dintre granulele de agregat.

- ✓ Raportul apa/ciment influențează în mod hotărâtor densitatea, compactitatea și porozitatea betonului.

La un raport apa/ciment mare rezultă un beton poros cunoscând că orice surplus de apă se evaporă lăsând în urma ei goluri de aer, beton cu densitate aparentă mică și cu compactitate mică, iar la un raport mic rezultă un beton cu lucrabilitate redusă și cu volum de goluri mare.

- ✓ Stadiul hidratării

În procesul hidratării cimentului, volumul porilor capilari scade datorită obturării lor cu produși de reacție, odată cu evoluția gradului de hidratare al pastei de ciment.

- ✓ Agregatele influențează cele trei caracteristici ale betonului, mai ales prin natura mineralogică și granulozitatea lor: creșterea cantității de fracțiuni fine necesită apă în exces și odată cu creșterea raportului apa/ciment sunt influențate negativ rezistențele mecanice.
- ✓ Modul de punere în operă corespunzător astfel încât să nu rămână goluri sub/între armături și/sau între acestea și cofraj, o compactare corectă prin vibrare precum și o tratare ulterioară la execuție sunt factori esențiali pentru asigurarea compactității.
- ✓ Natura și dozajul adaosurilor minerale din ciment și din beton.

Nivelurile de performanță din punct de vedere al compactității betonului sunt:

- **beton compact** are un volum de goluri de 5—7% din volumul total. Acesta se obține printr-o compactare energică și respectând compoziția granulometrică a agregatelor utilizate la prepararea betonului în conformitate cu indicațiile din NE 012-1. Cu acest beton se execută toate elementele de rezistență ale construcțiilor.

- **beton semicompact** prezintă un volum de goluri de 7...10% se obține din agregate lipsite parțial de partea fină. Acestea se utilizează în elementele de beton simplu cu solicitări mici (de

exemplu: pereții construcțiilor cu înălțime redusă), dar care trebuie să realizeze și o izolare termică.

- **beton macroporos** are un volum mare de goluri de 20...40%, realizat cu agregate fără partea fină. Acesta este utilizat ca beton termoizolant sau drenant.

- **beton celular** în care golurile de aer ajung până la 75% din volumul total. Din beton celular se fabrică în mod obișnuit plăci și blocuri folosite pentru zidării termoizolatoare, izolări de terase, sau intră în componenta unor panouri de pereți exteriori. Se mai folosesc și pentru realizarea unor panouri de planșee de acoperiș din beton armat, care au și rol de rezistență și de termoizolare.

### II.3.3. Permeabilitatea betonului (adâncimea de pătrundere a apei sub presiune)

Permeabilitatea este caracterizată prin ușurința de pătrundere a apei, căldurii, gazelor sau radiațiilor în masa betonului. Permeabilitatea la apa este determinată de porozitate, distribuția, dimensiunile și tipul porilor (închiși, interconectați), de (micro)fisurile pietrei de ciment și a agregatelor. Dacă betonul are o porozitate mare și porii interconectați permit circulația fluidelor prin beton va rezulta în consecință o permeabilitate mare a betonului respectiv; în schimb, dacă porii sunt discontinui și nu favorizează circulația fluidelor prin beton, obținem o permeabilitate mică a betonului. Aceasta proprietate este influențată de natura și dozajul în ciment (creșterea dozajului reduce permeabilitatea), de raportul  $a/c$ , prezența adaosurilor în ciment, permeabilitatea pietrei de ciment (are cea mai mare influență asupra permeabilității betonului), folosirea unor agregate cu granulozitate continuă, fără impurități și cu formă corespunzătoare a granulelor, folosirea aditivilor plastifianți, superplastifianți sau hiperplastifianți, rezistența betonului (cu cât rezistența betonului este mai mare cu atât permeabilitatea betonului va fi mai mică, rezistența betonului variind funcție de raportul gel/spațiu), condițiile de întărire, vârsta betonului, condiții de exploatare, etc.

În cazul betoanelor preparate cu cimenturi cu adaosuri minerale, permeabilitatea acestora se reduce cu creșterea cantității de materiale cimentoide hidratate, în condițiile unei tratări eficiente și suficiente în perioada de întărire.

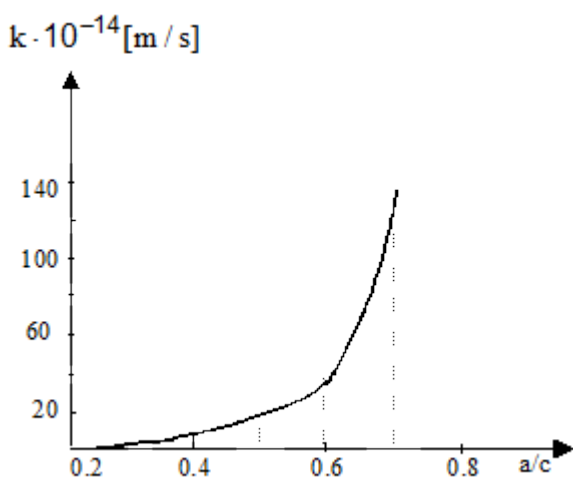


Figura II.5. - Variația coeficientului de permeabilitate  $k$  cu raportul  $a/c$  [75]

---

Betonul de rezistență din structuri are permeabilitatea de ordinul  $10^{-12} \dots 10^{-11}$  m/s.

Difuzia este cel de al doilea fenomen care guvernează transportul fluidelor prin beton și care are loc datorită unui gradient de concentrație, din zonele cu concentrație mai mare spre cele cu concentrații reduse. Spre deosebire de permeabilitate, difuzia este independentă de mărimea porilor străbătuți de fluid. Gazele difuzează în aer și aproximativ de  $10^4$ - $10^5$  ori mai lent în apă, din acest motiv fenomenele de carbonatare sunt mult încetinite în betonul umed. Determinarea permeabilității la apă a betonului este dificilă având în vedere complexitatea structurii materialului și caracterul evolutiv al acestuia. Practic determinarea gradului de impermeabilitate (P) se realizează prin metode standardizate și se apreciază convențional prin adâncimea pe care a penetrat în beton apa supusă unei anumite presiuni, într-un anumit interval de timp.

Gradul de impermeabilitate față de apă al betonului se caracterizează prin presiunea maximă până la care epruvetele de beton, încercate în condiții standardizate nu prezintă infiltrații de apă pe fața opusă aceleia aflate în contact cu apa sub presiune. Conform SR EN 12390-8 [22] se determină gradul de impermeabilitate prin măsurarea adâncimii de pătrundere a apei sub presiunea de 5 bari timp de 48 ore. Permeabilitatea se poate exprima în două moduri:

-prin presiunea la care apa pătrunde doar 10 cm în epruveta ( $P_8^{10}$ , de exemplu, pentru 8 atmosfere).

-prin presiunea la care apa nu străpunge complet epruveta.

Coeficientul de permeabilitate a fost calculat folosind relația:

$$S_k = \frac{m D_m^2}{2TH} \quad (II.10.)$$

unde :  $S_k$  este coeficientul relativ de permeabilitate (mm / h);

$D_m$  - înălțimea medie de permeabilitate (mm);

$m$  - absorbția betonului (0,03);

$T$  - timpul de aplicare a presiunii hidraulice (h);

$H$  - presiunea hidraulică (mm).

Metoda de determinare a coeficientul de permeabilitate se aplică betoanelor cu o permeabilitate relativ mare, în timp ce metoda adâncimii de pătrundere a apei este mai adecvată pentru betoanele care au o structură cu permeabilitate destul de redusă.

Prin urmare, este posibil să se determine coeficientul de permeabilitate în cm/sec prin utilizarea relației:

$$K = \frac{cc \times h}{A \times t \times P} \quad (II.11.)$$

unde:  $cc$  = apa permeabilă în  $cm^3$ ;

$h$  = înălțimea probei (cm);

$A$  = aria suprafeței probei ( $\text{cm}^2$ );

$t$  = timpul de penetrare (sec);

$P$  = presiunea hidrostatică în cm ai coloanei de apă.

Tabelul II.5. - Nivelurile de performanță ale betoanelor în funcție de clasele de impermeabilitate [31]

| Gradul de impermeabilitate | Adâncimea limită de pătrundere a apei (cm) | Presiunea apei (bari) |
|----------------------------|--------------------------------------------|-----------------------|
| $P_4^{10}$                 | 10                                         | 4                     |
| $P_4^{20}$                 | 20                                         |                       |
| $P_8^{10}$                 | 10                                         | 8                     |
| $P_8^{20}$                 | 20                                         |                       |
| $P_{12}^{10}$              | 10                                         | 12                    |
| $P_{12}^{20}$              | 20                                         |                       |

#### II.3.4. Con tracția axială a betonului (metoda cu aparat tip Graf)

Betonul suferă deformații inițiale (modificări de volum în absența unor solicitări exterioare), de la începutul prizei cimentului până la întărirea pastei de ciment, iar după ce acest proces s-a încheiat, datorită variației umidității mediului înconjurător. Experimental, s-au constatat următoarele aspecte:

- La betoanele confecționate cu cimenturi obișnuite, de tip Portland, deformația din contracție este mult mai mare decât cea din umflare. Con tracția betonului păstrat în condiții de umiditate relativă normală poate atinge valorile finale  $\epsilon_{c\infty} = 0.4 \dots 0.8$  mm/m, teoretic pentru  $t = \infty$ . Deoarece deformația specifică din contracție este mai mare decât deformația specifică limită la întindere,  $\epsilon_{tu} = 0.1 \dots 0.15$  mm/m, rezultă că, în cazul în care contracția este împiedicată, se produce fisurarea betonului;
- Deformația din contracție și umflare se dezvoltă după legi neliniare, la o vârstă mică cu viteză mare, apoi din ce în ce mai lent; în prima lună de la turnare se consumă circa 30% din deformația finală de contracție  $\epsilon_{c\infty}$ , iar după un an, aproximativ 75-90% din deformația finală  $\epsilon_{c\infty}$ . Amortizarea deformației din contracție se produce pe măsură ce întărirea cimentului se apropie de sfârșit, depinzând de tipul cimentului utilizat; de regulă, pentru betoanele obișnuite, grele, amortizarea se produce în 35 ani, iar în cazul betoanelor hidrotehnice, în 10-15 ani.
- Con tracția și umflarea sunt fenomene parțial reversibile; dacă betonul este păstrat alternativ în mediu uscat și umed, valoarea contracției  $\epsilon_{ct}$  la timpul  $t$ , respectiv valoarea finală  $\epsilon_{c\infty}$  sunt mai mici decât pentru betonul păstrat numai în aer.

#### **Cauzele deformațiilor din contracție:**

Până în prezent, nu s-a reușit elaborarea unei explicații pe deplin satisfăcătoare pentru definirea evoluției deformațiilor din contracție și umflare. Toate teoriile elaborate se bazează pe

---

ideea ca deformațiile inițiale ale betonului se datorează deplasării apei în masa betonului. În betonul proaspăt, apa se deplasează sub influența proceselor de transformare a pastei de ciment în piatra de ciment, iar în betonul întărit, sub efectul variațiilor de umiditate și temperatura din mediul înconjurător.

Se poate concluziona:

- componenta ireversibilă a contracției se datorează îmbătrânirii gelurilor, manifestată prin reducerea progresivă a volumului lor și creșterea volumului formațiunilor cristaline;
- componenta reversibilă a contracției este parțial independentă de vârsta betonului, datorită fenomenului de capilaritate și parțial dependentă de vârsta betonului, datorită modificării grosimii peliculelor de apă absorbite pe suprafața gelurilor; deoarece gelurile îmbătrânesc (se usucă), componenta reversibilă scade în timp;
- la nivelul componentelor pietrei de ciment, granulele nehidratate și cristalele se opun contracției gelurilor, în consecință sunt comprimate, iar gelurile sunt întinse; la nivelul betonului, agregatele împiedică deformarea pietrei de ciment, care este întinsă și în unele zone fisurează, când se depășește rezistența la întindere.

În perioada de întărire a betonului, pot să apară simultan sau separat și alte tipuri de contracție, depinzând atât de structura betonului, cât și de dimensiunile elementelor structurale:

- ❖ contracția din tasarea agregatelor se manifestă înainte de începerea prizei, când betonul se afla într-o ușoară stare plastică, iar agregatele își mențin tendința de tasare.
- ❖ contracția chimică a cimentului, sau contracția intrinsecă (de întărire); volumul absolut ocupat de cimentul hidratat este mai mic decât suma volumelor absolute ale cimentului nehidratat și apei; contracția de întărire (chimică) este de circa  $0.04 \cdot 10^{-3}$  după o lună și de circa  $0.1 \cdot 10^{-3}$  după 5 ani;
- ❖ contracția plastică este rezultatul unei pierderi rapide de umiditate la suprafața betonului aflat în stare plastică, raportându-se următorilor factori: caracteristicilor betonului, temperatura mediului înconjurător, umiditatea relativă și viteza vântului la suprafața expusă a betonului;
- ❖ contracția endogenă (modificarea interioară de volum) a betonului reprezintă schimbarea macroscopică a volumului de beton care are loc fără transfer de umiditate între beton și mediul înconjurător;
- ❖ contracția la uscare reprezintă reducerea de volum a betonului ca urmare a pierderii graduale lente de apă din interiorul elementului de beton prin evaporare;
- ❖ contracția termică în interiorul construcțiilor masive; căldura degajată în procesul exotermic de întărire duce la încălzirea betonului din interiorul elementului masiv și este posibil să apară diferențe mari de temperatură între fețele libere ale elementului și interiorul acestuia;
- ❖ contracția de carbonatare se produce la suprafața elementelor, numai în anumite condiții de umiditate relativă, însoțind reacția de transformare a hidroxidului de calciu  $\text{Ca(OH)}_2$  în carbonat de calciu  $\text{CaCO}_3$ , în contact cu dioxidul de carbon  $\text{CO}_2$  din aer.

### **Factorii care influențează contracția liberă a betonului:**

Contracția betonului crește odată cu:

- ✓ conținutul ridicat de aluminat tricalcic  $C_3A$  al clincherului;
- ✓ finețea de măcinare sporită a cimentului;
- ✓ creșterea dozajului de ciment;
- ✓ reducerea conținutului de ghips al cimentului;
- ✓ procentul mărit de adaosuri minerale din ciment;
- ✓ mărirea raportului a/c al betonului;
- ✓ volumul sporit al gelurilor;
- ✓ cantitatea mică de agregate cu granule mari (comparativ cu betonul obișnuit, valoarea contracției betonului ușor este de 1-2 ori mai mare. Pentru betonul cu argilă expandată, valoarea contracției determinată experimental a ajuns la 0.45-0.50mm/m);

$\varepsilon_c \text{ ciment} > \varepsilon_c \text{ mortar} > \varepsilon_c \text{ beton}$  (betonul prezintă o contracție de aproximativ 10 ori mai mică decât piatra de ciment)

- ✓ agregatele mai puțin spălate (granule de agregat acoperite cu praf de argilă);
- ✓ umiditatea relativă scăzută a aerului;
- ✓ temperaturile ridicate ale aerului atmosferic;
- ✓ volumul, mărimea și natura porilor; contracția este mai mare dacă în masa betonului porii alcătuiesc o rețea continuă, în contact cu exteriorul;
- ✓ compactitatea redusă a betonului, respectiv cu rezistența mai mică;
- ✓ raportul mare dintre suprafața expusă și volum; pentru elemente liniare, contracția axială este predominantă, în timp ce la elementele de volum este semnificativă contracția superficială.
- ✓ modul deficitar de punere în operă și tratare ulterioară (menținerea umidității și tratamentul termic).

Construcțiile din beton armat se împart în tronsoane prin rosturi de deformații care le asigură deformarea liberă, mărimea și distanța dintre rosturi se determină în funcție de cauzele și mărimea deformațiilor și respectiv de natura lucrării executate. Aceste rosturi trebuie tratate utilizând materiale specifice (deformabile elastic, plastic, hidroizolatoare, etc).

### **II.3.5. Modulul de elasticitate la compresiune**

Modulul de elasticitate pentru beton, determinat dintr-o curbă experimentală efort unitar-deformație specifică a betonului solicitat la compresiune/întindere, este denumit în general modulul de elasticitate static la compresiune/întindere al betonului ( $E_c$ ).

Modulul de elasticitate longitudinal  $E_b$  caracterizează deformarea elastică liniară, pe direcție longitudinală, a betonului solicitat la compresiune:

$$E_b = \operatorname{tg} \alpha = \sigma_b / \varepsilon_b \quad (\text{II.12.})$$

Se admite în mod curent același modul de elasticitate (tangenta comună în origine la curba  $\sigma$ - $\epsilon$ ) pentru compresiune și pentru întindere).

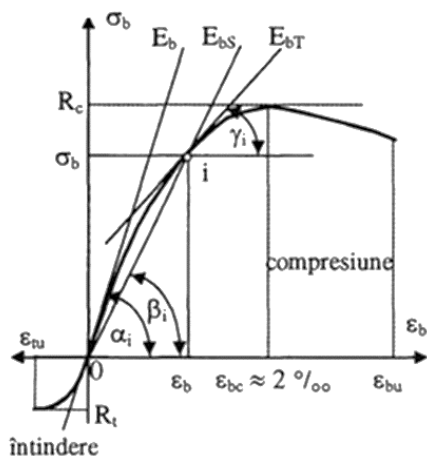


Figura II.6. - Curba caracteristică a betonului solicitat până la rupere [71]

Modulul de elasticitate longitudinal este cu atât mai mare, cu cât calitatea betonului este mai bună; se consideră că are valoarea constantă în timp, deși în realitate crește cu rezistența betonului.

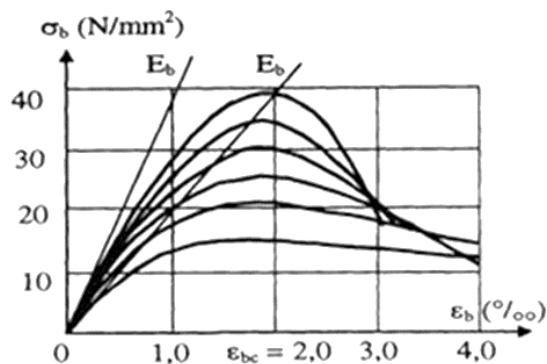


Figura II.7. - Influența calității betonului asupra formei curbei caracteristice [71]

Modulul de elasticitate se determină pe prisme supuse la compresiune axială; se execută  $n$  cicluri de încărcare-descărcare între limitele  $0,05R_{pr}$  și  $0,3R_{pr}$ , limita superioară de solicitare fiind aleasă astfel, pentru a evita dezvoltarea deformațiilor plastice. Valoarea deformațiilor specifice se determină pentru ultimul ciclu de încărcare-descărcare, când se constată stabilizarea deformațiilor permanente. Valoarea modulului de elasticitate se poate obține prin utilizarea unor relații specifice:

- conform EN 1992-1-1 [33]: 
$$E_{cm} = 22 [(f_{cm}) / 10]^{0.3} \quad (II.13.)$$

în care  $f_{cm}$  este rezistența medie la compresiune determinată pe cilindri, în  $N/mm^2$ ,  $E_{cm}$  este modulul de elasticitate secant;

- conform ACI 301 [107] (American Concrete Institute):

$$E_c = \rho_b^{1.5} 0.0426 \sqrt{R_b}^3 \text{ [N/mm}^2\text{]} \text{ sau} \quad (\text{II.14.})$$

$$E_c = 5000 \sqrt{f_{ck}} \text{ (conform IS 456 of 2000)} \quad (\text{II.15.})$$

în care  $\rho_b$  este densitatea specifică aparentă a betonului [ $\text{kg/m}^3$ ], iar  $R_b$ , rezistența medie la compresiune pe cuburi la 28 de zile [ $\text{N/mm}^2$ ],  $f_{ck}$  rezistența caracteristică la compresiune pe cuburi la 28 de zile [ $\text{N/mm}^2$ ]

Modulul de elasticitate transversal  $G_b$  se determină cu relația:

$$G_b = \frac{E_b}{2(1+\nu)} \quad (\text{II.16.})$$

în care  $\nu$  este coeficientul lui Poisson; dacă  $\nu=0.2$  (pentru beton nefisurat) rezultă  $G_b = 0,4 E_b$ . Pentru beton fisurat  $\nu=0$ .

Legătura dintre  $E_b$ ,  $G_b$  și  $\nu$  (constante elastice ale betonului), este valabilă în limitele teoriei elasticității, deci dacă eforturile unitare în beton nu depășesc limita de microfisurare,  $\sigma_0$ . Legătura dintre  $E_b$  și  $E_{bS}$  (modul de elasticitate secant) se poate stabili eliminând  $\sigma_b$  din cele doua relații:

$$E_{bS} = E_b \left( 1 - \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_b} \right) = E_b (1 - \lambda) \quad (\text{II.17.})$$

în care  $\lambda$ , reprezintă coeficientul de plasticitate și arată ponderea deformațiilor plastice în deformația specifică totală a betonului, produsă de efortul unitar  $\sigma_b$ :

$$\lambda = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_b} \quad (\text{II.18.})$$

Teoretic,  $0 \leq \lambda \leq 1$ , fiind funcție de calitatea și compoziția betonului și de natura, mărimea și durata de acțiune a încărcării. Se admite pentru compresiune  $\lambda = 0,7$  iar pentru întindere  $\lambda = 0,5$ ; aceste valori arată că la ruperea produsă de încărcări statice de scurtă durată, cel puțin jumătate din deformația totală este deformație plastică.

*Modulul tangent  $E_{bT}$  caracterizează deformația totală a betonului.*

Pentru eforturi unitare  $\sigma_b < 0.5R_c$ ,  $E_{bT} \cong E_b$ ; pentru eforturi unitare depășind limita de microfisurare:  $E_{bT} = f(\sigma_b)$  (II.19.)

$E_{bT}$  este coeficientul unghiular al tangentei la curba caracteristică, în punctul  $i$  :

$$E_{bT} = \text{tg } \gamma = d\sigma_b / d\varepsilon_b \quad (\text{II.20.})$$

În proiectare se folosesc modulul longitudinal  $E_b$ , transversal  $G$  și coeficientul lui Poisson.

Evoluția modulului de elasticitate în timp poate fi estimată prin:

$$E_{cm}(t) = (f_{cm}(t) / f_{cm})^{0.3} E_{cm} \quad (\text{II.21.})$$

---

expresie în care  $E_{cm}(t)$  și  $f_{cm}(t)$  sunt valori la vârsta  $t$  (zile) și  $E_{cm}$  și  $f_{cm}$  valorile determinate la 28 zile.

#### **Factorii care afectează modulul de elasticitate a betonului:**

##### ✓ Umiditatea mediului

- Epruvetele testate în stare uscată arată o scădere cu aproximativ 15% a modulului de elasticitate comparativ cu epruvetele umede. Acest lucru se explică prin faptul că uscarea produce mai multe microfisuri în zona de tranziție, ceea ce afectează relația efort unitar-deformație specifică a betonului.

- Are efect opus față de rezistența la compresiune. Rezistența la compresiune este crescută cu aproximativ 15% atunci când este testată pe probe uscate în comparație cu probele umede.

##### ✓ Proprietățile agregatelor

- Porozitatea agregatului are cel mai mare efect asupra modulului de elasticitate al betonului. Agregatele cu o porozitate scăzută au un modul de elasticitate ridicat.

- Modulul de elasticitate al betonului este influențat de ponderea în volum a agregatului și de modulul de elasticitate al agregatului.

##### ✓ Matricea de ciment

- Cu cât porozitatea cimentului este mai mică, cu atât este mai mare modulul de elasticitate al pietrei de ciment.

- Cu cât este mai mare modulul de elasticitate al pietrei de ciment, cu atât este mai mare modulul de elasticitate al betonului.

##### ✓ Zona de tranziție

- Porii și microfisurile formate în zona de tranziție joacă un rol major în influențarea relației efort unitar-deformație specifică a betonului.

- Caracteristicile zonei de tranziție afectează modulul de elasticitate mai mult decât afectează rezistența la compresiune a betonului.

### **II.3.6. Rezistența la compresiune a betonului**

Rezistența la compresiune ( $f_c$ ) constituie principalul criteriu de apreciere a calității unui beton dând indicații suficient de precise asupra rezistenței la alte solicitări, cât și asupra altor proprietăți fizico-mecanice ale betonului. Se determină pe epruvete în conformitate cu SR EN 12390-1[19]:

- cubice cu dimensiunea laturii de 100, 150, 200, 250, 300 mm (în funcție de mărimea agregatului);

- cilindrice cu diametrul de 100, 113, 150, 200 250, 300 mm și înălțimea egală cu de 2 ori diametrul;
- prismatice cu dimensiunile secțiunii transversale 100x100, 150x150, 200x200, 250x250, 300x300mm și lungimea astfel încât raportul  $h/b > 3 \dots 5$  și latura bazei să fie de cel puțin trei ori și jumătate mai mare decât dimensiunea maximă a granulelor de agregat utilizate la prepararea betonului;
- carote cilindrice prelevate din elemente deja executate.

Tabelul II.5. - Criterii de conformitate pentru rezistența la compresiune a betonului [17].

| Producție | Număr "n" de rezultate ale încercărilor | Criteriul 1                                 | Criteriul 2                                           |
|-----------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
|           |                                         | Media celor "n" rezultate ( $f_{cm}$ , MPa) | Rezultatul individual al încercării ( $f_{ck}$ , MPa) |
| Inițială  | $\geq 3$                                | $\geq f_{ck} + 4$                           | $\geq f_{ck} - 4$                                     |
| Continua  | $\geq 15$                               | $\geq f_{ck} + 1.48 \sigma$                 | $\geq f_{ck} - 4$                                     |

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa unde } f_{ck} = f_{ck \text{ cilindru}} \quad (\text{II.22.})$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c \quad (\text{II.23.})$$

unde  $f_{cd}$  - rezistența de calcul la compresiune a betonului,

$\alpha_{cc}$  - coeficient ce ține seama de efectele încărcărilor de lungă durată asupra rezistenței la compresiune și de efectele defavorabile ce rezultă din modul de aplicare al încărcării;

$\gamma_c$  - coeficient parțial pentru beton.

Verificarea clasei se efectuează pe epruvete confecționate, păstrate și încercate conform standardelor la vârsta de 90 zile pentru betoane hidrotehnice masive și la 28 zile pentru betoanele destinate celorlalte categorii de construcții.

### Factorii care influențează rezistența la compresiune:

- ✓ Caracteristicile și proporția constituenților:

#### a. influența cimentului

- compoziția mineralogică a clincherului Portland (Conținutul de silicat tricalcic,  $C_3S$  sau alit care asigură dezvoltarea rezistențelor mecanice într-o perioadă scurtă la aproximativ patru săptămâni de la hidratare. Conținutul de silicat bicalcic,  $C_2S$  sau belit oferă o creștere lentă în timp a rezistenței la compresiune. Conținutul de celit I,  $C_3A$  sau celit II,  $C_4AF$  nu influențează în mod semnificativ rezistențele mecanice ale cimentului);

Tabelul II.6. - Creșterea în timp a rezistenței la compresiune a unor betoane preparate cu cimenturi de compoziții mineralogice diferite [34].

| Denumirea cimentului       | Compoziția mineralogică |                  |                  |                   | Rezistența procentuală față<br>cea de la 28 de zile |        |        |         |
|----------------------------|-------------------------|------------------|------------------|-------------------|-----------------------------------------------------|--------|--------|---------|
|                            | C <sub>3</sub> S        | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF | 1 zi                                                | 3 zile | 7 zile | 28 zile |
| Portland superior (alitic) | 60                      | 15               | 12               | 8                 | 20                                                  | 60     | 85     | 100     |
| Portland normal            | 50                      | 20               | 12               | 8                 | 15                                                  | 30     | 60     | 100     |
| Portland lent (belitic)    | 25                      | 50               | 6                | 14                | 10                                                  | 25     | 50     | 100     |
| Feroportland               | 45                      | 40               | 5                | 5                 | 12                                                  | 40     | 60     | 100     |

- finețea de măcinare exprimată prin suprafața specifică a cimentului (creșterea gradului de finețe mărește rezistența la compresiune la toate vârstele, datorită vitezei de hidratare care crește odată cu creșterea fineței de măcinare a cimentului);

- dozajul de ciment (se observă o creștere a rezistențelor mecanice ale betonului la o cantitate a cimentului de până la 450-500 kg/mc, iar la betoanele de înaltă rezistență, creșterea se manifestă până la 700 kg/mc. Rezistențele mecanice cresc odată cu creșterea dozajului. Rata creșterii rezistenței ( $f_c$ /dozaj) este mai mare până la o anumită valoare, după care ea se atenuează, tinzând către plafonare, o parte din ciment rămânând nehidratat. Influența dozajului asupra rezistențelor mecanice, în mod special a celei la întindere este dependentă și de condițiile de păstrare (mediu umed, mediu uscat), care influențează apariția fisurilor; deformările betonului se accentuează cu mărirea dozajului întrucât matricea este mai deformabilă decât agregatele sub efectul variațiilor de umiditate, temperatură și a solicitărilor mecanice de scurtă sau lungă durată. La stabilirea dozajelor în ciment, trebuie să se țină seama de considerentele tehnice privind alegerea dozajului optim pentru fiecare tip de beton precum și de aspectele economice, cimentul fiind componentul cu cea mai mare pondere în prețul betonului.

- distribuția granulometrică a cimentului (cimenturile cu o curbă granulometrică mai restrânsă și cu o finețe de măcinare mai mică pot avea rezistențe mecanice asemănătoare cu cele ale cimenturilor cu o curbă granulometrică mai largă și cu granule cu suprafață specifică mai mare);

- prezența alcaliilor în ciment (un conținut de alcalii de aproximativ 1%, Na<sub>2</sub>O și K<sub>2</sub>O, poate împiedica creșterea în timp a rezistențelor mecanice ale betonului chiar la 10-15 zile după hidratarea cimentului);

- dozajul, tipul și reactivitatea adaosului mineral (cimentul cu materiale cementoide suplimentare, având aceeași finețe de măcinare și reactivitate cu a clincherului dau rezistențe mecanice mai mici comparativ cu cimenturile CEM I la vârste relativ mici. Cimenturile cu adaosuri minerale care se hidratează mai lent, ca efect al reacției puzzolanice specifice, vor avea o valoare inițială mai mică a rezistenței la compresiune, dar rezistență finală superioară);

- raport apa-ciment (dependența raportului a/c cu rezistența la compresiune are forma unei hiperbole și se obțin rezistențe la compresiune maxime corespunzătoare unui raport a/c=0.4.

Raportul a/c are efecte directe asupra porozității capilare, mărimii și distribuției porilor în structura pietrei de ciment, a permeabilității betonului și asupra rezistențelor mecanice.

La un beton cu raport apa-ciment foarte scăzut și cu agregate mari, rezistența la compresiune scade datorită împiedicării contracțiilor pietrei de ciment și fisurării betonului).

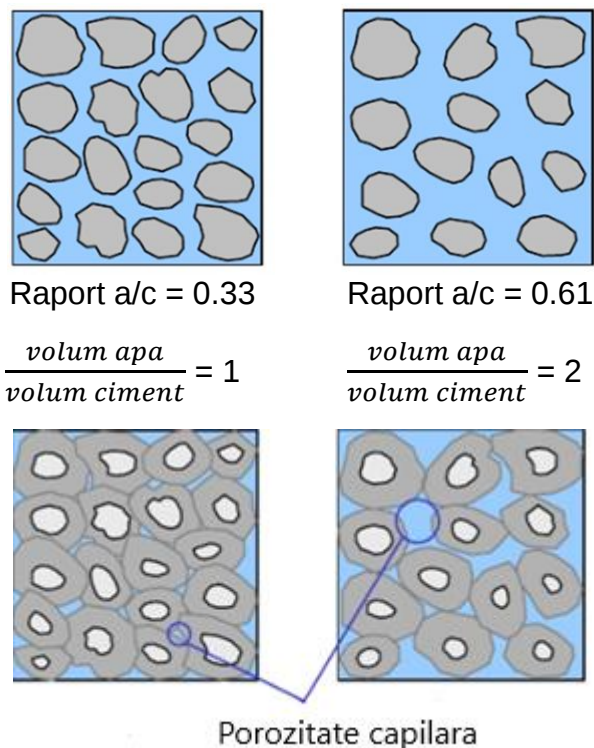


Figura II.8. - Influența raportului a/c asupra structurii betonului [35]

Raport a/c scăzut

- porozitate capilara scăzută
- pori mici neconectați
- permeabilitate scăzută
- rezistență mare

Raport a/c mare

- porozitate capilara mare
- pori mari interconectați
- permeabilitate mare
- rezistență scăzută

Legea lui Abrams afirmă că "presupunând compactarea completă la o anumită vârstă și la o temperatură normală, rezistența betonului poate fi considerată invers proporțională cu raportul apă / ciment":

$$S = \frac{A}{B^x} \quad (II.24.)$$

unde x = raportul apă/ciment în volum și pentru 28 de zile rezultă constantele A și B egale cu 96N/mm<sup>2</sup> și, respectiv, 7.

- raportul gel/spațiu

Raportul gel/spațiu este raportul dintre produsele solide de hidratare și spațiul disponibil pentru aceste produse de hidratare. Deoarece betonul este un material casant, porozitatea lui guvernează în primul rând rezistența sa la compresiune care scade semnificativ cu creșterea porozității. Raportul gel/spațiu este dependent de raportul apă/ciment din beton. Un raport apă/ciment mai mare reduce raportul gel/spațiu crescând porozitatea și reducând astfel rezistența betonului.

Rezistența betonului poate fi legată de acest raport gel/spațiu conform ecuației Power:

$$S = 240x^3 \quad (II.25.)$$

în care: x este raportul gel/spațiu, 240 reprezintă rezistența intrinsecă a gelului în MPa pentru tipul de ciment și specimenul utilizat.

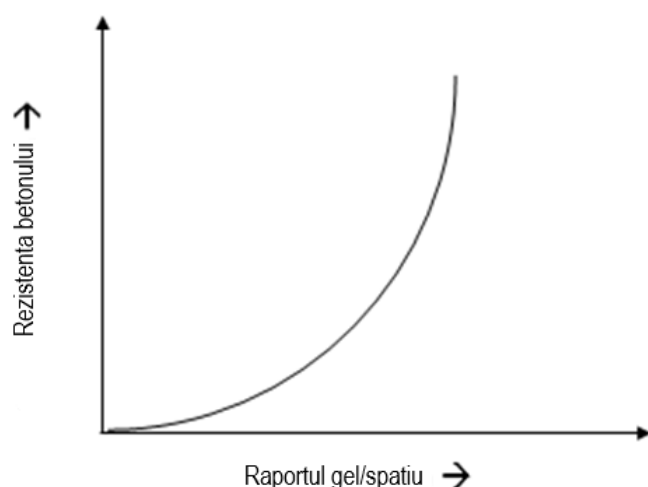


Figura II.10. - Variația calitativă a raportului gel/spațiu cu rezistența betonului [35].

Calcularea raportului gel/spațiu pentru hidratarea completă:

$$\text{raportul gel/spațiu} = \frac{\text{volumul gelului}}{\text{spatiu disponibil}} = \frac{c \times V_o \times 2.06}{c \times V_o + w_o} = \frac{0.657c}{0.319c + w_o} \quad (II.26.)$$

Calcularea raportului gel/spațiu pentru hidratarea parțială [36], [37]:

$$\text{raportul gel/spațiu} = \frac{\text{volumul gelului}}{\text{spatiu disponibil}} = \frac{c \times V_o \times 2.06 \times \alpha}{c \times V_o \times \alpha + w_o} = \frac{0.657c\alpha}{0.319c\alpha + w_o} \quad (II.27.)$$

unde: c este greutatea cimentului în grame;

$V_c$  - volumul specific al cimentului de 0.319 ml/g;

$w_o$  - volum apă de amestec în ml;

Considerând că la 1 ml de ciment hidratat corespund 2.06 ml gel, volumul de geluri devine egal cu  $c \times 0.319 \times 2.06 = 0.657c$ . Coeficientul  $\alpha$  evidențiază gradul de hidratare al cimentului care crește cu raportul a/c și perioada de tratare. Raportul spațiu/gel poate fi calculat la orice vârstă și pentru orice fracțiune de hidratare a cimentului. Relația dintre rezistență și raportul gel-spațiu este independentă de vârstă.

- vârsta betonului

Creșterea vârstei betonului și a gradului de hidratare al cimentului mărește în general raportul gel/spațiu și în consecință rezistența betonului. Evoluția rezistenței mecanice a betonului depinde de vârstă și valoarea ei după 28 de zile trebuie luată în considerare în proiectarea structurilor. Rezistența betonului la vârstă mai mică de 28 de zile depinde de compoziția mineralogică a cimentului, de finețea lui de măcinare și de temperatura mediului în care are loc întărirea. Betonul preparat cu un raport apa/ciment mic își crește rezistența mai rapid decât amestecul cu un conținut ridicat de a/c. Estimarea rezistenței la compresiune la 28 de zile se poate face în funcție de rezistența la 7 zile între valorile date de relațiile [35] :

$$f_{c28} = 1,4 \times f_{c7} + 150 \text{ și } f_{c28} = 1,7 \times f_{c7} + 850 \quad (\text{II.28.})$$

unde  $f_{c28}$  este rezistența la 28 de zile, respectiv  $f_{c7}$  rezistența la 7 zile, exprimate în psi.

O altă relație este [35]:

$$f_{c28} = k_2 (f_{c7})^{k_1} \quad (\text{II.29.})$$

Coeficienții  $k_1$  variază de la 0,3 la 0,8 și  $k_2$  variază de la 3 la 6 în funcție de tipul cimentului și condițiile de întărire.

#### *b. influența agregatelor*

- dimensiunea agregatelor (cu cât este mai mare dimensiunea, cu atât mai mică va fi suprafața specifică pentru aderența gelurilor, fapt care va conduce la o rezistență mai mică a betonului. Un agregat rotunjit de formă sferică, compactat, conține mai puține goluri decât un agregat neregulat și fragil, de aceeași dimensiune nominală și prin urmare, se obține o rezistență mai mare. La betoanele ușoare se recomandă utilizarea diametrelor maxime de 20 mm), natura mineralogică, aspectul suprafeței agregatelor (agregatele cu suprafața rugoasă asigură rezistențe mecanice sporite datorită aderenței bune a pastei de ciment la această suprafață), tipul agregatelor (naturale sau concasate pentru betoanele de înaltă performanță), granulozitatea agregatelor (cu cât partea de agregat fin este mai mare, cu atât rezistența scade datorită creșterii necesarului de apă la amestecare. Agregatele mai mari vor aduce, de asemenea, o structură eterogenă pentru beton, ceea ce va face distribuția neuniformă a încărcărilor atunci când este aplicată o solicitare), densitatea agregatelor. Agregatele sunt factorii cheie care vor afecta rezistența la soc a betonului în condiții de aplicare a unei acțiuni agresive. Agregatele de bună calitate vor absorbi o cantitate mai mică de apă, restul fiind destinată hidratării cimentului.

✓ Condiții de punere în operă și de tratare ulterioară

- gradul de compactare (compactarea necorespunzătoare conduce la un volum de pori cu aer de 5-10% și la o reducere de rezistență între 30-55%. În timpul turnării betonului trebuie evitată segregarea betonului, limitându-se înălțimea de turnare la maxim 1.50 m. Punerea în operă trebuie să asigure o compactitate și omogenitate maxime betonului, vibrarea asigurând eliminarea aerului inclus la amestecare, dar un timp de vibrare îndelungat conduce la fenomene de segregare a betonului și deteriorare a cofrajelor.)

- metodele de tratare ulterioară ale betonului (sunt de doua tipuri: cele care aduc umiditate suplimentară betonului cum ar fi: stropirea, acoperirea cu țesături îmbibate cu apă, tratamentul cu vapori de apă, si cele care împiedică pierderea umidității betonului prin acoperirea cu folii impermeabile sau produși impermeabilizanți care acoperă porii betonului).

- durata de tratare (se stabilește funcție de viteza de întărire a betonului și temperatura la care se toarnă și se păstrează betonul).

Tabelul II.7. - Durate minime recomandate pentru tratare [4]

| Temperatura la suprafața betonului <sup>1)</sup> t, °C | Perioada minimă de tratare, zile                     |                                   |                                   |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                                                        | Evoluția rezistenței betonului, $r = f_{c2}/f_{c28}$ |                                   |                                   |
|                                                        | Rapidă<br>( $r \geq 0.50$ )                          | Medie<br>( $0.50 > r \geq 0.30$ ) | Lentă<br>( $0.30 > r \geq 0.15$ ) |
| $t \geq 25$                                            | 1.5                                                  | 2.5                               | 3.5                               |
| $25 > t \geq 15$                                       | 2.0                                                  | 4                                 | 7                                 |
| $15 > t \geq 10$                                       | 2.5                                                  | 7                                 | 12                                |
| $10 > t \geq 5$ <sup>2)</sup>                          | 3.5                                                  | 9                                 | 18                                |

1) Temperaturile sunt cele măsurate ziua, la ora 12  
2) Pentru temperaturi sub 5 °C, durata de tratare se prelungește cu o perioadă egală cu timpul sub 5 °C.

- temperatura de întărire ( creșterea temperaturii de întărire accelerează reacțiile chimice ale hidratării și, astfel, mărește rezistența timpurie a betonului. Zece ore de întărire la o temperatură de aproximativ 90 °C vor conduce la o rezistența la compresiune egala aproximativ cu 85% din rezistența la compresiune la 28 de zile.

Hidratarea inițială rapidă pare să formeze produse cu o structură fizică mai slabă, probabil mai poroasă, astfel încât o proporție din pori să rămână întotdeauna neumpluți. Raportul gel/spațiu indică faptul că acest lucru va conduce la o rezistență mai mică comparativ cu o pastă de ciment mai poroasă, dar lent hidratată, în care în cele din urmă va fi atins un raport gel/spațiu ridicat.

Condițiile optime de întărire ale betonului sunt cuprinse între 15-25 °C, scăderea de temperatura provocând o reducere în viteza de evoluție a rezistențelor mecanice. Efectul scăderii temperaturii asupra dezvoltării rezistențelor mecanice este mai pregnant la betoanele cu cimenturi cu materiale cementoide suplimentare decât la betoanele cu ciment fără adaos CEM I).

#### ✓ Condiții de încercare

- dimensiunile și forma epruvetelor și influența asupra valorilor rezistenței la compresiune este dată de relațiile de mai jos [38]:

$$f_{c \text{ cub } 200 \text{ mm}} = 1.10 \times f_{c \text{ cub } 300 \text{ mm}} = 0.95 \times f_{c \text{ cub } 150 \text{ mm}} = 0.90 \times f_{c \text{ cub } 100 \text{ mm}} \quad (\text{II.30.})$$

$$f_{c \text{ cub } 150 \text{ mm}} = 0.97 \times f_{c \text{ cub } 100 \text{ mm}} \quad (\text{II.31.})$$

$$f_{c \text{ cil H150xD300 mm}} \sim 0.80 \times f_{c \text{ cub 150 mm}} \quad (\text{II.32.})$$

$$f_{\text{prisma}} = (0.87 - 2 \times 0.001 \times f_{c \text{ cub 200 mm}}) \times f_{c \text{ cub 200 mm}} \text{ pentru un raport } h/b=3 \quad (\text{II.33.})$$

- umiditatea probei în momentul încercării (în funcție de mediul de păstrare și indiferent de tipul cimentului, pentru două cuburi de aceleași dimensiuni executate din același beton, unul păstrat în apa 28 de zile și celălalt păstrat în apă 7 zile și 21 de zile uscat în aer, încercate la compresiune la 28 de zile, există următoarele relații [38]:

$$f_{c \text{ cub saturat}} = 0.92 \times f_{c \text{ cub uscat}} \quad \text{pentru clase de beton până la C55/67;} \quad (\text{II.34.})$$

$$f_{c \text{ cub saturat}} = 0.95 \times f_{c \text{ cub uscat}} \quad \text{pentru clase de beton peste C55/67.} \quad (\text{II.35.})$$

- viteza de încărcare (pentru încercarea la compresiune a epruvetelor din beton încărcarea se aplică cu o viteză constantă de 0.5+/-0.2 MPa/secundă. Rezistența probelor de beton supuse la compresiune crește dacă se mărește viteza de încărcare).

### II.3.7. Rezistența la întindere a betonului (întindere directă, întindere din încovoiere și întindere din despicare)

Rezistența la întindere axială a betonului, ( $f_t$ ), este cea mai mică dintre rezistențele sale la întindere, reprezentând doar 1/6–1/20 din rezistența la compresiune, funcție de clasa betonului.

$$\text{- rezistența medie:} \quad f_{ctm} = 2.12 \ln(1 + f_{cm}/10) \text{ MPa} \quad (\text{II.36.})$$

$$\text{- rezistența caracteristică: } f_{ctk 0.05} = 0.7 f_{ctm} \quad \text{fractil 5 \%} \quad (\text{II.37.})$$

$$f_{ctk 0.95} = 1.3 f_{ctm} \quad \text{fractil 95 \%} \quad (\text{II.38.})$$

$$\text{- rezistența de calcul:} \quad f_{ctd} = \alpha_{cc} f_{ctk 0.05} / \gamma_c \quad (\text{II.39.})$$

Când este necesară determinarea valorii rezistenței la întindere a betonului la vârste diferite de 28 de zile în standardul european EN 1992-1-1 [33] se folosește o metodă similară cu cea folosită pentru rezistența la compresiune:

$$f_{ctm}(t) = (\beta_{cc}(t))^\alpha f_{ctm} \quad (\text{II.40.})$$

$$\text{unde } \beta_{cc}(t) = \exp\{s[1 - (28/t)^{1/2}]\} \quad (\text{II.41.})$$

în care:  $f_{ctm}(t)$  - rezistența medie la întindere a betonului la vârsta de  $t$  zile;

$f_{ctm}$  - rezistența medie la întindere a betonului la vârsta de 28 zile;

$\beta_{cc}(t)$  - coeficient ce depinde de vârsta betonului;

$\alpha = 1$  pentru  $t < 28$  zile;

$\alpha = 2/3$  pentru  $t \geq 28$  zile;

$s$  - coeficient care depinde de tipul de ciment.

Spre deosebire de compresiune, unde în prima etapa se produce închiderea microfisurilor inițiale, la întindere, procesul de microfisurare a structurii interne se dezvoltă odată cu creșterea efortului unitar. Ruperea este bruscă, prin smulgere, iar deformările sunt aproximativ de 10 ori mai mici decât în cazul compresiunii, comportare caracteristică materialelor casante. Sistemul de fisuri format este mai instabil decât cel format în cazul solicitării prin compresiune.

Rezistența la întindere axială se poate determina pe epruvete cilindrice sau prismatice, la capetele cărora se lipesc cu adezivi piese metalice cu ajutorul cărora epruvetele se centrează și se supun la întindere directă. Se vor valida valorile rezistenței la întindere directă numai atunci când ruperea se produce în treimea centrală a epruvetei pentru ca în celelalte zone se împiedică deformația transversală de către dispozitivele de prindere în presă. Din cauza dificultăților de centrare a forței, în practică se admite că determinarea rezistenței la întindere  $f_{ct}$  să se facă indirect pe baza solicitărilor epruvetelor la încovoiere sau prin despicare.

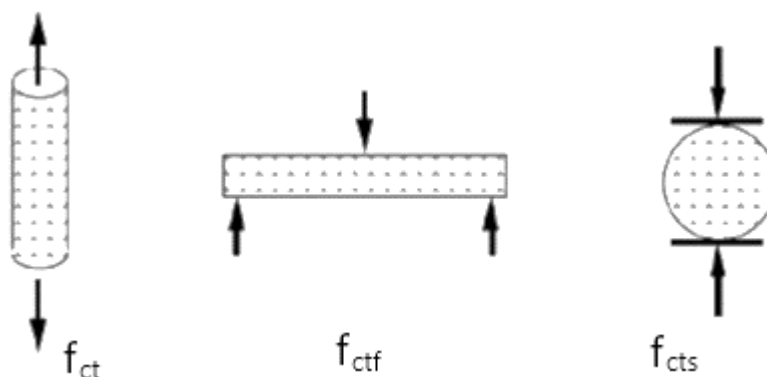


Figura II.11. - Moduri de determinare a rezistenței la întindere

Rezistența de întindere axială [107]:  $f_{ct} = 0.35 \sqrt{f_c}$  ( $f_c$  în MPa) (II.42.)

Rezistența de întindere din despicare:  $f_{cts} = 0.50 \sqrt{f_c}$  ( $f_c$  în MPa) (II.43.)

Rezistența de întindere din încovoiere:  $f_{ctf} = 0.64 \sqrt{f_c}$  ( $f_c$  în MPa) (II.44.)

Legătura între rezistențele la întindere este :  $f_{ctf} > f_{cts} > f_{ct}$

Rezistența la întindere din încovoiere ( $f_{ctf}$ ) se determină pe prisme de  $100 \times 100 \times 550$  mm sau  $150 \times 150 \times 600$  mm,  $200 \times 200 \times 800$  mm în funcție de dimensiunea maximă a agregatului în conformitate cu SR EN 12390-1[19].

În cazul solicitării la încovoiere cu o singură forță, valoarea rezistenței la întindere,  $f_{ctf}$ , se determină cu relația:

$$f_{ctf} = \frac{3PL}{2bh^2} \quad \text{N/mm}^2 \quad \text{sau} \quad \text{daN/cm}^2 \quad (\text{II.45.})$$

unde: P este forța de rupere, în N;

L – distanța dintre reazeme, în mm;

b – lățimea medie a secțiunii transversale, în mm;

$h$  – înălțimea medie a secțiunii transversale, în mm.

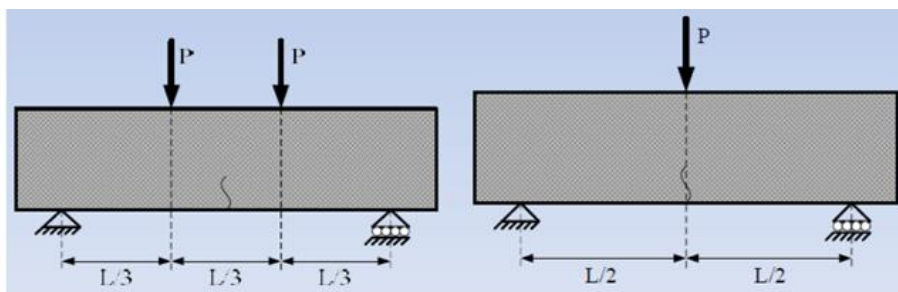


Figura II.12. - Moduri de determinare a rezistenței la întindere din încovoiere [37]

În cazul când încercarea se efectuează cu două forțe, rezistența la întindere din încovoiere este mai mică. Ținând seama de plasticizarea zonei întinse a betonului, rezistența la întindere din încovoiere se determină cu relația:

$$f_{ctf} = 0.875 \frac{PL}{bh^2} \text{ (N/mm}^2 \text{ ; MPa) pentru betoane grele și} \quad (II.46.)$$

$$f_{ctf} = 0.925 \frac{PL}{bh^2} \text{ (N/mm}^2 \text{ ; MPa) pentru betoane ușoare} \quad (II.47.)$$

Rezistența la întindere prin despicare prezintă avantajul unei încercări simple care se poate efectua pe cuburi, pe fragmente de prisme rezultate în urma încercării la încovoiere sau pe cilindri.

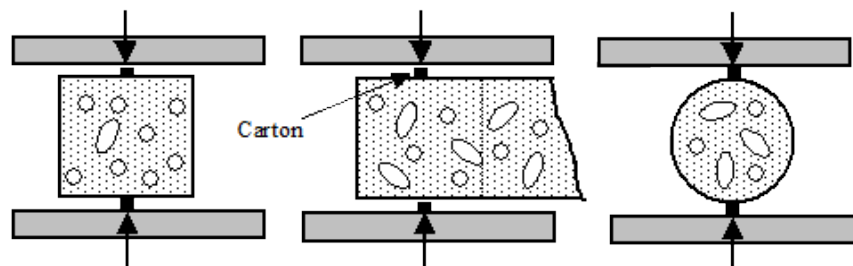


Figura II.13. - Moduri de determinare a rezistenței la întindere prin despicare [75]

Rezistența la întindere din despicare se calculează cu relația :

$$f_{cts} = 2P / \pi lh \text{ (N/mm}^2 \text{ ; MPa),} \quad (II.48.)$$

în care:  $P$  este forța de rupere citită pe cadranul presei, în N;

$l$ - lungimea liniei de contact a epruvetei , în mm;

$h$ - înălțimea medie a secțiunii transversale, în mm.

O relație mai generală între rezistența la întindere din încovoiere și rezistența la întindere centrică, care arată dependența rezistenței la întindere din încovoiere de dimensiunile elementului este cea dată în EN 1992-1-1 [33]:

$$f_{ctm,fl} = \max\{(1.6-h/1000) f_{ctm} ; f_{ctm}\} \quad (II.49.)$$

Comparând rezistența la întindere din încovoiere cu rezistența măsurată la întindere centrică se constată că aceasta din urmă este mai mică cu circa 40%. Diferența dintre cele două tipuri de rezistențe este mai accentuată la betoanele de clase inferioare, la elementele cu înălțime mai redusă și atunci când schema de încărcare produce solicitarea maximă într-o singură secțiune pe lungimea elementului.

În general, între rezistența la întindere centrică și cea la întindere prin despicare există relația:

$$f_{ct} = 0.9 f_{cts} \quad (II.50.)$$

În afară de forma și dimensiunile epruvetelor, rezistența la întindere este funcție de clasa betonului și este influențată de aceeași factori ca și rezistența la compresiune. Relația între rezistențele la compresiune și la întindere utilizată în standardul SR EN 1992-1-1[33] este:

$$f_{ctk} = 0.21 (f_{ck})^{2/3} \quad (II.51.)$$

### II.3.8. Aderența dintre beton și armatură. Metoda prin smulgere

Conlucrarea dintre cele doua materiale este posibilă deoarece la suprafața de contact dintre acestea se realizează o legătură cunoscută sub numele de aderență, care ia naștere în cursul procesului de întărire a betonului. Aderența împiedică lunecarea armăturii și asigură caracterul monolit al elementului de beton armat până la rupere. Chiar dacă betonul solicitat la întindere fisurează și armatura lunecă în beton pe o anumită porțiune în imediata vecinătate a fisurii, conlucrarea dintre cele două materiale continuă să existe pe distanța dintre fisuri. Conlucrarea celor două materiale este favorizată de valorile apropiate ale coeficienților lor de dilatare termică.

Mecanismul prin care se asigură aderența:

- încluirea pastei de ciment pe armătură;
- înclăștarea betonului în neregularitățile de pe suprafața armăturii;
- frecarea dintre armătură și beton în procesul deplasării barei.

Factorii care influențează aderența [73]:

- ✓ *Calitatea betonului.* Aderența crește odată cu creșterea calității betonului, fiind legată în mod direct de rezistența la întindere. Prin urmare toți factorii care influențează calitatea betonului (dozajul și natura mineralogică a cimentului, raportul a/c, compactitatea etc) vor influența și valoarea efortului unitar de aderență.
- ✓ *Dozajul de ciment.* Aderența se îmbunătățește odată cu sporirea dozajului de ciment, deoarece mărirea cantității pastei de ciment asigură o încluire și o înclăștare mai bună la suprafața de contact dintre cele două materiale.
- ✓ *Raportul apa-ciment.* Aderența scade odată cu creșterea raportului a/c, atât ca urmare a reducerii compactității betonului cât și ca urmare a formării unor goluri cu apă sub porțiunile orizontale ale armăturilor. În timp, apa din aceste goluri se evaporă, iar armatura nu mai rămâne în contact intim cu betonul în zona respectivă.

- ✓ *Compactarea betonului.* Utilizarea unor mijloace mecanice de punere în operă influențează favorabil rezistențele betonului, deci și aderența dintre beton și armătură.
- ✓ *Poziția armăturii în raport cu direcția betonării.* Armăturile așezate orizontal, în momentul turnării și compactării betonului, prezintă o aderență mai slabă decât cele așezate vertical, deoarece tasarea betonului proaspăt provoacă goluri cu apă și aer sub armături reducând suprafața de contact dintre armătură și beton. De asemenea aderența dintre cele două materiale mai depinde și de tasarea betonului proaspăt. Influența tasării plastice a betonului proaspăt este mai accentuată la armăturile așezate la partea superioară a elementelor, aderența acestora reducându-se până la 75% față de cele de la partea inferioară. Aceste armături sunt considerate, conform EN 1992-1, ca având condiții defavorabile de aderență.
- ✓ *Forma secțiunii transversale a armăturii.* În condiții similare de încercare efortul unitar de aderență depinde de forma secțiunii și de tipul armăturii. În condițiile aceluiași beton, pentru diferite tipuri de armături au fost stabilite, experimental, următoarele valori ale efortului unitar de aderență ( $N/mm^2$ ): vezi figura II.14. Se poate constata că cea mai bună aderență o au armăturile cu secțiune circulară, formă care se folosește cu preponderența la alcătuirea elementelor de beton armat. În cazul barelor necirculare compactarea betonului poate fi necorespunzătoare, în colțurile profilelor se produc concentrări de eforturi care conduc la distrugerii locale și în consecință aderența scade.

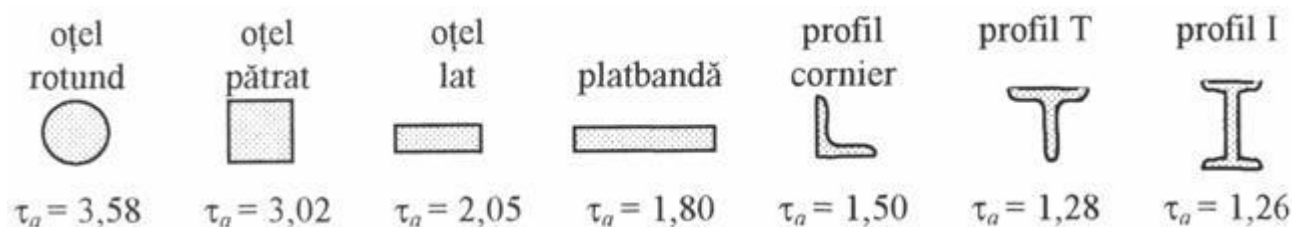


Figura II.14. - Valorile efortului unitar de aderență pentru diverse forme ale secțiunii transversale ale armăturii [73]

- ✓ *Diametrul și numărul barelor.* În condiții similare experimentale, efortul unitar de aderență scade atunci când diametrul  $d$  al armăturii crește. Pentru asigurarea unei aderențe corespunzătoare, legat de necesitatea înglobării barelor într-un anumit volum minim de beton se prevede în funcție de tipul elementului și al armăturii distanța minimă dintre bare. Se constată că armăturile dispuse izolat au aderență mai bună decât cele dispuse grupat.
- ✓ *Grosimea stratului de acoperire cu beton.* Diminuarea stratului de acoperire cu beton conduce la scăderea aderenței deoarece presiunile radiale, exercitate prin contracția betonului asupra armăturii se reduc.
- ✓ *Lungimea de înglobare a barei în beton.* Testele experimentale au relevat că efortul unitar de aderență scade odată cu creșterea lungimii de înglobare. Aceste rezultate sunt o confirmare a faptului că distribuția efortului unitar de aderență în lungul barei nu este uniformă.
- ✓ *Natura suprafeței armăturilor.* Pe baza rezultatelor experimentale s-a constatat că barele cu profil periodic laminate la cald prezintă o aderență de 35 ori mai mare decât cea a

---

barelor cu suprafața netedă. Efectul ruginii incipiente și neregularitățile suprafeței barei obținute la laminare (tunderul) joacă, la scara redusă, rolul profilelor barelor laminate la cald. Barele corodate a căror strat de rugină are tendința de exfoliere se curată cu perii de sârmă rezultând o rugozitate mai pronunțată și o aderență mai bună.

După activarea aderenței, care are loc la o deplasare de 0,01 mm a capătului liber al barei, efortul unitar de aderență crește, valoarea lui maximă atingându-se la o deplasare de 0,25 mm în cazul barelor netede, respectiv 1 mm în cazul barelor cu profil periodic.

- ✓ *Armarea transversală.* Ancorarea armăturii în beton și în special a armăturii cu profil periodic duce la eforturi transversale în masa betonului datorită efectului de împănare al neregularităților. La smulgerea unor bare cu profil periodic s-a observat apariția unor fisuri longitudinale și despicarea epruvetelor în momentul smulgerii. Armătura transversală sub formă de fretă, etrieri sau plase sudate împiedică deformările transversale ale betonului, măbind forța de smulgere. Pe baza rezultatelor experimentale s-a constatat că la armăturile cu profil periodic, armătura transversală sporește aderența de 3...5 ori față de ceea ce înregistrată în cazul elementelor nefretate, în timp ce la barele cu suprafața netedă acest spor este de numai 50%.
- ✓ *Modul de solicitare.* Aderența dintre beton și armătură se diminuează în cazul când solicitările nu au un caracter static. În cazul elementelor structurilor antiseismice sau a celor supuse la oboseală, aderența dintre beton și armătură se poate diminua cu până la 25%, datorită condițiilor severe de solicitare.
- ✓ *Modul de păstrare.* Diferența dintre eforturile unitare de aderență la păstrarea în mediu umed sau uscat este sensibilă numai la betoane de vârstă mai mare, când probele păstrate în mediu umed prezintă o aderență cu 10...15% mai mare decât cele păstrate în mediu uscat. Dacă imediat după turnare survine un îngheț, aderența dintre beton și armătură scade foarte mult. Experimental, la betoanele care au suferit influența înghețului s-au înregistrat eforturi de aderență mult diminuate față de cele întărite normal .

## II.4. Încercări pentru aprecierea durabilității betoanelor

Un beton durabil este cel care are performante satisfăcătoare în mediul înconjurător în condiții anticipate de expunere în timpul duratei de viață (de exploatare). Durabilitatea betonului de ciment este definită drept capacitatea sa de a rezista la acțiunea intemperiei (schimbări de temperatură și umiditate), abraziunii, atacului cu lichide/gaze naturale sau industriale, atacul agenților biologici sau oricărui alt proces de deteriorare.

Betonul durabil își va păstra forma sa originală, calitatea și utilitatea atunci când este expus mediului înconjurător. Una dintre caracteristicile principale care influențează durabilitatea betonului este permeabilitatea sa la pătrunderea apei, a oxigenului, a dioxidului de carbon, a clorurii, a sulfatilor și a altor substanțe potențial corozive.

Se presupune că un material ajunge la sfârșitul duratei de viață atunci când proprietățile sale în condiții de utilizare date s-au deteriorat într-o asemenea măsură încât utilizarea continuă a

materialului este considerată fie nesigură, fie neeconomică prin amploarea lucrărilor de reparații. Deteriorarea betonului poate fi cauzată de:

- Utilizarea materialelor necorespunzătoare.
- Practici deficitare de execuție.
- Probleme ale durabilității betonului cauzate de mediu înconjurător (coroziunea, delaminarea, fisurarea, carbonatarea, atacul sulfatic, atacul chimic, exfolierea, abraziunea și cavitația).
- Temperatură.
- Umiditate.
- Factori fizici: abraziunea, cavitația, rezistența la foc.
- Factori chimici.
- Factori biologici.

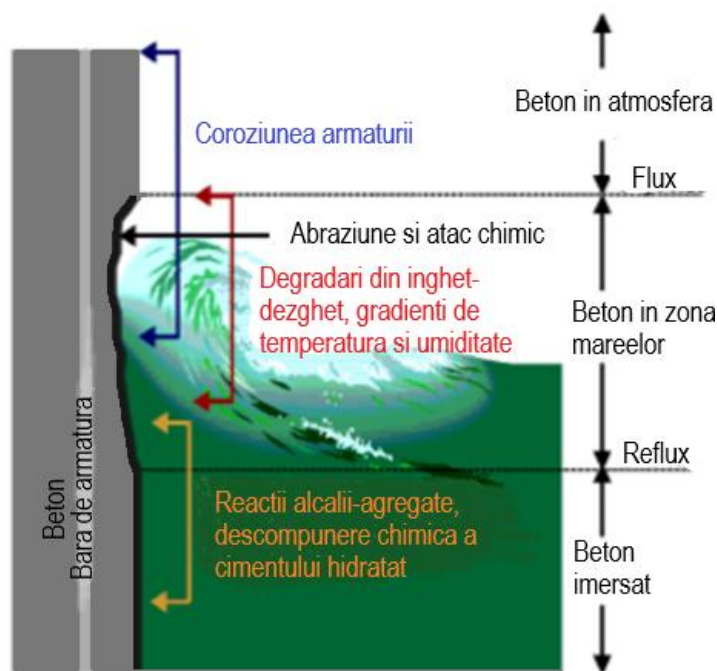


Figura II.15. - Mecanisme de degradare în structurile din beton [40].

#### ✓ Temperatura

- Variațiile de temperatură vor determina modificări ale volumului betonului. Atunci când temperatura crește, betonul se dilata ușor, iar când temperatura scade, se contractă.
- Deoarece variațiile de volum ale betonului sunt de obicei împiedicate de către fundații, armături sau elemente de legătură, vor apare eforturi semnificative de întindere care depășesc rezistența la întindere și pot provoca fisurarea betonului.
- La temperaturi ridicate, piatra de ciment își va micșora volumul datorită deshidratării hidrosilicatului de calciu (C-S-H), în timp ce agregatele se vor dilata.

- Modificările sezoniere ale temperaturii în intervalul de temperatură de până la 50 °C (90 °F) între vară și iarnă determină eforturi de întindere mai mari decât variațiile de temperatură zilnice, ceea ce duce la dezvoltarea procesului de fisurare.

#### ✓ *Umiditatea*

- Variația umidității din beton produce contracția sau umflarea alternativă a betonului.
- Dezvoltarea contracției la suprafețe betonului va determina apariția eforturilor unitare de întindere și posibile fisuri. Pentru diminuarea acestui fenomen, în construcțiile din beton armat se prevăd rosturi în beton care dirijează procesul de fisurare.
- Dacă nivelul de umiditate al betonului în apropierea armăturii atinge 60% până la 90% și există cloruri suficiente, oțelul va coroda.

Tabelul II.8. - Influența umidității relative asupra coroziunii armăturii din beton

| Umiditatea relativă  | Observații                                                                                                                              | Risc de coroziune                 |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Beton imersat în apă | Pori capilari plini cu soluție de hidroxid de calciu. Oxigenul trebuie să difuzeze prin porii capilari umpluți cu soluție spre armătură | Fără coroziune sau cu risc scăzut |
| 90 - 95 %            | Pori umpluți cu soluție prin care oxigenul poate să difuzeze                                                                            | Risc mic spre mediu               |
| 60 - 90 %            | Pori umpluți numai parțial cu soluție prin care oxigenul și apa ajung ușor la armătură                                                  | Risc crescut                      |
| Sub 60 %             | Fără sau cu foarte puțină soluție în pori                                                                                               | Fără risc                         |

#### ✓ *Contaminanții*

- Contaminanții din apa absorbită în beton pot provoca murdărirea, coroziunea oțelului sau atacul sulfatic. Ei includ: săruri de clor și sulfat, carbonați etc.
- Ciclurile alternative de umezire și uscare permit creșterea concentrației de săruri și astfel crește severitatea atacului lor.
- O creștere a mărimii cristalelor de săruri în porii capilari din apropierea suprafeței de evaporare cauzează fisurarea sau exfolierea. Dacă sărurile sunt atrase la suprafață și sunt depozitate în locuri unde are loc evaporarea apei, se produc eflorescențe.

#### ✓ *Abraziunea*

- În multe situații, suprafețele de beton sunt supuse abraziunii exercitată de alunecarea unor elemente pe suprafața betonului sau de impactul obiectelor care cad pe beton.
- În structurile hidrotehnice, acțiunea materialelor abrazive purtate de apa curgătoare duce, în general, la eroziunea betonului.

- Deteriorarea betonului poate fi provocată și prin expunerea betonului la acțiunea materialelor abrazive (de ex: nisip) transportate de vânt sau de apă.

- Rezistența la abraziune este în mod clar legată de rezistența la compresiune a betonului; pentru rezistența la abraziune este necesar un raport redus de apă-ciment și o întărire corespunzătoare a betonului.

- Agregatele dure sunt mai rezistente la abraziune decât agregatele moi.

#### ✓ *Cavitația*

- În general apele curgătoare produc cavitația betonului care prezintă în urma acestei acțiuni o suprafață neregulată, rugoasă și ciupită;

- Cavitația poate apare în orice canal deschis în care viteza apei curgătoare este mai mare de 12 m/s. Într-o conductă închisă, cavitația poate avea loc la viteze mai scăzute de 7,5 m/s.

- Pentru a asigura o rezistență bună la acțiunea de cavitație este necesară utilizarea betoanelor cu rezistență ridicată, un raport apă/ciment redus, o dimensiune mică a agregatului care nu depășește 20 mm și o bună aderență între piatra de ciment și agregate.

#### ✓ *Focul*

- Degradările produse de incendiu ale structurilor din beton pot include prăbușirea parțială sau totală a construcției, distorsiuni, deformări excesive, flambajul armăturii, aspect inestetic prin decolorarea betonului și pot diminua puternic rezistența betonului.

- Efectul temperaturilor ridicate asupra rezistenței betonului este mic și oarecum neregulat sub 250 °C (482 °F).

Tabelul II.9. - Impactul temperaturii datorat incendiilor asupra betonului

| Temperatura  | Efectul ei asupra betonului                                                |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 100 - 250 °C | Culoare normală, o reducere mică a rezistenței de compresiune              |
| 250 - 300 °C | Culoarea se schimbă în roz, reducerea rezistenței este moderată            |
| 300 - 600 °C | Culoarea este roz spre roșu, reducerea rezistenței este mare               |
| Peste 600 °C | Culoarea se schimbă în gri-negru; rezistența reziduală este foarte mică    |
| Peste 900 °C | Culoarea se schimbă în galben închis (bej), pierderea totală a rezistenței |

#### ✓ *Factori biologici*

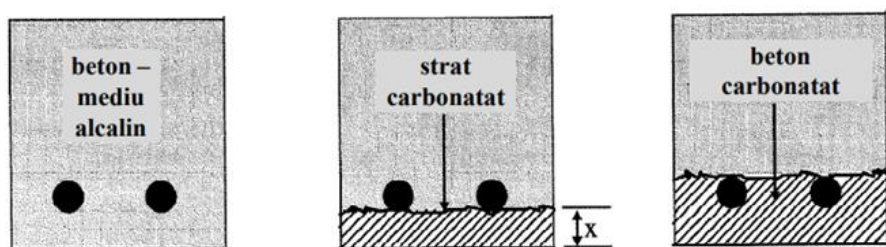
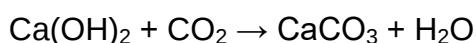
- Betonul poate fi deteriorat de organisme vii, cum ar fi plante, mușchi și licheni, bureți, scoici sau moluște marine.

- Acidul carbonic ce ia naștere prin descompunerea mușchilor și lichenilor vor ataca piatra de ciment și vor produce dezintegrarea și exfolierea betonului.
- Vietățile marine, de tipul moluștelor sau bureților, tind să formeze cavități în structurile subacvatice din beton. Ele reduc capacitatea portantă a betonului și expun armaturile cu strat de acoperire insuficient la apa de mare corozivă, materialul de la suprafața betonului se desprinde.
- Dezintegrarea stratului de suprafață expune un nou substrat al betonului la bureții care formează noi cavități, fenomenul având o dezvoltare lentă în timp.

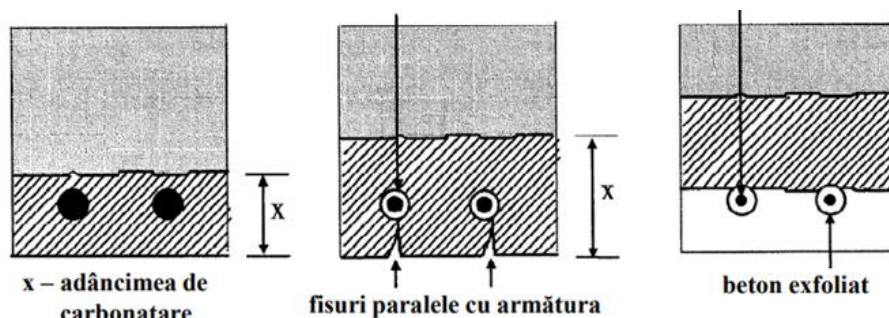
### II.4.1. Carbonatarea betonului

Coroziunea armăturii are loc atunci când pH-ul betonului scade de la valoarea de aproximativ 13 (în timpul turnării) la valori mai mici decât 9, dacă agenții agresivi din mediul ambiant (dioxidul de carbon și ionii de clor) penetrează stratul de acoperire cu beton, ajungând la armături.

Carbonatarea este reacția chimică care are loc între hidroxizii de calciu și dioxidul de carbon, care pătrunde prin pori în interiorul betonului.



a) perioada inițială, carbonatarea betonului  $\Rightarrow \text{Ca}_2\text{CO}_3$



b) perioada de coroziune a armăturii  $\Rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$

Figura II.16. - Evoluția fenomenului de carbonatare într-un element de beton armat [41].

Fenomenul de carbonatare nu conduce în mod automat la coroziunea armăturii. Dacă sunt îndeplinite anumite condiții de umiditate, chiar dacă betonul e carbonatat, armătura poate

să nu corodeze. Acest aspect a fost evidențiat prin cercetări în situ, efectiv la construcții cu o perioadă lungă de exploatare. Astfel, au fost depistate armături în stadii avansate de coroziune în medii cu umiditate ridicată (băi, bucătării) și armături neafectate, în medii “uscate”, pentru aceleași valori ale pH-ului betonului.

De aceea, pare hazardată afirmația că durata de viață a unei construcții din beton poate fi considerată drept timpul după care adâncimea de carbonatare a betonului este egală cu adâncimea stratului de acoperire cu beton a armăturii (teorie prezentată în unele studii științifice).

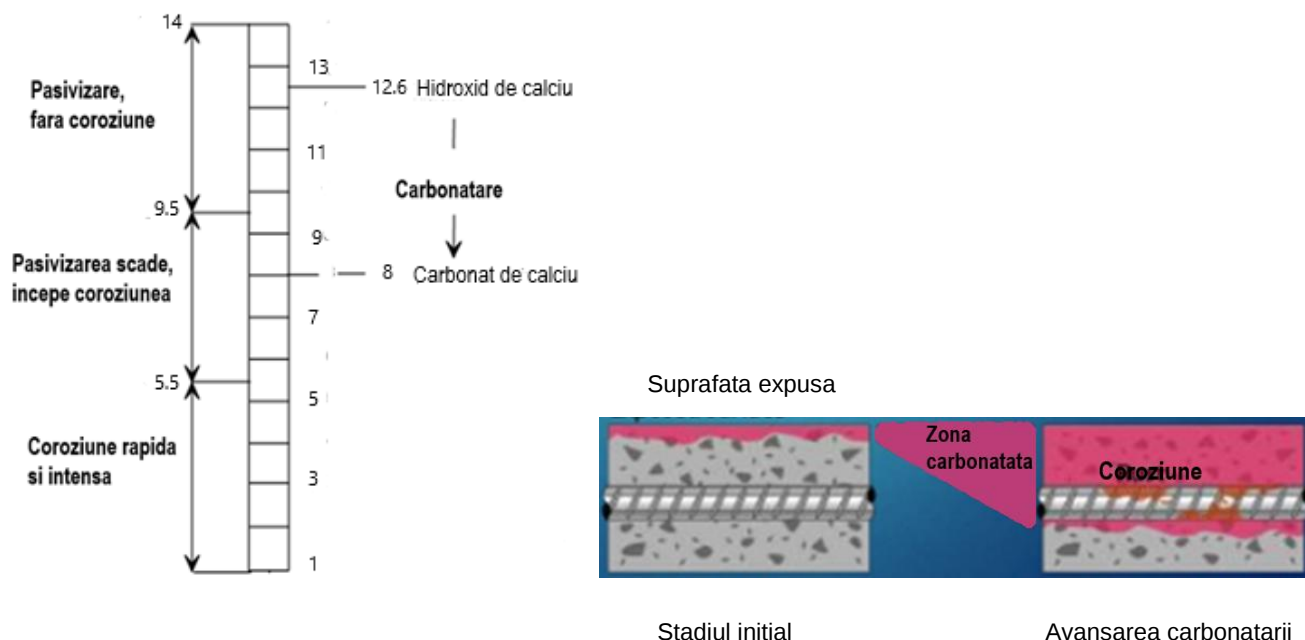


Figura II.17.- Coroziunea armăturii în funcție de pH [42].

Betonul protejează armătura de coroziune prin alcalinitatea sa. Din cauza valorilor ridicate ale pH-ului, pe suprafața armăturii se formează un strat protector fin din oxizi stabili de fier, care împiedică dezvoltarea coroziunii. Când acest strat protector format din compuși stabili ai fierului se distruge sub influența unui mediu puternic agresiv, apare fenomenul de coroziune.

Factori care influențează carbonatarea [76]:

✓ Umiditatea

Un beton foarte uscat nu carbonatează datorită lipsei apei necesare pentru declanșarea reacțiilor chimice și formarea calcitei. Pe de altă parte, carbonatarea este foarte lentă în condiții de umiditate ridicată, este necesară o umiditate “optimă” pentru carbonatare.

Carbonatarea maximă se obține pentru o anumită umiditate, o porozitate deschisă și un anumit tip de ciment. Carbonatarea maximă se dezvoltă la o umiditate (în interiorul betonului) cuprinsă între 60% și 80%. Este de așteptat ca un beton poros să carbonatzeze mai repede la o umiditate mai mare decât un beton mai puțin poros. Alternanța umiditate-uscăre grăbește procesul de carbonatare.

---

✓ Temperatura

Viteza de difuzie și reacțiile de carbonatare cresc cu temperatura. Într-un mediu interior încălzit sau în regiuni cu climă caldă carbonatarea este mai accelerată.

✓ Dozajul de ciment

Difuzia are loc în piatra de ciment și nu prin agregate. Dozajul de ciment nu afectează viteza de carbonatare atâta timp cât raportul a/c este menținut constant. O cantitate mai mare de piatră de ciment, având aceeași porozitate, va conduce la aceeași adâncime de carbonatare, dar la un volum mai mare de produse carbonatate. Deci, pentru a putea estima volumul de produse de carbonatare trebuie cunoscut dozajul de ciment.

✓ Calitatea betonului

Un raport a/c redus și un grad ridicat de hidratare conduce la obținerea unui beton compact cu o porozitate redusă. Rezultă de asemenea densificarea produșilor care conduc la încetinirea carbonatării în toate mediile. La aceeași umiditate, o porozitate redusă va determina o pătrundere mai dificilă a  $\text{CO}_2$  și astfel va cauza o carbonatare mai redusă. Astfel, calitatea betonului va influența valoarea coeficientului de difuzie.

Puzzolanele vor afecta, de asemenea, porozitatea și, în consecință, viteza de carbonatare. Trebuie să se ia în considerare și gradul de hidratare, deoarece un grad redus de hidratare generează o piatră de ciment poroasă.

Suprafețele betoanelor expuse în exterior prezintă o hidratare prelungită care conduce la o densificare a pietrei de ciment, încetinind astfel procesul de carbonatare.

Unii autori consideră că efectul unei tratări necorespunzătoare se resimte pe o perioadă limitată de timp. Cei mai mulți consideră însă tratarea betonului esențială pentru îmbunătățirea comportării în timp a betonului.

✓ Suprafața betonului și fisurile

Carbonatarea este o reacție care se dezvoltă de la suprafața către interior. Din acest motiv, starea suprafeței betonului este esențială. Difuzia se produce prin pori dar trebuie luate în considerare și suprafețele aflate între piatra de ciment, agregate și fisuri. În interiorul fisurilor, pe suprafața acestora, dioxidul de carbon poate pătrunde mai adânc, iar reacția se poate produce pe o suprafață mai mare.

✓ Presiunea  $\text{CO}_2$

O cantitate mai mare de  $\text{CO}_2$  în atmosfera va crește viteza de carbonatare. Viteza de carbonatare este mai mare în special în zonele urbane și în interior unde presiunea  $\text{CO}_2$  este mai mare. În anumite zone industriale, concentrația de  $\text{CO}_2$  poate fi foarte ridicată. Cel mai scăzut nivel este în zonele litorale, unde apa "absoarbe"  $\text{CO}_2$ . Având în vedere creșterea globală a concentrației de  $\text{CO}_2$ , carbonatarea va crește în viitor.

---

✓ Influenta tipurilor de ciment

Cele mai utilizate tipuri de ciment sunt cele de tip II. Viteza de carbonatare este legată, în general, de raportul a/c al betoanelor. S-a observat că betoanele preparate cu procente ridicate de zgură prezintă o viteză mai mare de carbonatare. Acest fapt se explică prin structura porilor stratului carbonatat al betonului care este mai puțin fină. Unii autori consideră ca viteza de carbonatare mai mare se manifestă mai accentuat la începutul perioadei, după care se atenuează în timp. În orice caz, viteza de carbonatare este mai mare decât în cazul betoanelor preparate cu cimenturi fără adaosuri.

Betoanele având în componenta praf de silice carbonatează mai repede. Betoanele preparate cu cimenturi cu cenușă prezintă diferite viteze de carbonatare în funcție de reactivitatea și de finețea cenușii. În general, betoanele la vârstă mică preparate cu cimenturi cu adaosuri prezintă o porozitate mai mare și o viteză de întărire mai redusă, din acest motiv și viteza de carbonatare este mai ridicată.

✓ Alți factori care influențează carbonatarea

Viteza de carbonatare depinde de viteza de difuzie a  $\text{CO}_2$  prin suprafața betonului. Unele tipuri de protecții aplicate pe suprafața betonului conduc la o reducere a umidității în pori și fisuri conducând la creșterea vitezei de carbonatare a structurilor expuse în exterior.

Betoanele afectate de îngheț-dezgheț carbonatează mai repede datorită faptului că betonul degradat prezintă suprafețe active mai mari. Metoda de determinare a rezistenței la carbonatare relativă a betonului pentru epruvetele din beton întărit necesită o perioadă de testare mai îndelungată determinându-se faptul că fenomenul de carbonatare este influențat atât de compoziția betonului (inclusiv de tipul de ciment), de modul de tratare inițial al betonului, cât și de mediul de menținere a probelor.

Metoda de evaluare a adâncimii de carbonatare accelerată a betonului definită conform standardului național SR 13379 [104] se poate utiliza informativ, pentru verificarea unor diferențe inerente dintre condițiile de expunere din laborator și cele din exploatare.

## **II.4.2. Penetrarea clorurilor în beton**

În afară de  $\text{CO}_2$ , ionii de clor (provenind, de exemplu din apa mării) pătrund prin pori în interiorul betonului. Difuzia clorurilor este un proces care are loc total sau parțial în porii umpluți cu apă, existând, întotdeauna, un echilibru între clorul legat și ionii de clor liberi. După carbonatare, clorul este desfăcut încă o dată, crescând riscul de coroziune. Acest fenomen se întâlnește și în cazul folosirii substanțelor de dezghețare, când, datorită umezelii și uscării suprafeței betonului, ionii de clor pătrund în beton prin suțione capilară, iar prin uscare, apa migrează în exterior, producând o îmbogățire în cloruri a zonei afectate de umezire și uscare. Grosimea stratului de beton afectat are o mare importanță, în special în legătură cu acoperirea cu beton a armăturilor.

## Depasivarea în zona fisurilor

Atât  $\text{CO}_2$ , cât și clorul pot pătrunde la armături prin fisuri, mai repede decât prin betonul nefisurat, timpul de depasivare depinzând de deschiderea fisurilor. Clorurile pot proveni din diverse surse: apa de mare în zona litorală, sarea pentru topirea gheții sau clorul din beton prezent în anumite adaosuri. Sursa de cloruri din beton poate fi internă sau externă. În cazuri mai puțin frecvente, clorurile sunt prezente în beton dacă se utilizează aditivi care conțin clor, clorura de calciu ( $\text{CaCl}_2$ ) fiind un constituent principal al mai multor aditivi adăugați pentru a accelera priza și întărirea betonului sau dacă se utilizează agregate din zona de plajă în construcțiile de beton din zona de coastă sau regiuni marine depărtate de furnizarea de materiale non saline. Conținutul maxim de clor raportat la masa cimentului pentru betonul armat este de maxim 0.4%.

Tabelul II.10. - Conținutul maxim de cloruri din beton [3].

| Utilizarea betonului                                                                                                                | Clasa de cloruri <sup>a</sup><br>conținute | Conținutul maxim de<br>Cl <sup>-</sup> raportat la masa<br>cimentului <sup>b</sup> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Beton care nu conține armături de oțel sau alte piese metalice înglobate (cu excepția pieselor de ridicare rezistente la coroziune) | Cl 1.0                                     | 1.0%                                                                               |
| Beton conținând armături de oțel sau piese metalice înglobate                                                                       | Cl 0.20                                    | 0.20%                                                                              |
|                                                                                                                                     | Cl 0.40                                    | 0.40%                                                                              |
| Beton conținând armături de precomprimare de oțel                                                                                   | Cl 0.10                                    | 0.10%                                                                              |
|                                                                                                                                     | Cl 0.20                                    | 0.20%                                                                              |

<sup>a</sup> Pentru o utilizare specifică a betonului, clasa de utilizare este în funcție de prevederile valabile pe locul de utilizare a betonului

<sup>b</sup> Când sunt utilizate adaosuri de tip II și sunt luate în calculul conținutului de ciment, atunci conținutul de cloruri este exprimat ca procent din masa ionilor clor față de masa de ciment plus masa totală a adaosurilor care sunt luate în considerație

Rezistența la penetrare depinde de vârsta betonului și în special de continuarea hidratării și creșterea compactității pietrei de ciment.

Coroziunea acidă, produsă de gazele, vaporii și soluțiile cu caracter acid (acid clorhidric, acid hipocloros, acid cloros, acid cloric, acid percloric etc.), constă în coroziune prin cristalizare din soluții concentrate de clorură, sulfat sau carbonat acid din ape freatică, ape de suprafață sau ape de mare, în urma pătrunderii acestora în beton prin fenomene de ascensiune capilară sau permeabilitate. Cristalizarea sărurilor care se depun în porii capilari și microfisurile pietrei de ciment se face cu mărire de volum, având ca rezultat distrugerea betonului în profunzime.

Diminuarea proprietăților fizico-mecanice ale betonului este însoțită întotdeauna și de coroziunea armăturilor care provoacă: reducerea ariei secțiunii transversale a armăturii, reducerea și pierderea aderenței beton-armătură și desprinderea stratului de acoperire cu beton a armăturilor.

### II.4.3. Rezistența la îngheț-dezgheț

Gelivitatea se caracterizează prin numărul maxim de cicluri de îngheț – dezgheț succesive pe care probele pot să le suporte fără ca pierderea de greutate să depășească 5% (respectiv 10%), reducerea rezistenței la compresiune cu 25% față de o probă martor nesupusă acestui tratament, iar reducerea modulului de elasticitate dinamic să fie de maxim 15%. Betoanele se degradează datorită eforturilor interioare repetate produse de mărirea cu 10% a volumului apei ce îngheață în defectele de structură. Apa legată chimic și fizic nu îngheață.

Distrugerea betonului prin îngheț-dezgheț este o consecință a structurii sale capilar-poroase și a gradului de saturare cu apă, în condițiile unor temperaturi negative, când apa îngheață în pori determinând eforturi interioare ce depășesc rezistența la întindere a betonului.

Temperatura la care îngheață apa prezentă în beton depinde de tipul și mărimea porilor în care se găsește. Apa din micropori și pori capilari este supusă la presiuni importante, a căror valoare este cu atât mai mare cu cât diametrul lor este mai redus și, în consecință, îngheață la temperaturi mai scăzute decât apa liberă. Cele mai mari transformări în structura betonului se produc în intervalul de temperatura cuprins între  $-10^{\circ}$  și  $-40^{\circ}$  C.

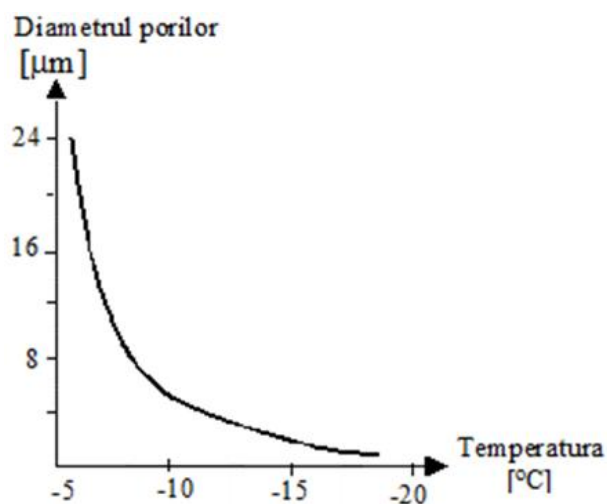


Figura II.18. Variația temperaturii de înghețare a apei din pori în funcție de diametrul porilor [75].

Un pavaj din beton uscat nu va fi deteriorat de aceste cicluri de îngheț-dezgheț, deoarece porii cu dimensiunile de 20–200 μm rezultați în urma acțiunii aditivilor antrenori de aer din piatra de ciment hidratată sunt goi și oferă spațiu adecvat pentru a suporta presiunile hidraulice, osmotice și de cristalizare care se dezvoltă datorită formării gheții. Dacă același beton suferă cicluri repetate de îngheț-dezgheț într-o stare saturată critic (peste o saturație de aproximativ 85%), deteriorările vor avea loc după câteva cicluri, indiferent de volumul golurilor de aer [43]. Rezistența la îngheț-dezgheț repetat a unui beton la un anumit grad de saturare cu apa, depinde de compactitate, de mărimea, forma și modul de distribuție a porilor și capilarelor, de tipul și dozajul de ciment, natura agregatelor, etc.

Pentru obținerea de betoane rezistente la îngheț-dezgheț repetat este necesar să se realizeze betoane compacte, impermeabile, preparate cu cimenturi bogate în  $C_3S$ -alit și cu

---

conținut cât mai redus în C<sub>3</sub>A-celit. De asemenea, se recomandă folosirea aditivilor plastifianți, antrenori de aer, care determină formarea unor pori fini, uniform distribuiți și închiși, care întrerup capilarele și care în același timp amortizează efectul presiunii produse de înghețarea apei. Se consideră că betonul de bună calitate (utilizând ciment Portland unitar, cu raport a/c mai mic de 0,36, cu un grad de hidratare avansat, având deci cantități mici de apă care poate îngheța) se comportă bine la temperaturi de până la -30° C.

Rezistența la îngheț-dezgheț se poate determina în conformitate cu SR 3518 [44] prin:

- metoda distructivă, exprimându-se prin numărul maxim de cicluri de îngheț-dezgheț succesive pe care epruvetele din beton, începând cu o vârstă de cel puțin 28 de zile pot să le suporte fără să sufere o reducere a rezistenței la compresiune mai mare de 25 %;
- metoda nedistructivă, exprimându-se prin numărul maxim de cicluri de îngheț-dezgheț succesive, pe care epruvetele pot să le suporte fără să sufere modificări ale structurii, care să reducă modulul de elasticitate dinamic cu mai mult de 15 %.

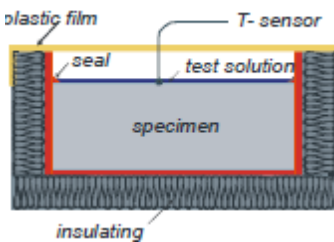
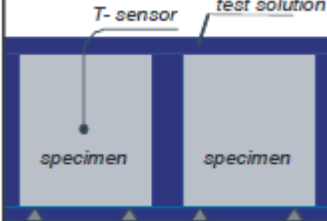
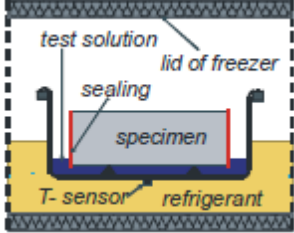
În Europa cele mai frecvente metode de testare se efectuează în conformitate cu standardul CEN/TS 12390-9 [45]. Acest standard descrie o metodă de referință (slab test) și două metode de testare alternative (cube test și CF/CDF test). Nu sunt stabilite corelații între rezultatele obținute prin aplicarea acestor trei metode. Toate metodele apreciază rezistența la îngheț-dezgheț prin cantitatea de beton exfoliat, fie ca masă absolută, fie ca procent din pierderea de masă. Pentru determinarea degradărilor interne care se produc datorită ciclurilor de îngheț-dezgheț și pot provoca variații ale dimensiunilor probelor încercate față de dimensiunile inițiale se utilizează documentul CEN/TR 15177 [80].

Standardul european CEN/TS 12390-9 [45] conține trei metode de determinare a rezistenței la îngheț-dezgheț având următoarele criterii de acceptare bazate pe cantitatea de material exfoliat sau pe evaluarea reducerii modulului de elasticitate a betonului [38]:

- criteriul 1: dacă prin metoda "cube-test", cantitatea de material exfoliat este mai mică de 5% din masa probei de beton (cu dozaj de ciment 300 kg/m<sup>3</sup> și raport a/c=0.6) după aplicarea a 56 cicluri de îngheț-dezgheț succesive și respectiv sub 10% după 100 cicluri de îngheț-dezgheț succesive, atunci compoziția respectivă este acceptată în clasa de expunere XF1;
- criteriul 2: dacă prin metoda "cube-test", cantitatea de material exfoliat este mai mică de 3% din masa probei de beton (cu dozaj de ciment 300 kg/m<sup>3</sup> și raport a/c=0.6) după aplicarea a 56 cicluri de îngheț-dezgheț succesive și respectiv sub 5% după 100 cicluri de îngheț-dezgheț succesive, atunci compoziția respectivă este acceptată în clasa de expunere XF3;
- criteriul 3: dacă prin metoda "slab-test", cantitatea de material exfoliat de pe suprafața probei de beton (cu dozaj de ciment 320 kg/m<sup>3</sup>, raport a/c=0.5 și aditiv antrenor de aer) este mai mică de 1 kg/m<sup>2</sup> după aplicarea a 56 cicluri de îngheț-dezgheț succesive cu agenți de dezghețare, atunci compoziția respectivă este acceptată în clasa de expunere XF4;
- criteriul 4: dacă prin metoda pentru evaluarea reducerii modulului de elasticitate a betonului, proba de beton (cu dozaj de ciment 320 kg/m<sup>3</sup> și raport a/c=0.5) are o reducere a modulului de

elasticitate dinamic mai mică de 25% după aplicarea a 28 cicluri de îngheț-dezgheț succesive, atunci compoziția respectivă este acceptată în clasa de expunere XF3;

Tabelul II.11. - Comparație între metodele de testare în conformitate cu CEN/TS 12390-9 [45].

|                                          | Metoda de testare                                                                 |                                                                                    |                                                                                     |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                                          | Slab test                                                                         | Cube test                                                                          | CF/CDF test                                                                         |
| Parametrii de testare                    |  |  |  |
| Mentținere                               | apă 6 zile/<br>aer 21 de zile/<br>strat apă (soluție) 3 zile                      | apă 6 zile/<br>aer 20 zile/<br>apă/soluție 1 zi                                    | apă 6 zile/<br>aer 21 zile/<br>apă/soluție 7 zile                                   |
| Forma probelor (mm)                      | 150x150x50                                                                        | 100x100x100                                                                        | 150x150x70                                                                          |
| Vârsta probelor la începutul încercării  | Cel puțin 31 de zile                                                              | 28 zile                                                                            | Cel puțin 35 zile                                                                   |
| Direcția de testare                      | Pe o parte (superioară)                                                           | Pe toate părțile                                                                   | Pe o parte (inferioară)                                                             |
| T min./Tmax                              | -20°C/+20°C măsurată în apă/soluție                                               | -20°C/+20°C măsurată în interiorul cubului                                         | -20°C/+20°C măsurată sub container                                                  |
| $\Delta T$                               | $\pm 2^{\circ}\text{K}$                                                           | $\pm 2^{\circ}\text{K}$                                                            | $\pm 0,5^{\circ}\text{K}$                                                           |
| Viteza de răcire/<br>viteza de încălzire | 6,2°C/h/<br>1,8°C/h                                                               | 10°C/h/<br>1,5°C/h                                                                 | 10°C/h/<br>10°C/h                                                                   |
| Durata ciclu/<br>Numărul de cicluri      | 24h/<br>56 cicluri                                                                | 24h/<br>56 cicluri                                                                 | 12h/<br>12 cicluri                                                                  |
| Criteriul de testare                     | exfoliere la suprafață                                                            | % absorbție<br>% pierdere de masă                                                  | exfoliere la suprafață                                                              |

- criteriul 5: dacă prin metoda "CF/CDF test", proba de beton are o reducere a modulului de elasticitate dinamic mai mică de 25% după aplicarea a 28 cicluri de îngheț-dezgheț succesive și cantitatea de material exfoliat de pe suprafața probei de beton este mai mică de 1 kg/m<sup>2</sup>, atunci compoziția respectivă este acceptată în clasa de expunere XF3;

- criteriu 6: dacă prin metoda "CF/CDF test", proba de beton are o cantitate de material exfoliat de pe suprafața probei de beton mai mică de 1.5 kg/m<sup>2</sup> după aplicarea a 28 cicluri de îngheț-dezgheț succesive, atunci compoziția respectivă este acceptată în clasa de expunere XF2 și XF4.

---

Folosind metoda "slab test", s-au propus pe plan național alte criterii pentru acceptarea comportării corespunzătoare la fenomene de îngheț-dezgheț a unui beton de ciment.

- criteriul național 1: dacă prin metoda "slab test", proba de beton (cu dozaj de ciment  $320 \text{ kg/m}^3$  și raport  $a/c=0.5$ ) are cantitatea de material exfoliat de pe suprafața probei de beton mai mică de  $1.3 \text{ kg/m}^2$  după aplicarea a 56 cicluri de îngheț-dezgheț succesive, atunci compoziția respectivă este acceptată în clasa de expunere XF1;
- criteriul național 2: dacă prin metoda "slab test", proba de beton (cu dozaj de ciment  $320 \text{ kg/m}^3$ , raport  $a/c=0.5$  și aditiv antrenor de aer) are cantitatea de material exfoliat de pe suprafața probei de beton mai mică de  $1.3 \text{ kg/m}^2$  după aplicarea a 56 cicluri de îngheț-dezgheț succesive cu agenți de dezghețare, atunci compoziția respectivă este acceptată în clasa de expunere XF2;
- criteriul național 3: dacă prin metoda "slab test", proba de beton (cu dozaj de ciment  $320 \text{ kg/m}^3$  și raport  $a/c=0.5$ ) are cantitatea de material exfoliat de pe suprafața probei de beton mai mică de  $1 \text{ kg/m}^2$  după aplicarea a 56 cicluri de îngheț-dezgheț succesive, atunci compoziția respectivă este acceptată în clasa de expunere XF3;

Folosind metoda "slab test", s-a propus alt criteriu pentru acceptarea comportării corespunzătoare la fenomene de îngheț-dezgheț a unui beton preparat cu ciment candidat comparativ cu betonul de referință. După aplicarea a 56 de cicluri de îngheț-dezgheț succesive, probele de beton preparate cu ciment "experimental" (candidat) nu trebuie să prezinte o reducere a modulului de elasticitate dinamic mai mare de 5% comparativ cu valoarea înregistrată în cazul probelor preparate cu ciment "standard" (de referință) a cărui comportare favorabilă este recunoscută în medii specifice.

#### **II.4.4. Solicitarea mecanică a betonului prin uzură (abraziune)**

Rezistența la soc și la uzură este o încercare dinamică și se determină la fundațiile de mașini, piste de aeroport, drumuri și pardoseli industriale. Rezistența betonului la uzură, de fapt rezistența zonei de la suprafața acestuia, crește cu rezistența la compresiune și vârstă. Proprietățile acestei zone de suprafață sunt puternic influențate de operațiunile de finisare și tratare după execuție. În compoziția betoanelor rezistente la uzură se utilizează cimenturi fără adaosuri sau cu adaos de zgură, funcție de scopul urmărit și de solicitări, la dozaje medii de ciment  $350 \text{ kg/m}^3$ . Pe măsura ce crește dozajul de zgura din ciment este necesara sporirea duratei tratării betonului.

Prezența agregatelor concasate, din roci dure, rezistente conferă o rezistență superioară la uzură. O bună compactare și omogenitate, însoțite de o păstrare în mediu umed cel puțin 7 zile, permit să se obțină o rezistență mare la uzură și o comportare bună în exploatare a betoanelor rutiere sub aspectul durabilității.

---

## **II.4.5. Atacuri chimice de deteriorare a betonului (coroziunea betonului)**

Betonul este rezistent la cele mai multe medii naturale și multe substanțe chimice, betonul fiind practic singurul material utilizat pentru construcția de instalații de transport și tratare a apelor reziduale datorită capacității sale de a rezista la coroziunea cauzată de contaminanții foarte agresivi din fluxul de apă reziduală, precum și de substanțele chimice adăugate pentru tratarea acestor deșeuri. Acizii atacă betonul prin dizolvarea pietrei de ciment și a agregatelor calcaroase.

Pe lângă utilizarea betonului cu o permeabilitate redusă, tratamentele de suprafață pot fi utilizate pentru a feri ca substanțele agresive să vină în contact cu betonul. Pentru a diminua acțiunile substanțelor chimice asupra betonului se recomandă o serie de tratamente de protecție pentru a ține sub control atacul chimic.

Durabilitatea structurilor din beton este adesea determinată de viteza cu care betonul este descompus în urma reacțiilor chimice. Toate aceste reacții necesită ca substanțele agresive (ioni sau molecule), transportate din mediul ambiant la suprafața sau în interiorul betonului prin intermediul apei (lichidă sau vaporii) să ajungă în contact cu substanțe reactive. Întrucât, în mod normal, viteza de transport a substanțelor agresive în beton este redusă, efectul dăunător al reacțiilor chimice devine evident numai după mai mulți ani. Creșterea temperaturii accelerează însă atacul chimic asupra betonului, deoarece sporește mobilitatea ionilor și a moleculelor de substanțe agresive. Substanțele agresive pentru beton pot acționa sub forma de soluții, gaze ( $\text{CO}_2$  sau  $\text{SO}_2$  din atmosferele industriale în prezenta umidității devin agresive), aerosoli (în zona litoralului), uleiuri, grăsimi, sau ca rezultat al acțiunii microorganismelor. Distrugerea betonului în medii agresive chimic se produce în primul rând prin degradarea pietrei de ciment prin procese de decalcifiere sau expansiune.

Reacțiile chimice care pot conduce la diminuarea calității betonului sunt:

- a) reacțiile acizilor, sărurilor de amoniu, sărurilor de magneziu și a apei fără duritate;
- b) reacțiile sulfatilor cu aluminații din beton;
- c) reacțiile bazelor (alcaliilor) cu agregatele reactive din beton.

### **II.4.5.1. Atacul acizilor**

Prima categorie de reacții este o transformare a compușilor de calciu (hidroxidul de calciu, hidrosilicatul de calciu și hidroaluminatul de calciu) în săruri de calciu ușor solubile, iar în cazul apei fără duritate, o dizolvare a compușilor de calciu. În consecință, piatra de ciment se distruge strat după strat, până la fărâmițarea completă.

### **II.4.5.2. Atacul sulfatic**

A doua categorie de reacții, care în prezenta unei cantități suficiente de apă, dă naștere la creșterea de volum, ceea ce produce un fenomen de expansiune a betonului, generator de fisuri cu

---

traseu neregulat, care permit în continuare accesul mai ușor al substanțelor agresive, până la dezintegrarea completă.

Cantități excesive de sulfați în sol sau apă pot ataca și distruge un beton care nu are o compoziție corespunzătoare. Sulfații (de exemplu, sulfatul de calciu, sulfatul de sodiu și sulfatul de magneziu) pot ataca betonul prin reacția cu compușii hidrați în pasta de ciment întărită. Aceste reacții pot induce o presiune suficientă pentru a determina dezintegrarea betonului. Ca și piatra naturală, cum ar fi calcarul, betonul poros (în general, cu un raport apă/ciment ridicat) este susceptibil la cristalizarea sărurilor. Exemple de săruri cunoscute care provoacă degradări betonului includ carbonatul de sodiu și sulfatul de sodiu.

Atacul sulfatic și cristalizarea sărurilor sunt mai severe în locurile în care betonul este expus ciclurilor alternative de umezire și uscare, în comparație cu umiditatea continuă. Pentru cea mai bună protecție împotriva atacului sulfatic exterior, trebuie avută în vedere o compoziție cu un raport a/c aproximativ 0.40 și utilizarea cimenturilor speciale recomandate pentru mediile sulfatice. Atacul sulfatic poate fi "extern" sau "intern". Atacul sulfatic extern este cel mai frecvent tip și apare de obicei în cazul în care apa care conține sulfați dizolvați pătrunde în beton schimbând compoziția și microstructura lui. Aceste modificări pot varia în funcție de tipul sau severitatea atacului, dar includ de obicei fisurare extinsă, expansiune, pierderea aderenței dintre pasta de ciment și agregat, modificarea compoziției pietrei de ciment și o pierdere generală a rezistenței betonului.

Efectele de mai sus sunt tipice atacului cu soluții de sulfat de sodiu sau sulfat de potasiu. Soluțiile care conțin sulfați de magneziu sunt, în general, mai agresive, pentru aceeași concentrație. Acest lucru se datorează faptului că și magneziul participă la reacții, înlocuind calciul în fazele solide cu formarea brucitului (hidroxid de magneziu) și hidrosilicatul de magneziu. Calciul înlocuit precipită în principal ca ghips. Alte surse de sulfați care pot provoca atac sulfatic includ:

- Apa de mare
- Oxidarea mineralelor sulfurate conținute de argila din jurul elementelor din beton poate produce acid sulfuric care reacționează cu betonul
- Acțiune bacteriana din canalizare - bacteriile anaerobe produc dioxid de sulf care se dizolvă în apă și apoi se oxidează pentru a forma acid sulfuric
- În zidărie, sulfații prezenți în cărămidă pot fi eliberați treptat pe o perioadă lungă de timp, cauzând atacul sulfatic al mortarului, în special acolo unde sulfații sunt concentrați datorită umidității.

Atacul sulfatic intern apare când o sursă de sulfați este încorporată în beton la prepararea lui prin utilizarea agregatului bogat în sulfați, excesul de ghips adăugat în ciment sau contaminare. Prin testări adecvate se poate evita, în general, atacul sulfatic intern.

Parametrii care influențează expansiunea sulfatică sunt:

- condițiile de expunere, respectiv severitatea atacului, determinată de cantitatea de substanțe agresive;
- accesibilitatea, respectiv permeabilitatea betonului, apreciată în practică prin valoarea raportului apă/ciment sau prin calitatea betonului;
- susceptibilitatea betonului, determinată de tipul de ciment (cimenturile cu un conținut de  $C_3A$  de maximum 3%, ca și cimenturile cu adaosuri minerale asigură o rezistență sporită la acțiunea sulfatilor);
- cantitatea de apă disponibilă.

Metoda propusă pentru evaluarea rezistenței la atacul soluțiilor sulfatice are ca referință pr.ENV 196-X [57] și constă în determinarea expansiunii (modificări ale lungimii) unor probe prismatice de 20 mm x 20 mm x 160 mm menținute în soluție sulfatică (soluție de  $Na_2SO_4$  cu o concentrație  $16,0 \pm 0,5$  g/litru sau soluție de  $MgSO_4$  cu o concentrație  $16,0 \pm 0,5$  g/litru sau în apă de mare artificială). Valoarea expansiunii se compară fie cu valori obținute pentru cimenturi considerate rezistente la sulfat, fie se compară cu valori absolute propuse pentru o expansiune maximă după perioada de menținere predeterminată.

Un criteriu propus pentru acceptarea comportării corespunzătoare la atac sulfatic al unui beton cu ciment "experimental" trebuie să respecte valorile acceptate în prezent la nivel european (probele de mortar preparate cu diferite tipuri de cimenturi nu trebuie să depășească o deformare de 0,5mm/m după 90 de zile de expunere) și trebuie să fie completat de compararea rezultatelor obținute pe mortarele preparate cu cimentul experimental cu cele obținute pentru cel puțin un ciment recunoscut ca fiind rezistent la sulfat:

CEM I.....SR 0 ( $C_3A=0$ )  
 CEM I.....SR 3 ( $C_3A \leq 3\%$ )  
 CEM I.....SR 5 ( $C_3A \leq 5\%$ )  
 CEM III/B.....SR S  
 CEM III/C .....SR S  
 CEM IV A.....SR P  
 CEM IV B.....SR P

Se consideră că în afară de aplicarea criteriilor propuse, este întotdeauna util să se compare rezultatele obținute prin aplicarea diferitelor metode experimentale pe betoanele preparate cu cimenturile „experimentale” cu rezultatele obținute pe betoanele preparate cu cimenturi verificate ca având o comportare corespunzătoare în timp în medii specifice de expunere.

---

### II.4.5.3. Reacția alcalii-agregate

Reacția alcalii-agregate are un mecanism asemănător cu cel al atacului sulfaților. Incompatibilitatea agregatelor cu cimentul apare la betoane confecționate cu cimenturi bogate în alcalii și cu agregate care conțin  $\text{SiO}_2$  activ (opale, calcedonie, etc). La prepararea betonului alcaliile trec în soluție sub formă de hidroxizi și reacționează cu  $\text{SiO}_2$  activ din agregate formând geluri, care au proprietatea de a se umfla în contact cu apa, creând eforturi unitare interioare. Cea mai frecventă este reacția dintre constituenții activi ai silicei din agregat și alcaliile din ciment. Reacția începe cu atacul asupra mineralelor silicei din agregat de către hidroxizii alcalini derivați din alcaliile ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) aflate în ciment. Ca rezultat se formează un gel de silicat alcalin având loc alterarea exteriorului particulelor de agregat. Acest gel are o capacitate de umflare practic „nelimitată”, absorbind apa și, în consecință, mărimdu-și volumul. Acest gel creează o presiune internă care se manifesta prin expansiunea, fisurarea și dezintegrarea pietrei de ciment.

Factorii principali care influențează atacul alcalii-silice sunt:

- ✓ reactivitatea agregatelor, care se bazează pe prezenta silicei amorphe sau parțial cristalizate;
- ✓ concentrația în alcalii a apei din pori (cantitatea internă de substanțe agresive);
- ✓ tipul cimentului;
- ✓ condițiile de expunere (cantitatea externă de substanțe agresive);
- ✓ cantitatea de apă disponibilă.

### II.4.5.4. Atacul biologic

Degradările produse asupra betonului de mușchi, licheni, ciuperci, bureți, scoici sau moluște marine determină o coroziune acidă (datorată acizilor humici rezultați din fenomene de putrezire) și o coroziune biochimică prin prezența bacteriilor și a microorganismelor care se dezvoltă în medii cu mult aer și oxigen (bacterii aerobe) sau în medii cu puțin oxigen (bacterii anaerobe). În conductele de canalizare care transportă lichide (nu neapărat reziduri industriale) sau în galerii s-a observat coroziunea deasupra nivelului lichidului, deoarece acolo este atacat betonul de hidrogenul sulfurat ( $\text{H}_2\text{S}$ ) rezultat al activității bacteriilor prezente în canalizare. Cantitatea de hidrogen sulfurat depinde de temperatura din conductă și de ventilația ei.

## II.5 Impactul caracteristicilor betonului proaspăt și întărit asupra activităților specifice realizării elementelor și structurilor din beton armat

În tabelul II.12. este prezentată o sinteză a principalelor caracteristici ale betonului proaspăt și întărit și impactul pe care îl au acestea asupra activităților esențiale în domeniul construcțiilor din beton armat (proiectare/producere beton/execuție/cercetare).

Tabelul II.12. - Sinteza cerințelor de proiectare/producere/execuție/cercetare ale betonului [115]

|                | Caracteristica                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Proiectare                                                                                                                                                                                          | Producere                                                                                                                                                                             | Execuție                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Cercetare                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 2                                                                                                                                                                                                   | 3                                                                                                                                                                                     | 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 5                                                                                                                                                                                                                                                               |
| BETON PROASPAT | <p>Consistența (lucrabilitatea) (II.2.1.)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- metoda răspândirii</li> <li>- metoda tasării trunchiului de con, SR EN 12350-5 [10] ;</li> <li>- metoda vâscozimetruului tip Powers, SR EN 12350-2 [13];</li> <li>- metoda vâscozimetruului tip Vebe, SR EN 12350-3 [14]</li> </ul> | Indirect: calculul lungimii de ancorare, aplicarea coeficienților de reducere datorită tasării plastice a betonului în cazul armăturilor de la partea superioară                                    | Direct: Stabilirea compoziției betonului, stabilirea cantității de apă, aditivi, astfel încât betonul să satisfacă toate criteriile de performanță specificate pentru betonul întărit | Principal: Cerință în funcție de tehnologia de punere în operă, omogenitatea, tendința de separare a apei prin mustire                                                                                                                                                                            | Direct: Optimizarea compoziției betonului                                                                                                                                                                                                                       |
|                | <p>Gradul de compactare (II.2.2.)</p> <p>SR EN 12350-4 [9]</p>                                                                                                                                                                                                                                                             | Indirect: Îmbunătățirea gradului de impermeabilitate pentru elementele expuse la intemperii sau situate în medii agresive; Asigurarea proprietăților de rezistență, deformabilitate și durabilitate | Direct: Verificarea conținutului de apă, dozajul de ciment și granulozitatea agregatelor                                                                                              | Principal: Cerință în funcție de consistența impusă a betonului (respectarea raportului optim a/c) compactarea betonului proaspăt să se facă astfel încât materialele componente ale betonului să fie uniform distribuite în amestec, să nu segreghe și betonul să realizeze o structură compactă | Direct: Stabilirea tehnologiei de turnare (punere în operă) în funcție de mijloacele de compactare și compoziția betonului                                                                                                                                      |
|                | <p>Densitatea aparentă (II.2.3.)</p> <p>SR EN 12350-6 [11]</p>                                                                                                                                                                                                                                                             | Indirect: Asigurarea rezistenței la compresiune                                                                                                                                                     | Indirect: Previziuni asupra clasei betonului (rezistențele mecanice) compactității, permeabilității, gelivității.                                                                     | Principal: Acțiuni asupra cofrajelor și sprijinirilor acestora SR EN 1991-1-1                                                                                                                                                                                                                     | Principal: Studii pentru stabilirea naturii agregatelor pentru betoane speciale (betoane ușoare)                                                                                                                                                                |
|                | <p>Conținutul de aer (II.2.4.)</p> <p>SR EN 12350-7 [12]</p>                                                                                                                                                                                                                                                               | Indirect: Asigurarea unei compactități maxime și a rezistențelor mecanice ale betonului                                                                                                             | Direct: Controlul riguros al materialelor componente, dozarea lor și caracteristicile betonului proaspăt: consistență și densitate aparentă                                           | Principal: Măsurile de compactare adecvate                                                                                                                                                                                                                                                        | Principal: Eliminarea efectelor negative ale aditivilor antrenori de aer asupra celorlalte proprietăți                                                                                                                                                          |
|                | <p>Timpul de priză (II.2.5.)</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Direct: Reglarea procesului de întărire, întârziere sau accelerare de priză în funcție de cerințele tehnologice                                                                                     | Direct: Indicarea perioadei de timp dintre momentul preparării și al punerii în operă, dictată de priza cimentului                                                                    | Indirect: Stabilirea distanței maxime de transport cu/fără malaxare și măsuri speciale la decofrare sau betonare pe timp friguros sau excesiv de cald, durata maximă de transport recomandată pentru care nu se modifică performanțele și caracteristicile                                        | Principal: Stabilirea tipurilor de ciment indicate în funcție de punerea în operă și de exploatare impusă (întârzierea prizei betonului folosind cimenturi cu cenuși și zgură de furnal) și a unor noi tipuri de aditivi acceleratori sau întârziatori de priză |

|                  | Caracteristica                                                                                      | Proiectare                                                                                                                                                                                                                                                  | Producere                                                                                                | Execuție                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Cercetare                                                                                                                                                                          |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  | 1                                                                                                   | 2                                                                                                                                                                                                                                                           | 3                                                                                                        | 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 5                                                                                                                                                                                  |
|                  |                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                          | betonului<br>Factori de mediu<br>(temperatură,<br>umiditate, acțiuni<br>mecanice)                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                    |
| BETON    INTARIT | Densitatea aparentă -<br>metoda prin cântărire (II.3.1.)<br>SR EN 12390-7 [23]                      | Principal: Calculul<br>acțiunilor<br>permanente (greutăți<br>proprie)<br>SR EN 1991-1-1                                                                                                                                                                     | Direct: Compararea<br>caracteristicii<br>obținute cu cea<br>prescrisă                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Principal: Studii<br>pentru stabilirea<br>unor compoziții cu<br>cerințe speciale                                                                                                   |
|                  | Compactitatea (porozitatea<br>aparentă) (II.3.2.)                                                   | Indirect: Asigurarea<br>rezistențelor<br>mecanice,<br>permeabilitatea,<br>gelivitatea ,<br>rezistența la acțiuni<br>chimice agresive,<br>aderența                                                                                                           | Direct: Adoptarea<br>de compoziții ale<br>betonului care sa<br>conducă la un<br>volum minim de<br>goluri | Direct: Mijloace de<br>compactare<br>eficiente în funcție<br>de consistența<br>betonului și tipul<br>elementului<br>astfel încât să nu<br>rămână goluri între<br>armături și/sau între<br>acestea și cofraj,<br>precum și o<br>compactare corectă<br>prin vibrare<br>(astfel încât să<br>rezulte o cantitate<br>minimă de aer<br>oclus) | Principal: Influența<br>asupra comportării<br>betoanelor în funcție<br>de tehnologia de<br>execuție și mediul de<br>exploatare                                                     |
|                  | Permeabilitatea (adâncimea<br>de pătrundere a apei sub<br>presiune) (II.3.3.)<br>SR EN 12390-8 [22] | Principal: În cazul<br>structurilor supuse la<br>presiune<br>Indirect:<br>Asigurarea<br>Cerințelor de<br>durabilitate<br>Pentru păstrarea<br>caracteristicilor<br>betonului la acțiunile<br>fizico - chimice în<br>timpul duratei de<br>serviciu proiectate | Direct:<br>Stabilirea<br>compoziție<br>corespunzătoare                                                   | Indirect:<br>Respectarea<br>tehnologiilor de<br>punere în<br>operă/vibrare                                                                                                                                                                                                                                                              | Direct:<br>Influența materialelor<br>componente și a<br>compoziției betonului                                                                                                      |
|                  | Contrația axială (metoda cu<br>aparat tip Graf) (II.3.4.)<br>SR 2833 [24]                           | Direct: Evaluarea<br>(calculul)<br>deformațiilor din<br>construcție pentru<br>elemente din beton<br>armat și beton<br>precomprimat<br>SR EN 1992-1-1                                                                                                        | Principal:<br>Compoziție<br>adekvata unei<br>anumite utilizări                                           | Direct:<br>Măsurile de protecție<br>și tratare ulterioară<br>după turnare                                                                                                                                                                                                                                                               | Direct:<br>Stabilirea influenței<br>asupra construcției.<br>Determinarea<br>experimentală a<br>valorilor deformației<br>din construcție pentru<br>compoziții/utilizări<br>speciale |
|                  | Modulul de elasticitate secant<br>la compresiune (II.3.5.)<br>SR 5585 [25]                          | Direct: Stabilirea<br>coeficientului de<br>echivalență și<br>evaluarea<br>deformațiilor<br>SR EN 1992-1-1                                                                                                                                                   |                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Direct: Studii privind<br>obținerea unor<br>compoziții care să<br>conducă la<br>deformații reduse la<br>acțiuni de<br>scurtă/lungă durată                                          |

|  | Caracteristica                                                                                  | Proiectare                                                                                                                                                                                                                                              | Producere                                                                                                         | Execuție                                                                                                                                   | Cercetare                                                                                                                                                                                                                                      |
|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | 1                                                                                               | 2                                                                                                                                                                                                                                                       | 3                                                                                                                 | 4                                                                                                                                          | 5                                                                                                                                                                                                                                              |
|  | Rezistența la compresiune (II.3.6.)<br>SR EN 12390-3 [21]                                       | Principal:<br>Determinarea rezistenței de calcul la compresiune<br>SR EN 1992-1-1<br>Evoluția rezistenței betonului la anumite intervale de timp, Creșterea rezistenței și a durabilității prin îmbunătățirea structurii betonului                      | Direct: Compararea caracteristicii obținute cu cea prescrisă (verificarea criteriilor de conformitate)            | Direct: Controlul calității betonului (clasei de beton) NE 012-1/2007<br>- Efectul tratamentului termic al betonului                       | Direct: Influența diverselor adaosuri din cimenturi sau aditivi din beton. Mijloace pentru obținerea betoanelor de înaltă rezistență fără a altera celelalte caracteristici                                                                    |
|  | Rezistența la întindere prin încovoiere (II.3.7.)<br>SR EN 12390-5 [26]                         | Principal:<br>Determinarea rezistenței de calcul la întindere prin încovoiere<br>SR EN 1992-1-1                                                                                                                                                         | Direct: Compararea caracteristicii obținute cu cea prescrisă                                                      | Direct: Criteriu de calitate impus betoanelor hidrotehnice<br>- Măsurile speciale de protecție pentru reducerea deformației din contracție | Direct: Influența diverselor adaosuri din cimenturi sau aditivi din beton. Mijloace pentru obținerea betoanelor de înaltă rezistență fără a altera celelalte caracteristici<br>- Armări dispersate                                             |
|  | Rezistența la întindere prin despicare (II.3.7.)<br>SR EN 12390-6 [27]                          | Principal:<br>Determinarea rezistenței de calcul la întindere prin despicare<br>SR EN 1992-1-1                                                                                                                                                          | Direct: Compararea caracteristicii obținute cu cea prescrisă                                                      | Direct: Criteriu de calitate impus betoanelor hidrotehnice<br>- Măsurile speciale de protecție pentru reducerea deformației din contracție | Direct: La evaluarea betonului din construcții existente                                                                                                                                                                                       |
|  | Aderența beton - armătură. Metoda prin smulgere (II.3.8.)<br>SR 5511 [28] și SR EN 12504-3 [29] | Principal:<br>Determinarea lungimilor de ancoraj sau de transmitere                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                   | Direct: Eliminarea eventualelor agenți care împiedică contactul dintre beton și armătură                                                   | Direct: Stabilirea principalilor factori care depind de proprietățile betonului și influențează forța de aderență a armăturilor                                                                                                                |
|  | Carbonatarea (II.4.1.)<br>SR CR 12793 [105] și SR 13379 [104]                                   | Principal:<br>- Determinarea stratului minim de acoperire în funcție de clasa de expunere XC<br>- Asigurarea rezistenței mecanice corespunzătoare clasei de expunere XC<br>Betonul trebuie să fie durabil și să realizeze o bună protecție a armăturii. | Direct: Asigurarea unei compoziții adecvate cu un tip de ciment adecvat                                           | Direct: Asigurarea compactității<br>- Reducerea deformațiilor din contracție și evitarea apariției fisurilor                               | Principal: Studii care să fundamenteze valorile care caracterizează viteza de carbonatare a betoanelor preparate cu diferite tipuri de cimenturi cu adaosuri, în condițiile climatice specifice și extinderea utilizării agregatelor reciclate |
|  | Penetrarea clorurilor (II.4.2.)<br>pr CEN/TS 12390-11 [69]                                      | Principal:<br>- Determinarea stratului minim de acoperire în funcție de clasa de expunere XD sau XS<br>- Limitarea                                                                                                                                      | Direct: Adoptarea de rețete ale betonului care să realizeze compactități mari și deformații din contracție reduse | Direct: Măsurile de compactare și tratare ulterioară a betonului                                                                           | Direct: Studii pentru determinarea rezistenței la cloruri în funcție de tipul cimentului și proporția de adaos                                                                                                                                 |

|  | Caracteristica                                                              | Proiectare                                                                                                                                                                | Producere                                                                                                                              | Execuție                                               | Cercetare                                                      |
|--|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
|  | 1                                                                           | 2                                                                                                                                                                         | 3                                                                                                                                      | 4                                                      | 5                                                              |
|  |                                                                             | conținutului total de ioni de clor<br>SR EN 206<br>Betonul trebuie să fie durabil și să realizeze o bună protecție a armăturii.                                           | pentru un ciment potrivit                                                                                                              |                                                        |                                                                |
|  | Acțiuni din îngheț-dezghet (II.4.3.)<br>CEN/TS 12390-9 [45] și SR 3518 [44] | Principal:<br>- Determinarea stratului minim de acoperire funcție de clasa de expunere XF<br>Betonul trebuie să fie durabil și să realizeze o bună protecție a armăturii. | Direct: Stabilirea unei compoziții cu volum minim de goluri sau utilizarea aditivilor de tip antrenori de aer și cu un ciment potrivit | Direct: Metode și mijloace energice de compactare      | Direct: Cercetări asupra metodelor de încercare și de evaluare |
|  | Abraziune sau rezistența la uzură (II.4.4.)                                 | Principal:<br>- Determinarea stratului minim de acoperire funcție de clasa de expunere XM                                                                                 | Direct: Stabilirea unei compoziții potrivite cu agregate de concasaj din roci dure                                                     | Direct: Măsuri de tratare corespunzătoare după turnare | Direct: Cercetări asupra metodelor de încercare și de evaluare |
|  | Atac sulfatic (II.4.5.2.)<br>Pr ENV 196-X [57]                              | Principal:<br>- Indicarea cimenturilor rezistente la sulfați                                                                                                              | Direct: Stabilirea compoziției betonului cu ciment potrivit                                                                            | Direct: Punerii în operă corespunzătoare               | Direct: Cercetări asupra metodelor de încercare și de evaluare |

---

## CAPITOLUL III.

### INFLUENTA ADAOSURILOR DIN CIMENT SI BETON ASUPRA PROPRIETATILOR BETOANELOR

#### III.1. Influența adaosului de cenușă zburătoare asupra pastei de ciment și betonului

Potențialul de utilizare a cenușii zburătoare ca material cimentoid suplimentar în beton a fost cunoscut aproape de la începutul secolului trecut din anul 1914, dar din anul 1948 a început utilizarea mai intensă a cenușii zburătoare în beton în urma cercetării de pionierat efectuată la Universitatea Berkeley din California. În ultimii 50 de ani, utilizarea cenușii zburătoare în beton crește semnificativ, cu aproape 15 milioane de tone utilizate în beton, produse din beton și mortar în SUA în 2005. Din punct de vedere istoric, cenușa zburătoare a fost utilizată în beton la niveluri cuprinse între 15% și 25% din masa liantului. Valoarea efectivă utilizată variază în funcție de aplicație, de proprietățile cenușii zburătoare, de limitele prescripțiilor, de criteriile geografice și climat. În structurile masive (de exemplu, fundațiile și barajele) au fost folosite niveluri mai mari de 30% până la 50% pentru a controla creșterea temperaturii. În ultimele decenii, cercetările au demonstrat că în aplicații structurale pot fi utilizate niveluri mari de dozaj (40% până la 60%), producând beton cu proprietăți mecanice bune și durabil [2].

Creșterea cantității de cenușă zburătoare în beton nu este lipsită de dezavantaje. La construcții înalte pot apărea dificultăți datorate timpilor de priza prelungiți și dezvoltării lente a rezistenței, ceea ce duce la rezistențe scăzute la vârstă timpurie și întâzieri în ritmul de construcție. Aceste neajunsuri devin deosebit de pronunțate în cazul betonării pe timp friguros. De asemenea, durabilitatea betonului poate fi compromisă în ceea ce privește rezistența la substanțele de degivrare și rezistența la carbonatare. Pentru orice situație dată, va exista o cantitate optimă de cenușă zburătoare care poate fi utilizată într-un amestec de beton, care va maximiza beneficiile tehnice, de mediu și economice ale utilizării cenușii, fără a afecta în mod semnificativ ritmul de construcție sau a afecta performanța pe termen lung a produsului finit. Cantitatea optimă de cenușă zburătoare va fi stabilită în funcție de o gamă largă de parametri și trebuie determinată de la caz la caz [2].

Acest capitol tratează aspecte legate de utilizarea procentelor scăzute sau ridicate de cenușă zburătoare în beton și oferă îndrumări pentru utilizarea cenușii zburătoare fără a compromite procesul de construcție sau calitatea produsului finit. Performanța cenușii zburătoare în beton este puternic influențată de proprietățile sale fizice, mineralogice și chimice. Compoziția mineralogică și chimică depinde în mare măsură de compoziția cărbunelui folosit (antracit, cărbune bituminos sau sub-bituminos și lignit) și au fost tratate în detaliu la punctul I.2.2.

Cenușa tip F - Cenușă zburătoare produsă în mod obișnuit din arderea antracit sau a cărbunelui bituminos și are proprietăți puzzolanice.

Cenușa tip C - Cenușă zburătoare produsă în mod normal din arderea lignitului sau a cărbunelui sub-bituminos, având în afară de proprietăți puzzolanice și unele proprietăți cimentoidale. Aceste cenuși pot avea un conținut de var mai mare de 10%.

Conținutul de calciu din cenușa zburătoare este probabil cel mai bun indicator al modului în care cenușa zburătoare se va comporta în beton, deși alți compuși, cum ar fi alcaliile ( $\text{Na}_2\text{O}$  și  $\text{K}_2\text{O}$ ), cantitatea de cărbune nears (de obicei măsurat ca LOI) și sulfatul ( $\text{SO}_3$ ) poate afecta, de asemenea, performanța cenușii zburătoare.

### III.1.1. Caracteristicile mortarelor preparate cu cimenturi compozite cu cenușă zburătoare

Aproximativ 33% din producția de cenușă zburătoare este utilizată în Europa ca și constituent al cimenturilor compozite și ca adaos mineral pentru prepararea betonului. Compoziția cimentului, proporția diferiților compuși mineralogici și a procentelor de adaos constituie factorul esențial care influențează în mod hotărâtor proprietățile betonului. Într-un studiu al Universității din Egipt [46] se prezintă influența substituirii a 10-30% ciment cu cenușa zburătoare, asupra principalelor proprietăți ale mortarelor de ciment.

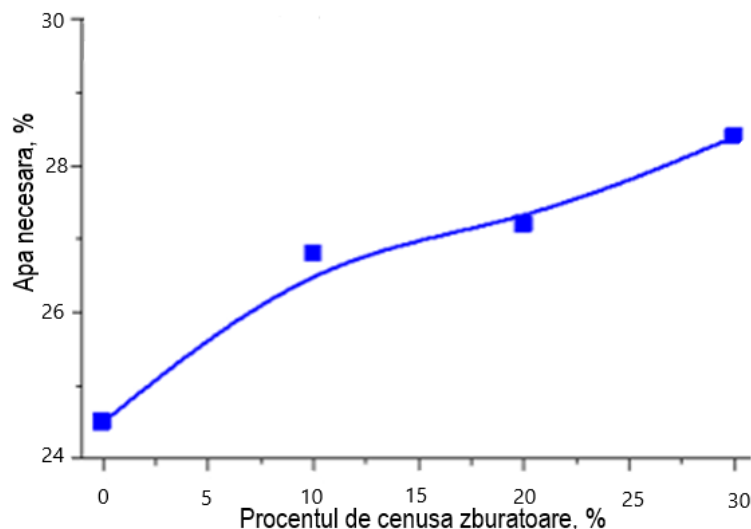


Figura III.1. - Variația raportului a/c pentru cimenturile Portland și cimenturile cu cenușa zburătoare [46].

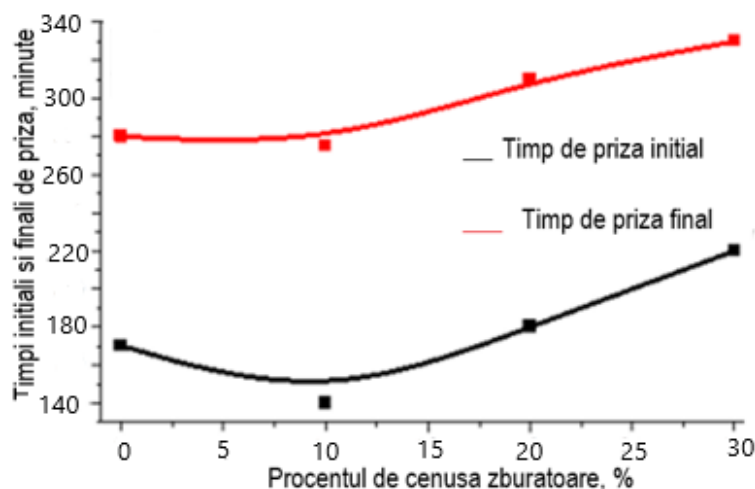


Figura III.2. - Variația timpului inițial și final de priza pentru cimenturile Portland și cimenturile cu cenușa zburătoare [46].

Toate probele (cuburi de 50 × 50 × 50 mm) au fost preparate prin amestecarea a 1 parte de ciment și 2,75 părți a proporției de nisip standard, au fost decofrate după 24 de ore și apoi păstrate în apă la  $23,0 \pm 2$  °C până la timpul de încercare.

Compozițiile mortarelor M1, M2, M3 și M4 conțin proporții de cenușa zburătoare de 0, 10, 20 și 30%. Apa de amestecare a fost măsurată pentru a obține pentru toate probele aceeași lucrabilitate.

Rezultatele din fig. III.1. arată că, cimenturile cu cenușa zburătoare necesită o cantitate mai mare de apă și timpi de priză inițiali și finali din fig. III.2. sunt mai lungi comparativ cu cimenturile Portland, care cresc cu procentul de adaos. Aceasta se datorează în principal suprafeței specifice mai mari a cenușii zburătoare comparativ cu cimentul Portland. Hidratarea cimentului este mai rapidă decât reacția puzzolanică a cenușii zburătoare cu portlanditul. Înlocuirea a 10 % din greutatea cimentului Portland de către cenușa zburătoare accelerează timpul de priză inițial, fără efect detectabil asupra duratei de priza finale. Pe de altă parte, creșterea conținutului de cenușă zburătoare cu până la 30% din greutatea cimentului Portland măresc timpul inițial și final de priză. Creșterea timpului de priză se poate explica prin diluția liantului, iar creșterea raportului apă/ciment, respectiv a cantității de apă disponibilă pentru hidratarea granulelor de ciment, întârzie procesul de hidratare, în cazul unor cimenturi compozite cu conținut de cenușă silicioasă (V).

În cazul lianților cu conținut de cenușă calcică (W), efectul de întârziere a prizei este mai puțin important, acest lucru fiind explicat prin căldura de hidratare mai mare dezvoltată în astfel de sisteme liante, comparativ cu cele cu cenușă silicioasă. Creșterea căldurii de hidratare determină o intensificare a procesului de hidratare și accelerează priza [2].

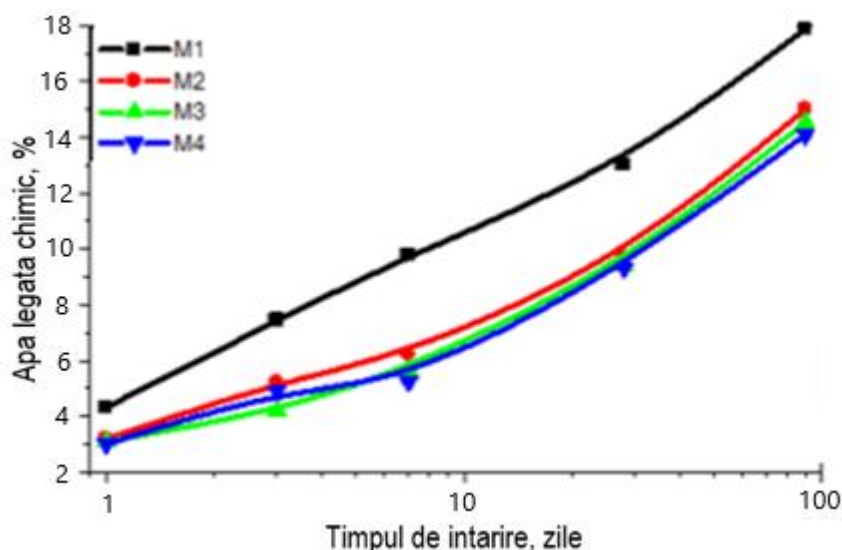


Figura III.3. - Variația apei legate chimic în funcție timpul de întărire pentru cimenturile Portland și cimenturile cu cenușă zburătoare [46].

În general, valorile apei legate chimic reprezentate în fig. III.3. cresc cu timpul de întărire până la 90 de zile și cu conținutul de cenușă zburătoare pentru toate mortarele de ciment, datorită hidratării continue a fazelor de ciment și a reacției puzzolanice, conducând la formarea

de aluminați, silicați și aluminosilicați hidrați cu conținut ridicat de apă. De asemenea, cantitatea de apă legată chimic scade cu conținutul de cenușă zburătoare.

Cenușa zburătoare crește apa de consistență de la 24,5 până la 28,4% pentru procente ale cenușii zburătoare între 0 și 30% din greutatea cimentului Portland. Înlocuirea cimentului Portland cu cenușa zburătoare până la 30% în greutate nu are efect semnificativ asupra valorilor apei legate chimic ale mortarelor de ciment până la 90 de zile de întărire. Dar, aceste valori sunt mai mici decât cele ale cimentului Portland, datorită activității puzzolanice reduse a cenușii zburătoare.

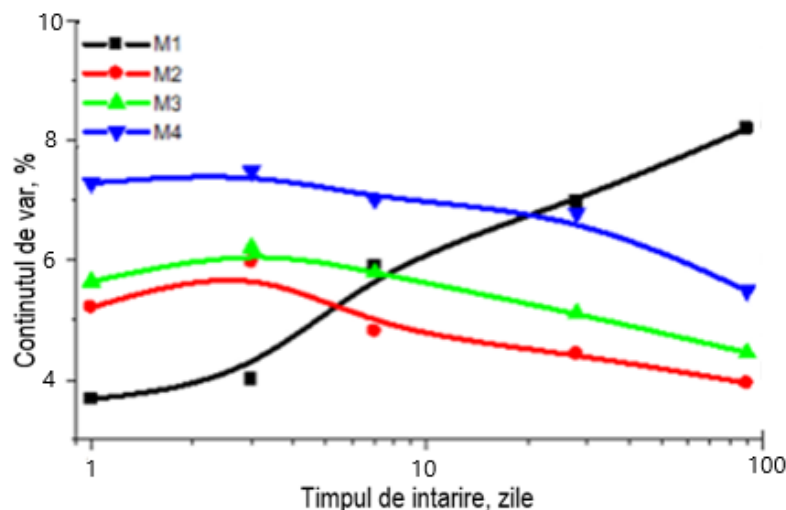


Figura III.4. - Conținutul de var în funcție de timpul de întărire pentru cimenturile Portland și cimenturile cu cenușă zburătoare [46].

Conținutul de var al cimenturilor Portland crește cu timpul de întărire de până la 90 de zile datorită hidratării continue a fazelor alitice și belitice din ciment, eliberând hidroxidul de calciu  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  în timpul hidratării (fig. III.4.). Pe de altă parte, conținutul de var al tuturor cimenturilor compozite cu cenușă zburătoare crește până la 3 zile, apoi scade până la 90 de zile, se poate concluziona că această cenușă zburătoare este un material puzzolanic slab. Atât conținutul de var, cât și cel al apei legate chimic al cimenturilor compozite cu cenușă zburătoare sunt mai mici decât cele ale cimenturilor Portland. Fenomenul poate fi atribuit activității puzzolanice scăzute a cenușii zburătoare, în special la vârstele de hidratare timpurie [2].

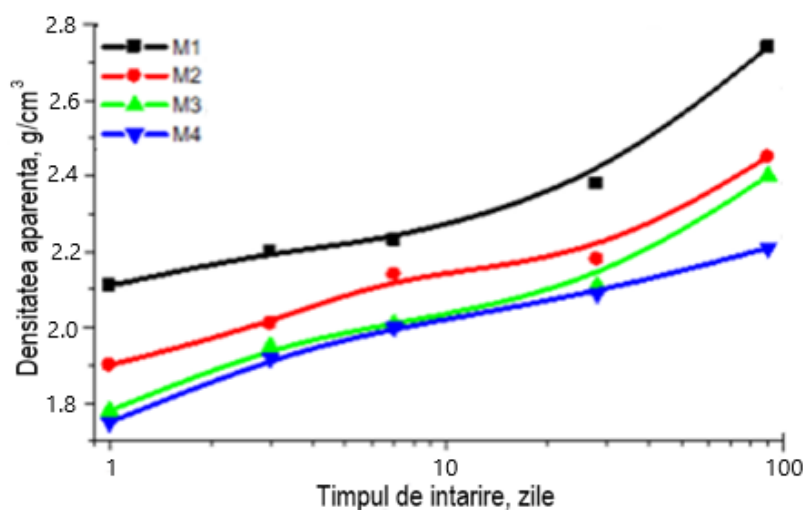


Figura III.5. - Densitatea aparentă în funcție de timpul de întărire pentru cimenturile Portland și cimenturile cu cenușă zburătoare [46].

Pe măsură ce timpul de întărire avansează, densitatea aparentă pentru toate cimenturile crește (fig. III.5.). Acest fapt se datorează umplerii treptate a porilor mari de către produșii de hidratare a componentilor de bază ai cimentului. Înlocuirea cimentului Portland cu cenușă zburătoare duce la o scădere semnificativă a densității aparente. Creșterea apei de consistență cu procentul de cenușă zburătoare reduce densitatea aparentă. Rezultatele din fig. III.6. arată că rezistența la compresiune crește cu timpul de întărire pentru toate cimenturile. Prin urmare, creșterea produșilor de hidratare care vor umple o parte din spațiile porilor dau o rezistență mai mare. Pe de altă parte, pe măsură ce crește conținutul de cenușă zburătoare, rezistența la compresiune scade datorită activității puzzolanice inferioare a adaosului de cenușă zburătoare.

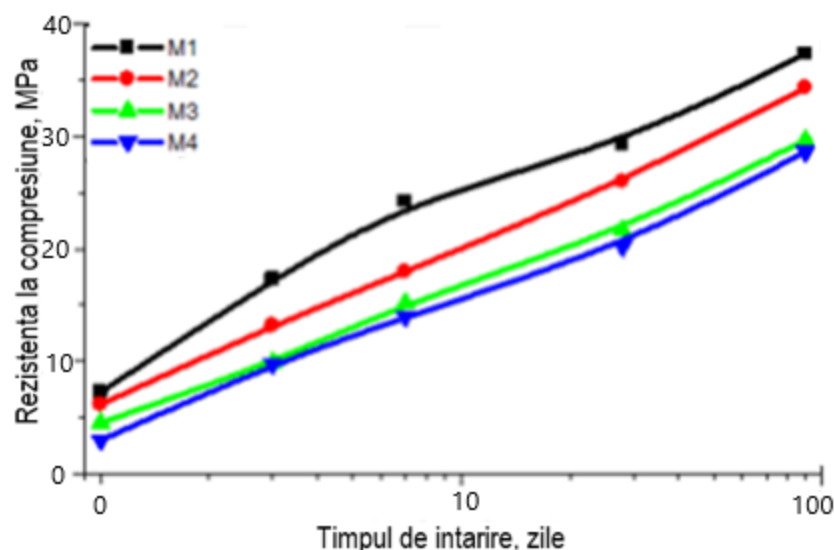


Figura III.6. - Variația rezistenței la compresiune în funcție de timpul de întărire pentru cimenturile Portland și cimenturile cu cenușă zburătoare [46].

De asemenea, valorile rezistenței la compresiune sunt în armonie cu cele ale conținutului de apă legată chimic și cu cele ale densității aparente. Creșterea produșilor de hidratare este principalul factor care justifică creșterea rezistenței la compresiune. Se poate afirma că 10% cenușă zburătoare din masa cimentului Portland este nivelul optim de substituție în cadrul studiului efectuat.

### III.1.2. Efectele adaosului de cenușă zburătoare asupra proprietăților betonului proaspăt

#### *Lucrabilitatea*

Utilizarea de cenușă zburătoare de bună calitate cu o finețe ridicată și un conținut redus de cărbune nears reduce cantitatea de apă la prepararea betonului (fig. III.7. și III.8.). Deși reducerea apei variază foarte mult în funcție de natura cenușii zburătoare și a altor parametri ai amestecului, o aproximare brută este aceea că fiecare 10% cenușă zburătoare permite o reducere a apei cu cel puțin 3%.

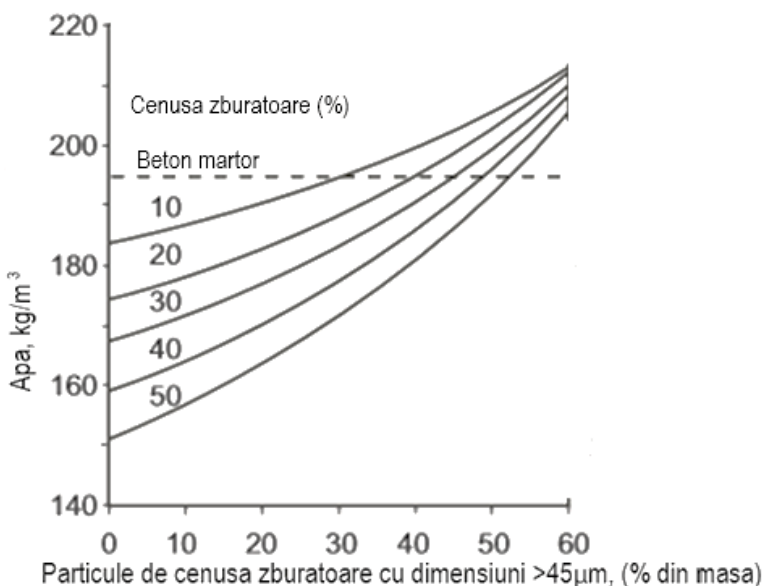


Figura III.7. - Efectul cenușii zburătoare în funcție de cantitatea de apă a betoanelor determinată pentru tasări egale [47].

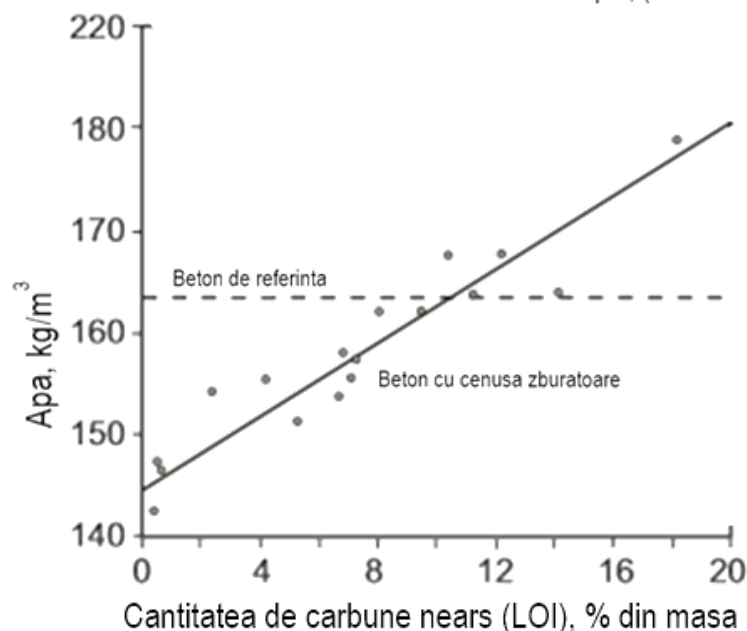


Figura III.8. - Efectul cantității de cărbune neurs (LOI) asupra cantității de apă a betoanelor determinată pentru tasări egale [47].

Un amestec de beton cu cenușă bine dimensionat va îmbunătăți lucrabilitatea în comparație cu un beton cu ciment Portland cu aceeași tasare. Acest lucru înseamnă că, la o tasare dată, betonul cu cenușă zburătoare este mai fluid și se compactează mai bine decât un beton de ciment Portland când este vibrat. Folosirea cenușii zburătoare îmbunătățește coeziunea și reduce segregarea betonului. Forma sferică a particulelor lubrifică amestecul, făcând mai ușoară pomparea și reduce uzura utilajelor [2].

#### *Separarea apei în exces*

În general, cenușă zburătoare va reduce viteza și cantitatea de apă separată, în primul rând datorită reducerii necesarului de apă. O atenție specială este necesară pentru a determina momentul finalizării procesului de separare a apei înainte de finisarea finală a elementelor. Nivelurile ridicate de cenușă zburătoare utilizate în beton cu conținut scăzut de apă pot elimina practic separarea apei. Prin urmare, betonul proaspăt turnat poate să fie finisat cât mai repede posibil și imediat protejat pentru a preveni fisurarea din contracție plastică atunci când condițiile

ambientale permit evaporarea rapidă a umidității de suprafață. O excepție de la această condiție este atunci când cenușa zburătoare este utilizată fără o reducere corespunzătoare a apei, caz în care separarea apei va crește în comparație cu betonul confecționat cu ciment Portland.

#### *Aerul antrenat*

Betonul care conține cenușă zburătoare cu un conținut scăzut de calciu (clasa F) necesită, în general, o cantitate mai mare de aditivi antrenatori de aer pentru a obține o distribuție satisfăcătoare a porilor. Acest lucru se datorează în principal prezenței cărbunelui nears (fig. III.9.) care absoarbe aditivul.

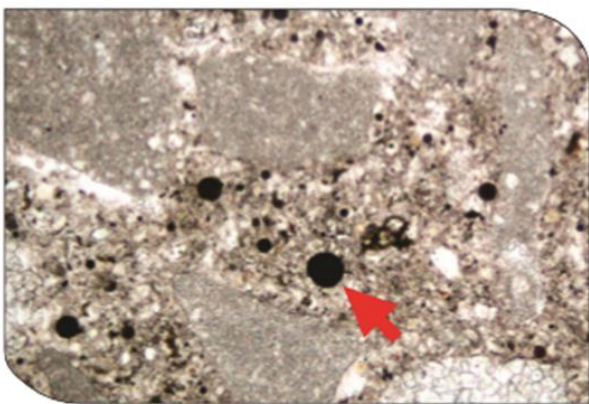


Figura III.9. - Secțiune transversală printr-un beton cu un conținut ridicat de cărbune nears care necesită cantități mai mari de aditivi antrenori de aer [47].

În consecință, sunt necesare dozaje mai mari de aditivi antrenori de aer, fie dacă conținutul de cenușă zburătoare din beton crește, fie dacă conținutul de cărbune nears al cenușii zburătoare crește. Unele cenuși zburătoare de clasa C, bogate în alcalii solubili în apă, pot necesita chiar mai puțin aditiv decât amestecurile fără cenușă zburătoare.

#### *Timpul de priză*

Impactul cenușii zburătoare asupra timpului de priză al betonului depinde nu numai de compoziția și cantitatea de cenușă zburătoare folosită, ci și de tipul și cantitatea de ciment, de raportul a/c echivalent, tipul și cantitatea aditivilor chimici și temperatura betonului. S-a stabilit că cenușa zburătoare cu conținut scăzut de calciu extinde atât timpul de priză inițial cât și cel final al betonului, cum arată figura III.10.

La temperaturi relativ ridicate, timpul de întârziere din cauza cenușii zburătoare tinde să fie mic și reprezintă probabil un beneficiu în multe cazuri. Pe vreme rece, utilizarea cenușii zburătoare, în special la procente mari de înlocuire, poate duce la întârzieri semnificative atât în timpul de priză inițial, cât și în cel final. Aceste întârzieri pot conduce la dificultăți de turnare, în special în ceea ce privește momentul finisării elementelor de suprafață sau asigurării protecției pentru a preveni înghețarea betonului în stadiul plastic. Considerațiile practice pot necesita ca conținutul de cenușă să fie limitat în timpul betonării la rece. Utilizarea aditivilor acceleratori de priză poate compensa total sau parțial efectul de întârziere al cenușii zburătoare. Timpul de priză poate fi redus prin creșterea temperaturii inițiale a betonului în timpul preparării (de exemplu, prin încălzirea apei și/sau a agregatelor) [2].

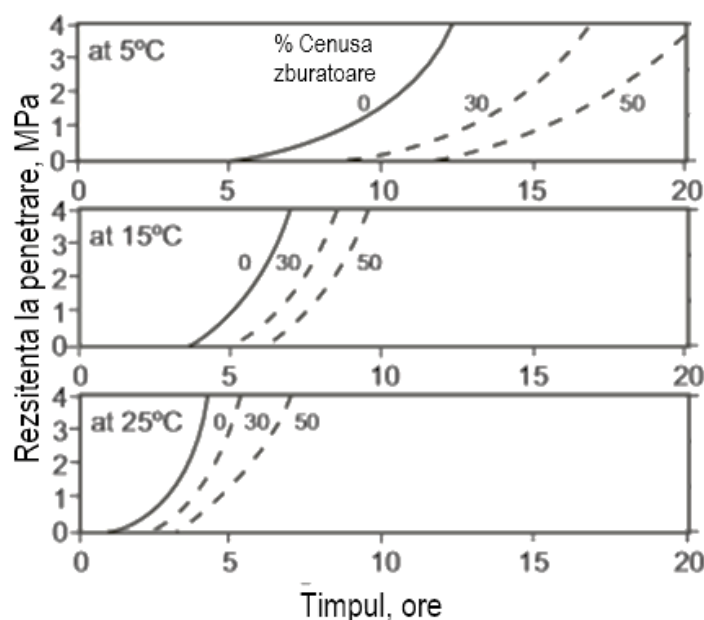


Figura III.10. - Efectul temperaturii și al rezistenței la penetrare (permeabilității) asupra timpului de priză al betoanelor având aceeași lucrabilitate și rezistențe egale la 28 de zile [47].

În general cenușile zburătoare cu conținut mare de calciu încetinesc timpul de priză într-o măsură mai mică decât cenușa zburătoare cu conținut scăzut de calciu, probabil datorită faptului că reactivitatea hidraulică a cenușii zburătoare crește odată cu creșterea conținutului de calciu. Cu toate acestea, efectul cenușilor zburătoare cu conținut ridicat de calciu este mai greu de prevăzut, deoarece utilizarea unor astfel de cenuși în combinație cu un anumit aditiv pot duce la o priza rapidă (sau chiar instantanee) sau la o întârziere accentuată a prizei [1].

#### Căldura de hidratare

Reducerea vitezei de evoluție a căldurii de hidratare și, prin urmare, scăderea temperaturii interne a betonului a fost de mult timp un stimul pentru utilizarea cenușii zburătoare în construcțiile masive din beton. În figura III.11 se prezintă rezultatele unui studiu care indică faptul că utilizarea cenușii zburătoare a redus temperatura internă de la 47°C la 32°C folosind comparativ un beton cu ciment Portland cu 305 kg/m<sup>3</sup> și un beton cu același conținut de ciment, dar cu 30% cenură zburătoare de clasă F.

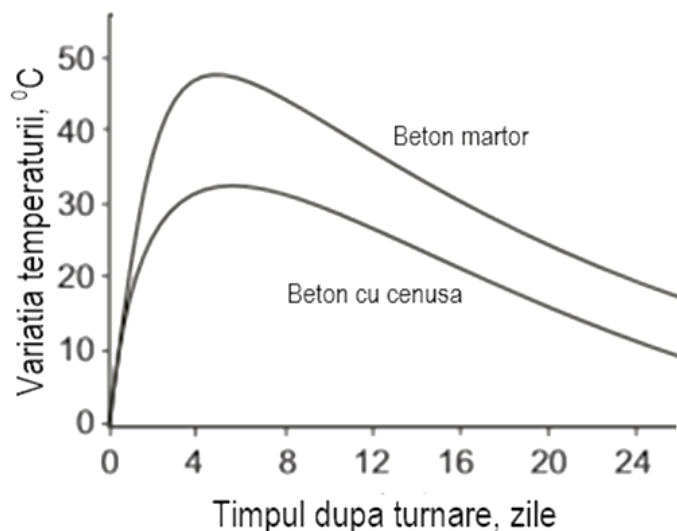


Figura III.11. - Efectul cenușii zburătoare și variația de temperatura în betoanele masive [47].

În cazul turnărilor masive de beton, unde viteza pierderilor de căldură este mică, creșterea maximă a temperaturii în betonul cu cenușă va fi în primul rând în funcție de cantitatea și compoziția cimentului Portland și a cenușii zburătoare utilizate, împreună cu temperatura betonului la momentul turnării. Betonul cu conținut redus de ciment Portland și conținutul ridicat de cenușă zburătoare sunt indicate pentru minimizarea creșterii temperaturii.

Betoanele cu conținut mare de cenușă de zburătoare (cu ~ 55% cenușă de clasa F ) au fost eficiente în reducerea vitezei de dezvoltare a căldurii și a temperaturii maxime atinse în masivul de beton. Această proprietate poate fi avantajoasă atunci când nu este importantă rezistența la vârstă timpurie. Efectele cenușii zburătoare asupra ritmului de dezvoltare a căldurii și creșterii temperaturii în beton cresc conținutul de calciu din cenușă. Cenușile zburătoare cu conținut ridicat de calciu pot produce o creștere mică sau chiar scăderea căldurii de hidratare comparativ cu cimentul Portland atunci când sunt utilizate în proporții normale de înlocuire. Căldura de hidratare a mortarelor cu cenușă zburătoare a fost corelată cu conținutul de calciu al cenușii zburătoare conform fig. III.12. Conținutul ridicat de calciu al cenușilor zburătoare de clasa C a fost utilizat pentru a controla creșterea temperaturii în fundațiile masive de beton.

### Finisare și întărire

Utilizarea cenușii zburătoare poate duce la o întârziere semnificativă a timpului de priză, ceea ce înseamnă că este posibil ca operațiunile de finisare să fie întârziate. La temperaturi normale, viteza reacției puzzolanice este mai lentă decât viteza de hidratare a cimentului și betonul cu cenușă zburătoare trebuie să fie tratat atent pentru a se realiza beneficiile complete ale acestui adaos din ciment. Când se utilizează proporții ridicate de cenușă zburătoare, este recomandat ca betonul să fie menținut umed pe o perioadă minimă de 7 zile, cu posibilitatea de extindere la 14 zile, prin acoperirea cu o membrană de protecție după 7 zile de menținere umedă. Dacă nu se poate asigura o întărire adecvată în practică, cantitatea de cenușă zburătoare utilizată în beton trebuie să fie limitată [1].

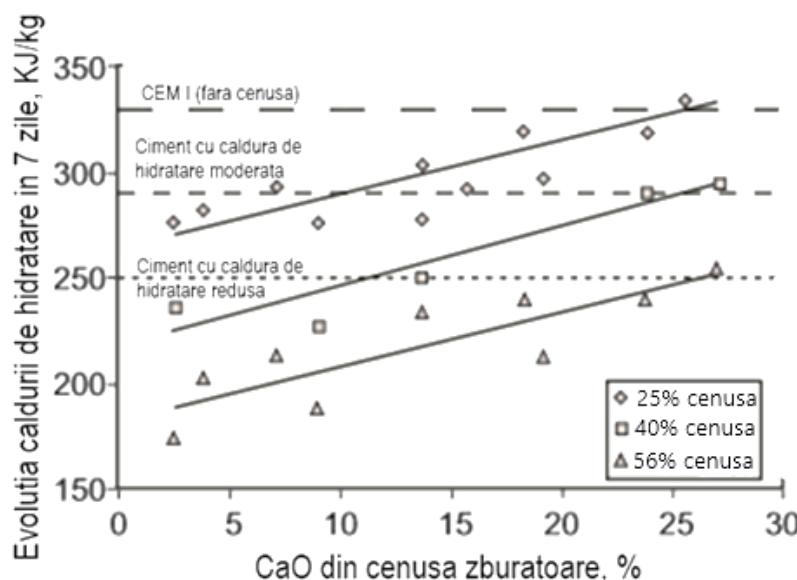


Figura III.12. - Efectele cenușii zburătoare asupra căldurii de hidratare [47].

### III.1.3. Efectele adaosului de cenușă zburătoare asupra proprietăților betonului întărit

#### *Dezvoltarea rezistenței de compresiune*

În figura III.13. se prezintă rezistența la compresiune a betonului la care a fost înlocuită o anumită masă de ciment Portland cu o masă egală de cenușă zburătoare cu conținut scăzut de calciu (clasa F) și menținând constant raportul a/c echivalent. Astfel, dacă nivelul de înlocuire crește, rezistența la vârstă timpurie scade. Cu toate acestea, dezvoltarea rezistenței pe termen lung este îmbunătățită atunci când se utilizează cenușă zburătoare, iar la o anumită vârstă rezistența betonului cu cenușă zburătoare va fi egală cu cea a betonului cu ciment Portland, atâta timp cât este asigurată tratarea ulterioară. Vârsta la care se obține egalitatea celor două rezistențe la compresiune față de cea a betonului de control cu ciment Portland este mai mare la niveluri mai ridicate de cenușă zburătoare.

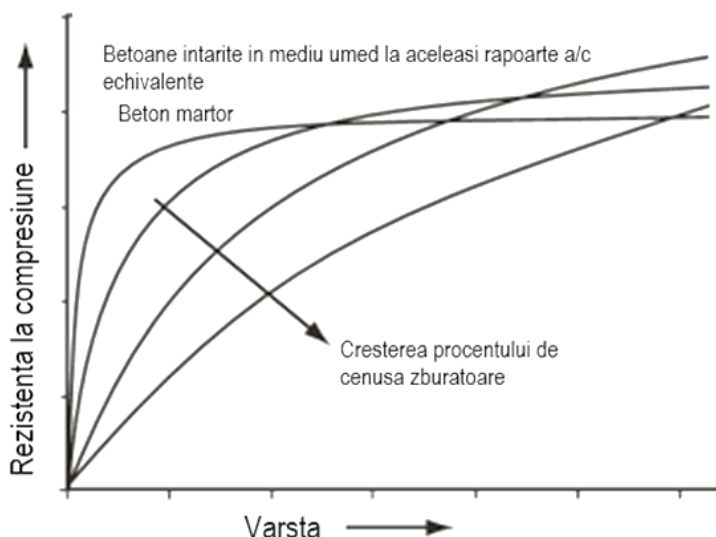


Figura III.13. - Variația rezistenței la compresiune a betoanelor în funcție de procentul de adaos și de vârstă [47].

Rezistența finală obținută de beton crește odată cu creșterea conținutului de cenușă zburătoare, cel puțin la procente de înlocuire de până la 50%. În general, diferențele în ceea ce privește rezistența la vârstă fragedă a betonului cu ciment Portland și a betonului cu cenușă zburătoare sunt mai mici pentru cenușă zburătoare cu conținut mai mare de calciu, dar acest lucru nu este întotdeauna valabil. Compoziția betonului poate fi astfel stabilită încât să se atingă o anumită rezistență minimă la o anumită vârstă (în mod obișnuit 28 de zile). Acest lucru se poate realiza prin alegerea unui raport adecvat a/c echivalent pentru amestecul de ciment și cenușă zburătoare necesară. Acest raport va varia în funcție de procentul de cenușă zburătoare, de compoziția cenușii, de vârstă betonului și rezistența propusă. Dacă rezistența propusă este cea la 28 de zile sau mai devreme, atunci se vor adopta valori mai mici ale raportului a/c echivalent la procente mai mari de cenușă zburătoare.

Un raport a/c echivalent mai mic poate fi obținut în două moduri: (i) reducerea conținutului de apă fie prin utilizarea avantajului cererii scăzute de apă în prezența cenușii zburătoare, fie prin utilizarea unui aditiv de reducere a apei sau a ambelor cazuri și (ii) crescând conținutul total de ciment al amestecului. Creșterea rezistenței la compresiune la vârste fragede este puternic

influențată de temperatură, în special cazul betonului cu cenușă zburătoare, deoarece reacția puzzolanică este mai sensibilă la temperatură decât hidratarea cimentului Portland.

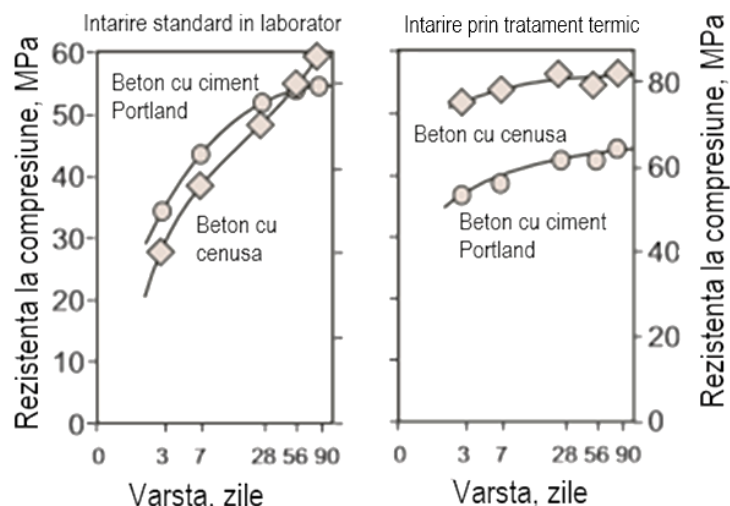


Figura III.14. - Variația rezistenței la compresiune a cuburilor cu latura de 100 mm în funcție de temperatura din laborator și tratament termic [47].

În figura III.14. este arătat efectul temperaturilor diferite în perioada de întărire pentru betoane fără și cu 30% cenușă zburătoare cu rezistențe egale la 28 de zile. Majorarea de temperatură a crescut rezistența betonului cu cenușă zburătoare până la vârsta de 28 de zile, efectul cel mai pronunțat fiind la vârste timpurii: la 3 zile rezistența cuburilor tratate la temperatură sporită a fost aproape dublă față de cuburile păstrate în condiții standard. Corecția de temperatură a dus la o creștere ușoară a rezistenței betonului de ciment portland la 3 zile (creștere de 5% față de betonul tratat standard), dar a afectat în mod semnificativ rezistența la vârstele ulterioare. În secțiuni mari sau în beton turnat la temperaturi ridicate, diferența dintre rezistența la vârsta timpurie (incipientă) a betonului in situ cu și fără cenușă zburătoare poate fi mult mai scăzută decât cea estimată pe baza probelor de testare păstrate în condiții standard de laborator. Rezultă că, în secțiunile mici turnate pe vreme rece, câștigul de rezistență al betonului cu cenușă zburătoare poate fi mai mic decât cel prezis pe baza cilindrilor depozitați în condiții standard.

Având în vedere sensibilitatea ridicată a rezistenței la compresiune a betonului cu cenușă zburătoare în funcție de temperatura de întărire, în special atunci când se utilizează procente mai ridicate de cenușă zburătoare, este indicat să se ia în considerare corectarea temperaturii sau prelevarea de epruvete pentru determinarea rezistenței in-situ a betonului. Pentru realizarea rezistențelor la compresiune relativ ridicate la vârste foarte fragede este necesar să se limiteze cantitatea de cenușă zburătoare utilizată dacă nu se adopta mijloace adecvate cum ar fi utilizarea de căldură sau aditivi acceleratori, sau ambele, în special atunci când betonul este turnat la temperaturi scăzute. Rezistența la compresiune a betonului crește odată cu creșterea proporției de cenușă zburătoare dar numai până la 20% adaos de cenușă.

#### *Alte caracteristici mecanice*

Relațiile dintre rezistența la întindere, rezistența la întindere din încovoiere și modulul de elasticitate și rezistența la compresiune a betonului nu sunt semnificativ afectate de prezența

---

cenușii zburătoare la procente scăzute și moderate de înlocuire. Rezistența la întindere prin despicare a betonului crește odată cu creșterea conținutului de cenușă zburătoare de până la 25%. Se evidentiază faptul că rezistența la întindere directă și rezistența la întindere din încovoiere pe termen lung a betonului cu procente mari de cenușă poate fi mult îmbunătățită datorită continuării reacției puzzolanice care mărește aderența dintre piatra de ciment și agregat.

#### *Curgerea lentă*

Curgerea lentă a betonului este influențată de un număr mare de parametri, iar efectul cenușii zburătoare asupra ei depinde într-o anumită măsură de modul în care efectul este determinat. Dacă elementul este încărcat la o vârstă fragedă, betonul cu cenușă zburătoare poate prezenta deformații mai mari de curgere lentă decât betonul cu ciment Portland deoarece are o rezistență mai mică la compresie. Cu toate acestea, dacă betoanele sunt încărcate la o vârstă când au atins aceeași rezistență, betonul cu cenușă zburătoare va prezenta o deformație de curgere lentă mai mică datorită creșterii continue a rezistenței. Curgerea lentă a betonului cu procente ridicate de cenușă zburătoare tinde să fie mai mică decât betonul de ciment Portland cu aceeași rezistență, acest fenomen fiind atribuit prezenței cenușii zburătoare nehidratate. Este foarte probabil că datorită conținutului foarte scăzut de apă și piatră de ciment care poate fi atins în betonul cu procent ridicat de cenușă zburătoare, concomitent cu conținut ridicat de agregate, să joace un rol important în reducerea curgerii lente a betonului.

#### *Contrația de uscare*

Pentru betoanele cu agregate cu granulozitate optimă, parametrii cheie care afectează contrația de uscare sunt: cantitatea de apă de amestecare, raportul a/c echivalent și volumul de agregat fin. În betonul cu cenușă zburătoare, chiar și pentru procente mari de cenușă, deformația din contrație este, în general mai mică sau egală decât pentru un amestec echivalent de beton cu ciment Portland datorită cantităților scăzute de apă. Cimenturile mixte cu conținut de cenușă de termocentrală prezintă contrații mai mari în timpul întăririi comparativ cu cimentul Portland, ca urmare a volumului mai mare de hidrosilicați de calciu gelici formați inclusiv prin reacția puzzolanică. În cazul betoanelor cu conținut ridicat de cenușă de termocentrală, acest dezavantaj este redus ca urmare a diminuării dozajului de apă, prin folosirea de aditivi superplastifianți [15].

### **III.1.4. Efectele adaosului de cenușă zburătoare asupra durabilității betonului**

#### *Rezistența la uzura prin abraziune*

S-a demonstrat că rezistența la abraziune a betoanelor finisate și tratate corect este în primul rând în funcție de proprietăților agregatului și a rezistenței betonului, indiferent de prezența cenușii zburătoare. Acest lucru pare a fi valabil și la procente mai ridicate de cenușă zburătoare.

#### *Permeabilitatea și rezistența la penetrarea clorurilor*

Cenușă zburătoare reduce permeabilitatea betonului la apă și gaz, cu condiția ca betonul să fie bine tratat, fapt atribuit dimensiunilor reduse ale porilor. Figura III.15. prezintă rezultatele testului de permeabilitate rapidă a clorurii pentru betoane cu raport echivalent a/c = 0.40 cu

procente diferite de cenușă zburătoare cu ~13% CaO menținute continuu umede până la aproximativ 7 ani. Permeabilitatea clorurilor a scăzut odată cu creșterea conținutului de cenușă zburătoare și, pentru un anumit nivel de înlocuire, a fost inferior pentru beton cu cenușă de clasă F comparativ cu cenușă zburătoare de clasa C.

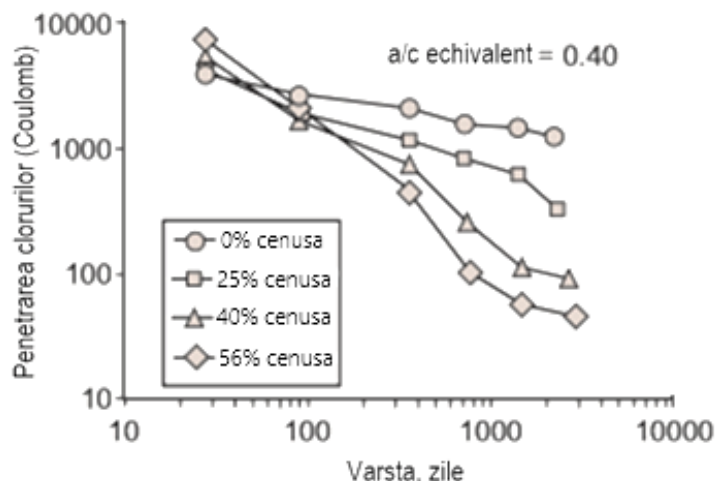


Figura III.15. - Evoluția penetrării clorurilor la betoanele cu procente diferite de cenușă zburătoare [47].

Este cunoscut faptul că materialele cimentoide suplimentare reduc concentrația de ioni din soluția din pori și, prin urmare, conductivitatea electrică a soluției. Astfel, reducerile în testul de permeabilitate rapidă a clorurii nu pot fi atribuite numai modificărilor benefice ale structurii porilor și reducerilor concomitente ale permeabilității. Cu toate acestea, reducerile de permeabilitate observate la betonul cu procente mari de cenușă sunt importante și indică o creștere substanțială a rezistenței betonului la penetrarea ionilor de clor. Testarea betonului expus mediului marin arată că efectele benefice ale cenușii zburătoare devin mai semnificative în timp, deoarece betonul care conține cenușă zburătoare reduce substanțial penetrabilitatea clorului în timp.

Figura III.16. prezintă adâncimea de pătrundere a clorurilor la vârste diferite pentru betonul expus într-o zonă cu maree până la 10 ani. Betoanele au fost realizate astfel încât să li se asigure aceeași rezistență la compresiune la 28 de zile.

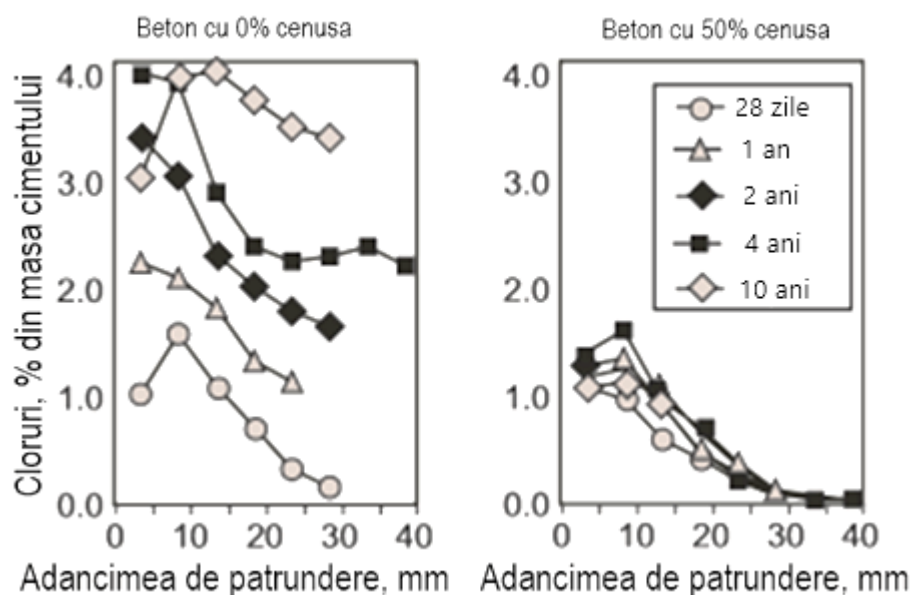


Figura III.16. - Adâncimea de pătrundere a clorurilor pentru betoane cu și fără cenușă în același interval de timp [47].

Betoanele au fost nesaturate la momentul primei expunerii și există o penetrare destul de rapidă a clorurilor în ambele betoane. Cu toate acestea, dincolo de această perioadă există diferențe semnificative între cele două betoane în ceea ce privește rezistența la penetrarea ionilor de clor. Betonul cu ciment Portland a oferit rezistență mică, și în timp, s-a înregistrat o creștere foarte mică a conținutului de cloruri al betonului care conține cenușă zburătoare.

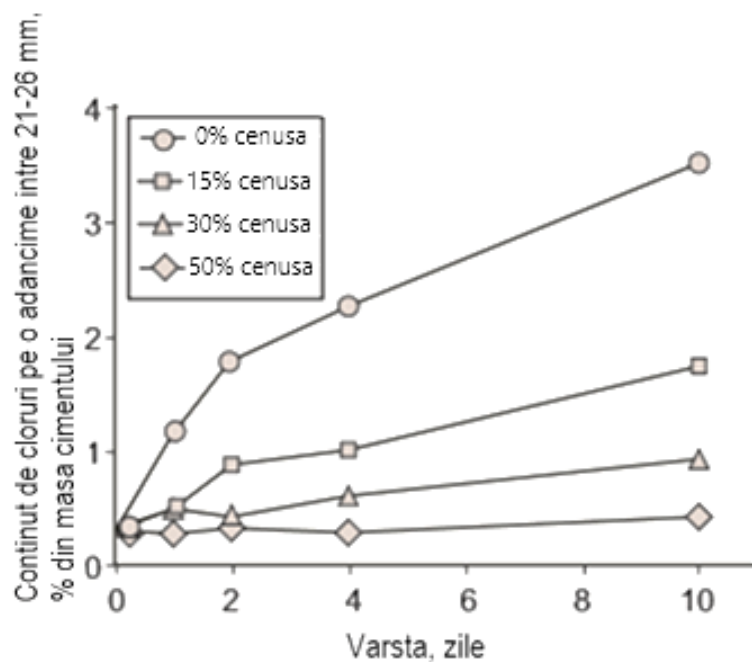


Figura III.17. - Conținut de cloruri pentru betoane cu și fără cenușă la vârstă timpurie [47].

Conținutul de cloruri în intervalul de adâncime 21-26 mm de la suprafața betonului se prezintă în figura III.17. pentru cantități diferite de cenușă zburătoare expuse la diferite perioade de timp. Clorura a pătruns mai rapid la această adâncime în betonul fără cenușă. Viteza de penetrare a clorurilor a scăzut semnificativ cu conținutul de cenușă zburătoare, iar conținutul de cloruri la această adâncime a crescut abia după perioada inițială de 28 de zile pentru beton cu 50% adaos de cenușă zburătoare.

Cenușă zburătoare din beton determină permeabilitate scăzută și foarte scăzută a clorurilor din beton. Adâncimea rezonabilă de penetrare a apei a fost atinsă pentru un procent de 20% de cenușă zburătoare din cantitatea de ciment.

### Reacția alcalii-silice

S-a stabilit că cenușă zburătoare cu conținut scăzut de calciu (clasa F) este capabilă să gverneze reacția dăunătoare alcalii-silice în beton la procente moderate de înlocuire (20% până la 30%), efectul a fost atribuit concentrației reduse de hidroxizii alcalii în soluția din pori când este prezentă cenușă zburătoare. Cenușile zburătoare cu conținut mare de calciu din clasa C sunt mai puțin eficiente în acest rol. Cercetările efectuate arată că cele mai multe cenuși zburătoare cu oxid de calciu scăzut sau moderat și conținuturi de alcalii ( $<20\%$  CaO și  $<4\%$  Na<sub>2</sub>O) sunt eficiente în reducerea expansiunii (de exemplu, expansiunea  $\leq 0,040\%$  la 2 ani) când sunt folosite până la un procent de 25%. Cenușă zburătoare cu conținut ridicat de alcalii și de oxid de calciu din clasa

C (> 20% CaO) sunt mai puțin eficiente, iar expansiunea la 2 ani crește în general cu conținutul de oxid de calciu al cenușii zburătoare.

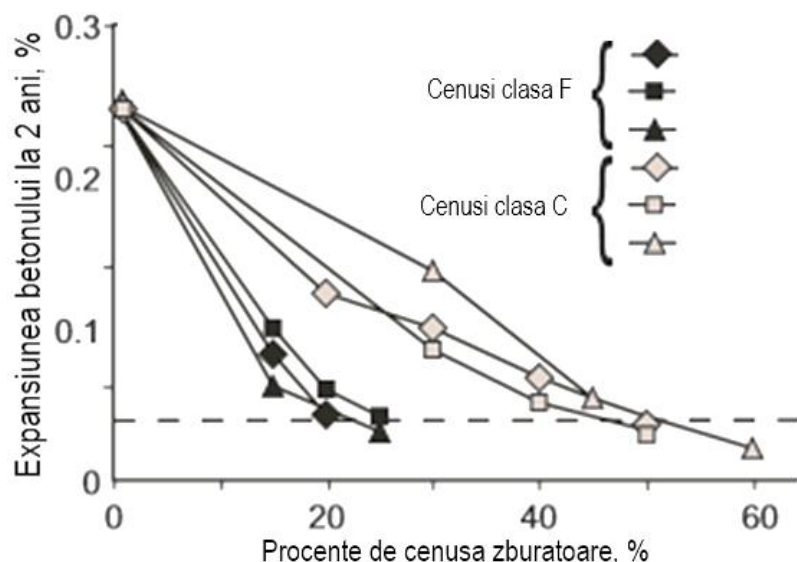


Figura III.18. - Expansiunea betonului cu cele două tipuri de cenuși datorată agregatelor reactive calcaroase [47].

Reducerea expansiunii betonului, așa cum se arată în figura III.18., se obține prin utilizarea cenușii zburătoare de clasa C cu condiția unor niveluri mai ridicate de înlocuire, unele chiar peste 50%. În general, nivelul de cenușă zburătoare necesar pentru a limita expansiunea betonului crește în următoarele cazuri cu:

- creșterea conținutului de calciu și alcalii din cenușa zburătoare;
- reducerea conținutului de silice din cenușă zburătoare;
- creșterea reactivității agregatelor;
- creșterea existenței alcaliilor din cimentul Portland (și alte componente ale betonului);
- creșterea alcaliilor în mediul înconjurător (săruri de degivrare sau anti-îngheț).

Există un risc scăzut de expansiune atunci când se utilizează beton cu cenușă zburătoare în cantitate foarte mare, cu 50% sau mai mult; totuși, pentru controlul comportării se recomandă efectuarea testelor atunci când se utilizează cenușă zburătoare cu conținut ridicat de calciu. Cenușa zburătoare cu conținut ridicat de alcalii (> 5%  $\text{Na}_2\text{O}$ ) nu este recomandată pentru utilizarea cu agregate cu potențial reactiv.

#### *Rezistența la atacul sulfatic*

Numeroase studii au demonstrat că utilizarea unor cantități suficiente de cenuși de clasă F cu conținut scăzut de calciu poate crește rezistența betonului la atacul chimic reprezentat de atacul sulfatic din pământurile de fundație sau al apelor freatice. De asemenea, s-a observat că cenușa zburătoare cu conținut mare de calciu din clasa C nu este eficientă și poate chiar crește viteza și amploarea atacului sulfatic. Experimental s-a demonstrat că amestecurile de ciment

Portland cu conținut ridicat de  $C_3A$  și de cenușă zburătoare cu conținut ridicat de calciu ( $> 20\%$   $CaO$ ) nu au îndeplinit cerințele pentru o rezistență moderată la atac sulfatic chiar și atunci când nivelul cenușii zburătoare a fost mărit la 40%. Studiile asupra betonului expus la cicluri de umezire și uscare de solurile sulfatice au arătat că mecanismul principal de deteriorare în acest mediu este atacul sulfatic fizic datorat formării și cristalizării sulfatului de sodiu. În aceste condiții, cenușa zburătoare nu a condus la nici o îmbunătățire semnificativă a performanței, chiar dacă a fost utilizată până la 40% cenușă zburătoare de clasă F.

### *Carbonatarea betonului*

Viteza de carbonatare a betonului cu compoziție corespunzătoare și tratat ulterior atent, este lentă. Coroziunea armăturii indusă de carbonatare este puțin probabil să se producă în timpul duratei de exploatare a unei structuri din beton armat, cu condiția să se asigure o acoperire adecvată a armăturii. Cu toate acestea, problemele legate de corozia armăturii inițiate de carbonatare se întâlnesc ocazional în structurile din beton datorită suprapunerii efectelor generate de un beton de calitate slabă, cu întărire neadecvată sau cu strat de acoperire insuficient.

Au fost propuși coeficienți ai vitezei de carbonatare pentru elemente din beton cu diferite rezistențe, cu procente diferite de cenușă zburătoare, expuse la perioade alternante uscare-umezire și păstrate în aer liber cu protecția împotriva precipitațiilor directe, acest mediu fiind considerat cel mai favorabil coroziei armăturii indusă de carbonatare.

Tabelul III.1. - Coeficienții vitezei de carbonatare,  $k$  ( $mm/y^{1/2}$ ) în funcție de rezistența betonului, durata de tratare și conținutul de cenușă [47].

| Rezistența betonului, (MPa) | Durata de tratare umedă, (zile) | Conținutul de cenușă, (%) |     |     |     |
|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------|-----|-----|-----|
|                             |                                 | 0                         | 15  | 30  | 50  |
| 18                          | 1                               | 6.8                       | 8.3 | 8.3 | 10  |
|                             | 3                               | 5.8                       | 6.3 | 6.2 | 8.4 |
|                             | 7                               | 4.9                       | 4.6 | 5.3 | 7.1 |
| 25                          | 1                               | 4.9                       | 4.9 | 5.2 | 6.4 |
|                             | 3                               | 3.1                       | 3.7 | 3.9 | 5.9 |
|                             | 7                               | 2.4                       | 3.3 | 3.2 | 4.8 |
| 32                          | 1                               | 2.4                       | 2.8 | 3.0 | 3.9 |
|                             | 3                               | 0.71                      | 2.1 | 2.1 | 2.6 |
|                             | 7                               | 0.28                      | 1.3 | 1.2 | 1.9 |

Rezistența betonului reprezintă rezistența caracteristică la compresiune a probelor cilindrice la 28 de zile.

Adâncimea de carbonatare poate fi calculată cu relația:

$$d = k \times t^{1/2} \quad (III.1.)$$

unde  $d$  este adâncimea de carbonatare, măsurată în mm;

---

t - timpul, în ani;

k - coeficient al vitezei de carbonatare, în mm/an<sup>1/2</sup>;

Aceste valori arată că, într-o singură clasă de rezistență, betonul conținând cenușă zburătoare a carbonatat într-un ritm mai rapid (în special pentru betonul cu rezistențe inferioare și cu procente mai ridicate de cenușă zburătoare) după doar 1 zi de întărire umedă.

Pentru a obține performanțe similare cu betonul fără cenușă zburătoare, betonul care conține 50% cenușă zburătoare are viteze de carbonatare mai mari și trebuie să fie uscat pe o perioadă lungă de timp sau să fie proiectat să aibă o rezistență mai mare [2].

Prin acest studiu s-a concluzionat că fenomenul de carbonatare nu reprezintă o problemă pentru betonul cu procente mari de cenușă, cu rezistențe mari la compresiune și tratat ulterior corespunzător, pe baza calculului timpului de coroziune (> 200 ani) pentru armătura cu un strat de acoperire de 40 mm de beton expus în aer liber.

Concluzia este valabilă numai dacă sunt îndeplinite următoarele condiții:

- (i) betonul cu procente mari de cenușă este realizat cu un raport a/c echivalent foarte scăzut ( $\leq 0,32$ );
- (ii) betonul este păstrat în mediu umed cel puțin 7 zile;
- (iii) betonul este expus direct la umiditate în timpul exploatării (nu este protejat de precipitații);
- (iv) sunt îndeplinite cerințele minime specificate pentru stratul de acoperire.

#### *Rezistența la îngheț-dezgheț și la agenții de dezghețare*

Betonul poate fi rezistent la îngheț-dezgheț, cu condiția ca acesta să aibă o rezistență suficientă și o distribuție adecvată a porilor, iar agregatele să fie rezistente la îngheț. Acest lucru este valabil pentru betonul cu cenușă zburătoare, indiferent de conținutul de cenușă zburătoare. Cu toate acestea, un număr de studii de laborator au arătat că betonul conținând cenușă zburătoare poate fi mai puțin rezistent la exfoliere atunci când este supus la îngheț-dezgheț în prezența sărurilor de dezghețare și rezistența inferioară la exfoliere a betonului cu cenușă zburătoare este mai pronunțată în cazul betoanelor cu conținut scăzut de liant sau al betoanelor cu niveluri ridicate de cenușă zburătoare.

Unele studii au demonstrat o performanță satisfăcătoare a betoanelor cu niveluri de cenușă zburătoare până la 30%. Pe baza unei analize a datelor publicate din testele de laborator și a unui studiu asupra structurilor de beton cu cenușă, expuse la sărurile de dezghețare, s-au făcut următoarele observații:

- creșterea exfolierii crește cu valoarea raportului a/c echivalent;
- pierderea masei exfoliate crește în general cu conținutul de cenușă zburătoare, în special la niveluri ridicate de înlocuire  $\geq 40$ -50%;

- 
- rezultatele obținute pentru betonul conținând cenușă zburătoare au o variabilitate mai mare;
  - necesitatea utilizării substanțelor de protecție pentru a reduce exfolierea.

Betonul cu cenușă zburătoare oferă o performanță satisfăcătoare pentru exfoliere cu condiția ca raportul a/c echivalent să nu depășească 0,45 și procentul de cenușă zburătoare să nu depășească 20 până la 30%.

Betonul cu volum mare de cenușă zburătoare, în mod invariabil, are rezultate slabe la testele de exfoliere în laborator chiar și atunci când raportul a/c echivalent este menținut la valori foarte scăzute. Performanțele in situ ale betonului cu procente mari de cenușă în ceea ce privește exfolierea la agenți de dezghețare sunt variate.

Deși betonul care conține cantități moderate sau mari de cenușă zburătoare poate fi realizat pentru a fi rezistent la acțiunea de îngheț-dezgheț în prezența sărurilor de dezghețare, este evident că rezistența la exfoliere este mai sensibilă la proporția amestecului, la modul de turnare, finisare și întărire decât la betonul cu ciment Portland.

### **III.1.5. Optimizarea conținutului de cenușă zburătoare din beton în funcție de proprietatea selectată**

Proprietățile betonului proaspăt, proprietățile mecanice și durabilitatea betonului întărit sunt puternic influențate de încorporarea adaosului de cenușă zburătoare în amestec. Măsura în care cenușă zburătoare afectează aceste proprietăți depinde nu numai de nivelul și compoziția cenușii zburătoare, ci și de alți parametri, inclusiv compoziția și proporțiile celorlalte ingrediente din amestecul de beton, tipul și dimensiunea componentelor betonului, condițiile de expunere în timpul și după turnarea betonului și practicile de construcție. Este clar că nu există un procent de înlocuire optim pentru toate aplicațiile.

Tabelul III.2. oferă un rezumat al modului în care cenușă zburătoare, atunci când este utilizată la niveluri moderate sau ridicate de înlocuire (15 până la 50%), afectează proprietățile betonului. Utilizarea cenușii zburătoare are atât efecte benefice, cât și efecte dăunătoare. Astfel, optimizarea presupune atingerea unui compromis în care conținutul de cenușă zburătoare selectat este suficient pentru a obține beneficiul necesar fără a produce vreun prejudiciu semnificativ.

Se prezintă efectul adaosului de cenușă zburătoare asupra proprietăților betonului în vederea optimizării nivelului de cenușă zburătoare folosită pentru o anumită aplicație. Cantitatea optimă de cenușă zburătoare variază nu numai cu aplicația, dar și cu compoziția și proporțiile tuturor materialelor (în special, cenușă zburătoare), condițiile din timpul turnării (în special, temperatura), practicile de construcție (de exemplu, finisarea și tratarea) și condițiile de expunere. Astfel, conținutul optim de cenușă zburătoare va varia în funcție de situație, de la caz la caz. Conținutul de cenușă zburătoare până la 50% poate fi adecvat pentru majoritatea elementelor de beton armat, cu condiția să fie îndeplinite cerințele privind rezistența la vârstă timpurie a

elementului și cu condiția să se asigure o întărire adecvată în mediu umed. Pentru elemente de suprafață, conținutul de cenușă zburătoare poate fi dictat de cerințele de finisare. Dacă nu se poate asigura o întărire adecvată sau dacă betonul este expus la atac din îngheț-dezghet în prezența sărurilor de dezghețare, cantitatea de cenușă zburătoare trebuie să fie limitată sub 25%.

Tabelul III.2. - Efectele adaosului de cenușă zburătoare asupra proprietăților betonului [47]

| Proprietate          | Efectul cenușii zburătoare                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Recomandări                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lucrabilitate        | <p>Îmbunătățirea lucrabilității și reducerea consumului de apă pentru cele mai multe cenuși zburătoare.</p> <p>Betonul este mai coeziv și segregă mai puțin - îmbunătățește pompabilitatea.</p> <p>Separarea apei este redusă în special la procente ridicate de înlocuire.</p>                                                                                    | <p>Reduce conținutul de apă cu aproximativ 3% pentru fiecare 10% cenușă zburătoare comparativ cu amestecul similar fără cenușă zburătoare.</p> <p>Se vor lua măsuri de precauție pentru a proteja betonul după turnare, când există condiții de accelerare a vitezei de pierdere a umidității (betonare pe vreme caldă).</p> <p>Se va verifica dacă separarea apei a încetat înainte de a începe operațiile de finisare finală.</p> |
| Timp de priză        | Extins - în special pe timp friguros. Anumite combinații de cenușă zburătoare, ciment și aditivi chimici pot determina priza rapidă sau priza sever întârziată la anumite temperaturi.                                                                                                                                                                             | Se apelează la reducerea procentului de cenușă zburătoare pe timp friguros sau utilizarea unui aditiv accelerator de priza. Se vor face teste pentru determinarea compatibilității cenușă zburătoare-ciment-aditiv.                                                                                                                                                                                                                 |
| Căldura de hidratare | Redusă pentru cenușa zburătoare din clasa F la procente normale de înlocuire. Cenușa zburătoare din clasa C trebuie utilizată la procente mai ridicate de înlocuire pentru a reduce căldura (de exemplu $\geq 50\%$ ). Reducerea este mai mare la utilizarea unor procente ridicate de înlocuire, conținutul total redus al materialelor cementoide și temperaturi | Se va folosi cenușă de clasă F, dacă controlul temperaturii este critic. În caz contrar, se vor utiliza procente ridicate de cenușă din clasă C și / sau se vor lua alte măsuri de reducere a temperaturii, cum ar fi: reducerea conținutului de ciment, a utilizării cimentului cu căldură redus (tip IV) sau a cimentului cu căldura moderată (tip II) sau scăderea temperaturii                                                  |

| Proprietate                                            | Efectul cenușii zburătoare                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Recomandări                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                        | scăzute de turnare a betonului (turnare pe timp friguros).                                                                                                                                                                                                                                                                | la turnare a betonului folosind răcirea cu gheață granulată sau răcirea cu azot lichid.                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Rezistența mecanică la vârste timpurii (1-7 zile)      | Redusă - în special la 1 zi. Reducerea este mai mare pentru cenușa zburătoare din clasa F și pentru procente ridicate de înlocuire.<br>Impact mai redus pentru rezistența in-situ dacă există o creștere semnificativă a temperaturii autogene (în cazul turnărilor masive).                                              | Se va lua în considerare reducerea conținutului de cenușă zburătoare în cazul în care rezistența la vârstă fragedă este critică.<br>Se utilizează aditivi de accelerare, cimenturi cu rezistență timpurie mare (tip III), sau praf de silice pentru a compensa rezistența redusă la vârste timpurii. Se va ține seama de efectul temperatura-întărire pentru a evalua rezistența la vârste fragede. |
| Rezistența mecanică pe termen lung                     | Crescută<br>Efectul crește cu procentul de cenușă zburătoare.                                                                                                                                                                                                                                                             | Se ia în considerare extinderea testelor la timpi de referință mai mari de 28 de zile pentru determinarea rezistențelor de calcul la compresiune, în special pentru elementele masive.                                                                                                                                                                                                              |
| Permeabilitatea și rezistența la penetrarea clorurilor | Redusă semnificativ - mai ales la vârste avansate.                                                                                                                                                                                                                                                                        | Întărirea adecvată este esențială dacă aceste beneficii trebuie realizate în beton aproape de suprafață (menținerea umidității betonului).                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Expansiunea datorată reacției alcalii-silice           | Redusă.<br>Expansiunea distructivă poate fi complet suprimată de procente suficiente de înlocuire.<br>Pentru cenușă de clasă F (cu până la 20% CaO) un procent de cenușă zburătoare de 20 până la 30% este suficient pentru majoritatea agregatelor.<br>Sunt necesare niveluri mai ridicate de cenușă de clasă C ( $\geq$ | Dacă se utilizează un agregat reactiv, cenușa de clasă F ar trebui să fie utilizată, dacă este disponibilă.<br>În cazul în care cenușa de clasă F nu este disponibilă, se va lua în considerare utilizarea combinației de cenușă zburătoare de clasă C cu praf de silice sau zgură.<br>Nivelul de cenușă zburătoare                                                                                 |

| Proprietate                             | Efectul cenușii zburătoare                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Recomandări                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                         | 40%).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | necesară pentru un anumit agregat trebuie determinat utilizând teste adecvate.                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Rezistența la atacul sulfatic           | Crescută pentru cenușile zburătoare din clasa F.<br>Un nivel de dozare de 20 până la 30% din categoria F de cenușă zburătoare va oferi, în general, o performanță echivalentă cu un ciment tip II sau V din ciment Portland sau un ciment rezistent la sulfați. Rezistența la atac sulfatic poate fi redusă de cenușa zburătoare de clasa C. Rezistența la imersarea ciclică în soluție de sulfat de sodiu și uscare s-a dovedit a fi relativ neafectată până la 40% cenușă zburătoare. | Nu se va utiliza cenușă zburătoare din clasa C.<br>Se vor testa toate combinațiile de cenușă zburătoare-ciment.<br>Se ia în considerare utilizarea cenușii zburătoare de clasă F cu ciment Portland rezistent la sulfați.                                                                                                                                               |
| Rezistența la carbonatare               | Scăzută pentru toate tipurile de cenuși zburătoare.<br>Scăderi semnificative în cazul în care nivelurile ridicate de cenușă zburătoare sunt utilizate în betonul cu rezistență redusă (raport mare a/c echivalent).<br>Cenușa clasa F poate fi ușor mai eficientă decât cea de clasa C.                                                                                                                                                                                                 | Se va asigura o tratare ulterioară adecvată pentru betonul care conține cenușă zburătoare.<br>Se va verifica că sunt îndeplinite cerințele minime pentru stratul de acoperire.                                                                                                                                                                                          |
| Rezistența la atacul din îngheț-dezgheț | Scăzută. Creșterea semnificativă are loc în testele de laborator pe beton cu niveluri ridicate de cenușă zburătoare.<br>Performanța în exploatare a betonului cu procente ridicate de cenușă este variabilă.<br>Finisarea manuală a suprafețelor extinse este cea mai sensibilă.<br>Cenușa zburătoare din clasa C prezintă o rezistență ușor îmbunătățită.<br>Membranele de protecție pot                                                                                               | Se va limita nivelul cenușii zburătoare în lucrările de finisare (nivelare) realizate manual (trotuare și căi de acces) expuse la săruri de dezghețare - în special la turnarea pe timp friguros.<br>Dacă este posibil, se asigură o perioadă de întărire adecvată înainte de prima aplicare a sării de dezghețare.<br>Se va acorda o atenție deosebită proporțiilor de |

| Proprietate | Efectul cenușii zburătoare | Recomandări                                                                                                                                                                                                                    |
|-------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|             | crește rezistența.         | amestec (raportul a/c echivalent), distribuția porilor și modul de finisare și de tratare când betonul cu cenușă zburătoare este folosit la elemente de suprafață (trotuare și căi de acces) expuse la sărurile de dezghețare. |

### III.2. Influența adaosului de zgură granulată de furnal măcinată asupra pastei de ciment și betonului

În amestecurile de beton, zgura granulată de furnal măcinată prezintă atât proprietăți puzzolanice cât și hidraulice. Acesta conține aceleași componente chimice ca și cimentul Portland, dar cantitățile din fiecare component pot diferi. Ca și în cazul altor adaosuri minerale, cum ar fi cenușa zburătoare și praful de silice, zgura granulată de furnal măcinată poate afecta în mod semnificativ anumite proprietăți ale betonului proaspăt și întărit. Constructorii care toarnă betoane cu zgură granulată de furnal măcinată trebuie să cunoască aceste efecte și să-și adapteze procedurile în consecință. De asemenea, proiectanții trebuie să dozeze corect amestecurile de beton care conțin zgură granulată de furnal măcinată pentru a îndeplini cerințele specifice de performanță. Pe baza rezultatelor încercărilor efectuate pe diferite mortare cu zgură realizate cu un procent diferit de înlocuire a cimentului și păstrate pe o perioadă de până la 180 de zile, se pot trage următoarele concluzii [48]:

(1) Amestecul de mortar cu zgură cu diferite procente de înlocuire a cimentului până la 50% a prezentat rezultate satisfăcătoare atât pentru rezistența la compresiune, cât și pentru rezistența la întindere.

(2) Se observă că utilizarea optimă a zgurii în mortar este de 40% din ciment. Mortarele de zgură cu procent de înlocuire de 40% a cimentului prezintă o rezistență la compresiune mai mare cu 19% decât mortarul cu ciment Portland după 180 de zile de întărire. Creșterea corespunzătoare a rezistenței la întindere este raportată la 25%.

(3) Utilizarea zgurii cu volum ridicat ca înlocuitor al cimentului, în orice lucrare de construcție, oferă un impact redus asupra mediului (reducerea emisiilor de CO<sub>2</sub>) și utilizarea judicioasă a resurselor (conservarea energiei, utilizarea subprodusului etc.)

(4) Utilizarea zgurii reduce cantitatea de ciment, precum și căldura de hidratare într-un amestec de mortar. Astfel, lucrările de construcție din beton cu zgură devin economice și, de asemenea, sigure din punct de vedere al mediului.

(5) Viteza lentă de hidratare în cazul betonului/mortarului cu zgură scade riscul de fisurare din temperatură.

### III.2.1. Efectele adaosului de zgură granulată de furnal măcinată asupra proprietăților betonului proaspăt

#### Lucrabilitatea

Mulți executanți au observat îmbunătățiri considerabile ale proprietăților de turnare și de pompare a betoanelor conținând zgură granulată de furnal măcinată, atât cu, cât și fără aditivi de reducere a apei (fig. III.19.). Aceste îmbunătățiri se datorează caracteristicilor de suprafață compactă și omogenă ale zgurii și dispersiei mai bune a particulelor care determină o fluiditate mai mare a pastelor de ciment și mortarelor.

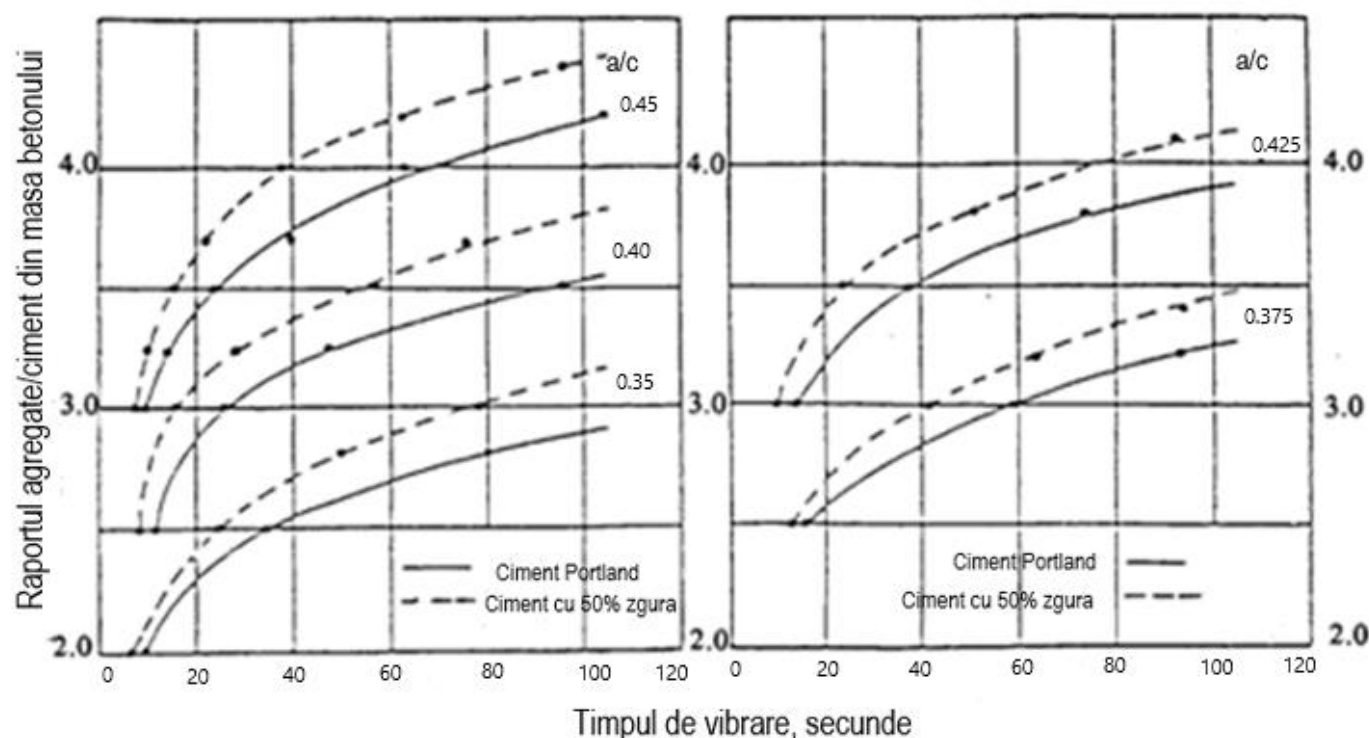


Figura III.19. - Relația dintre timpul de vibrare al betonului preparat cu ciment Portland și ciment compozit cu 50% zgură [49].

Cercetările au arătat că pastele de ciment ce conțin zgură granulată de furnal măcinată prezintă proprietăți reologice diferite față de pastele care conțin doar ciment Portland. Apa este absorbită de zgură în timpul amestecării, pasta este mai fluidă, rezultând o lucrabilitate mai bună. Pentru o lucrabilitate echivalentă, este posibilă o reducere a conținutului de apă de până la 10%. În urma cercetărilor experimentale s-a obținut o tasare crescută la toate compozițiile cu zgură testate în comparație cu betonul fără zgură la același conținut de apă (fig. III.20.). Studiile [49] au evidențiat că la betoanele confecționate cu același raport a/c și procente crescătoare de zgură, tasarea a crescut semnificativ odată cu creșterea procentelor de zgură.

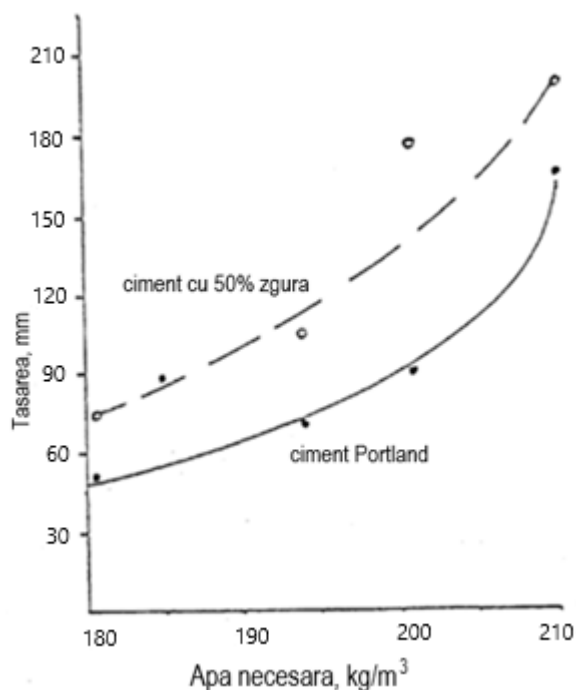
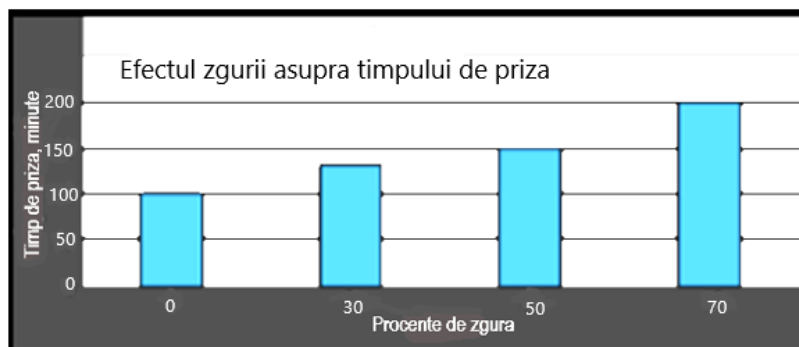


Figura III.20. - Efectul cantității de apă în funcție de tasarea betonului preparat cu ciment Portland și ciment compozit cu 50% zgură [49]

### Timpul de priză

Deoarece zgura hidratează mai lent decât cimentul Portland, utilizarea zgurii granulate de furnal măcinate întârzie în general timpul de priză al betonului. Gradul de întârziere depinde de factori precum proporția de zgură utilizată (cu cât este mai mare cantitatea de zgură, cu atât timpul de priză este mai mare), raportul a/c echivalent și temperatura inițială de întărire. De obicei, timpul de priză inițial este prelungit de la jumătate de oră până la o oră la temperaturi de 23°C; se înregistrează o mică schimbare la temperaturi de peste 30°C [51]. Adăugarea aditivilor acceleratori de priză la betonul cu zgură poate reduce sau elimina această întârziere a timpului de priză [1].



Efectul va fi mai pronunțat la procente mai mari de zgură și/sau temperaturi scăzute. Un timp de priză prelungit este avantajos prin faptul că betonul va rămâne lucrabil o perioadă mai lungă, fapt deosebit de util pentru betonări pe vreme caldă (fig. III.21.).

Figura III.21. - Variația timpului de priză în funcție de procentul de zgura [51].

### Separarea apei

Capacitatea de separare a apei și viteza de separare a apei din beton sunt în cea mai mare parte afectate de raportul dintre suprafața specifică a solidelor și volumul apei. Prin urmare, când se folosesc zguri, aceste efecte pot fi estimate în funcție de finețea zgurii în comparație cu

---

cea a cimentului și de efectul combinat al celor două materiale cimentoide. Atunci când zgura granulată de furnal măcinată este mai fină decât cimentul Portland și este înlocuită în masă egală, separarea apei este redusă; dimpotrivă, când zgura este în cantitate mai mare, viteza de separare a apei și cantitatea de apă separată pot crește. La zgura cu finețe de măcinare de 4000 cm<sup>2</sup>/g reducerea cantității de apă separată nu este semnificativă, dar un efect benefic important s-a observat la o finețe a zgurii de 6000 cm<sup>2</sup>/g.

#### *Căldura de hidratare*

Utilizarea zgurii poate reduce acumularea de căldură într-o structură de beton deoarece ea reduce în mod semnificativ creșterea temperaturii în timpul hidratării cimentului. Această reducere a temperaturii este deosebit de benefică în betoanele utilizate pentru structurile masive. Măsura în care zgura scade căldura de hidratare depinde de finețea zgurii (o măcinare mai fină are efect mai bun) și cantitatea de zgură utilizată (folosirea unor procente mai mari de zgura determină o reducere mai mare a temperaturii). Experimentele au arătat că înlocuirea cu 70% a zgurii granulate de furnal măcinate, a făcut posibilă reducerea temperaturii de hidratare cu aproximativ 30%.

#### *Finisare și întărire*

Indiferent de compoziția betonului și tipul de ciment utilizat, betonul trebuie păstrat într-o stare adecvată de umiditate și temperatură în faza inițială, cu scopul de a-și dezvolta rezistența și potențialul de durabilitate. Se poate afirma că betonul care conține zgură este mai sensibil la condițiile neadecvate de întărire decât betonul cu ciment Portland când zgura este utilizată în procente mai mari decât 30%. Această sensibilitate se atribuie formării reduse a hidratării la vârste fragede, ceea ce duce la o pierdere mare de umiditate care altfel ar fi disponibilă pentru continuarea hidratării. Cu certitudine se poate afirma, la fel ca în cazul tuturor materialelor cimentoide suplimentare, că viteza și gradul de hidratare sunt afectate de pierderea umidității la o vârstă fragedă, cu o scădere a sporului de rezistență.

Temperaturile și condițiile de umiditate în timpul întăririi au efecte similare asupra timpului de priză și a dezvoltării rezistenței betoanelor conținând zgură ca și pentru cele realizate numai cu ciment Portland. Cu toate acestea, timpul de priză necesar poate să fie mai lung pentru betoanele cu zgură granulată de furnal măcinată, deoarece la acestea rezistența evoluează în mod obișnuit mai lent. Ca și în cazul betoanelor pe bază de ciment Portland, cele mai bune rezultate au loc atunci când betonul este menținut continuu în umiditate cât mai mult timp posibil [1]. Se recomandă o perioadă minimă de tratare de trei zile pentru beton cu zgură de înaltă performanță deoarece durabilitatea depinde în principal de calitatea betonului la suprafață.

Betonul cu procente mari de zgură este mai susceptibil la condiții de tratare neadecvate decât betonul din ciment Portland, probabil datorită formării reduse a hidrosilicatlui de calciu la vârste timpurii. Cercetătorii au constatat că întărirea în aer a redus rezistența cu 21% și respectiv cu 47% la betoanele cu 50% și respectiv cu 65% înlocuitor de zgură comparativ cu betoanele menținute în apă și încercate la 180 de zile. Rezistența pentru un beton cu 50% zgură granulată de furnal măcinată cu o întărire inițială de șapte zile în umiditate, urmată de întărirea în aer, nu

---

este semnificativ afectată în comparație cu betonul păstrat în apă cu același nivel de înlocuire al zgurii. Betonul cu zgură necesită o perioadă mai lungă de întărire decât cea a betonului cu ciment Portland. Tratarea insuficientă (mai puțin de 3 zile) poate afecta în mod negativ evoluția rezistenței.

### *Culoarea*

Culoarea verzuie sau albastru-verzuie din primele zile (2-4 zile) după turnare este atribuită unei reacții complexe a sulfurii de sulf din cimentul cu zgură cu alți compuși din cimentul Portland. Gradul și amploarea colorării depind de viteza de oxidare, de procentul de zgură utilizat, de condițiile de întărire și de porozitatea suprafețelor de beton. Colorarea suprafeței are loc doar într-un procent mic în betonul realizat cu ciment de zgură. Cu toate acestea, interiorul betonului poate rămâne albastru-verde mereu. Proprietățile betonului întărit, cum ar fi rezistența, permeabilitatea și durabilitatea nu sunt compromise dacă se produce colorarea. În majoritatea betonului realizat cu ciment cu zgură, suprafața devine gri deschis sau aproape alb în câteva ore după ce suprafața betonului a fost expusă la lumina directă a soarelui și în aer.

Colorarea suprafeței se diminuează pe măsură ce progresează oxidarea și nu trebuie tratată. În mod obișnuit, suprafețele care arată colorate se vor maturiza și vor avea un aspect uniform de culoare gri deschis sau alb. Unii factori care pot provoca viteze mai mici de oxidare includ: întărirea umedă extinsă, vreme umedă, vreme rece, umbră, umiditate continuă, medii întunecate. Este neobișnuit ca culoarea să persiste după o săptămână de expunere la aer uscat și lumina soarelui.

### *Efectele adaosului de zgură asupra creșterii temperaturii în masa betonului*

Zgura a fost utilizată în mod obișnuit ca adaos al cimentului Portland cu zgură granulată de furnal macinată și ca un constituent cimentoid separat pentru a reduce creșterea temperaturii în masa betonului. Indiferent dacă zgura este conținută în ciment sau adăugată separat la prepararea betonului, încorporarea zgurii a redus viteza de generare a căldurii timpurii, reducerea este direct proporțională cu proporția de zgură utilizată (fig. III.22.). Căldura de hidratare depinde de compoziția cimentului Portland utilizat și de activitatea zgurii. Reducerea căldurii de hidratare poate fi înregistrată atunci când zgura înlocuiește cantități egale de ciment. Unele studii privind betonul cu zgura din elementele de suprafață indică faptul că adaosurile de zgură de 35 până la 55% au produs o căldură totală mai mare decât cimenturile Portland, chiar dacă viteza de creștere a căldurii a fost mai mică. În cazul în care se utilizează adaosuri de zgură foarte activă, pot fi necesare proporții de zgură de cel puțin 70% pentru a obține valori reduse ale căldurii de hidratare.

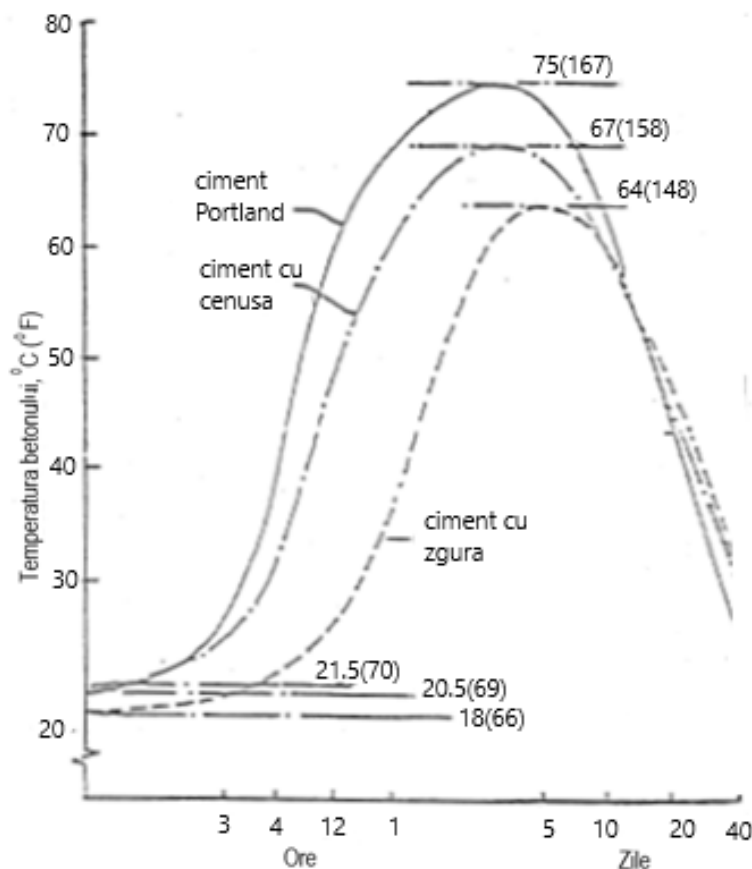


Figura III.22. - Compararea temperaturii din masa betonului cu ciment Portland, ciment compozit cu 30% cenușa zburătoare și ciment compozit cu 70% zgură [49]

### III.2.2. Efectele adaosului de zgură granulată de furnal măcinată asupra proprietăților betonului întărit

#### *Rezistența la compresiune*

Rezistența la compresiune fiind principalul indice de apreciere a calității betonului, este justificată întreprinderea de studii experimentale atât pe mortare cât și pe betoane. Adaosurile minerale sunt esențiale pentru producerea betoanelor de înaltă rezistență. Rezistențe la compresiune mari pot fi obținute prin utilizarea proporțiilor optime de zgură într-o compoziție de beton. Măsura în care zgurile afectează rezistența depind de indicele de activitate al zgurii și de proporția în care este utilizată în amestec. Cea mai mare rezistență la 28 de zile poate fi obținută cu adaosuri de 35% până la 65% zgură granulată de furnal măcinată.

În figura III.23. este prezentat că potențialul de rezistență la compresiune al mortarelor cu ciment compozit cu 50% zgura este dependent de indicele de activitate al zgurii, așa cum este definit în ASTM C 989 [95].

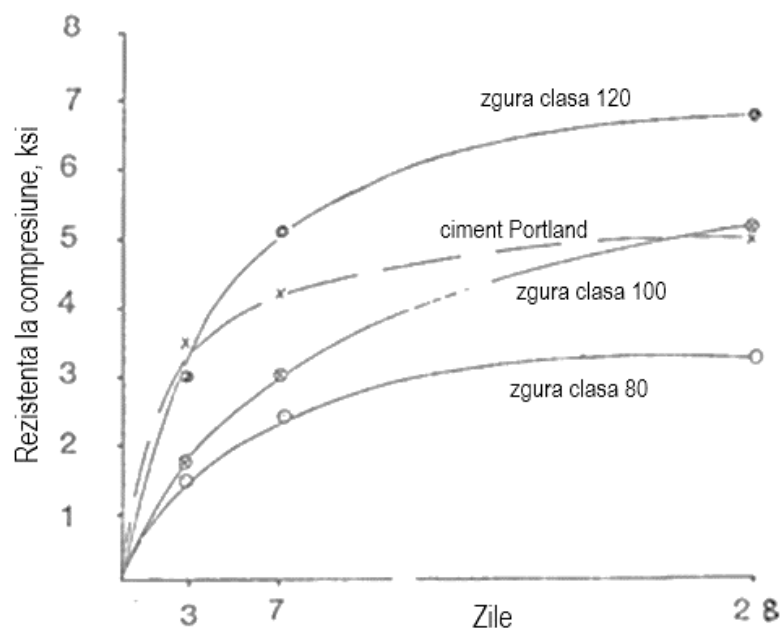


Figura III.23. - Rezistențele la compresiune ale mortarelor cu diferite cimenturi cu zgură comparativ cu mortarele cu ciment Portland (1 ksi = 6.89 MPa) [49].

Alți factori care pot afecta performanța zgurii în beton sunt raportul a/c echivalent, caracteristicile fizice și chimice ale cimentului Portland și condițiile de întărire. După cum se observă în figura III.24., creșterea rezistenței betonului obținut cu o zgură de clasa 120 este mai mare în cazul amestecurilor de beton care au un raport ridicat a/c echivalent, decât în amestecurile cu un raport redus a/c echivalent.

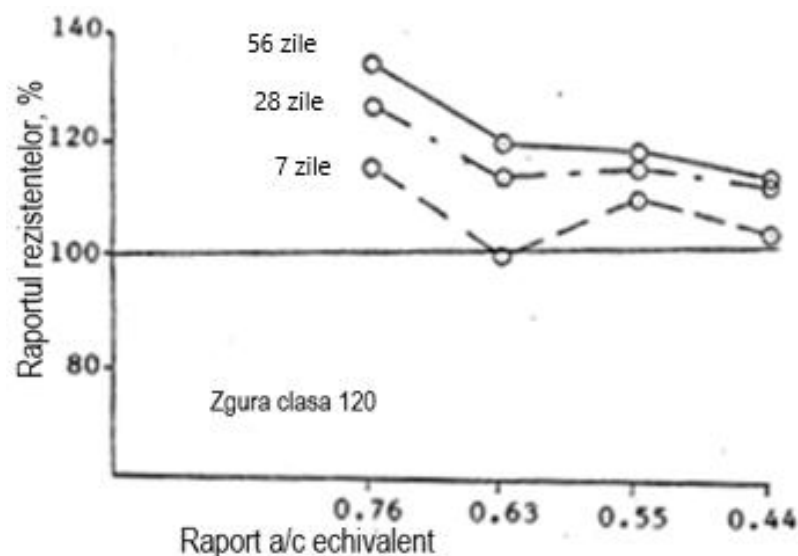


Figura III.24. - Efectul raportului a/c echivalent asupra rezistenței la compresiune a betoanelor cu ciment cu zgură comparativ cu cele cu ciment Portland [49].

Temperatura mediului în care loc întărire betonului are un efect deosebit asupra rezistenței lui, în special la vârste timpurii. Se constată că betonul care conține zgură răspunde foarte bine la condiții de întărire la temperaturi ridicate. În condiții de întărire accelerată s-au înregistrat rezistențe mai mari la o zi și mai târziu decât cele ale betonului cu ciment Portland. Atunci când se întărește la temperaturi normale sau scăzute se reduce rezistența la vârste timpurii pentru beton care conține zgură granulată de furnal măcinată.

Proporția de zgură utilizată afectează, de asemenea, rezistența la compresiune și viteza de creștere a rezistenței, după cum se constată din figura III.25. Atunci când s-au testat zgurii foarte active, cele mai mari rezistențe la 28 de zile s-au găsit în amestecuri cu 40 până la 50%

zgură. În cazul rezistentelor inițiale, viteza creșterii rezistenței este în general invers proporțională cu cantitatea de zgură utilizată în amestec.

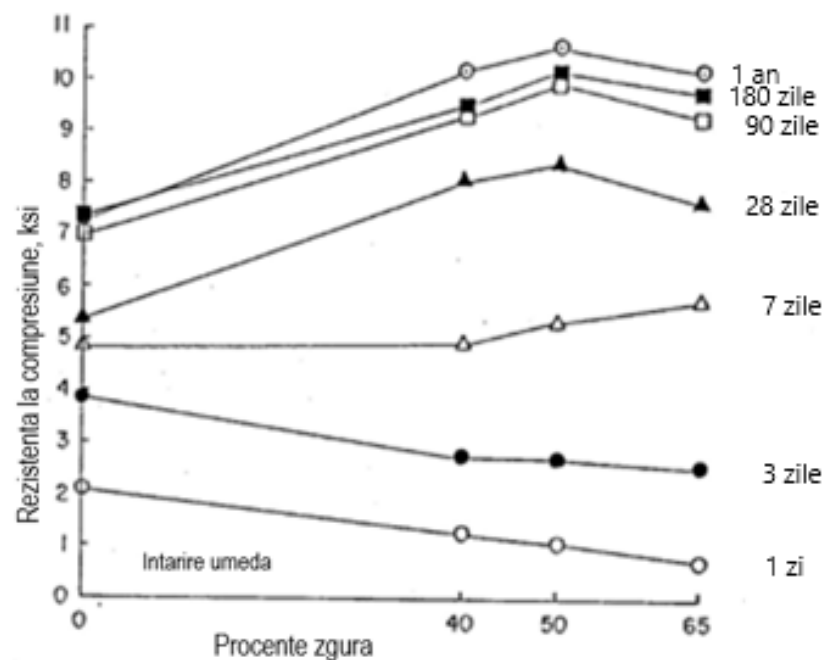


Figura III.25. - Influența procentelor de zgură din ciment asupra rezistenței la compresie a mortarelor (1 ksi = 6.89 MPa) [49].

Rezistența la compresie a amestecurilor de beton cu diferite procente de zgura obținute la diverse vârste de 7, 28, 56 și 90 de zile de întărire este reprezentată în figura III.26. din care rezultă că sporul de rezistență este funcție de timp. Adăugarea de zgură granulată de furnal măcinată a îmbunătățit rezistența la compresie la toate vârstele. Rezistența este crescută chiar și la nivelul de înlocuire de 55%, dar sporul maxim de rezistență este obținut la nivelul de înlocuire de 40% (optim) [50] (fig. III.27.).

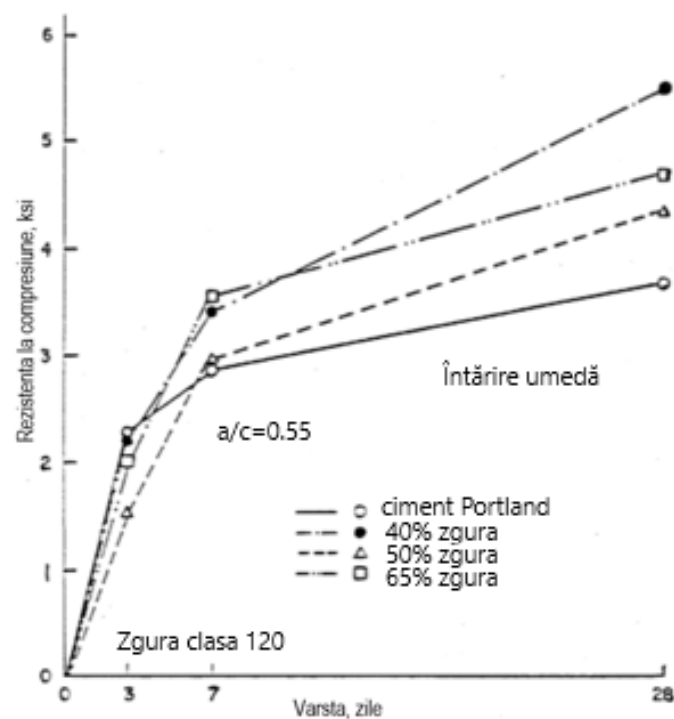


Figura III.26. - Rezistența la compresie ale diferitelor amestecuri cu ciment cu zgură granulată de furnal măcinată comparativ cu un beton conținând numai ciment Portland [49].

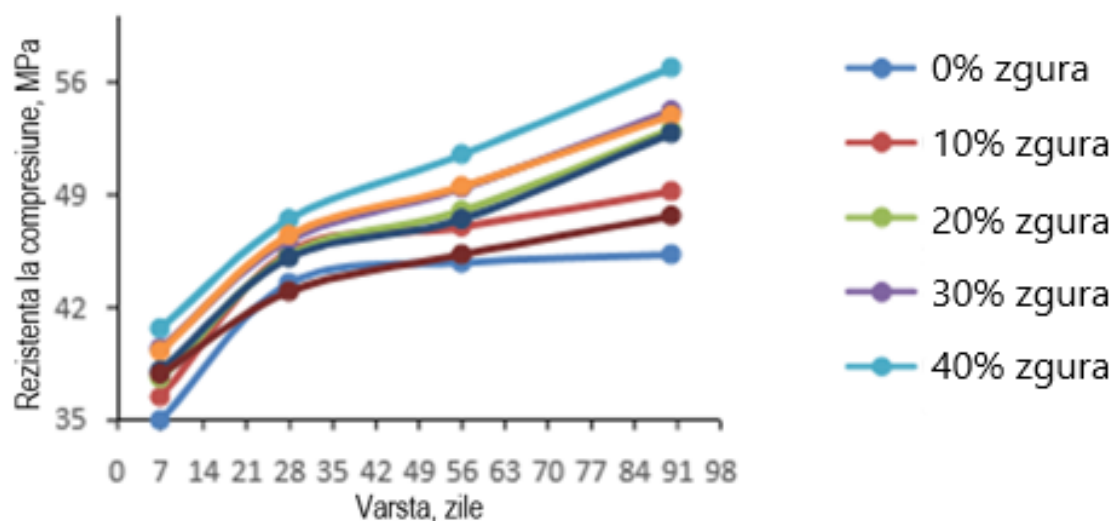


Figura III.27. - Variația rezistenței la compresiune a betonului cu ciment cu diverse procente de zgură în funcție de vârsta betonului [50].

Un interes deosebit îl reprezintă efectul zgurii asupra betonului testat pentru determinarea rezistenței la întindere din încovoiere. Atunci când se fac comparații între betonul cu și fără zgură, amestecurile cu ciment cu zgură dezvoltă în general rezistențe la întindere din încovoiere la vârste mai mari de 7 zile (figura III.28.). Se presupune că acesta este rezultatul densității crescute a pietrei de ciment și a aderenței îmbunătățite dintre agregate și piatra de ciment.

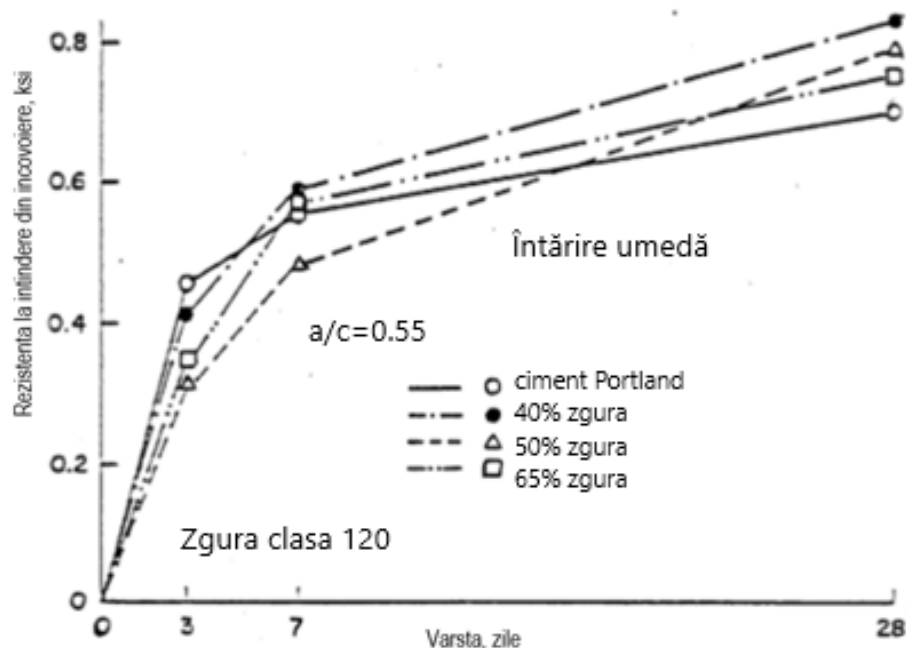


Figura III.28. - Rezistența la întindere din încovoiere ale diferitelor amestecuri cu ciment cu zgură comparativ cu un beton conținând numai ciment Portland (1ksi = 6.89 MPa) [49].

### Contrația de uscare și curgerea lentă

Majoritatea lucrărilor din literatura de specialitate arată că utilizarea zgurii are o influență redusă asupra contrației de uscare a betonului. Se observa că, în condiții de întărire la temperatura de 20 °C și 60% umiditate relativă după o perioadă de păstrare de 28 de zile în apă,

contractia de uscare a betonului cu 50% zgura a fost cu aproximativ 10% mai mică decât la betonul cu ciment Portland. Există puține studii referitoare la curgerea lentă și contractia betonului preparat cu ciment care conține zgură, iar rezultatele sunt contradictorii. Unii cercetători [49] au găsit mici diferențe între betoanele preparate cu ciment cu/fără zgură dar totuși în figura III.29. se observă deformări din contracție mai mari la procente ridicate ale adaosului de zgură. Reducerea deformărilor din contracție se poate obține prin adăugarea de ghips în zgură până la nivelul contracțiilor cu ciment Portland [2].

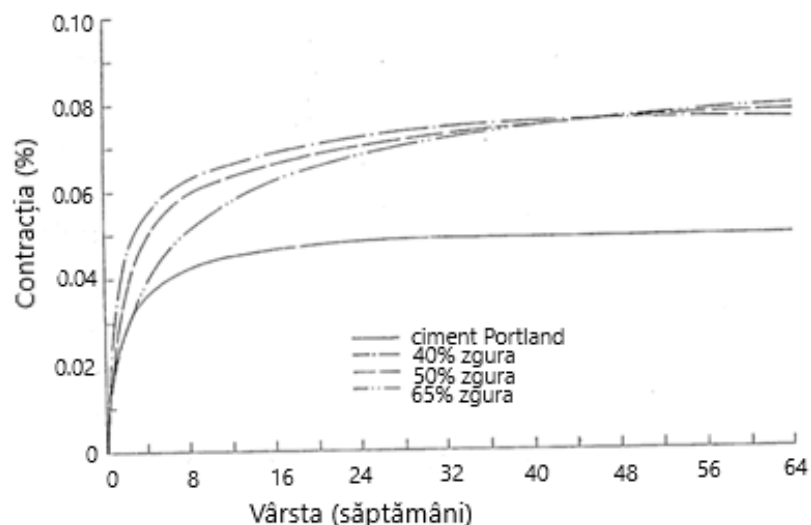


Figura III.29. - Contractia de uscare a betonului cu ciment cu diferite procente de zgura, fără aditivi antrenori de aer și raport a/c echivalent de 0.55 [49].

### Permeabilitate

Atunci când cimentul Portland se hidratează, principalul liant produs este hidrosilicatul de calciu (C-S-H) și până la o cincime din produsele de hidratare pot fi hidroxid de calciu sau var. În betonul întărit, prezența hidroxidului de calciu poate afecta durabilitatea.

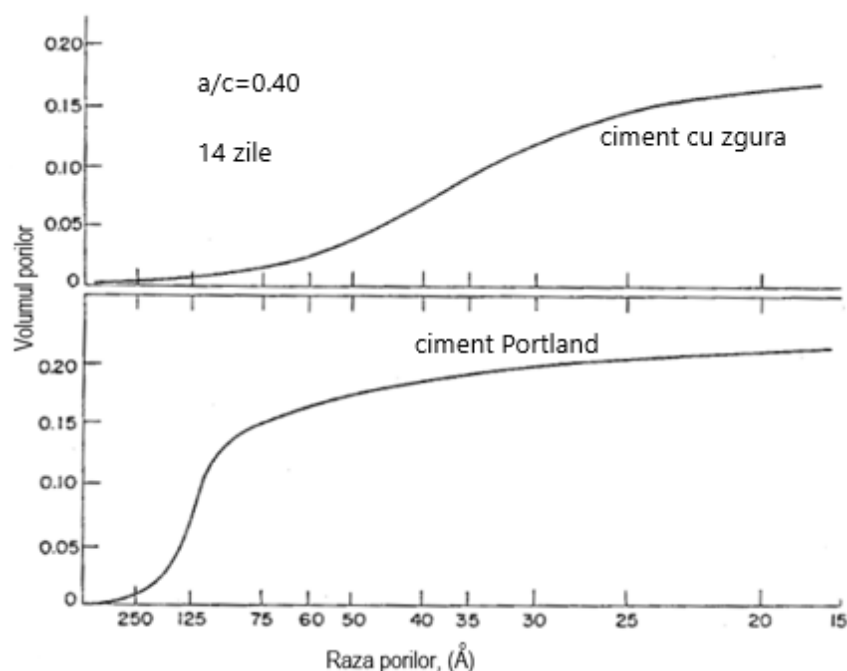


Figura III.30. - Comparație între distribuția dimensiunii porilor conținuți în pastele de ciment fără zgura și cu 40% zgura [49].

Când zgura granulată de furnal măcinată este amestecată cu ciment Portland și apă, se produce mai mult liant C-S-H deoarece hidratarea zgurii granulate de furnal macinate consumă hidroxid de calciu și îl transforma în liant C-S-H suplimentar.

Porii din beton conținând în mod normal hidroxid de calciu sunt umpluți în plus cu hidrosilicat de calciu C-S-H, rezultând o pastă densă de ciment și cu o permeabilitate redusă. Cu cât conținutul de zgură este mai ridicat, cu atât permeabilitatea betonului este mai redusă. Permeabilitatea betonului depinde de porozitate și de distribuția dimensiunii porilor. Reducerea mărimii porilor dată de granulele de zgura este vizibilă în figura III.30., comparând mortarul cu 40% și fără zgură.

### III.2.3. Efectele adaosului de zgura granulată de furnal măcinată asupra durabilității betonului

#### *Rezistența la atacul sulfatic*

Zgura granulată de furnal măcinată poate îmbunătăți rezistența betonului la atacul sulfatic, în primul rând prin reducerea cantității de elemente reactive (cum ar fi calciul) necesare pentru reacțiile de expansiune sulfatică. Cercetările arată o rezistență ridicată la atacul sulfatic în betonul în care proporția de zgură depășește 50% din masa cimentului. S-au întâlnit cazuri în care rezistența la atac sulfatic a betonului cu zgură este egală sau mai mare decât a betoanelor realizate cu ciment rezistent la sulfati de tip V. Îmbunătățirile rezistenței la atac sulfatic sunt cele mai mari la betoanele, în care conținutul de alumină din zgura este mai mic de 11%. Dacă se utilizează zgură pentru a crește rezistența la atac sulfatic a betonului trebuie folosită o zgura cu un conținut mediu scăzut de alumină.

Cimentul cu 65% zgură din masă este specificat în normele germane drept ciment cu rezistență ridicată la atac sulfatic (fig. III.31.). Cu toate acestea, unele studii au constatat că zgura cu conținut ridicat de alumină și un nivel de finețe ridicat poate afecta negativ rezistența la atac sulfatic a betonului.

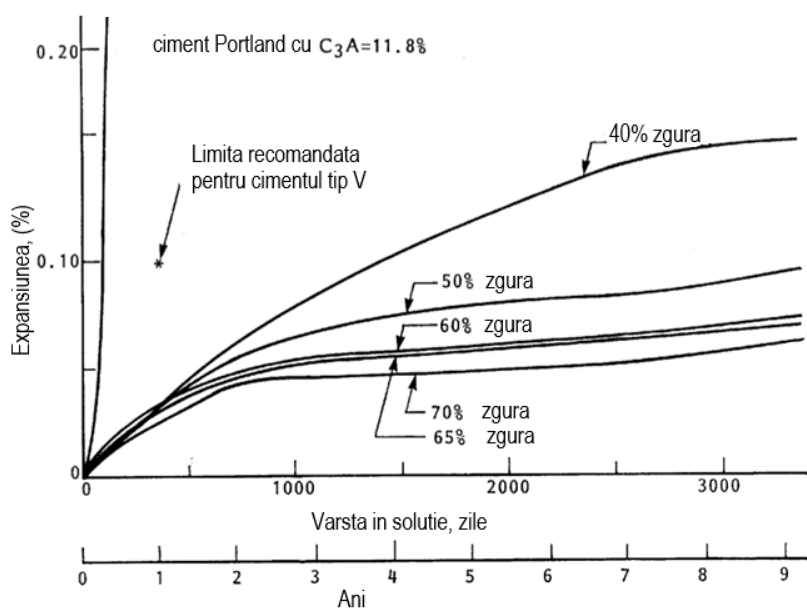


Figura III.31. - Efectul procentelor diferite de zgură (cu  $Al_2O_3 = 8.4\%$ ) asupra expansiunii în soluție de 50 mg/l  $Na_2SO_4$  [49].

Atunci când zgura este utilizată în cantități suficiente, apar o serie de modificări care îmbunătățesc rezistența la atacul sulfatic, astfel dacă conținutul de  $C_3A$  al cimentului Portland este redus proporțional cu procentul de zgură utilizat se observă că a crescut rezistența la sulfati, care nu depinde numai conținutul de  $C_3A$  ci și de conținutul de alumină al zgurii.

### Reacția alcalii-silice

Zgura poate reduce semnificativ potențialul de expansiune al betonului datorită reacției alcalii-silice, C-S-H suplimentar produs de zgură scade reactivitatea prin legarea chimică a alcaliilor din beton. Determinarea dozajelor optime de zgură este importantă pentru a reduce la maxim reactivitatea, conținutul de adaos de zgură de 40% până la 65% din conținutul de ciment poate elimina practic expansiunea (fig. III.32.).

Rezistența la reacția alcalii-silice se datorează următoarelor influențe: permeabilității reduse, schimbării raportului alcalii-silice, dezintegrării și eliminării alcaliilor, reducerii directe a alcaliilor disponibile și reducerii hidroxidului de calciu necesar pentru susținerea reacției. Pe baza încercărilor care utilizează zgură granulată de furnal măcinată ca înlocuitor parțial al cimentului cu conținut ridicat de alcalii și cu agregate care dau reacții alcalii-silice și alcalii-carbonați, după doi ani de observare, s-a constatat că betoanele cu adaos de zgură au fost eficiente în reducerea expansiunii, dar reducerea a fost mai mică decât în cazul cimentului cu conținut redus de alcalii. Când se utilizează zgura în combinație cu ciment cu conținut ridicat de alcalii, procentele de zgură de 40% par a fi eficiente în reducerea potențialului reacțiilor alcalii-carbonați, iar procentele de zgură de 50% par a fi eficiente în reducerea potențialului reacțiilor alcalii-silice.

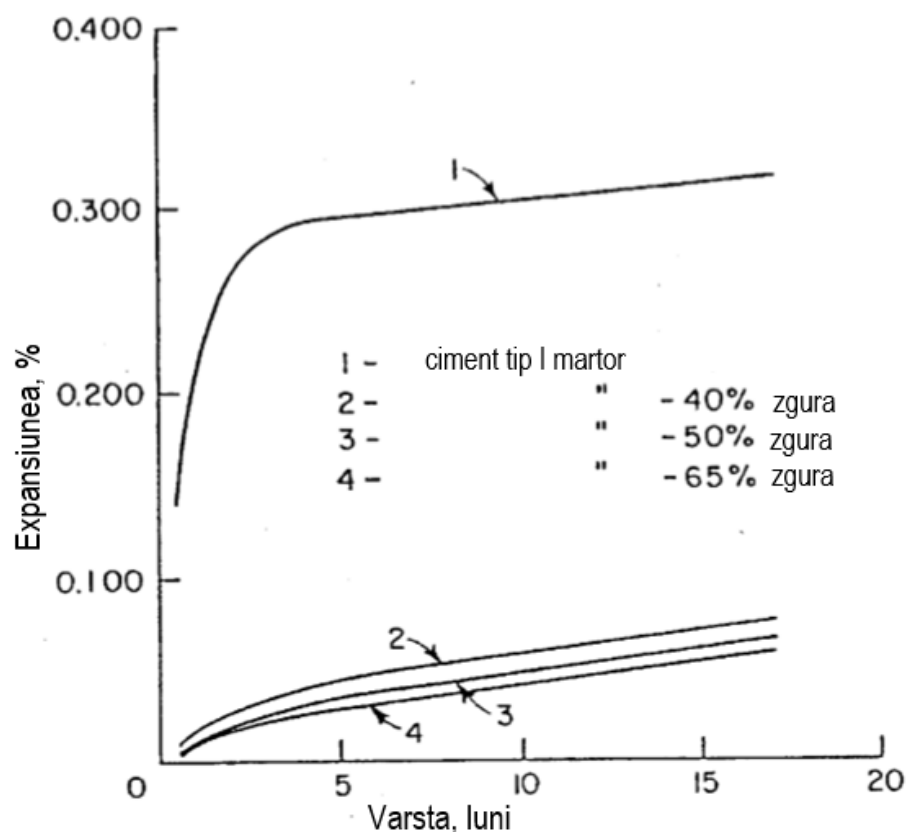


Figura III.32. - Expansiunea datorată reacției alcalii-agregate pentru cimente cu proporții variate de zgură [49].

### Rezistența la îngheț-dezgheț și la agenții de dezghețare

Gradul de hidratare mai mic al acestor cimenturi cu adaos de zgură, determinat în funcție de ponderea zgurii și de finețea sa de măcinare determină o microstructură a pietrei de ciment mai densă și un volum mai redus de pori de aer [15]. La betoanele conținând ciment cu zgură utilizarea aditivilor antrenori de aer este mai puțin eficientă decât la betoanele cu ciment Portland, o influență pozitivă se constată numai până la un procent mai mic sau egal cu 55% adaos (fig. III.33.).

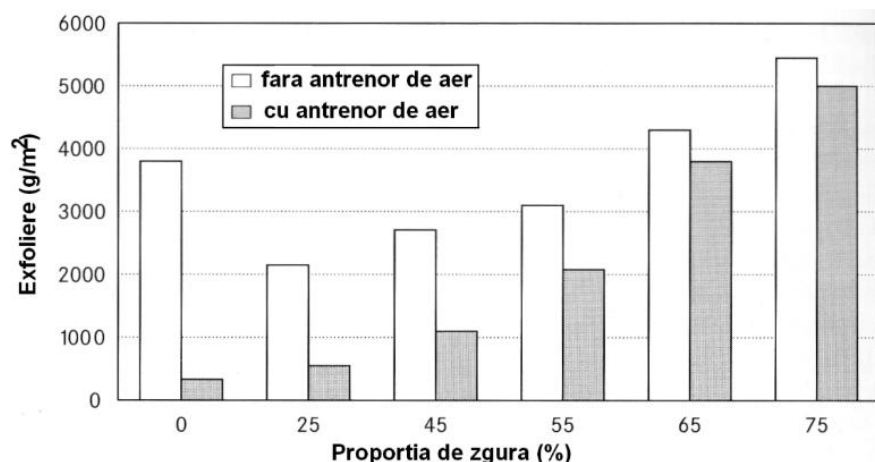


Figura III.33. - Exfolierea după 28 de cicluri de îngheț-dezgheț pentru betoane fără și cu aditiv antrenor de aer, în funcție de proporția de zgură [15].

Din rezultatele prezentate în literatura de specialitate nu se poate face o apreciere general valabilă a rezistenței la îngheț-dezgheț a betoanelor cu ciment cu zgură. Atunci când betonul realizat cu ciment Portland cu zgură granulată de furnal măcinată a fost încercat în paralel cu cimenturile de tip I și de tip II, rezistențele lor la îngheț-dezgheț au fost în esență asemănătoare.

În general, se consideră că rezistența la săruri de dezghețare a betoanelor de ciment cu zgură este mai slabă decât a celor cu ciment Portland. Rezistența la îngheț-dezgheț în prezența sărurilor de dezgheț a betoanelor cu cimenturi cu zgură, este determinată de straturile superficiale ale betonului, părțile interioare nefiind atacate și este necesară o calitate sporită a suprafeței betonului. Majoritatea cercetărilor întreprinse pentru determinarea rezistenței la îngheț-dezgheț indică faptul că exfolierea este de obicei întâlnită când betonul are un raport a/c echivalent ridicat și sunt utilizate procente ridicate de zgură granulată de furnal măcinată.

### Carbonatarea betonului

În termeni generali, combinația de zgură granulată de furnal măcinată și ciment Portland dă naștere la carbonatare crescută în betoane. Mărirea acestei creșteri depinde, în principal, de parametrii referitori la finețea zgurii și a cimentului Portland, compoziția și vârsta betonului în momentul expunerii la carbonatare [1]. În general, carbonatarea betonului cu zgură granulată de furnal măcinată este similară cu betonul cu ciment Portland până la un procent de 20% zgură; creșterea vitezei de carbonatare cu conținutul de zgură este de aproximativ 25% pentru 30% zgura (CEM II/B-S), 60% pentru 50% zgură (CEM III/A) și respectiv 115% pentru 75% zgură (CEM III/B). Deși au fost studiate mai puțin, există indicii că o creștere a fineții zgurii sau o

---

creștere a conținutului de ciment cu zgură granulată de furnal măcinată la un raport a/c dat îmbunătățește rezistența la carbonatare a betonului.

Întărirea realizată în mediu umed este factorul principal care determină carbonatarea betonului cu zgură. Folosind o întărire umedă prelungită, rezistența la carbonatare a betonului cu zgură poate fi similară cu aceea a betonului cu ciment Portland având rezistențe egale și reducând conținutul de zgură granulată de furnal măcinată.

În condiții de carbonatare accelerată la o concentrație de 3 - 5% dioxid de carbon, menținerea timp de o săptămână a unui betonului ciment cu zgură poate fi echivalată cu aproximativ 0,6 ani de carbonatare în spații închise. Informațiile privind coroziunea indusă de carbonatare arată că viteza de coroziune a armăturilor în betonul cu ciment cu zgură este mai mare decât cea în betonul cu ciment Portland atunci când carbonatarea a atins suprafața armăturii.

Pentru a reduce efectul de carbonatare al betonului cu ciment cu zgură asupra proiectării elementelor structurale, se poate lua în considerare limitarea cantității de adaos de zgură, creșterea rezistenței caracteristice și/sau a stratului de acoperire cu beton a armăturilor. Toate aceste opțiuni trebuie să fie cântărite în funcție de diferitele aspecte care trebuie luate în considerare la proiectarea betonului structural, cum ar fi durabilitatea, procedeele de execuție și avantajele economice.

#### *Rezistența la coroziunea armăturii*

Multe investigații au arătat că permeabilitatea redusă a betonului care conține zgură granulată de furnal măcinată reduce semnificativ penetrarea clorurii în beton. Reducerea permeabilității și rezistența la penetrarea clorurilor crește odată cu creșterea cantității de zgură în amestecul de beton sau mortar. Se constată că utilizarea zgurii reduce permeabilitatea betonului de mai multe ori. În timpul utilizării la vârste relativ reduse a betonului care conține ciment cu zgură granulată de furnal măcinată, există o preocupare considerabilă privind efectele potențiale nocive ale sulfului din zgură. Multe cercetări au evidențiat că utilizarea zgurilor nu are niciun efect negativ asupra coroziunii armăturii. S-a constatat că o ușoară reducere a pH-ului soluției din pori nu are un impact negativ asupra pasivității armăturii și că utilizarea zgurii în betonul de bună calitate reduce permeabilitatea betonului, reducând astfel penetrarea clorurilor și a dioxidului de carbon care favorizează coroziunea oțelului.

### **III.2.4. Optimizarea conținutului de zgură granulată de furnal măcinată din beton în funcție de proprietatea selectată**

#### *Proporțiile adaosului de zgură în betoane*

Compoziția betoanelor cu zgură granulată de furnal măcinată este stabilită, în majoritatea cazurilor, prin aceleași metode utilizate pentru betoanele cu ciment Portland. Cu toate acestea, proprietățile unice ale zgurii pot avea ca rezultat:

- Reducerea necesarului de apă (de la 3% la 5%) pentru o tasare egală

- Necesitatea creșterii ușoare a dozajului de aditiv antrenor de aer
- Utilizarea unei cantități reduse de apă cu circa 25% pentru a produce un beton fluid
- Menținerea lucrabilității când se utilizează agregate mai groșiere

Dozajul optim de zgură granulată de furnal măcinată utilizat într-un amestec de beton depinde de cerințele de performanță, de materialele folosite și de alți factori. Sunt uzuale doze de zgură care înlocuiesc 25% până la 50% din cimentul Portland în amestec. Cu toate acestea, pentru obținerea de proprietăți speciale cum ar fi rezistența la atac sulfatic, pot fi necesare amestecuri care conțin mai mult de 50% zgură. Dimpotrivă, atunci când este necesară obținerea unei rezistențe timpurii pentru îndepărtarea rapidă a cofrajelor, ar trebui utilizate amestecuri care conțin mai puțin de 50%. Ca și în cazul tuturor celorlalte betoane, betoanele cu zgură granulată de furnal măcinată pot fi afectate de diferite tipuri de cimenturi, aditivi, condiții de întărire și moduri de turnare. Pentru stabilirea compoziției și pentru verificarea performanțelor realizate trebuie efectuate încercări pe toate tipurile de amestec luate în considerare. Cea mai frecventă proporție de zgură utilizată este de 50%, dar această proporție poate fi variată pentru a satisface unele cerințe specifice ca:

- adaosul de zgură granulată de furnal măcinată de 65 până la 80% reprezintă procentul optim pentru o rezistență ridicată la atac sulfatic sau pentru o rezistență ridicată la penetrarea clorurilor.
- adaosul de zgură de 50 până la 70% poate fi procent optim pentru a reduce căldura de hidratare și fisurarea la vârsta timpurie
- adaosul de zgură de 25 până la 40% este un procent indicat pentru a evita prelungirea timpilor de finisare pentru elementele de suprafață
- adaosul de zgură de 20 până la 40% poate adoptat pentru asigurarea unei rezistențe timpurii ridicate
- adaosul de zgură granulată de furnal măcinată de 80 până la 95% poate fi recomandat pentru un spor foarte mic de rezistență timpurie în aplicații de tipul incintelor de coloane secante
- adaosul de zgură de 30 până la 45% poate fi indicat pentru a evita întârzierea excesivă a timpului de priză la temperaturi scăzute.

Tabelul III.3. - Efectul adaosului de zgură granulată de furnal măcinată asupra proprietăților betonului

| Proprietate    | Efectul zgurii granulate de furnal măcinată                                                        | Recomandări                                                                                                                                                                       |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lucrabilitatea | Îmbunătățirea lucrabilității și reducerea consumului de apă pentru cele mai multe tipuri de zguri. | Reduce conținutul de apă până la aproximativ 10% pentru o lucrabilitate echivalentă a betonului cu zgură granulată de furnal măcinată comparativ cu amestecul similar fără zgură. |

| Proprietate                   | Efectul zgurii granulate de furnal măcinate                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Recomandări                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                               | <p>Betonul este mai coeziv și segregă mai puțin - îmbunătățește pompabilitatea.</p> <p>Separarea apei este redusă în special la procente ridicate de înlocuire și pentru finețe de măcinare mare.</p>                                                                                                                                                    | <p>Se vor lua măsuri de precauție pentru a proteja betonul după turnare, când există condiții de accelerare a vitezei de pierdere a umidității (betonare pe vreme caldă).</p> <p>Se va verifica dacă separarea apei s-a oprit înainte de a începe operațiile de finisare finală.</p>                        |
| Timp de priză                 | Extins - crește cu creșterea procentului de zgură și/sau a temperaturii scăzute. Anumite combinații de zgură, ciment și aditivi chimici pot reduce sau elimina întârzierea timpului de priză.                                                                                                                                                            | Se va lua în considerare reducerea procentului de zgură granulată de furnal măcinată la execuția pe timp friguros. Se vor efectua încercări pentru determinarea compatibilității zgură - ciment-aditiv.                                                                                                     |
| Căldura de hidratare          | Redusă. Zgura granulată de furnal măcinată trebuie utilizată la procente mai ridicate de înlocuire pentru a reduce căldura degajată (de exemplu: 50-80%). Reducerea crește prin utilizarea unor procente ridicate de înlocuire și finețea de măcinare mare.                                                                                              | Beneficiu pentru betoanele turnate în structuri masive.                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Rezistența la vârste timpurii | Redusă - (1-3 zile pentru zgura cu indice de activitate ridicat, 1-21 zile pentru zgura granulată de furnal măcinată cu indice de activitate mediu și la toate vârstele pentru zgura cu indice de activitate scăzut). Viteza creșterii rezistenței este în general invers proporțională cu cantitatea de zgură granulată de furnal măcinată utilizată în | <p>Se va tine seama de reducerea conținutului de zgura granulată de furnal măcinată în cazul în care rezistența la vârstă fragedă este critică.</p> <p>Se vor utiliza aditivi de accelerare sau cimenturi cu rezistență timpurie mare (tip III) pentru a compensa rezistența redusă la vârste timpurii.</p> |

|                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Proprietate                                            | Efectul zgurii granulate de furnal măcinate                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Recomandări                                                                                                                                    |
|                                                        | amestec.<br>Crescută - în condiții de întărire (tratare) la temperaturi ridicate.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                |
| Rezistența pe termen lung                              | Crescută. De obicei, au crescut rezistențele pe termen lung datorită reacțiilor de hidratare întârziate. Efectul crește cu procentul de zgură granulată de furnal măcinată.                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Se va avea în vedere extinderea testelor la termene extinse față de 28 de zile pentru determinarea rezistențelor de calcul.                    |
| Permeabilitatea și rezistența la penetrarea clorurilor | Redusă semnificativ - mai ales la vârste avansate pentru betoane ce conțin procente de zgură cuprinse între 50-80%.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Întărirea adecvată este esențială dacă aceste beneficii trebuie realizate în beton aproape de suprafață (se va acoperi betonul).               |
| Expansiunea datorată reacției alcalii-silice           | Redusă.<br>Extinderea distructivă poate fi complet suprimată de procente suficiente de înlocuire între 40% până la 65% zgură granulată de furnal măcinată din conținutul total de ciment.                                                                                                                                                                                                                                                                    | Procentul de zgură necesară pentru un anumit agregat trebuie să se determine utilizând teste adecvate.                                         |
| Rezistența la atacul sulfatic                          | Ridicată. Procentul de zgură trebuie să fie cuprins între 50-80% din conținutul total de materiale pe bază de ciment. În unele cazuri, rezistența la atac sulfatic a betonului cu zgură este egală sau mai mare decât a betoanelor realizate cu ciment rezistent la sulfati de tip V. Îmbunătățirile rezistenței la atac sulfatic sunt cele mai mari la betoanele, în care conținutul de alumină din zgura granulată de furnal măcinată este mai mic de 11%. | Este necesar să se testeze combinațiile de zgură - ciment. Se va lua în considerare utilizarea zgurii cu ciment Portland rezistent la sulfați. |
| Rezistența la carbonatare                              | Crescută pentru toate tipurile de zgura în betonul slab întărit, cu                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Asigurarea unei întăriri adecvată pentru betonul care conține                                                                                  |

| Proprietate                             | Efectul zgurii granulate de furnal măcinate                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Recomandări                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                         | rezistență redusă (raport a/c echiv >0.5) în comparație cu betonul de ciment Portland de aceeași calitate.<br>Cu toate acestea, o creștere atât de mică a adâncimii de carbonatare nu a avut nici o implicație practică și nu ar crește riscul de corodare a armăturii în betonul cu zgură.                                                                             | zgură granulată de furnal măcinată.<br>Îndeplinirea cerințelor minime pentru stratul de acoperire.                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Rezistența la atacul din îngheț-dezgheț | Comparabilă cu cea a betonului realizat cu ciment Portland de tip I și II, dacă se folosește betonul cu aer antrenat, conținând zgură granulată de furnal măcinată circa 50% din ciment, chiar dacă s-a constatat o diferență măsurabilă în pierderea de greutate prin exfoliere.<br>Pentru structurile marine procentul recomandat de zgură din beton este de 60- 80%. | Dacă este posibil, se va asigura o perioadă de întărire adecvată înainte de prima aplicare a sării de dezghețare.<br>Se va acorda o atenție deosebită proporțiilor de amestec (raportului a/c echiv), sistemului de pori și practicilor de finisare și de tratare când betonul cu zgură este folosit la trotuare și căi de acces expuse la sărurile de dezghețare. |

### III.3. Influența adaosului de calcar asupra pastei de ciment și betonului

Calcarul a fost utilizat frecvent în Europa și în alte țări timp de mai multe decenii. De la adoptarea standardului european EN 197 [8] în 2000 care include prevederi pentru cimenturile care conțin calcar în cantități de până la 35%, utilizarea cimenturilor Portland-calcaroase în Europa a crescut constant.

Unele state sunt mai prudente în privința adaosului de calcar în ciment, admitând o proporție de numai 10-15%. Obținerea unor performanțe comparabile în beton utilizând cimenturi cu adaosuri de calcar față de cele obținute utilizând cimentul Portland este posibil deoarece calcarul fin măcinat poate contribui la dezvoltarea microstructurii, în special atunci când finețea și compoziția cimentului sunt optimizate de producător.

Prin realizarea unor amestecuri bine studiate și prin respectarea etapelor de tratare ulterioară, betoanele preparate cu cimenturi cu calcar pot realiza performanțe similare cu betoanele cu cimenturi fără calcar. Deși relativ inert în comparație cu clincherul sau materialele suplimentare cementoide (SCM-uri), calcarul pare să contribuie direct la proprietățile și comportarea în timp a betonului.

### III.3.1. Efectele adaosului de calcar asupra proprietăților betonului proaspăt

#### Lucrabilitate

În general, se poate afirma că finețea de măcinare a calcarului este principalul factor care influențează lucrabilitatea. Unele cercetări sugerează că utilizarea calcarului ca adaos poate modifica necesarul de apă de amestecare, rezultând o ușoară creștere sau scădere în comparație cu betonul realizat cu ciment Portland. Creșterea raportului  $a/c$  pentru a menține lucrabilitatea este aproximativ 0,01 pentru adaosurile de calcar mai mici de 5% și 0,02 pentru adaosurile de calcar mai mici de 25%. Alte cercetări au pus în evidență o creștere a lucrabilității betonului cu conținut de calcar de 15% rezultând o reducere a raportului  $a/c$  de 0.03 %.

Din fig. III.34. se observă că pentru raport  $a/c$  constant, lucrabilitatea scade ușor atunci când crește conținutul de filer, fapt datorat suprafeței specifice a agregatelor care a crescut, iar conținutul de apă nu s-a schimbat și amestecul a necesitat mai multă apă. Dacă evoluția este studiată cu raport  $a/(c+f)$  constant, putem vedea că lucrabilitatea se îmbunătățește cu creșterea conținutului de filer, când volumul de pastă de ciment și adaos crește, iar granulele agregatelor găsesc o facilitate de mișcare în timpul turnării [1].

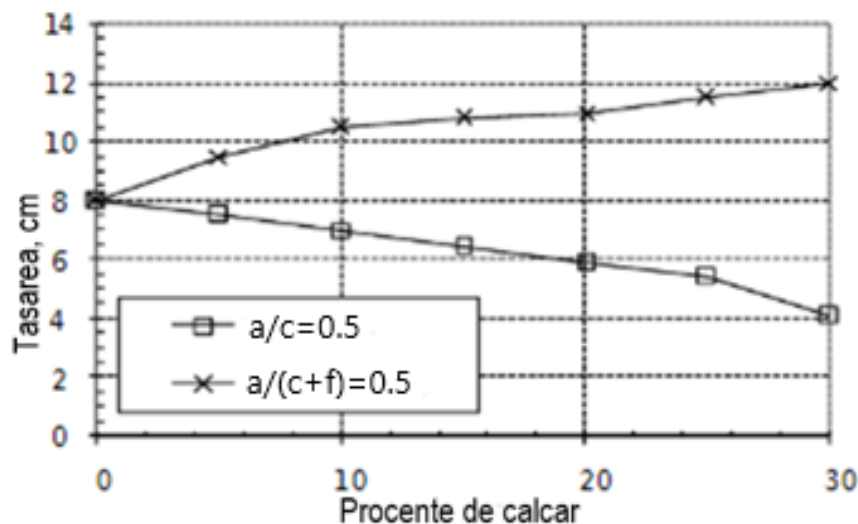


Figura III.34. - Evoluția lucrabilității în funcție de conținutul de calcar [52].

#### Separarea apei în exces

Particulele vor absorbi apa pe suprafețele lor; prin urmare, separarea apei este în mare măsură dependentă de suprafața specifică a particulelor de ciment. Pe măsură ce suprafața specifică crește, absorbția de apă crește. Creșterea fineții cimentului sau a calcarului va spori suprafața astfel încât absorbția de apă va crește și separarea apei va scădea. Utilizarea adaosului de calcar în ciment poate scădea ușor separarea apei datorită fineții sale, dar în general nu are efect remarcabil (fig. III.35.).

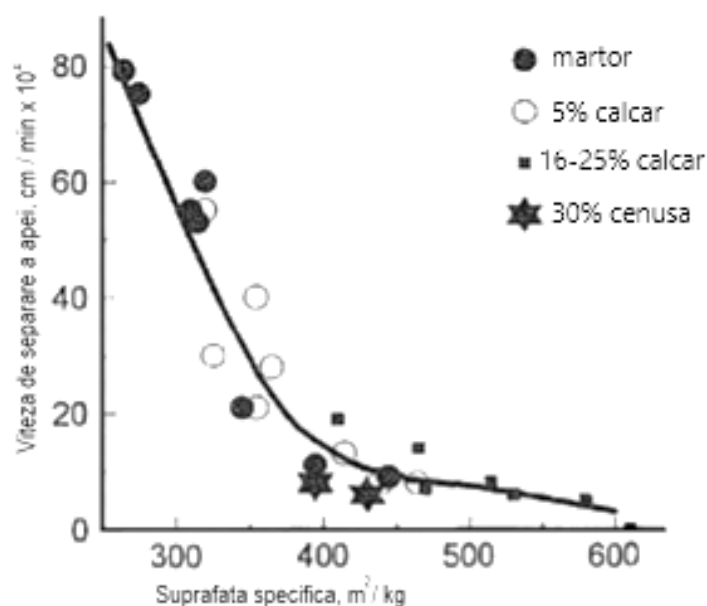


Figura III.35.- Separarea apei în funcție de influența suprafeței specifice

### *Timpul de priză*

Pe baza studiilor, se pare că cimenturile cu adaos de calcar pot avea un efect nesemnificativ asupra timpului de priză până la un procent de 15%. În general, se constată că influența calcarului asupra timpului de priză este legată de finețea de măcinare a calcarului; pe măsură ce calcarul este mai fin și nivelurile de înlocuire mai mari (aproximativ 20%), timpul de priză scade comparativ cu o pasta de ciment fără calcar.

### *Hidratarea și căldura de hidratare*

Particulele de calcar acționează ca centre de nucleație pentru produsele de hidratare. Aceasta înseamnă că particulele de calcar mici sunt suspendate în pastă între granulele de clincher și devin centre intermediare pentru dezvoltarea C-S-H (partea liantă principală din beton), îmbunătățind eficiența. Prin urmare, includerea calcarului poate crește viteza de hidratare. În timpul hidratării amestecului de beton cu raport scăzut  $a/c$ , o parte din ciment rămâne adesea nehidratată. Pur și simplu se află în beton ca material inert. Acesta este un material costisitor, deoarece cimentul este de obicei un factor de cost major în beton. Reducerea costurilor ar putea fi obținută prin înlocuirea aceluși ciment cu un material relativ inert, cum ar fi calcarul.

Calcarul influențează în general căldura de hidratare. Căldura este mărită atunci când calcarul este folosit ca adaos în beton, dar a scăzut ușor atunci când calcarul este utilizat ca înlocuitor pentru ciment; totuși, acesta nu scade până la un punct în care calcarul poate fi considerat complet inert (adică efect simplu de diluție) [15]. Se pare că calcarul poate acționa ca un centru de nucleație al hidrosilicaților de calciu, ceea ce ar duce la creșterea căldurii de hidratare la vârste mici. În general, influența calcarului asupra căldurii de hidratare poate fi observată la vârste mai mici de 48 de ore, ceea ce este atribuit efectelor de diluție sau de nucleere. Influența calcarului asupra căldurii de hidratare este mult mai puțin semnificativă la vârstele mai mari.

### III.3.2. Efecte adaosului de calcar asupra proprietăților betonului întărit

#### Rezistența la compresiune

Calitatea și cantitatea de calcar folosită joacă un rol important în asigurarea rezistenței betonului produs cu adaos de calcar. Studiile au arătat că conținutul de calcar de până la 15% poate crește efectiv rezistența la vârstă fragedă ca rezultat combinat al generării de centre de nucleație, creșterea vitezei de hidratare a cimentului și a producerii carboaluminatului de calciu [65]. În timp ce majoritatea cercetătorilor au crezut anterior că calcarul este un material inert, se constată că el reacționează într-o anumită măsură cu ceilalți componenți. La creșterea fineții de măcinare aceste reacții sunt posibile, calcarul putând reacționa complet pentru a forma carboaluminati.

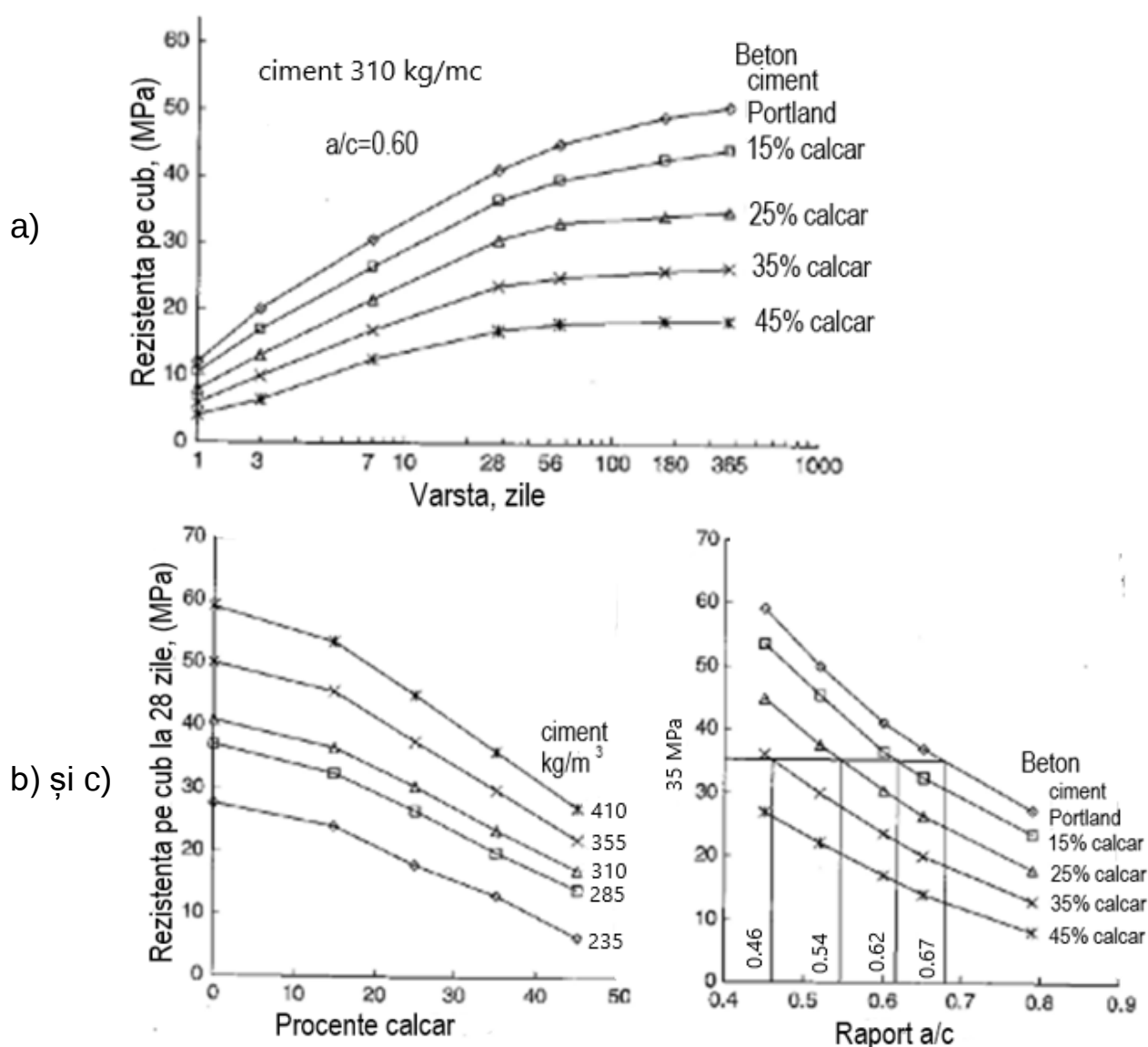


Figura III.36. - Efectul procentelor de calcar cuprinse între 15-45% din ciment asupra rezistenței la compresiune a betonului cu diverse rapoarte a/c echivalente [52]

Creșterea cantității de calcar din ciment pentru a obține rezistențe mai mari la compresiune ale betonului este plafonată. Testele au arătat că betoanele cu ciment cu o combinație de 15% calcar și 20% cenușă zburătoare de clasa C sau 15% calcar și 35% zgură au structura mai compactă și valori ridicate ale rezistenței la compresiune la 56 de zile [65]. De asemenea se constată reduceri ale rezistenței la compresiune pentru betoane cu conținut de adaos de calcar de la 15% la 45%.

În figura III.36. a) se prezintă impactul conținutului de calcar asupra evoluției rezistenței la compresiune a betoanelor cu raport a/c echivalent de 0.60; în Figura III.36.b) este dată corelația dintre conținutul de calcar și rezistența la compresiune a betoanelor cu raport diferit a/c echivalent; figura III.36.c) arată că a/c echivalent trebuie să fie redus cu 0,08 pentru fiecare creștere de 10% a conținutului de calcar pentru a obține aceeași rezistență la 28 de zile.

Figura III.37 arată rezultatele privind rezistența la compresiune pentru beton cu rapoarte a/c echivalent 0.50 produse cu ciment Portland cu 12% calcar produse cu diverse fineți de măcinare. Este necesară o creștere a fineții Blaine între 100 m<sup>2</sup>/kg și 120 m<sup>2</sup>/kg pentru a obține aceeași rezistență la 28 de zile pentru cele tipuri de betoane.

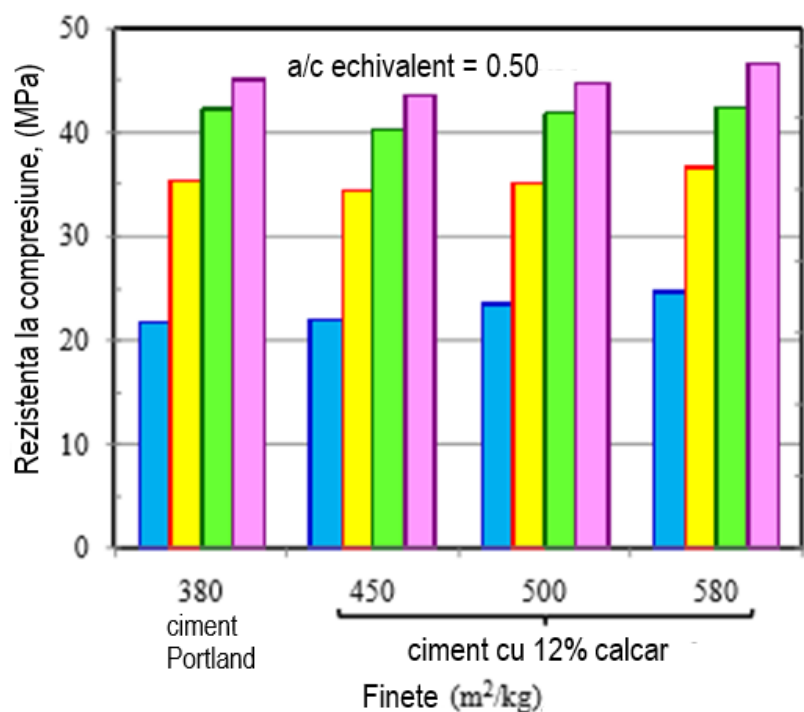


Figura III.37 - Efectul fineții de măcinare asupra rezistenței la compresiune a betonului cu ciment cu si fără calcar [56].

Un test efectuat conform standardului NFP 18-406 [66] arată că rezistența la compresiune și compactitatea ating valoarea maximă la un procent de aproximativ 5% filer care poate fi considerată o proporție optimă. Recomandarea ca procentul de calcar să nu depășească 15% este justificată deoarece sporul adaosului scade rezistența betonului.

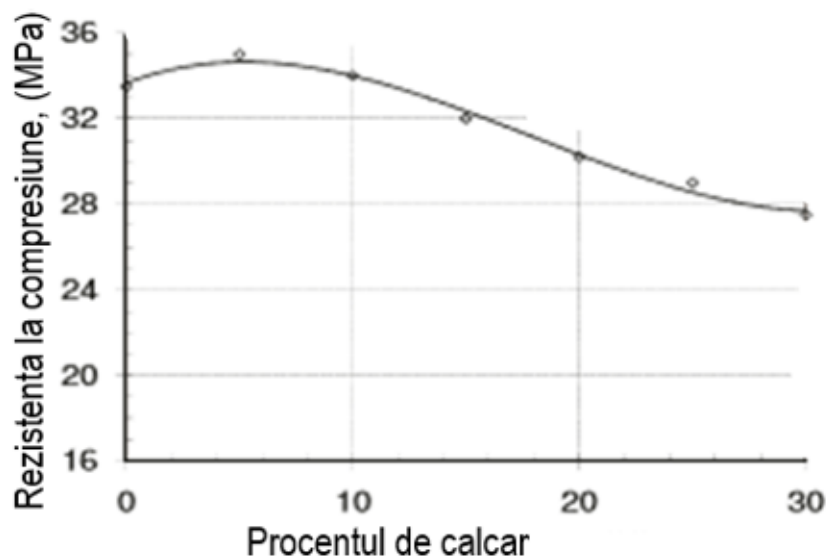


Figura III.38. - Evoluția rezistenței la compresiune a betonului în funcție de procentul de calcar [52].

Un studiu făcut la Universitatea din Alexandria (Egipt) și publicat în iunie 2016 [53] arată rezultatele obținute pentru amestecurile de beton cu calcar unde rezistența la compresiune a betonului cu același raport a/c a fost obținută la 3, 7, 28 și 365 zile pe cuburi cu latura de 150 mm care au fost păstrate în apă până la vârsta de încercare.

Efectul negativ al creșterii conținutului de pulberi de calcar este nesemnificativ până la 10%. La un conținut mai mare de adaos de calcar, efectul negativ asupra rezistenței la compresiune a betonului este mai pronunțat (fig. III.38.).

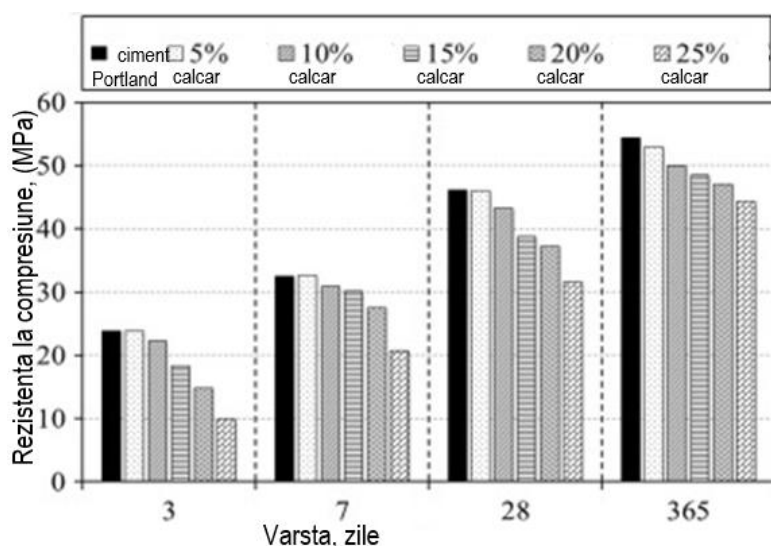


Figura III.39. - Rezistența la compresiune a betonului cu conținut diferit de calcar la diferite vârste [53].

Pe lângă influența procentului de adaos de calcar, rezistența la compresiune este afectată și de condițiile de tratare ulterioară a betonului. În fig. III.39. se prezintă rezultatele unui studiu efectuat la Universitatea Tehnică Națională din Buenos Aires în 2001 privind dezvoltarea rezistenței la compresiune a betoanelor cu raport a/c de 0.50 cu adaos de 0%, 10%, 20 % supuse diferitelor condiții de tratare ( păstrare în aer sau în apă până la 28 zile sau păstrare în apă 7 zile și apoi în aer ).

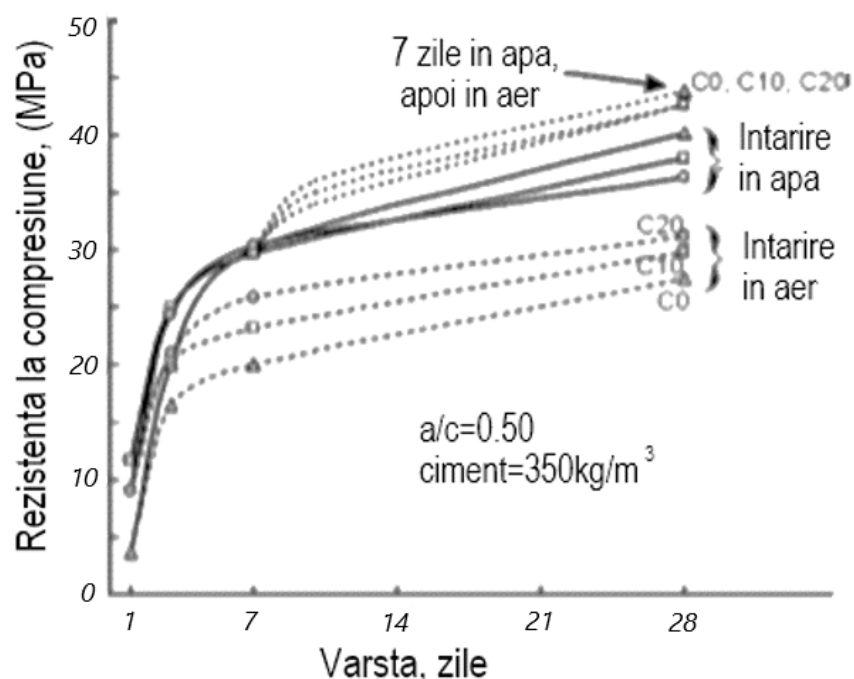


Figura III.40. - Influența condițiilor de tratare asupra rezistenței la compresiune [55].

Cea mai mare rezistență la compresiune la 28 zile a înregistrată la betoanele întărite în apă timp de 7 zile și demonstrează faptul că sporul de rezistență nu este afectat de lipsa de întărire umedă după șapte zile, iar rezultatele bune obținute pentru betoanele cu ciment cu calcar se datorează accelerării hidratării la vârstă fragedă (fig. III.40.).

#### Rezistența la întindere din încovoiere

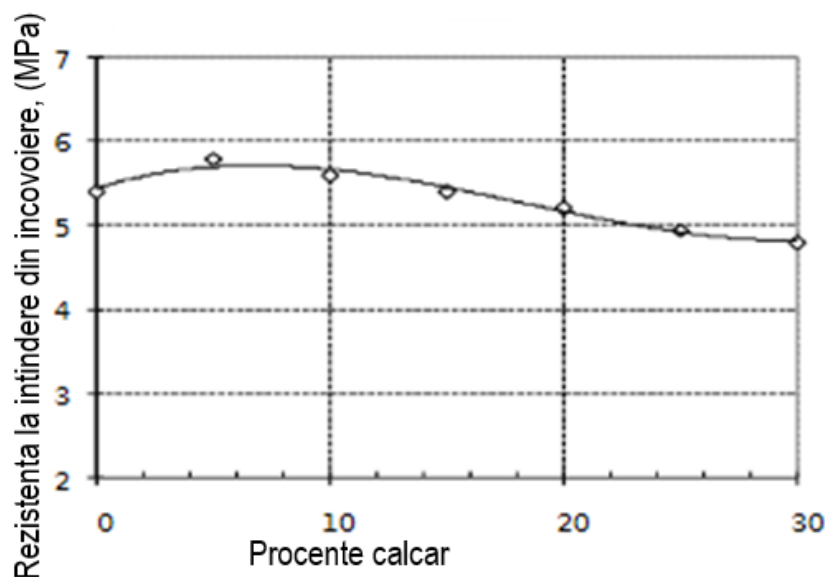
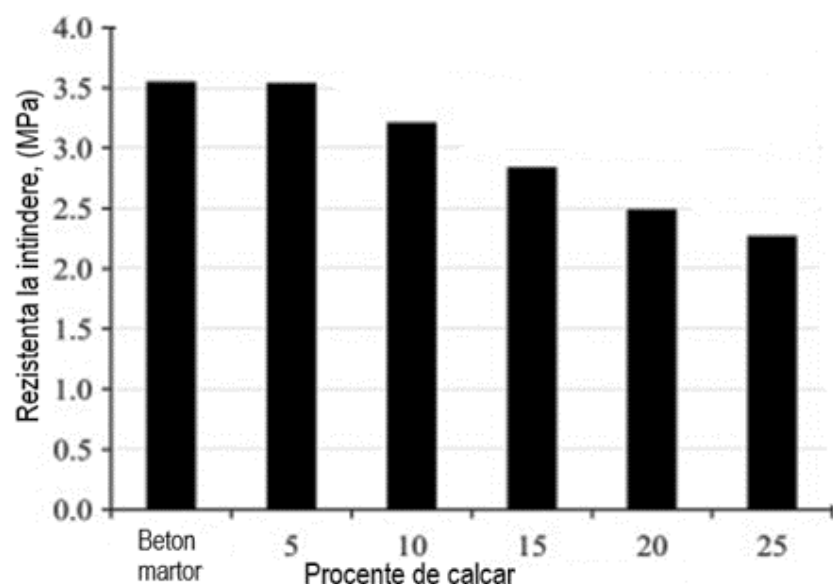


Figura III.41. - Evoluția rezistenței la întindere din încovoiere în funcție de adaosul de calcar [52].

Se pare că rezistența la încovoiere în funcție de cantitatea de filer evoluează în același mod ca și rezistența la compresiune, definind un procent optim de filer tot de 5% care dă o valoare maximă a rezistenței la încovoiere (fig. III.41.).

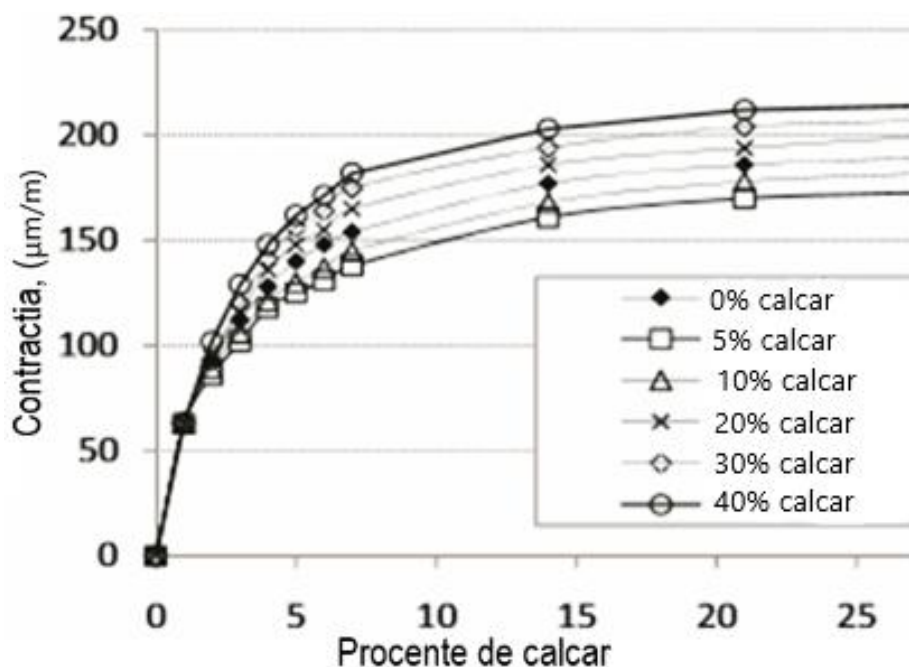
### Rezistența la întindere prin despicare



Din figura III.42. este evident că creșterea conținutului de adaos de calcar scade rezistența la întindere prin despicare a betonului. Reducerea rezistenței de întindere prin despicare este mai mare decât cea a rezistenței la compresiune.

Figura III.42. - Rezistența la întindere prin despicare a betonului cu conținut diferit de calcar [53]

### Contrația betonului



Prin analiza rezultatelor prezentate în Figura III.43., putem afirma că contracția betonului cu calcar este redusă la un conținut scăzut de filer, dar peste un anumit procent de filer, se înregistrează o creștere cu atât mai mare cu cât este mai mare cantitatea de filer din beton. Conținutul optim de filer este de aproximativ 5%, același procent care a dat cele mai bune proprietăți mecanice.

Figura III.43. - Evoluția contracției în funcție de conținutul de calcar [52].

Se constată că este posibil ca mărirea fineții de măcinare a filerului să crească valoarea contracției, iar procentul optim va fi puțin mai mare. Într-un studiu de cercetare în colaborare franceză-algeriană [54] pentru betoanele cu ciment cu 10% și cu raport a/c de 0.32 s-a prezentat contracția totală a betonului care conține adaos de calcar, care este mai mică decât cea măsurată pe betonul de referință (fig. III.44.).

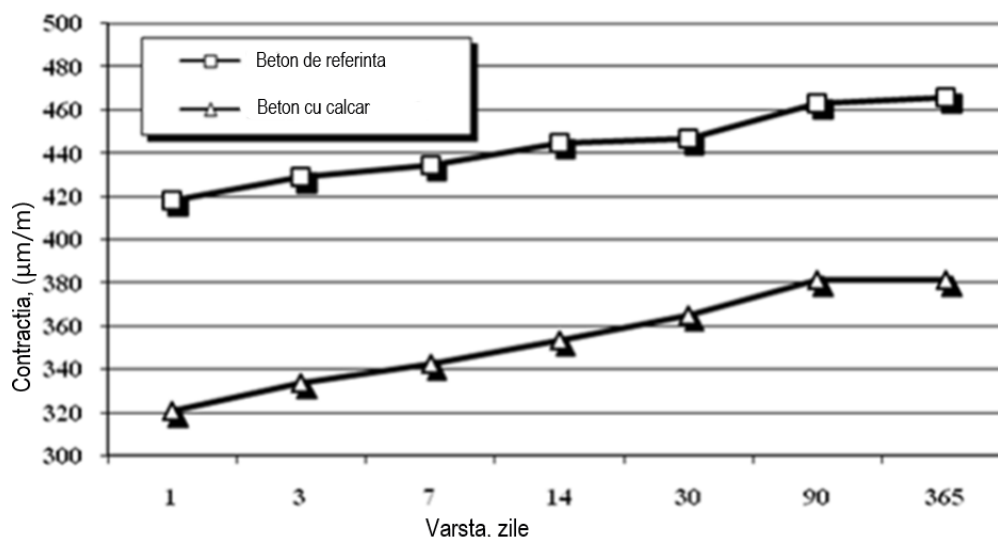


Figura III.44. - Evoluția în timp a contracției betoanelor cu și fără calcar [54]

### Permeabilitate

Indiferent de metoda de testare aplicată pentru a măsura rezistența betonului la penetrarea de fluide (apă, vapori sau gaze), precum și substanțe agresive (cloruri sau sulfati), permeabilitatea s-a dovedit a fi redusă prin utilizarea calcarului datorită reducerii conectivității porilor. Într-un studiu extins pe betoane cu cimenturi cu calcar cu procente de adaos între 0-35% s-a determinat că coeficienții de permeabilitate a gazelor sunt mai mari decât la betonul cu ciment Portland, (cu excepția betonului cu 35% calcar, care a înregistrat și cea mai scăzută valoare a permeabilității la gaz). Pe de altă parte, betoanele cu calcar au avut o permeabilitate redusă a apei și o valoare scăzută a absorbției apei. Porozitatea betonului nu a fost afectată de prezența până la 15% calcar în ciment, dar a crescut cu conținuturi mai mari de calcar.

## III.3.3. Efectele adaosului de calcar asupra durabilității betonului

### Rezistența la penetrarea clorurilor

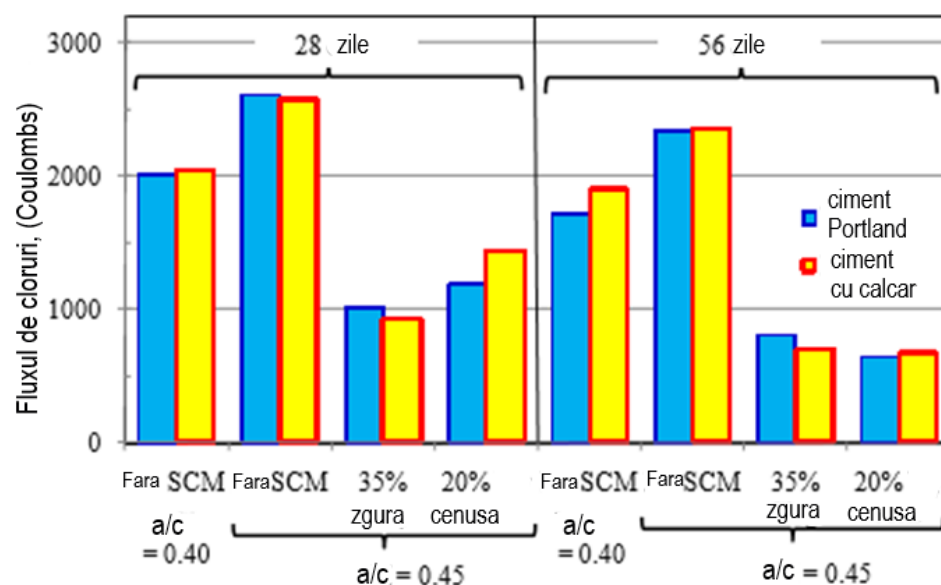


Figura III.45. - Testul de penetrare rapidă a clorurilor pentru betoane cu cimenturi Portland, cimenturi cu adaos de calcar cu sau fără materiale cimentoide suplimentare [56].

Rezultatele unui studiu pe betoane cu cimenturi cu conținut de calcar cuprins între 0% și 35% supuse la testul de permeabilitate rapidă a clorurii după 28 de zile de întărire umedă și au arătat un impact foarte mic datorită creșterii conținutului de calcar de la 15% până la 20% (fig. III.45.).

### Carbonatarea

La carbonatarea betoanelor produse cimenturi cu 0%, 5% sau 25% calcar, adâncimea de carbonatare măsurată la 5 ani a crescut cu raportul a/c echivalent și conținutul de calcar și a fost redusă prin extinderea perioadei inițiale de întărire umedă. Adâncimea de carbonatare a fost corelată cu raportul a/c al amestecului de beton, care indică faptul că componenta de calcar a cimentului nu a afectat rezistența la carbonatare. Adâncimea de carbonatare a fost, de asemenea, corelată cu rezistența betonului la 28 de zile (fig. III.46.).

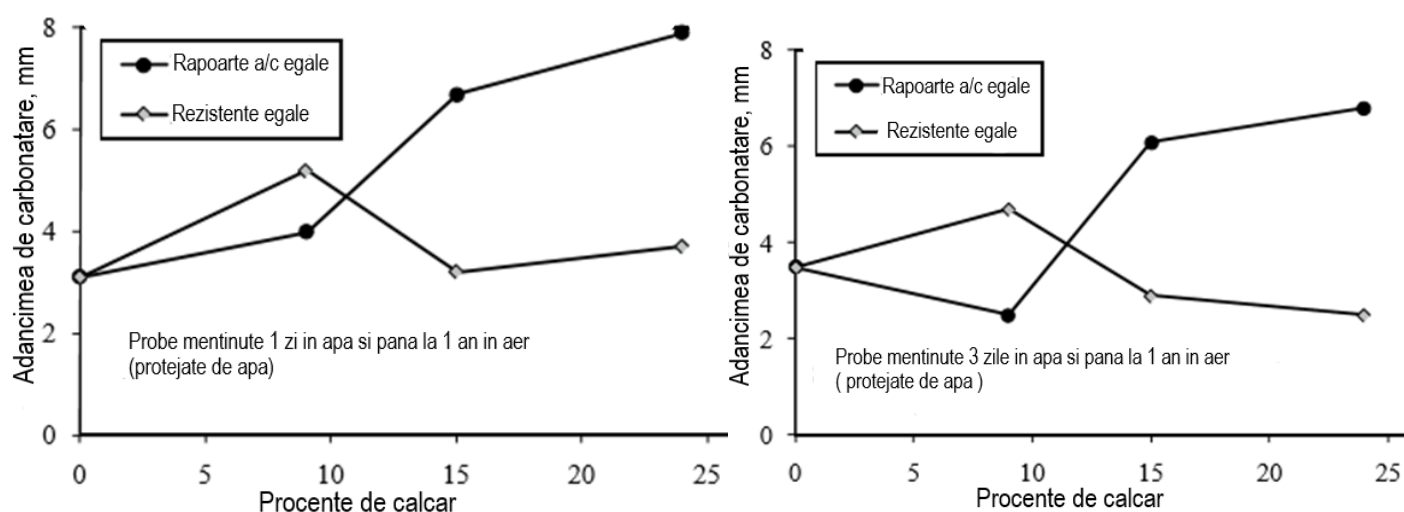


Figura III.46. - Efectul conținutului de calcar asupra carbonatării betoanelor cu raport a/c echivalent sau rezistențe egale și condiții diferite de întărire [54]

### Rezistența la îngheț-dezgheț și la agenții de dezghețare

Unele studii privind efectul calcarului asupra rezistenței la exfoliere datorită atacului din îngheț-dezgheț și a agenților de dezghețare în betoane fără aditiv antrenator de aer indică faptul că rezistența la îngheț-dezgheț este redusă prin încorporarea calcarului și altele afirmă faptul că betonul cu calcar poate atinge performanțe echivalente cu betonul cu ciment Portland. Datele limitate disponibile din Europa pentru betonul cu aditiv antrenor de aer demonstrează că rezistența la exfoliere datorită atacului din îngheț-dezgheț și a agenților de dezghețare a betonului cu calcar este comparabilă cu cea a betonului cu ciment Portland.

Rezistența la îngheț-dezgheț a betonului cu calcar este redusă comparativ cu betonul cu ciment Portland fără aditiv antrenator de aer, dar a crescut în betonul cu aditiv antrenor de aer. Rezistența la exfoliere datorită agenților de dezghețare în betonul fără aditiv antrenor de aer scade odată cu creșterea cantității de calcar din ciment, dar că pentru betonul cu aditiv antrenor de aer nu există o diferență semnificativă între performanța betonului cu ciment Portland și cu calcar, chiar și pentru beton cu până la 45% calcar. Rezultatele obținute în urma procesului ciclic de îngheț-dezgheț și exfolierea cu agenți de dezghețare sunt prezentate în figura III.47. Nu există

o diferență consistentă între comportamentul amestecurilor echivalente de beton cu ciment Portland sau cu adaos de calcar.

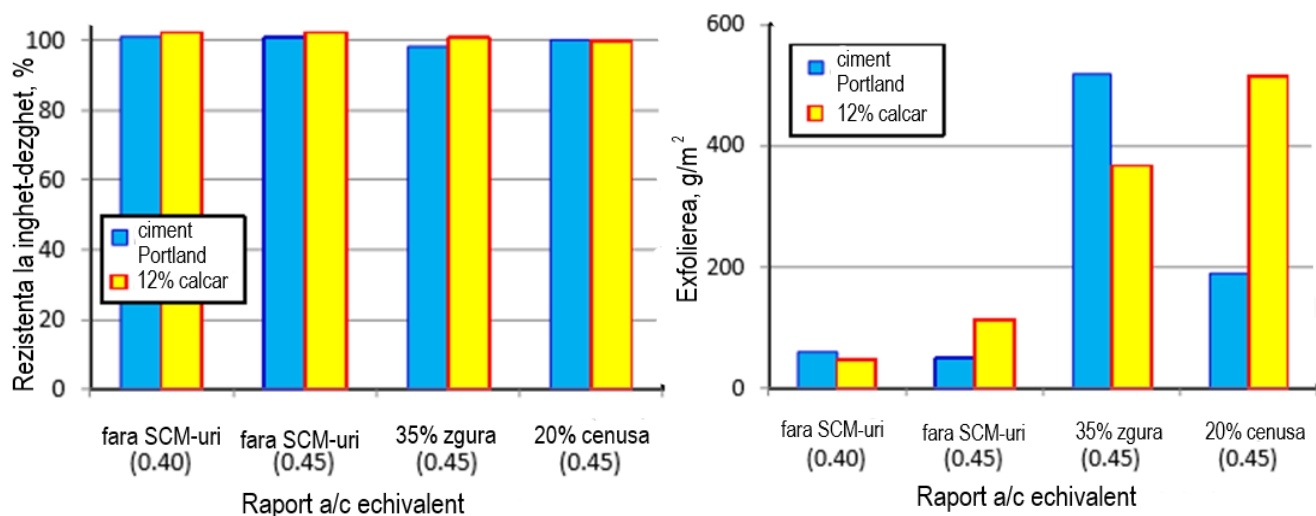
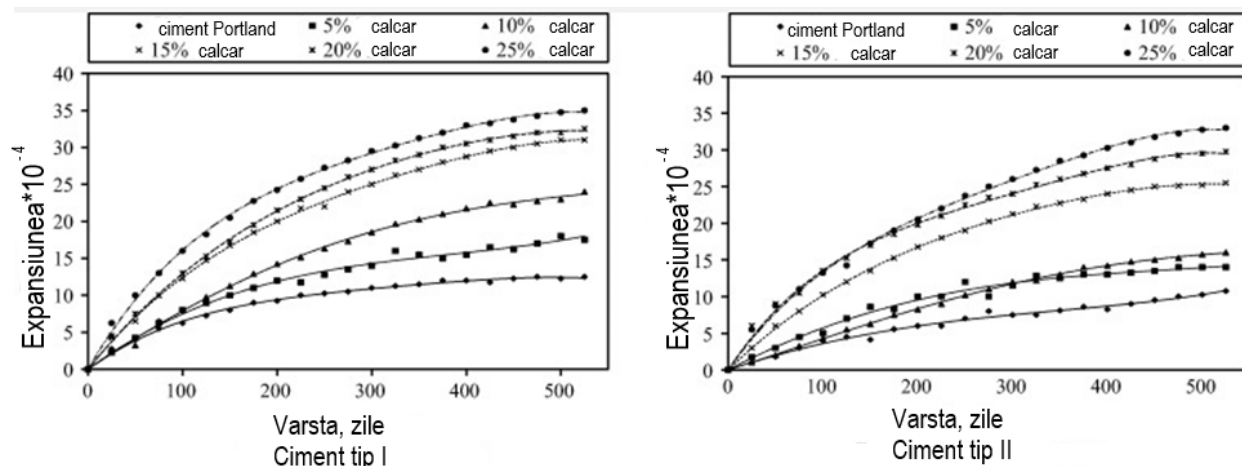


Figura III.47. - Rezultatele testelor de îngheț-dezghet și a agenților de dezghețare pentru betoanele cu ciment Portland si cu adaos de calcar cu/fără materiale cimentoide suplimentare [56].

#### Rezistența la atacul sulfatic

Examinarea expansiunii și deteriorării mortarelor care conțin 10%, 20%, 30% și 40% calcar din masă a pus în evidență o îmbunătățire a rezistenței sulfatice în comparație cu mortarul de control. Totuși, după perioade lungi de expunere, intensitatea fisurării mortarelor calcaroase a fost în esență aceeași la toate proporțiile de calcar și se concluzionează că utilizarea calcarului îmbunătățește rezistența la sulfați a mortarelor, dar nu într-o asemenea măsură încât să realizeze mortar rezistent la atac sulfatic.

Un studiu comparativ între betoanele cu ciment Portland (tip I), ciment cu rezistență moderată la sulfați (tipul II) și ciment cu rezistență ridicată la sulfați (tip V) și proporții de 5-25% adaos de calcar, raport a/c echivalent de 0,45 și cu un conținut de C<sub>3</sub>A egal cu 12%, 28%, 6,5% și respectiv 0,17%.



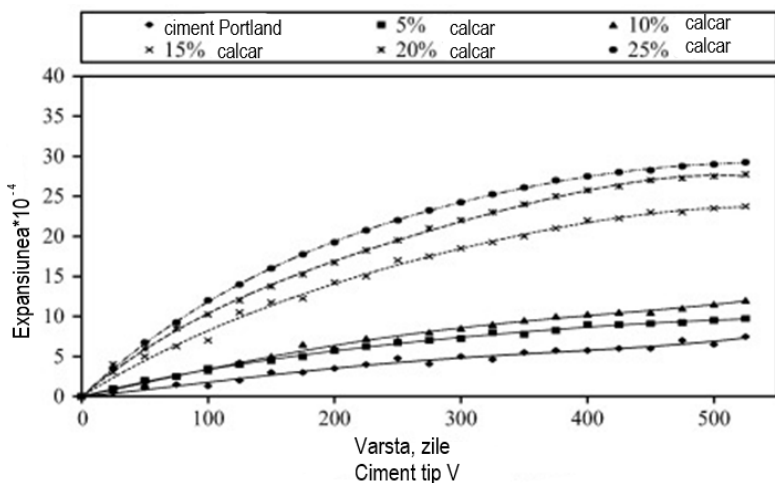


Figura III.48. - Variația expansiunii în funcție de vârstă pentru betonul cu cimentul Portland tip I, tip II și tip V cu diferite procente de calcar

Toate probele au fost supuse la cicluri repetate de atac sulfatic în soluție 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Fiecare ciclu constă în imersarea probelor de beton două săptămâni în soluție și încă două săptămâni păstrate în aer liber. Evoluția expansiunilor este prezentată în fig. III.48.

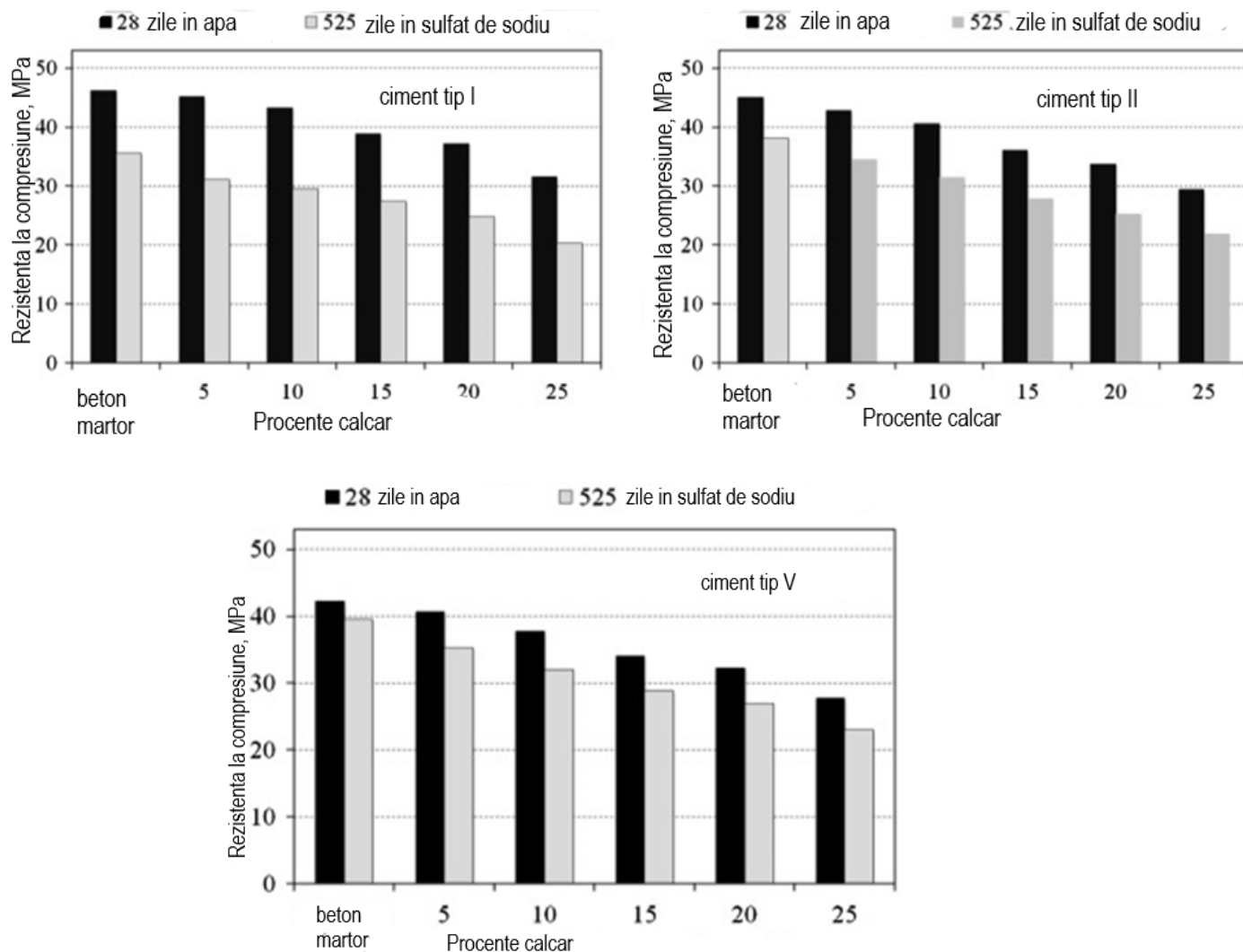


Figura III.49.- Reducerea rezistenței la compresiune în funcție de vârstă pentru betonul cu cimentul Portland tip I, tip II și tip V cu diferite procente de calcar [53]

Reducerea rezistenței la compresiune a betonului după atacul sulfatic până la 525 zile comparativ cu rezistența la compresiune a betonului după 28 de zile menținut în apă a avut valoare maximă de 43% la procentul de 25% adaos de calcar (fig. III.49.).

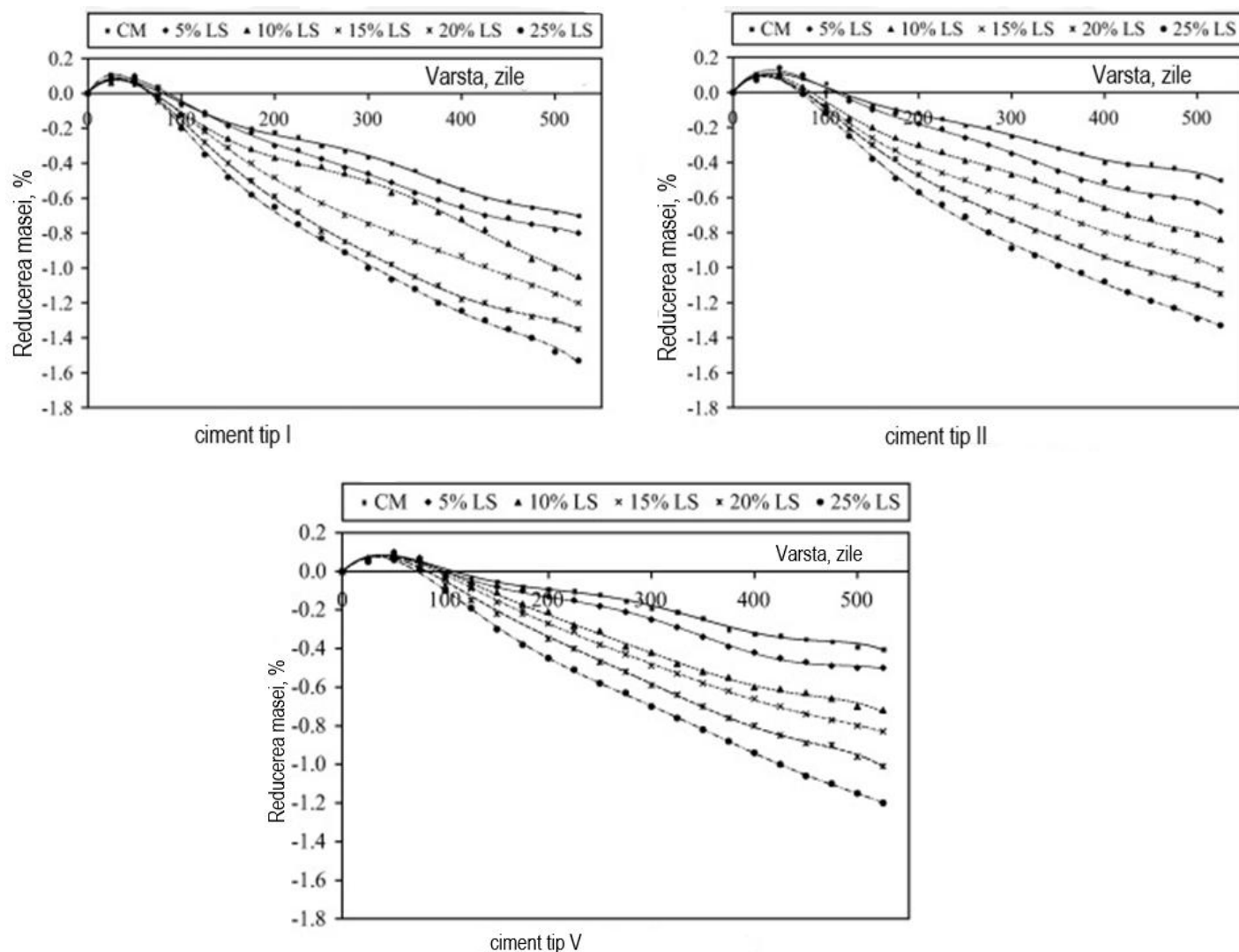


Figura III.50. - Pierdere în greutate în funcție de vârstă pentru betonul cu cimentul Portland tip I, tip II și tip V cu diferite procente de calcar [53].

Această tendință de variație a procentului de pierdere în greutate funcție de timp este aproape identică pentru betonul realizat cu ciment tip I, tip II și tip V. Este evident că efectul negativ al înlocuirii cimentului cu adaos de calcar asupra pierderii în greutate este nesemnificativ la procente de 5% pentru toate tipurile de ciment (fig. III.50.).

#### *Rezistența la penetrarea clorurilor în betonul cu ciment cu calcar*

Timpul de apariție al primelor fisuri influențează durata de viață a structurii din beton armat. Creșterea timpului de apariție a primelor fisuri indică o bună performanță a structurii.

Utilizarea adaosului de calcar ca înlocuitor al cimentului scade ușor timpul de apariție al primelor fisuri, reducerea timpului pentru cimentul Portland de tip I este de 11-15%, pentru procente de calcar între 5-25% comparativ cu amestecul cu ciment fără calcar. Timpul de apariție al primelor fisuri scade atunci când tipul de ciment se schimbă de la tipul I la tip II sau tip V, comportament datorat conținutului mai scăzut de  $C_3A$  în cimenturile tip V și tip II. (fig. III.51.).

Prezența  $C_3A$  determină rezistența la coroziune, deoarece aceasta reacționează cu clorurile pentru a forma cloraluminatul de calciu. Din acest motiv, utilizarea cimentului cu ciment cu conținut scăzut de  $C_3A$  mărește riscul coroziunii induse de cloruri.

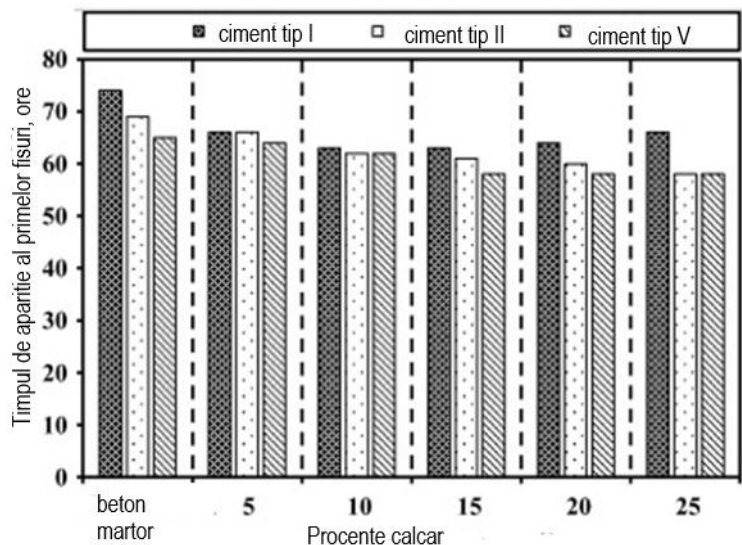


Figura III.51.- Timpul de apariție al primelor fisuri pentru betonul cu ciment Portland de tip I, II și V cu diferite procente de adaos de calcar [53]

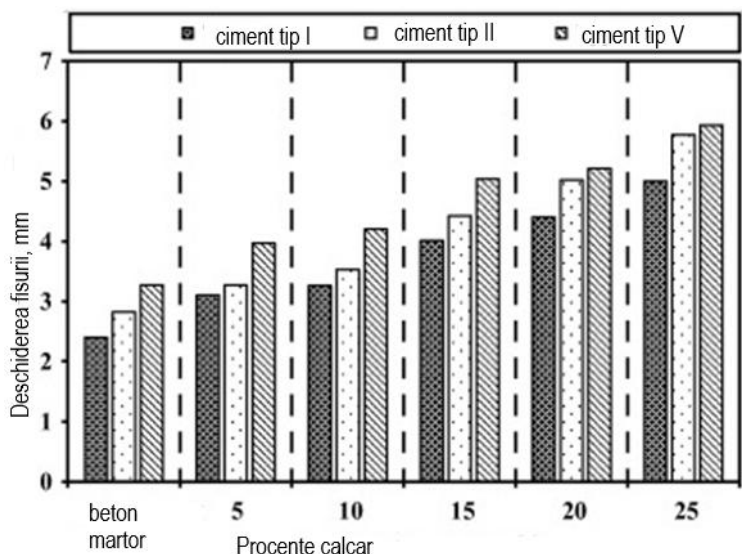


Figura III.52. - Deschiderea medie a fisurilor pentru betonul cu ciment Portland tip I, tip II și tip V cu procente diferite de calcar la vârsta de 250 ore.

Din fig. III.52., se observă că deschiderea medie a fisurii crește atunci când procentul de calcar crește. Totuși, efectul negativ al adaosului de calcar este nesemnificativ până la 10%, la procente mai mari de 10%, efectul negativ asupra timpului de apariție a primelor fisuri și a deschiderii fisurilor este mai pronunțat.

### Reacția alcalii-silice

Cercetările au evidențiat că utilizarea calcarului în proporție de 5% a prelungit timpul până la fisurare, dar nu a eliminat-o, în proba de mortar realizată cu ciment cu conținut ridicat de alcalii și nisip cu reactivitate mare. Figura III.53. arată expansiunea probelor de mortar și a prismelor de beton care conțin un agregat reactiv alcalii-silice. Rezultatele expansiunii sunt prezentate la vârsta de 14 zile pentru testul accelerat al probelor de mortar, la 1 an pentru testul prismelor de beton și 3 luni pentru testul accelerat pe prisme din beton. Rezultatele arată că nu există o diferență consistentă între expansiunile produse cu ciment Portland în comparație cu cimentul cu adaos de calcar.

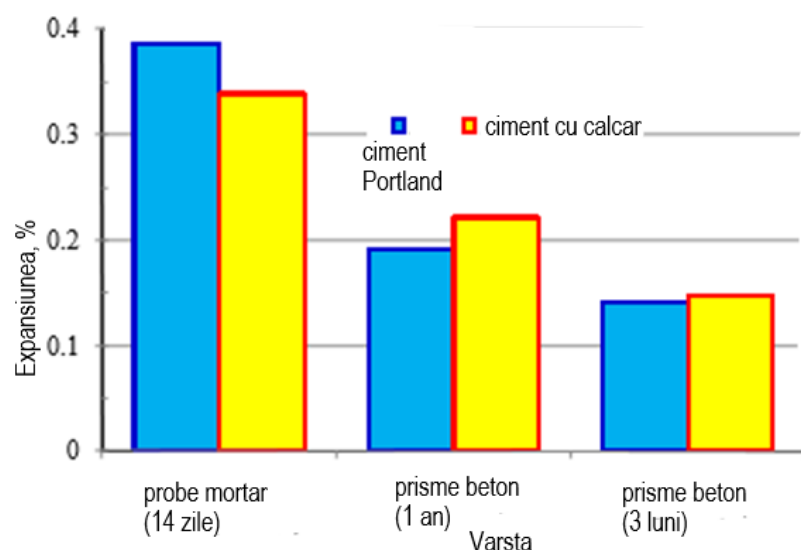


Figura III.53.- Expansiunea mortarelor și betoanelor cu ciment Portland cu alcalii cu și fără adaos de calcar [56].

### Rezistența la abraziune

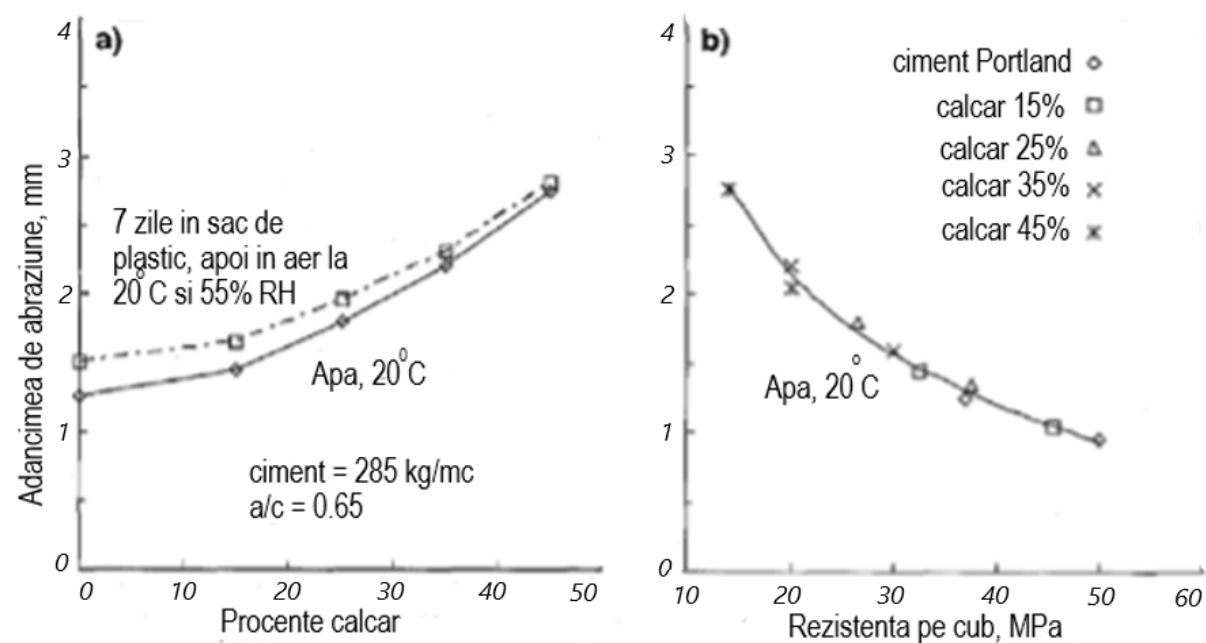


Figura III.54. - Efectul conținutului de calcar asupra rezistenței la abraziune a betonului

Pentru încercările la abraziune au fost efectuate teste pe două compoziții de beton (a/c echivalent de 0,52 și 0,65) preparate cu cimenturi care conțin între 0% și 45% calcar. Rezultatele, prezentate în figura III.54., indică faptul că, comparativ pentru beton cu același raport a/c echivalent, abraziunea crește odată cu creșterea conținutului de calcar, deși diferența dintre betoanele cu 0% și 15% calcar este mică. Betoanele cu aceeași rezistență la 28 de zile au o rezistență similară la abraziune, indiferent de conținutul de calcar al cimentului.

### III.3.4. Optimizarea conținutului de adaos de calcar din beton în funcție de proprietatea selectată

Tabelul III.4. - Efectul adaosului de calcar asupra proprietăților betonului

| Proprietate          | Efectul calcarului                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Recomandări                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lucrabilitate        | Îmbunătățirea lucrabilității și reducerea necesarului de apă, specifică prezenței adaosurilor. Betonul este mai coeziv și segregă mai puțin - îmbunătățește pompabilitatea.<br><br>Separarea este redusă foarte puțin datorită fineței calcarului.                                                                                                              | Dacă raportul $a/(c + f) = \text{constant}$ , lucrabilitatea se îmbunătățește cu creșterea conținutului de calcar. Se vor lua măsuri de precauție pentru a proteja betonul după turnare, când există condiții de accelerare a vitezei de pierdere a umidității (betonare pe vreme caldă). Operațiile de finisare finală se vor efectua după ce s-a oprit separarea apei. |
| Timp de priză        | Timpul de priză scade dacă crește finețea calcarului. Proporțiile scăzute de adaos de calcar (până la 5%) au arătat o creștere a timpului de priză; proporțiile de înlocuire mai mari ale calcarului (aproximativ 20%) au condus la un timp de priză mai scurt. Tendința de priză falsă s-a dovedit a fi redusă prin înlocuirea parțială a calcarului cu ghips. | Teste pentru determinarea timpului de priză funcție de cimentul și aditivul utilizat.                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Căldura de hidratare | Prezența calcarului aduce după sine o sporire a căldurii de hidratare, sesizabilă în special pe termen scurt (până la 48 de ore) și pe măsură ce conținutul de                                                                                                                                                                                                  | Se va folosi calcar în proporție de 5% adaos în ciment, dacă temperatura este critică. În caz contrar, se utilizează alte măsuri de reducere a temperaturii, cum ar                                                                                                                                                                                                      |

| Proprietate                                            | Efectul calcarului                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Recomandări                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                        | adaos de calcar crește.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | fi: reducerea conținutului de ciment, a utilizării cimentului cu căldură redusă (tip IV) sau a cimentului cu căldura moderată (tip II) sau scăderea temperaturii la turnare a betonului (folosiți răcirea cu gheață granulată sau răcirea cu azot lichid).                                                           |
| Rezistența la vârste timpurii                          | Rezistențele la compresiune sunt mai ridicate pe termen scurt pentru procente de calcar de până 15% din cantitatea de ciment Portland.<br>Utilizarea unor cantități mai mari de calcar (15% până la 25%) poate reduce rezistențele.                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Rezistența pe termen lung                              | Rezistențele la compresiune mai scăzute pe termen lung (28 zile). Rezistența la compresiune scade cu creșterea conținutului de pulbere calcaroasă.                                                                                                                                                                                               | Se recomană determinarea rezistenței la compresiune la 28 zile a betoanelor întărite în apă timp de 7 zile și apoi păstrate în aer până la 28 zile. Pentru a compensa efectul negativ al calcarului asupra rezistenței la compresiune trebuie adăugată silice ultrafină cu același conținut ca și calcarul utilizat. |
| Permeabilitatea și rezistența la penetrarea clorurilor | Permeabilitatea redusă substanțial prin utilizarea calcarului, probabil datorată mai degrabă reducerii conectivității porilor decât volumului lor. Se indică faptul că betonul produs cu ciment Portland cu calcar până la 15% poate fi un beton cu rezistență similară celui cu ciment Portland la penetrarea fluidelor, inclusiv a clorurilor. | Betonul cu conținutul de calcar peste 10% din ciment mărește penetrarea clorului, măbind riscul de coroziune a armăturii. În consecință, cimentul Portland cu calcar nu este adecvat pentru utilizare în medii severe care conțin cloruri.                                                                           |
| Expansiunea datorată reacției alcalii-silice           | Redusă.<br>Datele arată că nu există o diferență consistentă între expansiunile produse la ciment                                                                                                                                                                                                                                                | Datele disponibile sugerează că utilizarea a până la 5% calcar în ciment nu crește susceptibilitatea mortarului și betonului la reacția                                                                                                                                                                              |

| Proprietate                             | Efectul calcarului                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Recomandări                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                         | Portland în comparație cu ciment Portland cu calcar la un procent de 5%.                                                                                                                                                                                                                                                                               | alcalii-silice.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Rezistența la atacul sulfatic           | Relativ scăzută. Raportul de înlocuire a calcarului cu cimenturi ar trebui limitat la 10% pentru structurile expuse la medii cu atac sulfatic sever. Rezistența la sulfați este în primul rând funcție de conținutului de $C_3A$ și de raportul a/c.                                                                                                   | Betonul cu conținutul de calcar peste 10% din ciment produce o diminuare a performanței rezistenței la sulfați măbind riscul de coroziune a armăturii. În consecință, betonul cu ciment Portland cu calcar nu este adecvat pentru utilizare în medii severe care conțin sulfați. Utilizarea materialelor cimentoide suplimentare (SCM) poate produce beton rezistent la sulfați.                                                                                                                                                                                                                      |
| Rezistența la carbonatare               | Relativ crescută la 5 ani cu creșterea raportului a/c echivalent și a conținutului de calcar și redusă prin extinderea perioadei inițiale de întărire umedă.                                                                                                                                                                                           | Se va asigura o întărire adecvată pentru betonul care conține calcar. Se va verifica că sunt îndeplinite cerințele minime pentru stratul de acoperire.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Rezistența la atacul din îngheț-dezgheț | Scăzută comparativ cu betonul ciment Portland și scade odată cu creșterea cantității de calcar din ciment, în betonul fără aditiv antrenor de aer. Pentru betonul cu aditiv antrenor de aer nu există o diferență semnificativă între performanța betonului ciment Portland și ciment Portland cu calcar, chiar și pentru procente până la 45% calcar. | Se va asigura întotdeauna utilizarea aditivilor antrenori de aer la betoanele ciment Portland cu calcar indiferent de cantitatea de calcar folosită (controlul cantității de aer antrenat sau, mai precis, al sistemului de goluri de aer). Cerințele pentru calcarul utilizat ca ingredient în ciment, pe baza indicelui albastru de metilen, a conținutului total de carbon organic și a conținutului de carbonat de calciu, au fost puse în aplicare în Europa și Canada. Ele furnizează asigurări că utilizarea calcarului nu va avea un impact negativ asupra durabilității prin îngheț-dezgheț. |

### III.4. Efectele adaosurilor minerale din ciment/beton asupra proprietăților betonului proaspăt

O clasificare a efectelor adaosurilor minerale din cimenturile compozite/beton asupra proprietăților betonului proaspăt și întărit în funcție de efectele acestora sunt prezentate în Tabelele III.5 și III.6.

Tabelul III.5. - Efectele adaosurilor minerale din ciment/beton asupra proprietăților betonului proaspăt

| Adaosul din ciment                | Cenușă zburătoare |                  | Zgură granulată de furnal măcinată | Filer de calcar            |
|-----------------------------------|-------------------|------------------|------------------------------------|----------------------------|
|                                   | Clasa F           | Clasa C          |                                    |                            |
| Necesarul de apă                  | ↓↓↓               | ↓↓↓              | ↓                                  | ↓                          |
| Lucrabilitate                     | ↑<br>10-40%       | ↑<br>10-40%      | ↑<br>30-85%                        | ↑<br>5-35%                 |
| Mustirea și segregarea            | ↓<br>10-40%       | ↓<br>10-40%      | ↑<br>40-70%                        | ↓                          |
| Conținutul de aer                 | ↓↓↓               | ↓                | ↓                                  | ↔                          |
| Timp de priză                     | ↑                 | ↕                | ↑<br>10-70%                        | ↔                          |
| Căldura de hidratare              | ↓                 | ↑<br>↓<br>(≥50%) | ↓<br>50-80%                        | ↑<br>(până la 48 ore)<br>↓ |
| Finisarea suprafeței              | ↑                 | ↑                | ↑                                  | ↑                          |
| Pompabilitate                     | ↑                 | ↑                | ↑                                  | ↑                          |
| Fisurarea din contracția plastică | ↔                 | ↔                | ↔                                  | ↔                          |

### III.5. Efectele adaosurilor minerale din ciment/beton asupra proprietăților betonului întărit

Tabelul III.6. - Efectele adaosurilor minerale din cimenturile compozite/beton asupra proprietăților betonului întărit

| Adaosul din ciment                                                | Cenușă zburătoare                |             | Zgură granulată de furnal măcinată                                                                                                                                                                       | Filer de calcar           |
|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
|                                                                   | Clasa F                          | Clasa C     |                                                                                                                                                                                                          |                           |
| Rezistența la vârste timpurii                                     | ↓                                | ↔           | ↓<br>1-3 zile zgură cu un indice de activitate ridicat<br>1-20 zile zgură cu un indice de activitate mediu<br>1-28 zile zgură cu un indice de activitate scăzut<br>↑<br>Întărire la temperaturi ridicate | ↑<br>5-15%<br>↓<br>15-25% |
| Rezistența la compresiune pe termen lung                          | ↑<br>10-50%<br>(înlocuire nisip) | ↑<br>10-50% | ↑<br>30-50%<br>la 28 zile                                                                                                                                                                                | ↓<br>15-35%<br>la 28 zile |
| Rezistența la întindere                                           | ↑<br>10-50%                      | ↑<br>10-50% | ↑<br>30%                                                                                                                                                                                                 | ↔                         |
| Rezistența la încovoiere                                          | ↑<br>40-75%                      | ↑<br>40-75% | ↑<br>30-60%                                                                                                                                                                                              | ↔                         |
| Permeabilitatea, absorbția și rezistența la penetrarea clorurilor | ↓<br>≥10%                        | ↓<br>≥10%   | ↓<br>33-50%<br>↓↓<br>50-80%                                                                                                                                                                              | ↔                         |
| Expansiunea datorată reacției alcalii-silice                      | ↓↓<br>20-40%                     | ↓<br>20-40% | ↓<br>30-60%                                                                                                                                                                                              | ↔                         |

| Adaosul din ciment                      | Cenușă zburătoare |                  | Zgură granulată de furnal măcinată | Filer de calcar |
|-----------------------------------------|-------------------|------------------|------------------------------------|-----------------|
|                                         | Clasa F           | Clasa F          |                                    |                 |
| Rezistența la atacul sulfatic           | ↑↑<br>(<50%)      | ↔                | ↑↑<br>10-50%                       | ↓<br>5-10%      |
| Rezistența la carbonatare               | ↔<br>↓<br>(>30%)  | ↔<br>↓<br>(>30%) | ↔<br>↓<br>(≥50%)                   | ↔               |
| Rezistența la atacul din îngheț-dezghet | ↓<br>↑<br>40-60%  | ↓<br>↑<br>40-60% | ↓<br>↑<br>10-60%<br>60-80%         | ↔               |
| Rezistența la abraziune                 | ↔                 | ↔                | ↔                                  | ↔               |
| Contrația de uscare și curgerea lentă   | ↔                 | ↔                | ↔                                  | ↔               |

Legendă: ↓↓ reducere semnificativă  
 ↓ reducere  
 ↑ creștere  
 ↑↑ creștere semnificativă  
 ↔ efect neutru  
 ⇅ efect variabil



---

## CAPITOLUL IV.

### METODE DE PERFORMANTA PENTRU EVALUAREA DURABILITATII SI A EVOLUTIEI REZISTENTEI BETOANELOR PREPARATE CU ADAOSURI

#### IV.1. Aspecte generale ale durabilității betonului

Betonul este cel mai utilizat material de construcție. Orice material își modifică proprietățile în timp ca urmare a interacțiunilor cu mediu, deci are o durabilitate limitată. Se presupune că un material ajunge la sfârșitul ciclului de viață atunci când proprietățile sale în condiții de exploatare date s-au deteriorat într-o asemenea măsură încât utilizarea continuă a materialului este considerată fie nesigură, fie neeconomică.

Durabilitatea este capacitatea unui material de a rezista o perioadă lungă de timp fără deteriorări semnificative. Durabilitatea betonului poate fi definită ca abilitatea betonului de a rezista în timp și aș menține la un nivel anticipat caracteristicile, sub acțiunea intemperior, atacului chimic și abraziunii, sau oricărui alt proces de deteriorare. Betonul trebuie să fie astfel conceput încât să se încadreze în clase de durabilitate diferite în funcție de mediul de expunere și de proprietățile dorite. De exemplu, betonul expus la apa marină va avea cerințe diferite față de betonul unui planșeu interior. Componentele betonului, proporționarea lor, interacțiunile dintre acestea, practicile de punere în operă (turnare) și tratarea în funcție de mediul de exploatare determină durabilitatea și durata de viață a betonului.

Durabilitatea betoanelor preparate cu materiale cimentoide suplimentare este influențată de durata și eficiența tratării, raportul a/c, dozajul de ciment și ponderea (procentele) adaosului, finețea de măcinare a cimentului și domeniul granulometric, caracteristicile clincherului și influența adaosului și chiar de sursa (fabrica) din care provine. Durabilitatea betonului depinde de porozitatea și permeabilitatea sa, de ușurința pătrunderii și deplasării gazelor și lichidelor prin structura sa, de sistemul de pori capilari din piatra de ciment și de distribuția lor pe diametre și de zona de contact între piatra de ciment și agregat. Durabilitatea este o caracteristică importantă asociată direct proprietăților mecanice. Totuși, în ultimele decenii, problemele de durabilitate nesatisfăcătoare ale structurilor, în special a celor din beton armat, se află într-o creștere dramatică. Acest aspect are un impact economic direct, deoarece cheltuielile de reparare a structurilor deteriorate sunt aproape egale cu costurile unei construcții noi, dar are și consecințe de mediu și sociale importante datorate scăderii fiabilității și siguranței. Datorită faptului că durabilitatea betonului a beneficiat de o perioadă de cercetare relativ scurtă comparativ cu rezistența sa mecanică, studiul durabilității este una din preocupările principale ale comunității ingineresti de astăzi.

##### IV.1.1. Durabilitatea și factorii care influențează durabilitatea betonului

În practică, factorii principali care au o influență semnificativă asupra comportării durabile a betoanelor sunt:

a) factori care depind de caracteristicile cimentului cu adaos mineral:

- compoziția chimică (mineralogică) a clincherului Portland;
- compoziția chimică (mineralogică) a adaosului mineral (sau combinației de adaosuri minerale) utilizat;

- reactivitatea adaosului mineral (sau adaosurilor minerale);
  - procentul de substituție al clincherului cu adaosul mineral respectiv;
  - raportul în care sunt mai multe tipuri de adaosuri minerale în compoziția cimentului compozit;
  - finețea de măcinare a cimentului și/sau a adaosului;
  - clasa de rezistență a cimentului;
- b) factori care depind de caracteristicile betonului:
- clasa betonului;
  - raportul a/c;
  - dozajul de ciment folosit;
  - modul de punere în opera și eficiența tratării ulterioare;
  - temperatura mediului ( în special în perioada inițială a hidratării).

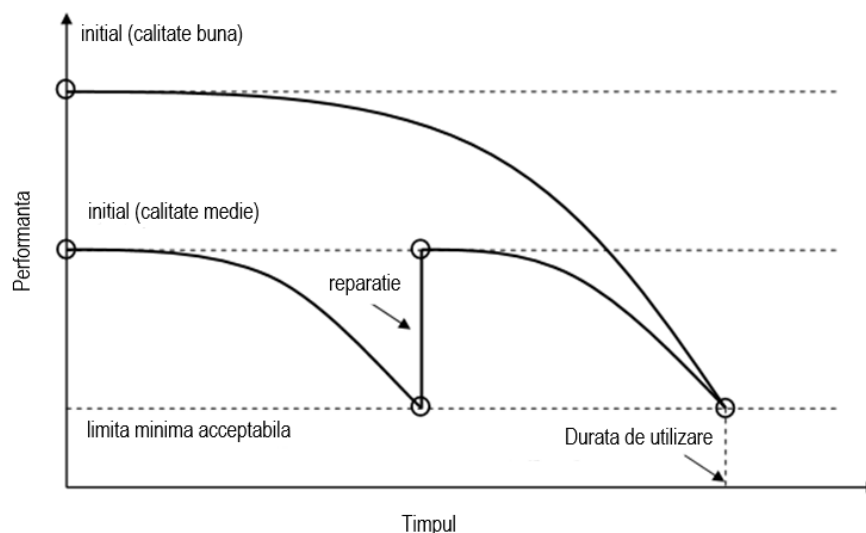


Figura IV.1. - Performanța betonului în funcție de durata de viață [39]

Tipul și viteza dezvoltării proceselor de degradare a betonului și a armăturii afectează rezistența și rigiditatea materialelor, secțiunilor și elementelor din beton armat care alcătuiesc structura de rezistență. Durata de viață a betonului este perioada de timp în care performanța structurii de beton va fi menținută la un nivel compatibil cu îndeplinirea cerințelor de performanță ale structurii, cu condiția ca aceasta să fie întreținută corespunzător. După cum se observă în figura IV.1. această durată de viață poate fi atinsă fie datorită unei calități inițiale bune a materialelor componente, fie datorită reparațiilor repetate a unei structuri în care calitatea inițială a fost medie.

Durabilitatea unei structuri reprezintă capacitatea de a rezista împotriva atacurilor de mediu fără ca performanța sa să scadă sub o limită minimă acceptabilă. Trei factori principali definesc durabilitatea betonului: proiectarea compoziției inițiale (calitatea și cantitatea componentelor din beton), proiectarea structurii, execuția, întreținerea și condițiile specifice de mediu. Deteriorarea materialelor de construcție în exploatare reprezintă o pierdere de performanță și poate fi rezultatul unei varietăți de procese mecanice, fizice, chimice sau biologice.

---

Betonul (și produsele de ciment în general) este, de asemenea, susceptibil la toate aceste tipuri de deteriorare. Rezultatul final al acestor acțiuni este în principal fisurarea.

**Procesele mecanice** care provoacă fisurarea pot fi considerate, contracția plastică, tasarea betonului proaspăt, acțiunile directe, deformațiile impuse, eroziunea:

- Contracția plastică este cauzată pierderea rapidă a apei prin evaporare.
- Dacă tasarea betonului proaspăt este împiedicată de armătură sau de cofraj, pot apărea fisuri longitudinale.
- Fisurarea cauzată de solicitarea elementelor (compresiune, întindere, încovoiere, forfecare, etc.).
- Deformațiile care produc fisuri pot fi considerate cele din tasarea diferențiată a fundațiilor, cutremure, etc.
- Un proces mecanic care cauzează deteriorarea suprafeței este eroziunea fie prin abraziune, fie prin cavitație.

**Procesele fizice** care cauzează fisurarea pot fi considerate diferențe de temperatură, contracție și îngheț-dezghet:

- Una dintre cauzele majore de fisurare este diferența de temperatură rezultată din răcirea de la temperaturile generate de hidratarea cimentului la cele din timpul exploatării.
- Contracția la uscare este independentă de încărcare și provoacă deformația pe termen lung a betonului datorită scăderii volumului prin evacuarea apei.
- În cazul înghețării apei în beton, următoarele procese fizice au o importanță majoră: înghețarea apei implică o creștere a volumului cu 9%, iar punctul de îngheț este redus pe măsură ce diametrul porilor scade. În cazul porilor complet umpluți cu apă, o astfel de creștere de volum va duce la exfolierea betonului. Datorită acestui fapt trebuie ca porii din structura betonului să nu fie umpluți cu apă.

**Procesele chimice** care cauzează deteriorarea betonului pot fi împărțite în două categorii în funcție de materialul pe care îl influențează: beton sau armătură.

În prima categorie apare atacul chimic al substanțelor agresive asupra betonului. O condiție prealabilă pentru reacțiile chimice care se produc în interiorul betonului este prezența apei sub o anumită formă (lichid, vapori). În general, reacțiile dintre substanța agresivă (prezentă în beton sau transportată din mediul înconjurător) și substanța reactivă a betonului au loc în timp mai mult sau mai puțin îndelungat. De multe ori din cauza vitezei scăzute de transport a acestor substanțe, reacțiile pot dura mai mulți ani pentru a constata efectul lor dăunător. În practică, cele mai importante atacuri chimice asupra betonului sunt atacul acizilor, atacul sulfatic și atacul alcaliilor.

- Acțiunea acizilor (cum ar fi: sărurile de amoniu, sărurile de magneziu și apele moi) asupra betonului se manifestă printr-o transformare a tuturor compușilor calciului în sărurile de calciu ale acidului atacant. Aceste săruri sunt foarte solubile și pot fi îndepărtate prin dizolvare sau abraziune, distrugând structura betonului.
- Atacul sulfatic al betonului este reacția ionilor sulfati cu faza de aluminat a cimentului, care determină expansiunea betonului, ducând la fisurare și dezintegrare.
- În cazul atacurilor alcaliilor, alcalii din ciment prezenți în soluția din pori pot reacționa cu agregatele care conțin silice rezultând formarea gelului alcalii-silice (reacția alcalii-agregate).

Aceasta poate duce la expansiune distructivă dacă este suficientă apă, începând cu mici fisuri de suprafață și urmată de o dezintegrare completă.

Barele de armătură din beton sunt protejate de coroziune printr-un strat de oxid subțire care se formează pe suprafața lor datorită alcalinității ridicate, adică a valorii ridicate a pH-ului betonului înconjurător. Corodarea poate începe atunci când stratul protector este distrus:

- fie prin penetrarea clorurilor (daca conținutul de clorură depășește o valoare critică),
- fie datorită unei reduceri a pH-ului betonului la valori mai mici de 9. O astfel de reducere a alcalinității este rezultatul carbonatării  $\text{Ca(OH)}_2$  în masa betonului, adică a reacției sale cu  $\text{CO}_2$  atmosferic care difuzează prin porii de beton. În mediile marine sau atunci când sărurile de dezghețare vin în contact cu suprafața de beton, penetrarea clorului este mecanismul principal care deschide calea către inițierea coroziunii armăturii. În toate celelalte cazuri, și mai ales în zonele urbane și industriale bogate în  $\text{CO}_2$ , carbonatarea betonului este mecanismul principal care duce la coroziunea oțelului. Mai mult, cele două mecanisme sunt sinergetice (acțiune combinată și orientată spre același rezultat), adică acțiunea clorurii este accelerată prin carbonatare. Cu toate acestea, coroziunea armăturii este posibilă, dacă există suficientă umiditate și oxigen.

În cele din urmă, multe **proces biologice**, cum ar fi creșterea pe suprafețele din beton a lichenilor, mușchilor, algelor și rădăcinilor de plante, pot duce la deteriorări:

- Microorganismele pot provoca atacuri chimice prin dezvoltarea acidului humic, care dizolvă piatra de ciment.
- În practică, cel mai important tip de atac biologic apare în sistemele de canalizare, unde hidrogenul sulfurat (format în condiții anaerobe) poate fi oxidat prin acțiune bacteriologică pentru a forma acid sulfuric, rezultând un atac acid asupra betonului.

Tabelul IV.1. - Mecanisme de deteriorare și timpul cu cea mai mare probabilitate de apariție a fisurării [39].

| Timpul de apariție al fisurilor |  |                    |                                     |           |           |      |        |     |                          |       |  |
|---------------------------------|--|--------------------|-------------------------------------|-----------|-----------|------|--------|-----|--------------------------|-------|--|
| ore                             |  | zile               |                                     | săptămâni |           | luni |        | ani |                          | secol |  |
| Procese                         |  | Cauza              |                                     |           |           |      |        |     |                          |       |  |
| Mecanice                        |  | Contrația plastică |                                     |           |           |      |        |     |                          |       |  |
|                                 |  | Tasarea            |                                     |           |           |      |        |     |                          |       |  |
|                                 |  |                    |                                     |           |           |      |        |     |                          |       |  |
|                                 |  | Acțiunile directe  |                                     |           |           |      |        |     |                          |       |  |
|                                 |  | Deformații impuse  |                                     |           |           |      |        |     |                          |       |  |
| Fizice                          |  |                    | Diferențe de temperatură            |           |           |      |        |     |                          |       |  |
|                                 |  |                    |                                     |           | Contrație |      |        |     |                          |       |  |
|                                 |  |                    | Fenomene de îngheț-dezgheț timpurii |           |           |      | târzii |     |                          |       |  |
| Chimice                         |  |                    |                                     |           |           |      |        |     | Atac sulfatic            |       |  |
|                                 |  |                    |                                     |           |           |      |        |     | Reacția alcalii-agregate |       |  |
|                                 |  |                    |                                     |           |           |      |        |     | Coroziunea armăturii     |       |  |
| Biologice                       |  |                    |                                     |           |           |      |        |     | Atac hidrogen sulfurat   |       |  |

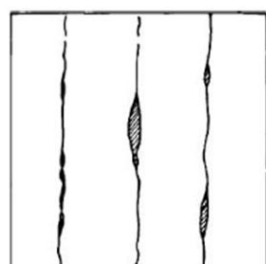
În urma cercetărilor întreprinse și a observațiilor constatăte în timp se poate stabili în funcție de procesul de deteriorare al betonului timpul probabil de apariție a primelor degradări.

Tabelul IV.2. - Tipuri de deteriorări cauzate de procese fizice și chimice [86].

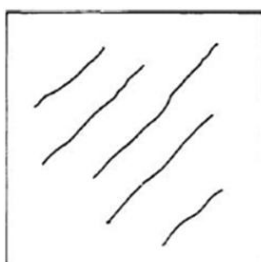
| Tipuri de deteriorări cauzate de procese fizice  |                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                            |                    |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Deteriorarea betonului din:                      | Defectul observat                                                                                                                                                                                                                | Cauza                                                                                                                                                                                                                      | Timpul de apariție |
| Atacul din îngheț-dezgheț al pietrei de ciment   | Microfisurare sau exfoliere a suprafeței betonului, a rosturilor deteriorate pentru betoanele rutiere. În general se inițiază în apropierea rosturilor sau fisurilor; posibilă perturbare internă a structurii betonului.        | Deteriorarea pietrei de ciment datorită ciclurilor repetate de îngheț-dezgheț într-o stare saturată. Sistemul de pori din aerul antrenat este insuficient pentru a proteja piatra de ciment de deteriorări.                | 1-10 ani           |
| Săruri de dezghețare                             | Fisurarea avansată sau exfolierea suprafețelor cu posibile modificări ale sistemului de pori din beton sau din piatra de ciment, ducând la apariția eflorescentelor în zona rosturilor și fisurilor, urmată de deteriorarea lor. | Dezghețul chimic amplifică deteriorarea din îngheț-dezgheț prin creșterea nivelului de saturație și a presiunii generate; poate interacționa chimic cu piatra de ciment.                                                   | 1-5 ani            |
| Îngheț-dezghețul agregatului                     | Fisurarea concomitentă a agregatelor din zona fisurilor deschise și a rosturilor este urmată de exfoliere, putând fi însoțită și de pătarea (colorarea) suprafeței.                                                              | Înghețul și dezghețul agregatelor mari sensibile duce la sfărâmarea sau dilatarea excesivă a agregatelor.                                                                                                                  | 10-25 ani          |
| Tipuri de deteriorări cauzate de procese chimice |                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                            |                    |
| Reacția alcalii-silice                           | Fisuri deschise pe elemente de suprafață și în zona rosturilor. Pot exista avarii legate de expansiune (colmatarea rosturilor, exfolieri, umflări).                                                                              | Reacția dintre alcalii din soluția din pori și silica reactivă din agregate are ca rezultat formarea unui gel expansiv și degradarea agregatelor.                                                                          | 5-25 ani           |
| Reacția alcalii-carbonați                        | Fisuri deschise pe elemente de suprafață și în zona rosturilor. Pot exista avarii legate de expansiune (colmatarea rosturilor, exfolieri, umflări).                                                                              | Reacție agresivă expansivă între alcalii din soluția din pori și anumite agregate dolomitice care implică frecvent dedolomitizarea și formarea de brucit (un mineral alb, gri sau verzui compus din hidroxid de magneziu). | 5-15 ani           |

| Tipuri de deteriorări cauzate de procese chimice |                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                         |                    |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Deteriorarea betonului din:                      | Defectul observat                                                                                                                                                                                                           | Cauza                                                                                                                                                                                                                   | Timpul de apariție |
| Atac sulfatic extern                             | Fisurarea fină în apropierea marginilor plăcilor sau pe întreaga suprafață a lor, care duce în final la deteriorarea rosturilor sau a suprafeței.                                                                           | Formarea etringitului, a ghipsului sau a thaumazitului care are loc atunci când sursele externe de sulfați (de exemplu, apa subterană, agenți chimici de dezgheț) reacționează cu fazele aluminat din piatra de ciment. | 1-10 ani           |
| Atac sulfatic intern                             | Fisurarea fină în apropierea marginilor plăcilor sau pe întreaga suprafață a lor, care duce în final la deteriorarea rosturilor sau a suprafeței. Avarii cauzate de expansiune (închiderea rosturilor, exfolieri, umflări). | Întârzierea formării etringitului datorită temperaturilor ridicate de întărire la vârstă timpurie care are ca rezultat o dezagregare expansivă în faza de pastă de ciment.                                              | 1-5 ani            |
| Coroziunea armăturii înglobate în beton          | Exfolierea, fisurarea și deteriorarea suprafețelor din zona armăturilor înglobate în beton.                                                                                                                                 | Ionii de cloruri penetrează betonul, facilitând coroziunea oțelului încorporat. Volumul crescut de produși de coroziune provoacă exfolieri majore ale betonului.                                                        | 3-20 ani           |

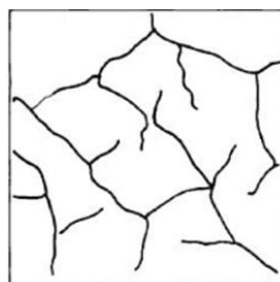
Este posibil să se obțină informații utile printr-o inspecție vizuală asociată cu date legate de tehnologia de turnare și finisare, de tipul de deteriorare a materialelor și de exploatarea structurii. Este semnificativ pentru ingineri să recunoască tipurile diferite de fisuri caracteristice, cel mai frecvent întâlnite.



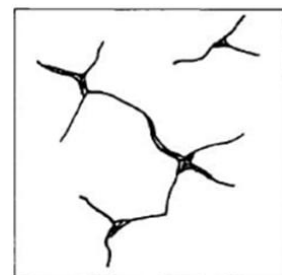
coroziunea armăturii



contractie plastică



atac sulfatic



reacția alcalii-agregate

Figura IV.2. - Tipuri specifice de fisuri la suprafața betonului [85].

Tabelul IV.3. - Stabilirea deteriorărilor și defectelor betonului din structuri [85]

| Cauza                     | Indicii și constatări |                         |          | Vârsta de apariție |             |
|---------------------------|-----------------------|-------------------------|----------|--------------------|-------------|
|                           | Fisuri                | Fisuri deschise excesiv | Eroziune | Timpurie           | Termen lung |
| Deficiențe structurale    | •                     | •                       |          | •                  | •           |
| Coroziunea armăturii      | •                     | •                       |          |                    | •           |
| Atac chimic               | •                     | •                       | •        |                    | •           |
| Avarii din îngheț-dezghet | •                     | •                       | •        | •                  |             |
| Avarii din incendiu       | •                     | •                       |          | •                  |             |
| Reacții interne           | •                     | •                       |          |                    | •           |
| Efecte termice            | •                     | •                       |          | •                  | •           |
| Contractie                | •                     |                         |          | •                  | •           |
| Curgere lentă             | •                     | •                       |          |                    | •           |
| Evaporarea rapidă a apei  | •                     |                         |          | •                  |             |
| Segregare plastică        | •                     |                         |          | •                  |             |
| Avarii fizice             | •                     | •                       | •        | •                  | •           |

## IV.2. Metode de dozare pentru adaosuri minerale

O influență importantă asupra durabilității o are compoziția betonului și tipurile și cantitățile de adaos mineral din beton. Pentru a se asigura același nivel al durabilității este necesară aplicarea unor metode de dozare astfel încât să se obțină performanțe echivalente cu cele ale betoanelor fără adaosuri.

### 1. Metoda de înlocuire simplă a adaosului mineral:

Aceasta este metoda tradițională de dozare. Înlocuirea cimentului se poate face fie pe bază de volum, fie pe bază de masă. Înlocuirea volumului nu modifică volumul general al pastei. Cu toate acestea, atunci când se face înlocuirea în masă, volumul pastei crește, iar această creștere este de obicei compensată de o scădere a volumului în cazul nisipului. Caracteristicile amestecului pot fi afectate în mod negativ prin îndepărtarea nisipului dacă volumul eliminat este substanțial (ceea ce se poate întâmpla pentru cantități mari de adaos cu greutate specifică scăzută, cum ar fi silicea ultrafină). Pentru puzzolanele cu reacție lentă, cum ar fi cenușa de tip F, această metodă are ca rezultat rezistența scăzută la vârstei timpurii. Un alt dezavantaj al acestei metode este acela că nu ține cont de variațiile caracteristicilor adaosurilor minerale. Avantajele acestei metode sunt simplitatea ei și efectele pozitive asupra lucrabilității (în special când materialul înlocuitor este cenușa zburătoare).

### 2. Metoda de adăugare a adaosului mineral:

Această metodă implică adăugarea directă a adaosului mineral la beton fără a înlocui nici o parte a cimentului. În betonul de înaltă performanță, aceasta este metoda aleasă, deoarece crește conținutul de material cimentoid. Această creștere este compensată de o scădere a conținutului de agregat fin. Metoda de adăugare are, de obicei, ca efect rezistențe mai mari, când se folosesc materiale fine, cum ar fi silicea ultrafină, dar această metodă poate determina o creștere substanțială a necesarului de apă.

### 3. Metoda de înlocuire modificată a adaosului mineral:

În acest caz, se adaugă o parte a adaosului în beton, iar o parte din acesta este utilizat ca înlocuitor. Cantitatea de adaos mineral introdus în amestec este mai mare decât cantitatea de ciment îndepărtată. Această metodă este utilizată în mod obișnuit pentru obținerea unor rezistențe suficient de mari la vârste timpurii pentru betoane preparate cu ciment cu cenușă zburătoare. Totuși, lucrabilitatea și necesarul de apă pot fi dificil de controlat în această metodă.

### 4. Metoda rațională de dozare a adaosului mineral:

Aceasta este o metodă eficientă de dozare a adaosurilor. Se cuantifică influența adaosului mineral folosind un factor  $k$ , care este factorul de eficiență al materialului cimentoid suplimentar. Acest factor califică adaosul mineral ca un ciment de grad inferior sau de calitate superioară. Cu alte cuvinte,  $k$  reprezintă cantitatea de adaos mineral care poate înlocui o parte de ciment Portland din amestec pentru obținerea unor proprietăți similare. Această metodă este capabilă să țină seama de dezvoltarea lentă a rezistenței la vârstă timpurie a betonului cu cenușă zburătoare.

## IV.2.1. Determinarea experimentală a valorii coeficientului $k$

Adaosurile minerale acționează ca materiale puzzolanice, precum și ca materiale cu granulație fină; prin urmare, microstructura matricei de ciment întărită devine mai compactă și mai rezistentă. De asemenea, betonul cu adaosuri minerale asigură o permeabilitate mai scăzută, căldură redusă de hidratare, reacție redusă alcalii-agregate, rezistență mecanică mai mare și rezistență la atacul chimic. Totuși, efectul acestor adaosuri minerale și al aditivilor chimici asupra performanței betonului depinde de proprietățile lor. Prin urmare, este necesar să se cunoască eficiența diferitelor adaosuri minerale asupra dezvoltării rezistenței la compresiune a betonului și, de asemenea, procentul lor optim de înlocuire. Pentru a produce beton de înaltă performanță, există multe tipuri de adaosuri minerale utilizate pentru îmbunătățirea rezistenței și performanțelor betonului. Contribuția fiecărui tip de adaos mineral pentru îmbunătățirea rezistenței betonului este diferită în funcție de procentul de înlocuire.

Efectul unui adaos mineral asupra rezistenței la compresiune a betonului poate fi analizat prin stabilirea unui factor  $k$  de eficiență cimentoidă sau puzzolanică. Acesta este un factor de multiplicare al adaosului mineral pentru a obține o cantitate echivalentă de ciment în vederea determinării raportului  $a/c$ . S-a propus un factor " $k$ " cunoscut ca eficiența materialului cimentoid " $k$ ", astfel încât o masă " $f$ " a cenușii zburătoare să fie echivalentă cu o masă " $kf$ " de ciment în termeni de dezvoltare ai rezistenței. El a constatat că rezistența și lucrabilitatea betonului cu cenușă zburătoare cu raportul efectiv  $a/(c + kf)$  este comparabil cu cel al betonului convențional fără cenușă zburătoare având același conținut de apă și raport  $a/c$ . Pe baza rezultatelor sale experimentale, valoarea factorului de eficiență  $k$  a fost de 0,25 până la utilizarea a 25% cenușă zburătoare ca adaos mineral.

Codul model CEB-FIB (1994) a propus o valoare a coeficientului de eficiență de 0,4 pentru procente de înlocuire între 15% și 40% cenușă zburătoare. Cercetările experimentale au observat că această metodă bazată pe coeficientul de eficiență  $k$  este insensibilă la tipul de ciment, condiții de întărire etc. și, prin urmare, nu este adecvată pentru amestecuri cu dozaje mari. Testele au arătat că aportul de cenușă zburătoare nu este o constantă determinată numai de caracteristicile lor fizice și chimice, ci variază și în funcție de tipul de ciment și raport  $a/c$ , propunând doi factori de eficiență, pe de o parte, un factor general de eficiență și al doilea factor, corespunzând

procentului de înlocuire. Dacă factorul de eficiență este cunoscut, rezistența compozițiilor cu adaos mineral poate fi determinată prin modificarea ecuației Bolomey ca:

$$S = A_1 [c/a] + A_2 \text{ pentru beton cu ciment fără adaos} \quad (IV.1.)$$

$$S = A_1 [(c+kf)/a] + A_2 \text{ pentru beton cu ciment cu adaos} \quad (IV.2.)$$

unde: S este rezistența la compresiune în MPa, c este dozajul de ciment în kg/m<sup>3</sup>, f este conținutul de adaos mineral în kg/m<sup>3</sup>, k este factorul de eficiență și A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> sunt constante arbitrare. Aceste constante arbitrare sunt influențate de tipul, dimensiunea maximă și sortul agregatului, tipul de ciment, perioada de întărire etc.

Aceste relații au fost folosite pentru a obține factorul de eficiență k pentru materialele de înlocuire a cimentului, cum ar fi:

$$S = A_1 (c + kf) / a + A_2 \quad (IV.3.)$$

$$k = (1 / f) \{-c + a [S - A_2] / A_1\} \quad (IV.4.)$$

unde: k este factorul de eficiență;

S - rezistența la compresiune;

c - greutatea cimentului în kg/m<sup>3</sup>;

a - greutatea apei în kg/m<sup>3</sup>;

f - greutatea adaosului mineral în kg/m<sup>3</sup>;

A<sub>1</sub> și A<sub>2</sub> - constante.

Valoarea coeficientului k a fost obținută din valorile rezistenței betonului pentru raportul a/c echivalent de 0,30 și 0,40 pentru adaosuri minerale la procente diferite de înlocuire și la vârsta de 7 și 28 de zile. S-a observat că perioada de întărire și înlocuirea procentuală influențează factorul de eficiență.

Factorul de eficiență pentru cenușa zburătoare prezintă o majorare, în cazul în care perioada de întărire este crescută, ceea ce indică reacția puzzolanică mai lentă la vârstă fragedă. Astfel, este esențial ca cimentul care conține cenușă zburătoare să necesite o perioadă de întărire prelungită. Amestecurile de cenușă zburătoare au prezentat o reducere a factorului de eficiență pe măsura majorării cantității de cenușă zburătoare. Factorul de eficiență pentru betonul cu praf de silice și metakaolin, pentru toate procentele de înlocuire, este supraunitar la vârsta de 7 zile, în timp ce factorul de eficiență pentru cenușa zburătoare este subunitar chiar la 28 de zile pentru toate procentele de înlocuire.

Tabelul IV.4. - Factori de eficiență k pentru diferite materiale cimentoide suplimentare [39].

| Materiale cimentoide suplimentare | Rezistența la 2 zile | Rezistența la 7 zile | Rezistența la 28 zile | Rezistența la 90 zile |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Clincher Portland                 | 1                    | 1                    | 1                     | 1                     |
| Praf de silice                    | 1                    | 2                    | 3                     | 2.4                   |
| Puzzolane naturale                | 0.4                  | 0.3                  | 0.3                   | 0.3                   |
| Metakaolin                        | 1                    | 1.8                  | 3                     | 3                     |
| Cenușa silicioasă                 | 0.2                  | 0.3                  | 0.5                   | 0.7                   |
| Cenușa calcaroasă                 | 1.1                  | 1.1                  | 1.2                   | 1                     |

(toate materialele cimentoide suplimentare au o finețe de măcinare de 400±20 m<sup>2</sup>/kg)

Tipul și procentul de adaos mineral influențează caracteristicile betonului proaspăt și întărit, principala caracteristică care trebuie luată în considerare fiind rezistența la compresiune a betonului la 28 de zile. Din articolul [82] pentru betoanele ce au în compoziție adaosuri, raportul a/c este înlocuit cu raportul  $w_a/(c_a+ka)$ , unde k este coeficientul de echivalență și a este adaosul din beton. Factorul k indică contribuția adaosurilor din betoane pentru obținerea unei rezistențe echivalente cu cea a unui beton fără adaosuri.

Utilizând notațiile din documentul european [81] putem scrie relația:

$$\omega_0 = w_a/(c_a + ka) \quad (IV.5.)$$

unde:  $\omega_0$  este raportul apa/ciment al betonului de referință fără adaosuri;

$w_a$  - cantitatea de apa a betonului cu adaosuri ( $\text{kg/m}^3$ );

$c_a$  - cantitatea de ciment a betonului cu adaosuri ( $\text{kg/m}^3$ );

a - cantitatea de adaosuri ( $\text{kg/m}^3$ ).

În cazul în care acești parametri au fost determinați pentru o aceeași rezistență, coeficientul k poate fi calculat cu relația:

$$k = (w_a/\omega_0 - c_a) / a \quad (IV.6.)$$

sau normalizând cu cantitatea de ciment  $c_a$  din betonul cu adaosuri:

$$k = (\omega_a / \omega_0 - 1) / (a / c_a) \quad (IV.7.)$$

unde  $\omega_a = w_a/c_a$  este raportul apa/ciment al betonului cu adaosuri.

În metodele descriptive de proiectare a compoziției betonului, valoarea constantei k are semnificația unei valori maxime, care poate fi utilizată pentru a dovedi ca raportul  $w_a/(c_a+ka)$  al betonului nu depășește raportul maxim apa/ciment, așa cum este definit pentru betonul fără adaosuri, în funcție de o anumită clasă de expunere. Prin aceasta nu se dau însă informații privind performanțele "echivalente" ale betonului preparat cu adaos față de betonul fără adaosuri. Determinarea coeficientului k se face comparând performanțele unui beton de referință preparat cu un ciment "c" cu un beton în care o parte din cimentul "c" a fost înlocuit cu un adaos, în funcție de procentul de adaos și de raportul a/c. Principiul de calcul se bazează pe relația care există între raportul a/c și rezistența betonului. Precizia metodei este mai mare dacă determinările se efectuează pe mai multe compoziții de beton.

Daca relația dintre rezistența la compresiune și raportul a/c este:

$$f_0 = A_0 - B_0 \omega_0 \quad \text{pentru betonul de referință} \quad (IV.8.)$$

$$f_a = A_a - B_a (w/c+a) \quad \text{pentru betonul cu adaosuri cu raportul a/c} \quad (IV.9.)$$

Experimental se determină valorile coeficienților  $A_0$ ,  $A_a$ ,  $B_0$ ,  $B_a$  pentru diferite rapoarte între ciment și adaosuri c/a. După determinarea valorii coeficienților se efectuează egalitatea relațiilor:

$$f_0 \text{ (referința)} = f_a \text{ (adaos)} \quad (IV.10.)$$

$$\left. \begin{aligned} f_0 &= f_a \Rightarrow A_0 - B_0 \omega_0 = A_a - B_a \cdot w / (c+a) \\ \omega_0 &= w / (c+k \cdot a) \Rightarrow w = \omega_0 (c+k \cdot a) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} A_0 - B_0 \omega_0 &= A_a - B_a \omega_0 (c+k \cdot a) / (c+a) \\ \text{sau} \\ A_0 - B_0 \omega_0 &= A_a - B_a \omega_0 (1+k \cdot a/c) / (1+a/c) \end{aligned}$$

Valoarea coeficientului  $k$  va fi în funcție de raportul apă/ciment al betonului de referință. Se va utiliza relația:

$$k = \frac{(A_a - A_0)(1 + a/c)}{B_a \times a/c} \times \frac{1}{\omega_0} + \left[ \frac{B_0(1 + a/c)}{B_a} - 1 \right] \times \frac{1}{a/c} \quad (IV.11.)$$

unde:  $\omega_0$  este raportul apă/ciment al betonului de referință fără adaosuri;

$\omega_a$  - raportul apă/ciment al betonului cu adaosuri,  $\omega_a = w_a/c_a$ ;

$w_a$  - cantitatea de apă a betonului cu adaosuri ( $\text{kg/m}^3$ );

$c_a$  - cantitatea de ciment în betoanele cu adaosuri ( $\text{kg/m}^3$ );

$a$  - cantitatea de adaosuri ( $\text{kg/m}^3$ );

$f_a, f_0$  - rezistențele la compresiune ale betonului (MPa);

$A_0, A_a, B_0, B_a$  - coeficienți ai relației liniare între rapoartele  $a/c$  și rezistența la compresiune a betonului pentru betonul de referință și betonul cu adaosuri.

### IV.3. Conceptul de performanță echivalentă a betonului în normativul european CEN/TC104/SC1 - Principles of the equivalent durability procedure

Standardul european EN 206 [17] se referă la durabilitatea betonului având o abordare axată în special pe specificațiile prescriptive prezentate în anexa F privind clasa minimă, conținutul minim de liant și raportul maxim de apă/liant pentru o serie de clase de mediu bine definite. Acest standard oferă și informații de principiu despre abordarea și principiile metodelor de proiectare legate de performanță în ceea ce privește durabilitatea betonului.

Conceptul de performanță echivalentă a betonului (Equivalent Concrete Performance Concept - ECPC) permite modificarea cerințelor privind conținutul minim de ciment și raportul maxim  $a/c$  față de valorile date în EN 206 [17] atunci când se utilizează o combinație între un adaos mineral specific și o sursă specifică de ciment, pentru care sursa de producție și caracteristicile fiecăruia sunt clar definite și documentate. Acest concept se utilizează numai pentru cimenturile conforme cu EN 197-1 [8] cu adaosuri de tip II. Trebuie să se dovedească că betonul are o performanță echivalentă în special în ceea ce privește interacțiunea cu mediul în comparație cu betonul de referință în conformitate cu cerințele pentru clasa de expunere relevantă. Standardul EN 206 [17] nu detaliază o metodă pentru implementarea practică a conceptului de performanță echivalentă a betonului.

În cazul în care indicatorii de durabilitate ai betonului candidat sunt egali sau mai buni decât cei ai betonului de referință, performanța betonului testat este caracterizată ca fiind echivalentă cu betonul de referință.

Conceptul de performanță echivalentă a combinațiilor (Equivalent performance of combinations concept - EPCC) echivalează performanța unei combinații de ciment cu un adaos (sau adaosuri) cu performanța unui ciment standardizat cu aceeași compoziție nominală. Acest concept permite ca o gamă definită de combinații să fie luată în considerare astfel încât să respecte cerințele de performanță echivalente cu ale cimentului standardizat având raportul  $a/c$  maxim și conținutul minim de ciment specificate. Principiul fundamental este să se poată

---

demonstra că betonul cu adaosuri va performa la fel ca betonul la care se utilizează ciment cu același tip de adaosuri. Aplicarea acestui concept este permisă numai atunci când se efectuează un program continuu de testare și de control al adaosului specific și al cimentului specific. Atunci când se aplică acest concept, se recomandă: - identificarea unui tip de ciment care să respecte un standard european și care are aceeași compoziție (sau foarte asemănătoare) cu combinația prevăzută a adaosului în beton și - să se evalueze dacă performanțele mecanice și de durabilitate ale betonului cu adaosuri sunt similare cu cele ale betonului preparat cu cimentul cu adaosuri.

#### **IV.3.1. Aspecte generale legate de conceptul de performanță echivalentă a betonului**

Procedura de durabilitate echivalentă poate fi utilizată pentru stabilirea conformității cu EN 206 [17] a compozițiilor de beton care se abat de la criteriile de valoare limită în locul de utilizare. Această procedură se aplică numai compozițiilor din beton care conțin componente (naturale, fabricate sau reciclate) care intră sub incidența specificațiilor tehnice europene menționate în EN 206 [17] sau a dispozițiilor valabile la locul de utilizare.

Procedura pentru evaluarea durabilității echivalente este o procedură bazată pe încercări, prin care se demonstrează că un beton candidat are performanțe egale sau mai bune decât o valoare de referință sau un beton de referință atunci când sunt verificate criteriile de performanță legate de o anumită clasă de expunere. Procesul include definirea valorii de performanță, testând betonul candidat cu o încercare de performanță la o vârstă specificată și compararea acestuia cu valoarea de referință adecvată a performanței sau cu performanța betonului de referință la aceeași vârstă.

*Betonul candidat* cuprinde un ansamblu de elemente constitutive supuse analizei pentru definirea compoziției care să asigure o durată de viață/performanță de referință egală cu sau mai mare decât a betonului de referință pentru clasa de expunere selectată.

*Betonul de referință* este betonul în care sunt prescrise toate componentele și proporțiile de amestec, conforme cu prevederile EN 206 [17] valabile la locul de utilizare și reprezentative pentru experiența națională/locală în clasa de expunere definită. Betonul de referință se alege pe baza experienței de utilizare având în vedere încadrarea în anumite clase de expunere în conformitate cu EN 206 [17].

În cazul în care este cunoscut, se recomandă selectarea unui beton dintr-unul care se află în intervalul mediu al performanței curente. Conceptul de "reprezentativitate" se aplică și materialelor constitutive utilizate pentru producerea betonului.

În practică, "betoanele prescrise" sunt rareori "complet" prescrise, de ex. de obicei se specifică doar tipul de ciment, conținutul de ciment și raportul a/c. Pentru alegerea unui beton de referință consecvent, acesta trebuie să fie "prescris" pe deplin și acesta include specificarea tipului și conținutului de ciment/adaos, clasa de rezistență a cimentului, tipurile de agregate, compoziția granulometrică (sorturile), și conținutul, precum și tipul și conținutul aditivului. Trebuie remarcat faptul că pot exista diferențe de performanță între diferite surse la același tip de ciment, adaos mineral, agregat sau aditiv. Prin urmare, trebuie definită sursa fiecărui material.

Având în vedere dificultățile de a specifica un beton de referință care să ofere o performanță adecvată, se va lua în considerare opțiunea de a testa betoanele de referință de către o autoritate independentă și se va specifica o performanță de referință în locul betonului de

---

referință. Performanța de referință poate fi determinată prin testarea betonului de referință pe cel puțin trei probe sau prin testarea unei serii de betoane care se conformează tuturor dispozițiilor valabile în locul de utilizare și prin selectarea unei valori din intervalul rezultatelor încercărilor ca performanță de referință.

*Performanța de referință* este o valoare pe care betonul candidat trebuie să o atingă sau să o depășească. Se determină prin teste pe betonul de referință sau se alege o valoare selectată din gama de valori rezultate din betoanele de testare care sunt conforme cu dispozițiile valabile la locul de utilizare și valoarea respectivă a luat în considerare și incertitudinea de măsurare a procedurii.

*Rezistența de referință* este rezistența la compresiune a betonului (pe cilindru sau cub în funcție de tipul epruvetei utilizate pentru măsurarea rezistenței la controlul producției) asociată cu performanța de durabilitate a betonului. Modificările de la această valoare sunt utilizate la controlul producției ca indicator al modificărilor în performanța constituenților sau funcționarea instalației. Se consideră ca o reducere a rezistenței sub rezistența de referință indică o reducere potențială a durabilității. Raportul tehnic al CEN/TC104/SC1 [59] stabilește principiile procedurii echivalente de durabilitate și oferă orientări cu privire la selectarea betoanelor de referință sau a performanțelor de referință.

În principiu, procedura este aplicabilă oricărei clase de expuneri, însă, în practică, se limitează la clasele de expunere în cazul în care există metode standardizate de testare acceptate. Aplicarea metodei de durabilitate echivalente nu este adecvată pentru clasa de expunere X0, în care nu există condiții de mediu agresive pentru beton sau armătură.

Experiența dobândită prin aplicarea metodei de testare asociată performanței va ajuta la dezvoltarea modelării duratei de viață. Cu toate acestea, metoda de testare asociată performanței este, în esență, confirmarea faptului că performanța de încercare a unui beton candidat este egală sau mai bună decât un beton de referință la vârsta la care se testează betoanele. Când testul de laborator nu ar putea să dea o indicație cantitativă precisă a performanței reale in situ a betonului, atunci este necesar să se garanteze că testul specificat va oferi rezultate verosimile pentru a fi un indicator al performanței in situ. În medii naturale, betonul va continua să câștige rezistență și rezistență la penetrarea agenților agresivi în timp, deși cu o viteză mai scăzută. Din acest motiv, este necesar să se specifice o perioadă de păstrare și o vârstă de testare, care pot furniza rezultate rezonabile orientative, de exemplu pentru cimenturi cu materiale cementoide suplimentare, cu un ritm mai lent de reacție, betoanele ar trebui să fie testate la vârste mai târzii.

Tabelul IV.5. prezintă o comparație a surselor de incertitudine legate de aplicarea unor metode diferite pentru specificarea durabilității și modul în care acestea sunt luate în considerare sau controlate.

Tabelul IV.5. - Specificații pentru durabilitate și surse de incertitudine [59].

| Metoda de specificare a betonului durabil | Surse de incertitudine                                                                                                                                                  | Controlul incertitudinii sau modul în care se ține seama de incertitudine                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Specificarea valorii limită               | Selecția constituenților din cei permisi                                                                                                                                | Performanța se bazează pe setul de componente care dă performanțele mai slabe.                                                                                                                                                              |
|                                           | Variația dintre componentele betonului specificate și cele furnizate, variația calității componentelor                                                                  | Controlul producției din stație și atestarea conformității<br>Inspecție prin încercări                                                                                                                                                      |
|                                           | Turnarea, compactarea, finisarea și întărirea                                                                                                                           | Controlul pe șantier<br>Parțial prin factorul de siguranță pentru materiale (de obicei 0,85 pentru rezistență)                                                                                                                              |
| Procedura de durabilitate echivalentă     | Stabilirea faptului că un beton candidat are performanțe la fel de bune sau mai bune decât betonul de referință.                                                        | O combinație de luat în considerare variabilitatea testului, numărul de teste și nivelul de importanță                                                                                                                                      |
|                                           | Variația dintre componentele betonului specificate și cele furnizate, variația calității componentelor                                                                  | Controlul producției din stație și atestarea conformității<br>Inspecție prin încercări                                                                                                                                                      |
|                                           | Turnarea, compactarea, finisarea și întărirea                                                                                                                           | Controlul pe șantier<br>Parțial prin factorul de siguranță pentru materiale (de obicei 0,85 pentru rezistență)                                                                                                                              |
|                                           | Rata de îmbunătățire a performanței cu timpul, o problemă în cazul în care betonul candidat nu își îmbunătățește performanțele la fel de rapid ca betonul de referință. | Se vor folosi materiale similare atât pentru betoane de referință, cât și pentru betoane candidate.<br>sau,<br>Se va selecta un beton candidat la care îmbunătățirea performanțelor după încercarea durabilității echivalente este mai bună |

|                                                                        |                                                                                                           |                                                                                                                                                                                            |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Metoda de specificare a betonului durabil                              | Surse de incertitudine                                                                                    | Controlul incertitudinii sau modul în care se ține seama de incertitudine                                                                                                                  |
|                                                                        |                                                                                                           | decât cea a betonului de referință<br><br>sau,<br><br>Se va realiza testarea durabilității echivalente la o vârstă în care îmbunătățirea performanțelor diferențiate nu este semnificativă |
| Specificațiile de performanță rezultate din modelarea duratei de viață | Relația dintre performanța reală și performanța estimată depinde de robustețea și fiabilitatea modelului. | Toate incertitudinile sunt controlate de proiectant care va specifica cerința de performanță minimă sau caracteristică corespunzătoare.                                                    |

### IV.3.2. Principiile metodei

Evaluarea durabilității echivalente este o procedură care se bazează pe specificațiile tradiționale de valori limită pentru durabilitatea betonului în măsura în care performanța de încercare a unui beton "referință" stabilit este măsurată astfel încât să poată fi propus un beton alternativ care să ofere o performanță egală sau mai bună decât referința.

CEN/ TC 104/SC1 a convenit că orice procedură de durabilitate echivalentă inclusă în cadrul EN 206-1 [17] trebuie să fie susținută de standardele europene de testare și ele se bazează doar parțial pe procedurile stabilite la nivel național.

O caracteristică importantă a acestor principii pentru o procedură europeană este formularea și standardizarea națională a procedurii de testare a durabilității echivalente pentru evaluarea noilor constituenți, extinsă pentru dezvoltarea unor noi valori limită. Aceste valori limită noi (valori limită ale betonului candidat) sunt specifice setului de componente și compoziției care îndeplinesc o performanță de încercare de durabilitate echivalentă dată de un beton de referință. Este important de menționat că aceste noi valori limită nu sunt generice pentru toate betoanele realizate cu un anumit constituent.

Metoda de testare asociată performanței trebuie să determine echivalența unui beton utilizat cu aceeași performanță minimă în aceeași clasă de expunere și durata de viață prevăzută ca pentru betonul de referință sau valoarea de referință. Metoda de testare asociată performanței include cel puțin trei părți:

- Partea 1: stabilirea unei valori de referință sau prescrierea unui beton de referință din care poate fi determinată o valoare de referință ;
- Partea 2: testarea și evaluarea inițială a betonului candidat pentru stabilirea unor valori limită specifice;

---

- Partea 3: controlul continuu al producției și evaluarea conformității la valorile limită stabilite.

Etapa 1: Betoanele candidat sunt testate prin aceleași metode la aceeași vârstă și comparate cu valoarea de referință/betonul de referință. Trebuie avută în vedere incertitudinea măsurării. Durabilitatea echivalentă la o anumită vârstă de testare este realizată atunci când betonul candidat are o valoare măsurată egală sau mai mică decât (adică mai bună decât) valoarea de referință sau valoarea măsurată a betonului de referință adecvat după luarea în considerare a incertitudinii de măsurare. În cazul testului de carbonatare, al testului de difuziune a clorurilor și al testului de îngheț-dezgheț, cu cât este mai mică valoarea măsurată cu atât performanța este mai bună.

Etapa 2: Evaluarea performanței relative a unui beton la o vârstă fragedă (până la un an) poate să nu reflecte în mod corespunzător performanța relativă pe toată durata de viață a structurii datorită efectelor de îmbătrânire. Dacă valoarea de referință sau betonul de referință are un tip similar de ciment/adaos cu betonul candidat, etapa 2 este satisfăcută și se poate presupune că betonul asigură o durabilitate similară pe durata ciclului de viață.

### **IV.3.3. Metode de testare asociate performanței care au fost sau sunt standardizate la nivel european**

O trecere de la specificațiile prescriptive la specificațiile bazate pe performanță reprezintă următorul pas logic în evoluția industriei betonului. Performanțele pe baza specificațiilor se referă la cerințele privind proprietățile mecanice și funcționale ale betonului. Cerințele trebuie să se bazeze pe aprecierea profesională a proiectării încărcărilor și a condițiilor de expunere a elementelor structurale din beton. Conformitatea este verificabilă prin măsurători sau teste pentru a asigura că produsul îndeplinește cerințele dorite. Atribuțiile desemnate pentru atingerea anumitor obiective sunt clare. În cele din urmă, specificațiile bazate pe performanță nu conțin limitări ale procesului, cum ar fi proporțiile amestecului și metodele de execuție.

Proiectarea bazată pe performanță este rareori simplă și niciodată ușoară, dar aplicarea acestui proces poate duce la soluții care să ofere o performanță superioară soluției prescriptive, eliminând în același timp caracteristicile nedorite care rezultă din respectarea strictă a amestecului prescris.

Cerințe impuse unei metode de testare:

- să fie relevantă pentru mecanismul de deteriorare pentru care se compară performanța;
- să aibă o relație stabilită și documentată cu performanța în practică;
- să aibă o precizie cunoscută și adecvată;
- să fie sensibilă la variațiile din compoziția betonului și proporțiile amestecului.

În prezent se folosesc proceduri locale de testare pentru evaluarea performanței noilor constituenți și a betoanelor fiind oportun să se utilizeze astfel de teste. Dacă este posibil, o astfel de testare ar trebui efectuată în paralel cu procedura de testare europeană, astfel încât să se acumuleze experiența cu testele europene și, pe termen lung, Europa să poată adopta proceduri comune de testare.

Tabelul IV.6.- Metode de testare asociate performanței care au fost sau sunt standardizate la nivel european [59]

|                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CEN/TS 12390-9 [45]                                                                                                                                       | Încercarea betonului întărit. Partea 9: Rezistență la îngheț-dezgheț – Exfoliere.                                                                                                                             |
| CEN/TS12390-10 [67]                                                                                                                                       | Încercarea betonului întărit. Partea 10: Determinarea rezistenței la carbonatare relativă a betonului (care în prezent se efectuează în conformitate cu SR CR 12793 [105]).                                   |
| CEN/TS 12390-11 [69]                                                                                                                                      | Încercarea betonului întărit. Partea 11: Determinarea rezistenței la cloruri a betonului, difuzia unidirecțională.                                                                                            |
| CEN/ TS 12390-12 [68]                                                                                                                                     | Încercarea betonului întărit. Partea 12: Determinarea rezistenței de carbonatare potențiale a betonului. Metoda de carbonatare accelerată (care în prezent se efectuează în conformitate cu SR 13379 [104] ). |
| CEN/TR 15177 [80]                                                                                                                                         | Încercarea rezistenței la îngheț-dezgheț a betonului - Deteriorarea structurii interne.                                                                                                                       |
| Nu există clase de expunere în EN 206 [17] pentru abraziune, dar ele există în alte standarde europene și naționale și există metode de testare asociate. |                                                                                                                                                                                                               |

Unele metode de testare, dar nu toate, definesc vârsta betonului la începutul testului. Vârsta betonului la începutul testului va avea o influență asupra rezultatului testului și nu ar trebui să se presupună că un set de betoane testate la o anumită vârstă va avea același rezultat când sunt testate la o vârstă diferită. Metodele de testare legate de performanță pentru beton enumerate în tabelul IV.6. au fost sau sunt standardizate la nivel european (în această listă sunt incluse numai metodele care au fost publicate sub forma de documente tehnice).

Utilizarea metodelor enumerate în tabelul IV.6. este recomandată sau, cel puțin, utilizată în paralel cu metoda locală stabilită.

#### IV.3.4. Determinarea performanțelor de încercare asociate cu durabilitatea echivalentă

Dacă în încercarea inițială pentru clasa de expunere selectată, un beton candidat dă rezultate echivalente cu cele ale betonului de referință specificat sau ale performanței de referință specificate atunci când sunt supuse uneia sau mai multor metode de testare specificate de un laborator independent, se consideră că betonul candidat are o performanță asociată cu durabilitatea echivalentă. Pentru orice evaluare a performanței echivalente, trebuie să existe cel puțin trei rezultate ale fiecărui test pentru betoanele de referință și pentru betoanele candidate. Aceasta poate fi, de exemplu, cel puțin trei rezultate din trei loturi pentru un singur beton

candidat sau cel puțin un rezultat al testului din trei amestecuri diferite realizate cu același set de constituenți.

Unul dintre amestecuri va fi proiectat pentru a oferi performanțele necesare, un amestec cu o performanță mai bună și celălalt amestec cu o performanță mai mică. Proporțiile amestecului care dau performanța de încercare echivalentă pot fi apoi interpolate între cele trei valori măsurate. Performanța de încercare echivalentă și proporțiile amestecurilor asociate nu ar trebui determinate prin extrapolare dincolo de intervalul valorilor testului.

Testarea inițială va conduce la identificarea:

- surselor și tipurilor tuturor componentelor (pot include, de asemenea, sursele și tipurile de constituenți care sunt demonstrate ca similare);
- conținut minim de ciment;
- conținut minim de adaos, în cazul în care se utilizează adaosuri minerale;
- raportul adaos/ciment;
- conținutul minim de particule fine (toate particulele <125μm);

Pentru durabilitate, adică pentru realizarea unei structuri închise, particulele fine sunt definite ca fiind toate particulele cu diametre mai mici decât 125 μm, care cuprind suma particulelor din ciment, adaos și a fracțiunii agregatelor mai mici <125μm.

- rezistența de referință;
- limitarea proporțiilor de amestec pentru producție.

#### Evaluarea etapei 1

Criteriul de acceptare pentru Etapa 1 este o probabilitate de 95% ca performanța medie a betonului candidat să fie mai bună decât a betonului de referință.

Pentru o performanță de referință definită, există o probabilitate de 90% ca valorile medii reale să se încadreze în  $\pm 1,64\sigma_R$  din valoarea măsurată, unde  $\sigma_R$  este abaterea standard a reproductibilității. Pentru rezultatele a "n" teste, valoarea reală medie va fi cu o probabilitate de 95% între:

$$\pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33\sigma_R)^2 - (2.33\sigma_r)^2 \left(\frac{n-1}{n}\right))} \quad (\text{IV.12.})$$

din valoarea măsurată, unde  $\sigma_r$  este abaterea standard de repetabilitate. Valoarea măsurată a betonului candidat trebuie să fie:

≤ performanța de referință

$$\leq \text{valoarea betonului de referință} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33\sigma_R)^2 - (2.33\sigma_r)^2 \left(\frac{n-1}{n}\right))} \text{ unde } n \geq 3.$$

#### Evaluarea etapei a 2-a

Obiectivul etapei a 2-a este de a evalua performanța de durabilitate a unui beton candidat care nu are aceeași viteză de dezvoltare a performanței ca betonul de referință.

Dacă tipul de ciment sau (ciment + adaos) este același atât pentru betonul de referință, cât și pentru betonul candidat, nu este necesară evaluarea etapei a 2-a. Nu este necesară evaluarea etapei 2 pentru clasele de expunere XC, cu excepția cazului în care cimentul pentru betonul candidat este CEM I, CEM II/A-D sau CEM II/L sau CEM II/LL.

Atunci când în betonul de referință sunt folosite alte tipuri de ciment sau de ciment+adaos, betonul de referință va dezvolta o rezistență sporită la carbonatare după vârsta de încercare datorită reacțiilor puzzolanice sau hidraulic latente comparativ cu un beton candidat preparat cu cimenturile listate.

În cazul în care betonul de referință se bazează pe CEM I, CEM II/A-D sau CEM II/L sau CEM II/LL pentru clasele de expunere XD și XS (sau performanța de referință este derivată din aceste tipuri de ciment), nu este necesară evaluarea etapei 2.

În clasele de expunere XF3 și XF4, o evaluare în etapa 2 este adecvată numai dacă cimentul sau cimentul+adaosul din betonul candidat cuprinde 40% sau mai mult de cenușă zburătoare conform cu EN 450-1 [62] sau zgura conform cu EN 15167-1 [63].

Validarea periodică se efectuează prin prelevarea unui eșantion din betonul de producție și prin testarea acestuia prin metoda utilizată la testarea inițială. Dacă rezultatul este între:

$$\pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33\sigma_R)^2 - (2.33\sigma_r)^2 \left(\frac{n-1}{n}\right))}$$

din performanța de referință, proporțiile amestecurilor sunt validate fără modificări.

O problemă a unui beton de referință este că performanța măsurată poate diferi între laboratoare, iar performanța de referință a materialelor poate varia în funcție de timp.

Vârsta la care este testat betonul va influența rezultatul. În general, cu cât este mai betonul are o vârstă mai mare, cu atât performanța acestuia este mai bună (dar există și excepții). Este necesară validarea periodică a performanței la o perioadă maximă de timp cuprinsă între 3 și 5 ani.

Se recomandă insistent ca testarea inițială și revalidarea periodică să fie întreprinse de o parte independentă de producătorul de beton și aceasta testare să fie efectuată de laboratoare acreditate sau aprobate la nivel național, pentru procedura de încercare.

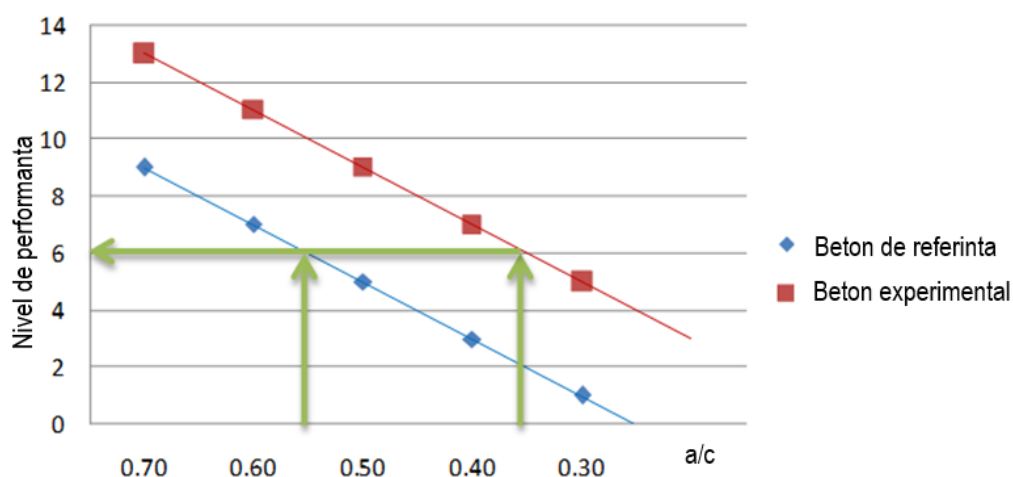


Figura IV.3. - Aplicarea conceptului de performanță echivalentă

---

Ilustrarea principiului de obținere a raportului optim apă/ciment pentru betonul candidat aplicând procedura de durabilitate echivalentă funcție de nivelul ales al performantei de referință a betonului de referință în clasa de expunere selectată.

#### **IV.4. Conceptul de performanță echivalentă a betonului în Codul olandez CEN/TR 16563: 2013 (VC12 WG4)**

Conceptul de performanță echivalentă (sau conceptul de durabilitate echivalentă) a betonului preparat cu cimenturi compozite a apărut în premieră într-o anexa informativă a EN 206-1 în anul 2002 și reprezintă o metodă de abordare a durabilității betoanelor în funcție de un anumit nivel de performanță specific unui domeniu de utilizare.

Metodele de performanță sunt utilizate pentru a determina dacă un beton realizat cu un ciment "nou" poate fi utilizat în aceleași condiții (respectiv cu aceleași valori limită ale compoziției de beton) ca un beton cu ciment care a fost testat în timp sau pentru a autoriza utilizarea betonului care conține adaosuri și a cărui valoare limită de compoziție este diferită de cea recomandată.

Norma CEN/TR 16563:2013 (VC12 WG4) [61] indică modul în care se poate aprecia că o nouă componentă sau o compoziție de beton preparat cu ciment cu adaos are aceeași performanță de durabilitate ca cea deja existentă și este acceptată pentru o componentă/compoziție de beton.

Conceptul de performanță echivalentă a betonului a fost utilizat în Olanda în ultimii 15 ani pentru combinații de cenușă zburătoare și ciment CEM I și recent a fost introdusă posibilitatea combinării cimentului cu zgura granulată de furnal măcinată și cenușă zburătoare.

Recomandarea VC12 WG4 [61] se aplică evaluării adecvate a unei combinații de unul sau mai multe adaosuri specifice (adaos mineral pentru care sursa de fabricație și metoda de producție sunt bine documentate) și unul sau mai multe cimenturi specifice pentru utilizare în beton. Toți constituenții cimentului menționați în EN 197-1 [8], cu excepția clincherului din ciment Portland, pot fi utilizați ca adaosuri minerale.

În cazul în care aspectele de durabilitate, care urmează să fie testate conform recomandării, ale betonului de încercat sunt egale sau mai bune decât cele ale betonului de referință, performanța betonului de încercat este evaluată ca fiind echivalentă cu cea a betonului de referință. Dacă se demonstrează, în urma acestei recomandări, că performanța betonului de încercat este echivalentă cu betonul de referință, a cărui compoziție corespunde unei clase de expunere specifică, betonul de încercat este adecvat pentru utilizarea în această clasă de expunere.

Criteriile pentru evaluare avute în vedere pentru a demonstra performanța echivalentă a betonului de încercat, în funcție de clasa de expunere, presupun că trebuie testate unul sau mai multe dintre următoarele comportări privind durabilitatea :

- rezistența la carbonatare,
- rezistența la penetrarea clorurilor,
- rezistență la îngheț-dezgheț cu agenți de dezghețare,
- rezistența la apa de mare,

- rezistența la sulfat.

Reacția alcalii-silice nu face parte din această recomandare, dar sunt luate măsuri în Recomandarea VC12 WG4 [61] pentru a preveni deteriorarea betonului prin expansiune datorată acestei reacții.

Compoziția betonului de referință ar trebui:

- să respecte cerințele pentru clasa de expunere aplicabilă,
- să fie fabricat cu un ciment de referință aparținând clasei de expunere aplicabilă în conformitate cu tabelul IV.7.

Unul sau mai multe cimenturi de referință pot fi utilizate pentru testarea aspectelor de durabilitate diferite.

Tabelul IV.7. - Tipuri de cimenturi de referință în funcție de clasa de expunere [61]

| Clasa de expunere | Tipuri de cimenturi de referință |         |            |            |            |                  |                  |
|-------------------|----------------------------------|---------|------------|------------|------------|------------------|------------------|
|                   | CEM I                            | CEM/A-S | CEM II/B-S | CEM II/A-V | CEM II/B-V | CEM III/A        | CEM III/B        |
| XC                | x                                | x       | x          | x          | x          | x                | x                |
| XD                |                                  |         |            |            | x          | x <sup>(1)</sup> | x                |
| XS                |                                  |         |            |            | x          | x <sup>(1)</sup> | x                |
| XF                | x                                | x       | x          | x          | x          | x <sup>(2)</sup> | x <sup>(3)</sup> |
| XA                |                                  |         |            |            | x          |                  | x                |

(1) conținut de zgură  $\geq 50\%$ ,

(2) conținut de zgură  $<50\%$ ,

(3) numai pentru betonul de încercat, fabricat cu un adaos de zgură, cu un conținut de zgură practic identic cu cel al cimentului de referință.

Pentru o anumită clasă de expunere, cimenturile de referință sunt selectate din cele utilizate în mod obișnuit, în acest scop, în clasa de expunere în Olanda.

Compoziția betonului de încercat trebuie să respecte următoarele cerințe:

- conținutul principalilor constituenți (așa cum se menționează în EN 197-1 [8]) ai combinației de cimenturi și adaosuri, inclusiv conținutul de adaos al cimentului, ar trebui să se încadreze în intervalul definit de EN 197-1 [8] pentru tipul de ciment corespunzător,
- conținutul de liant trebuie să fie egal sau mai mare decât conținutul minim de ciment pentru cel aplicabil din clasa de expunere;
- raportul apă/liant trebuie să fie mai mic sau egal cu raportul maxim aplicabil în clasa de expunere.

Aspectele de durabilitate relevante în raport cu clasa de expunere pentru care trebuie să fie testate sunt date în tabelul IV.8.

Pentru clasa de expunere XA numai rezistența la sulfat face parte din programul de testare. Combinații ciment-adaos, care îndeplinesc cerințele, sunt permise pentru XA numai în cazul în care conținutul de sulfat din sol sau din apa duce la încadrarea în clasa XA. Rezistența la alte componente agresive este în afara domeniului de aplicare al recomandării. Un beton de încercat este adecvat pentru aplicarea într-o anumită clasă de expunere dacă îndeplinește criteriile pentru toate aspectele de durabilitate relevante pentru clasa de expunere.

Tabelul IV.8. Aspecte de durabilitate asociate cu clasa de expunere [61].

| Clasa de expunere | Carbonatare | Penetrare cloruri | Îngheț-dezgheț cu agenți de dezghețare | Rezistența la săruri marine | Rezistența la atac sulfatic |
|-------------------|-------------|-------------------|----------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| XC                | X           |                   |                                        |                             |                             |
| XD                |             | X                 |                                        |                             |                             |
| XS                |             | X                 |                                        | X                           |                             |
| XF                |             |                   | X                                      |                             |                             |
| XA                |             |                   |                                        |                             | X                           |

Pentru adaosurile de cenușă zburătoare și zgură, testul pentru fiecare aspect de durabilitate este realizat pe o singură compoziție de beton cu un anumit dozaj de liant și raport apa/liant. În cazul în care betonul de încercat îndeplinește cerințele pentru o anumită clasă de expunere, atunci combinația este permisă pentru întreaga gamă a dozajului de liant și raport apa/liant, pentru această clasă de expunere.

Evaluarea tuturor aspectelor de durabilitate se bazează pe compararea a n probe (a cimentului și a adaosului) și epruvetelor de testare realizate din aceste probe. Aprobarea sau respingerea se bazează pe diferența dintre rezultatul testului dintre betonul de încercat și betonul de referință. Valoarea limită se bazează pe următorul principiu: pentru fiecare aspect de durabilitate este definită o diferență relativă "d" [%], care este considerată inacceptabilă. Cu alte cuvinte, o evaluare a betonului de încercat care conduce la o diferență medie negativă "d" ar trebui să conducă la o probabilitate mare de respingere pentru betonul de încercat.

Condițiile de aplicare în conformitate cu această metodă sunt:

- pentru fiecare aspect de durabilitate se stabilește o diferență "d" [%] care este considerată inacceptabilă;
- riscul este stabilit la 10% din această diferență.

Pentru fiecare aspect al durabilității, evaluarea se bazează pe parametrul de evaluare  $T_j$ :

$$T_j = \sqrt{\frac{[m_r - \frac{m_t}{1+0.01d_j}]}{s/\sqrt{n}}} \quad (IV.13.)$$

$$\text{și } s = \sqrt{\{s_r^2 + \frac{s_t^2}{(1+0.01d_j)^2}\}} \quad (IV.14.)$$

unde:  $m_r$  este media rezultatelor testelor obținute pe n probe din betonul de referință;

$m_t$  - media rezultatelor testelor obținute pe n probe din betonul de încercat;

$s_r$  - abaterea standard a rezultatelor încercărilor obținute pe epruvetele betonului de referință;

$s_t$  - abaterea standard a rezultatelor încercărilor obținute pe epruvetele betonului de încercat;

n - numărul de probe;

$d_j$  - valoarea limită a aspectului de durabilitate  $j$ , așa cum se arată în tabelul IV.9.

Tabelul IV.9. - Valori limita pentru "d" [61]

| Aspectul durabilității $j$             | Diferența "d" (%) care determină respingerea cu o probabilitate de 90% |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Carbonatare                            | +30                                                                    |
| Penetrare cloruri                      | +30                                                                    |
| Îngheț-dezgheț cu agenți de dezghețare | +30                                                                    |
| Rezistența la săruri marine            | +40                                                                    |
| Rezistența la atac sulfatic            | +40                                                                    |

Pentru validare,  $T$  trebuie să fie mai mare decât valorile limită indicate în tabelul IV.10.

Tabelul IV.10. - Valori limită pentru  $T$

| Numărul de probe ( $n$ ) | Valoare limită pentru $T$ |
|--------------------------|---------------------------|
| 3                        | 1.533                     |
| 4                        | 1.440                     |
| 5                        | 1.397                     |
| 6                        | 1.372                     |
| 7                        | 1.356                     |
| 8                        | 1.345                     |
| 9                        | 1.337                     |
| 10                       | 1.330                     |
| 11                       | 1.325                     |
| 12                       | 1.321                     |

Metodele de testare pentru cele 5 aspecte de durabilitate se vor alege în ordinea preferințelor după:

- standarde europene armonizate,
- standarde europene nearmonizate,
- standarde naționale,
- instrucțiuni sau ghiduri.

Atât pentru carbonatare, cât și pentru penetrarea clorurilor poate fi utilizată metoda naturală și/sau metoda accelerată. Metoda naturală este metoda de referință. În cazul în care se folosesc ambele metode, metoda naturală este decisivă pentru evaluare. În primul rând, trebuie efectuată o testare inițială pentru o compoziție ciment-adaos și în cazul în care compoziția este acceptată, se efectuează în fiecare an un test de verificare.

## IV.5. Conceptul de performanță echivalentă a betonului în metoda belgiană

Reglementarea națională belgiană NBN B 15-100 - Norme belge - Methodologie pour l'evaluation et l'attestation a l'emploi de ciments et d'additions de type II destines du beton, 2008 [64] menționează în mod clar metoda de testare precum și modul în care se aplică performanța

de referință a betonului în clasa de expunere selectată (XC, XD, XS, XF și XA). În clasele de expunere XC, XF, XA și într-o clasă specială de expunere, de atac chimic complex al apei de mare se admit depășiri ale performanței de referință cu maximum 20% la betonul candidat față de betonul de referință, iar pentru clasele de expunere XS și XD aceste depășiri pot fi de maximum 40%.

Tabelul IV.11. - Cadrul general de aplicare a conceptului de performanță echivalentă la beton [38]

|                                                                                             |                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Beton de referință                                                                          | Beton candidat                            |
| Betoane / mortare preparate cu aceleași sorturi de agregate, același aditiv, aceleași surse |                                           |
| Ciment de referință specific                                                                |                                           |
| Beton de referință fără adaos în beton                                                      | Beton candidat cu adaos specific în beton |
| Același laborator                                                                           |                                           |
| Încercări efectuate simultan                                                                |                                           |
| Compararea rezultatelor sau performanțelor                                                  |                                           |

Criteriile de performanță acceptate în aceasta reglementare tehnică belgiană sunt:

- pentru determinarea contracției axiale a betonului/cimentului:

Contracția axială a betonului candidat trebuie să fie comparabilă cu contracția axială a betonului de referință înmulțită cu un coeficient de siguranță  $\theta$  care ține seama de precizia de măsurare și nivelul de siguranță ales.

$$\Delta_{\text{candidat}} \leq \theta \times \Delta_{\text{referință}} \quad (\text{IV.15.})$$

Coeficientul  $\theta$  este egal cu 1,20 și este introdus în regula de acceptare pentru a ține seama de precizia metodei de testare și variațiile statistice ale rezultatelor testelor.

- pentru determinarea absorbției aparente a betonului (determinată după păstrarea probelor în laborator în condiții standard și notată  $A_A$ ) și a absorbției la masă constantă a betonului (determinată după uscarea completă a probelor în etuvă și notată  $A_{ct}$ )

Absorbția aparentă medie a betonului candidat trebuie să fie mai redusă decât absorbția aparentă medie a betonului de referință înmulțită cu un coeficient de siguranță  $\theta$  care ține seama de precizia de măsurare și nivelul de siguranță ales.

Absorbția medie la masă constantă a betonului candidat trebuie să fie mai redusă decât absorbția medie la masă constantă a betonului de referință înmulțită cu un coeficient de siguranță  $\theta$  care ține seama de precizia de măsurare și nivelul de siguranță ales.

$$A_{A,\text{candidat}} \leq \theta \times A_{A,\text{referință}} \quad (\text{IV.16.})$$

$$A_{ct,\text{candidat}} \leq \theta \times A_{ct,\text{referință}} \quad (\text{IV.17.})$$

- pentru permeabilitatea betonului:

Adâncimea medie de pătrundere a apei în betonul preparat cu ciment candidat trebuie să fie mai redusă decât adâncimea medie de pătrundere a apei în betonul preparat cu ciment de referință înmulțită cu un coeficient de siguranță  $\theta$  care ține seama de precizia de măsurare și nivelul de siguranță ales

$$X_{\text{candidat}} \leq \theta \times X_{\text{referință}} \quad (\text{IV.18.})$$

- pentru determinarea porozității aparente a betonului (determinată după păstrarea probelor în laborator în condiții standard și notată PA) și a porozității standard a betonului (determinată după uscarea completă a probelor în etuva și notată Pct)

$$P_{A,candidat} \leq \theta \times P_{A,referință} \quad (IV.19.)$$

$$P_{ct,candidat} \leq \theta \times P_{ct,referință} \quad (IV.20.)$$

- pentru rezistența la carbonatare:

Adâncimea medie de carbonatare a betonului candidat determinată în testul de carbonatare accelerată la 56 zile trebuie să fie mai mică sau maxim egală cu 1.20 ori adâncimea medie de carbonatare a betonului de referință, incluzând și precizia de măsurare:

$$d_{c,candidat} \leq 1.20 \times d_{c,referință} \quad (IV.21.)$$

- pentru rezistența la îngheț-dezgheț fără săruri de dezghețare:

Valoarea scăderii rezistenței medii la întindere prin despicare a betonului candidat trebuie să fie mai mică sau maxim egală cu 1.20 ori valoarea scăderii rezistenței medii la întindere prin despicare a betonului de referință, incluzând și precizia de măsurare:

$$\Delta f_{ct,candidat} \leq 1.20 \times \Delta f_{ct,referință} \quad (IV.22.)$$

- pentru rezistența la îngheț-dezgheț cu săruri de dezghețare:

Valoarea pierderii medii de masă a betonului candidat trebuie să fie mai redusă sau maxim egală cu 1.20 ori valoarea pierderii medii de masă a betonului de referință, incluzând și precizia de măsurare:

$$P_{candidat} \leq 1.20 \times P_{referință} \quad (IV.23.)$$

- pentru rezistența la penetrarea clorurilor:

Valoarea medie a coeficientului de difuzie a betonului candidat trebuie să fie mai redusă sau maxim egală cu 1.40 ori valoarea medie a coeficientului de difuzie a betonului de referință, incluzând și precizia de măsurare:

$$D_{cl,candidat} \leq 1.40 \times D_{cl,referință} \quad (IV.24.)$$

Prin intermediul conceptului de performanță echivalentă prezentat în această reglementare tehnică se poate compara comportarea betonului candidat față de cea a betonului de referință în diferitele clase de expunere.

În capitolul următor au fost testate compoziții de beton preparate cu același tip de adaos mineral, introdus în ciment și respectiv în beton, cu același procent de adaos și același raport a/c echivalent, analizându-se rezultate obținute prin prisma specificațiilor prescriptive și a conceptului de performanță echivalentă a betonului.

## **IV.6. Evoluția în timp a rezistenței la compresiune a betoanelor preparate cu cimenturi compozite.**

Prezența adaosurilor în beton micșorează viteza de întărire în faza inițială și determină o evoluție ulterioară a rezistențelor, dependentă în mare măsură de gradul de umiditate. Dacă procente de adaos din ciment depășesc valoarea de 30% sau raportul a/c > 0.8 întărirea inițială

este încetinită, în schimb pentru rapoarte  $a/c < 0.4$  întărirea inițială este accelerată. Prescripțiile de proiectare românești și europene în vigoare prevăd stabilirea caracteristicilor de rezistență ale betonului la vârsta de 28 zile, considerând că sporul de rezistență pe perioade mai mari de timp ar reprezenta o suplimentare a coeficientului de siguranță al structurii.

În cazul unei structuri din beton exploatată într-un mediu umed s-a constatat că are rezistențe mecanice superioare față de exploatarea betonului într-un mediu uscat fără o tratare ulterioară, dar în ambele situații s-a observat o evoluție favorabilă a rezistențelor mecanice în timp.

Rezistența la compresiune se determină:

- în cadrul încercărilor preliminare, care au ca scop stabilirea compoziției betonului ce urmează a fi folosit la executarea lucrării, stabilirea regimului de tratare termică;
- în cadrul încercărilor de control în diferite faze ale procesului de execuție (decofrare, tratare termică, transfer, manipulare, dare în exploatare etc);
- pentru verificarea clasei betonului în cursul execuției;
- pentru verificarea calității betonului din elemente de construcții.

Verificarea clasei se efectuează pe epruvete confecționate, păstrate și încercate conform standardelor la vârsta de 90 zile pentru betoane hidrotehnice masive și la 28 zile pentru betoanele destinate celorlalte categorii de construcții.

Deși bazate pe principii utilizate de mai multă vreme, prevederile actuale din standardul european SR EN 1992-1-1 [33] privind caracterizarea evoluției în timp a rezistenței la compresiune a betonului și evaluarea rezistenței sale la diferite perioade de timp prin încercări în laborator conduc la obținerea unor rezultate diferite față de realitate.

În cazul în care este nevoie să se specifice rezistența betonului la alte vârste decât la 28 de zile se folosesc relațiile următoare:

$$f_{ck}(t) = f_{cm}(t) - 8 \text{ MPa} \quad \text{pentru } 3 < t < 28 \text{ zile} \quad (\text{IV.25.})$$

$$f_{ck}(t) = f_{ck} \quad \text{pentru } t \geq 28 \text{ zile}$$

în care rezistența medie la vârsta  $t$  se evaluează (dacă epruvetele au fost păstrate în condițiile specificate în EN 12390-2 [20]) cu relațiile:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \times f_{cm} \quad (\text{IV.26.})$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp\{s[1-(28/t)^{1/2}]\} \quad (\text{IV.27.})$$

în care:  $f_{cm}(t)$  este rezistența medie la compresiune a betonului la vârsta  $t$  zile;

$f_{cm}$  - rezistența medie la compresiune a betonului la vârsta 28 zile;

$\beta_{cc}(t)$  - coeficient ce depinde de vârsta betonului;

$t$  - vârsta betonului, în zile;

$s$  - coeficient ce depinde de tipul de ciment având valorile:

$s = 0.20$  pentru ciment de clasă de rezistență CEM 42.5 R; CEM 52.5 N și CEM 52.5 R (clasa R cu întărire rapidă);

$s = 0.25$  pentru ciment de clasă de rezistență CEM 32.5 R; CEM 42.5 N (clasa N cu întărire normală);

$s = 0.38$  pentru ciment de clasă de rezistență CEM 32.5 N (clasa S cu întărire întârziată).

La momentul actual acest standard ține seama prin relația de calcul dată numai de clasa de rezistență a cimentului cu care este preparat betonul respectiv, prin intermediul coeficientului  $s$ , de intervalul de timp stabilit și de rezistența medie la compresiune a betonului la vârsta de 28 de zile.

Noua propunere pentru actualizarea standardului european SR EN 1992-1-1:2004 [60] din octombrie 2017 aduce ca element de noutate față de prevederile anterioare considerarea unor termene de timp de referință cuprinse între 28 și 90 de zile privind determinarea evoluției în timp a rezistenței la compresiune a betonului, care constau, în principal, în creșterea gradului de încredere prin utilizarea, ca date de referință a rezultatelor obținute pe un număr relativ mare de epruvete încercate în laborator.

Pe aceasta bază, în propunerea de revizuire a standardului SR EN 1992-1-1:2004 [60], rezistența la compresiune a betonului definește clasele de rezistență ale betonului, care reprezintă rezistența caracteristică a betonului pe epruvete cilindrice cu probabilitate de nerealizare de 5% în conformitate cu EN 206 [17], determinată la o vârstă  $t_{ref}$  care ar trebui să fie luată ca:

(i) 28 de zile în general

(ii) sau poate fi luată între 28 și 91 de zile pentru aplicații unde rezistența se dezvoltă lent.

Clasele de rezistență ale betonului sunt notate C12-C100, în funcție de rezistența caracteristică la compresiune a betonului numai pe epruvete cilindrice și există restricții privind domeniul de aplicare al betonului cu agregate ușoare sau cel al betonului cu agregate reciclate.

Rezistența la compresiune a betonului la o vârstă  $t$  depinde de tipul de ciment, temperatură și condițiile de întărire. Pentru o temperatură medie de 20°C și întărire în conformitate cu EN 13670 [84] rezistența medie la compresiune a betonului la diferite vârste  $f_{cm}(t)$  poate fi estimată cu relațiile:

$$f_{ck}(t) = f_{cm}(t) - 8 \text{ MPa pentru } t < t_{ref} \text{ (în zile)} \quad (IV.28.)$$

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \times f_{cm} \quad (IV.29.)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp\{s[1-(t_{ref}/t)^{1/2}](28/t_{ref})^{1/2}\} \quad (IV.30.)$$

în care:  $f_{cm}(t)$  este rezistența medie la compresiune a betonului la vârsta  $t$  zile;

$f_{cm}$  - rezistența medie la compresiune a betonului la vârsta  $t_{ref}$ ;

$\beta_{cc}(t)$  - coeficient ce depinde de vârsta betonului;

$t$  - vârsta betonului, în zile;

$s$  - coeficient ce depinde de tipul de ciment și clasa betonului conform tabelului IV.12.

Diferența de abordare aduce după sine o independentă mai mare față de cunoașterea mai detaliată a caracteristicilor de compoziție și tratare a betoanelor analizate, având în vedere faptul că procedura poate fi utilizată pentru identificarea tipului de ciment cu adaos mineral pentru care timpul de referință este altul decât cel de 28 de zile.

Tabelul IV.12. - Valorile coeficientului s pentru diferite tipuri de cimenturi și diferite clase de beton [60]

| Clasa betonului  | Rezistențe inițiale mari             | Rezistențe inițiale normale | Rezistențe inițiale mici |
|------------------|--------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
|                  | CEM 42,5 R, CEM 52,5 N și CEM 52,5 R | CEM 32,5 R, CEM 42,5 N      | CEM 32,5 N               |
| C 35 și mai mici | 0.3                                  | 0.35                        | 0.4                      |
| C 40 - C 55      | 0.2                                  | 0.25                        | 0.35                     |
| C 60 și mai mari | 0.1                                  | 0.17                        | 0.3                      |

În acest scop au fost analizate o serie de betoane preparate cu cimenturi cu diferite procente de zgura granulată de furnal măcinată și/sau cenușă zburătoare, cu diferite rapoarte a/c și testate la diferite perioade de timp, iar rezultatele sunt prezentate în capitolul următor.

---

## CAPITOLUL V.

### CERCETARI EXPERIMENTALE PENTRU STABILIREA PARTICULARITATILOR LEGATE DE COMPORTAREA BETOANELOR CU CIMENTURI COMPOZITE

Necesitatea încercării materialelor și a elementelor din beton armat rezultă și din faptul că în procesul de proiectare și realizare ale structurilor trebuie să se folosească materiale noi și soluții optime care să satisfacă comportarea în anumite condiții specifice de solicitare sau de exploatare. Dezvoltarea laturii experimentale pentru verificarea utilizării unor materiale moderne, ecologice și economice cum ar fi cimenturile cu adaosuri minerale, în laboratoare dotate cu aparatură performantă și specialiști în domeniu, este necesară pentru acumularea mult mai amplă și mai organizată a rezultatelor testelor efectuate, astfel ca ele să constituie baza unor normative și standarde noi. Pentru studiul comportării betoanelor cu cimenturi compozite s-au testat betoane preparate cu tipuri de ciment diferite, cu mențiunea că s-au folosit și rezultate experimentale publicate în studii tehnice și articole de specialitate, cu acordul autorilor.

În cadrul acestui capitol se prezintă rezultatele unor teste de laborator care să evidențieze variația rezistenței la compresiune a unui beton realizat cu același tip de ciment compozit provenit din mai multe surse, variația în timp a rezistenței la compresiune a betoanelor preparate cu diverse tipuri de cimenturi compozite și aplicarea metodelor de performanță pentru determinarea caracteristicilor de rezistență și durabilitate a betoanelor cu cimenturi compozite.

#### **V.1. Rezistențele la compresiune ale betoanelor preparate cu același tip de ciment compozit provenit din surse diferite**

Studiul de față își propune să stabilească dacă în cazul utilizării aceluiași tip de ciment (în sensul clasificării din SR EN 197 [8]) există diferențe semnificative în ceea ce privește performanțele betonului proaspăt și întărit. Cercetările experimentale au constat în determinarea unor performanțe ale betonului preparat cu ciment tip II/A-S 42,5R (clinker 80-94%, zgură granulată de furnal măcinată 6-20%) și cu cimentul tip CEM III/A 42.5 N-LH (clinker 35-64%, zgură granulată de furnal măcinată 36-65%) în ceea ce privește variația raportului a/c pentru același dozaj de ciment, variația rezistenței la compresiune a betonului în funcție de sursă la același raport a/c și caracterizarea evoluției rezistenței betonului sub aspectul coeficientului "r" în funcție de care se stabilește durata de tratare ulterioară a betonului proaspăt după turnare, raportată la temperatura măsurată la suprafața betonului.

##### **❖ Beton cu ciment CEM II/A-S 42.5R (clinker 80-94%, zgură granulată de furnal măcinată 6-20%)**

Prima etapă a cercetărilor experimentale a constat în analiza comparativă a caracteristicilor betonului proaspăt și a caracteristicilor de rezistență ale betonului la vârstele de 2, 7, 28 și 56 zile preparat cu același tip de ciment compozit CEM II/A-S și cu dozaje de ciment cuprinse între 200 – 400 kg/m<sup>3</sup> dar provenind din trei surse diferite.

În tabelele V.1-V.4 sunt prezentate compozițiile betoanelor și caracteristicile betoanelor proaspete preparate cu CEM II/A-S 42,5R provenite din sursele a, b și respectiv c. Încercările betoanelor în stare proaspătă pentru determinarea tasării, a densității aparente și a conținutului de aer cu metoda prin presiune au fost efectuate în conformitate cu standardele SR EN 12350-2 [13], SR EN 12350-6 [11] și respectiv SR EN 12350-7 [12].

Tabelul V.1. – Compozițiile betoanelor preparate cu CEM II/A-S 42,5R - Sursele a, b și c

| Dozaj ciment<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Aditiv<br>superplast<br>1% (l) | Agregate<br>(kg) | sort 0-4<br>mm (kg) | sort 4-8<br>mm (kg) | sort 8-16<br>mm (kg) |
|--------------------------------------|--------------------------------|------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 200                                  | 1.70                           | 1879             | 846                 | 432                 | 601                  |
| 220                                  | 1.86                           | 1850             | 832                 | 425                 | 592                  |
| 240                                  | 2.03                           | 1832             | 825                 | 421                 | 586                  |
| 260                                  | 2.20                           | 1803             | 811                 | 415                 | 577                  |
| 280                                  | 2.37                           | 1786             | 804                 | 411                 | 571                  |
| 300                                  | 2.54                           | 1769             | 796                 | 407                 | 566                  |
| 320                                  | 2.71                           | 1752             | 788                 | 403                 | 560                  |
| 340                                  | 2.88                           | 1734             | 781                 | 399                 | 555                  |
| 360                                  | 3.05                           | 1717             | 773                 | 395                 | 550                  |
| 380                                  | 3.22                           | 1675             | 754                 | 385                 | 536                  |
| 400                                  | 3.39                           | 1658             | 746                 | 381                 | 531                  |

Tabelul V.2. – Caracteristicile betoanelor proaspete preparate cu CEM II/A-S 42,5R - Sursa a

| Dozaj ciment<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Apa<br>(l) | a/c  | Tasare<br>mm | Densitate<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Aer occlus<br>(%) |
|--------------------------------------|------------|------|--------------|-----------------------------------|-------------------|
| 200                                  | 203        | 1.02 | 100          | 2283                              | 4.4               |
| 220                                  | 190        | 0.87 | 100          | 2268                              | 4.5               |
| 240                                  | 204        | 0.86 | 105          | 2298                              | 4.3               |
| 260                                  | 193        | 0.75 | 100          | 2291                              | 4.0               |
| 280                                  | 194        | 0.70 | 100          | 2293                              | 4.1               |
| 300                                  | 182        | 0.61 | 100          | 2286                              | 4.2               |
| 320                                  | 180        | 0.57 | 100          | 2279                              | 4.1               |
| 340                                  | 186        | 0.56 | 100          | 2287                              | 4.2               |
| 360                                  | 190        | 0.54 | 100          | 2316                              | 4.2               |
| 380                                  | 191        | 0.51 | 110          | 2292                              | 4.0               |
| 400                                  | 184        | 0.47 | 110          | 2299                              | 3.9               |

Tabelul V.3. – Caracteristicile betoanelor proaspete preparate cu CEM II/A-S 42,5R - Sursa b

| Dozaj ciment<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Apa (l) | a/c  | Tasare<br>mm | Densitate<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Aer occlus<br>(%) |
|--------------------------------------|---------|------|--------------|-----------------------------------|-------------------|
| 200                                  | 196     | 0.98 | 110          | 2277                              | 4.5               |
| 220                                  | 206     | 0.94 | 115          | 2254                              | 4.5               |
| 240                                  | 184     | 0.77 | 120          | 2243                              | 4.3               |
| 260                                  | 190     | 0.74 | 100          | 2256                              | 3.9               |
| 280                                  | 193     | 0.69 | 100          | 2295                              | 3.8               |
| 300                                  | 182     | 0.61 | 115          | 2241                              | 3.8               |
| 320                                  | 181     | 0.57 | 100          | 2281                              | 4.1               |
| 340                                  | 175     | 0.52 | 100          | 2296                              | 4.0               |
| 360                                  | 173     | 0.49 | 100          | 2315                              | 3.9               |
| 380                                  | 179     | 0.48 | 100          | 2292                              | 3.8               |
| 400                                  | 185     | 0.47 | 100          | 2311                              | 3.7               |

Tabelul V.4. – Caracteristicile betoanelor proaspete preparate cu CEM II/A-S 42,5R - Sursa c

| Dozaj ciment<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Apa (l) | a/c  | Tasare<br>mm | Densitate<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Aer oclus<br>(%) |
|--------------------------------------|---------|------|--------------|-----------------------------------|------------------|
| 200                                  | 215     | 1.08 | 100          | 2277                              | 4.1              |
| 220                                  | 185     | 0.85 | 100          | 2268                              | 4.3              |
| 240                                  | 194     | 0.82 | 100          | 2271                              | 4.3              |
| 260                                  | 190     | 0.74 | 100          | 2240                              | 4.2              |
| 280                                  | 187     | 0.68 | 100          | 2278                              | 4.2              |
| 300                                  | 188     | 0.64 | 105          | 2296                              | 4.2              |
| 320                                  | 184     | 0.58 | 100          | 2276                              | 3.9              |
| 340                                  | 185     | 0.55 | 100          | 2261                              | 4.3              |
| 360                                  | 188     | 0.53 | 100          | 2291                              | 4.2              |
| 380                                  | 183     | 0.49 | 100          | 2296                              | 3.8              |
| 400                                  | 182     | 0.46 | 110          | 2296                              | 3.8              |

În figurile V.1. si V.2. se prezintă variația raportului a/c pentru betoanele cu cimentul tip CEM II/A-S cu dozaje diferite de ciment provenit din cele trei surse.

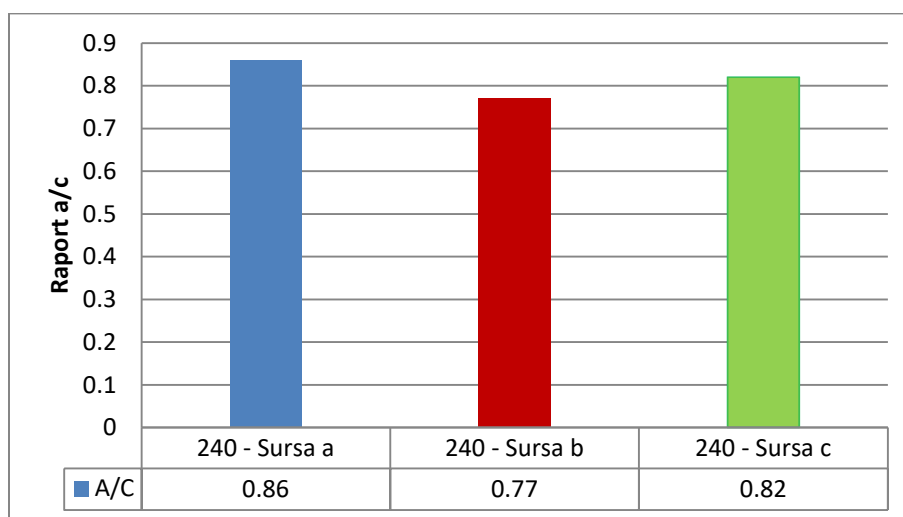


Figura V.1. - Variația raportului a/c pentru betoanele cu CEM II/A-S cu dozaj de ciment 240 kg/m<sup>3</sup>

Cele mai mici rapoarte a/c s-au obținut pentru betoanele preparate cu ciment CEM II/A-S provenit din sursa b, mai mici cu 5.9% decât betoanele cu ciment din sursa c si cu 11% fata de cele preparate cu ciment din sursa a, pentru același dozaj de ciment și respectiv aceeași tasare.

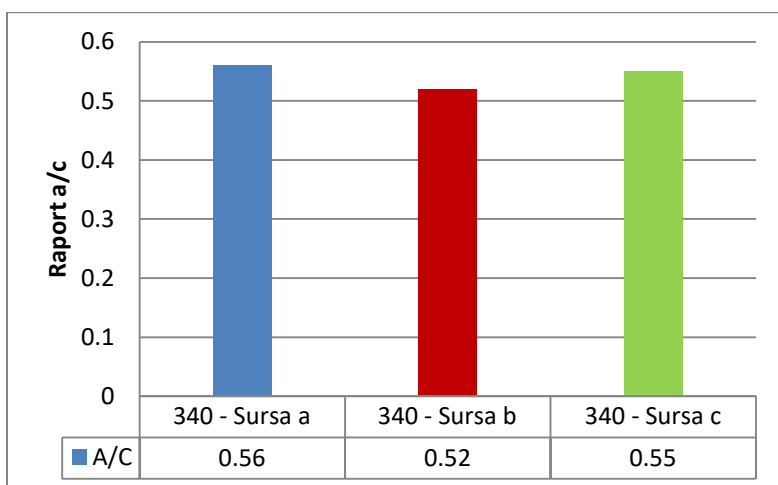


Figura V.2. - Variația raportului a/c pentru betoanele cu CEM II/A-S cu dozaj de ciment 340 kg/m<sup>3</sup>

Cele mai mici rapoarte a/c s-au obținut pentru betoanele preparate cu ciment CEM II/A-S provenit din sursa b, mai mici cu 5.1% decât betoanele cu ciment din sursa c și cu 7% față de cele preparate cu ciment din sursa a, pentru același dozaj de ciment și respectiv aceeași tasare.

În figurile V.3-V.5 se prezintă evoluția în timp a rezistenței la compresie a betonului cu CEM II/A-S 42.5 R în funcție de raportul a/c și sursă. Încercările betoanelor pentru determinarea rezistenței la compresie pe epruvete cubice au fost efectuate în conformitate cu standardele SR EN 12350-1 [123], SR EN 12390-1 [19] și respectiv SR EN 12390-2 [20].

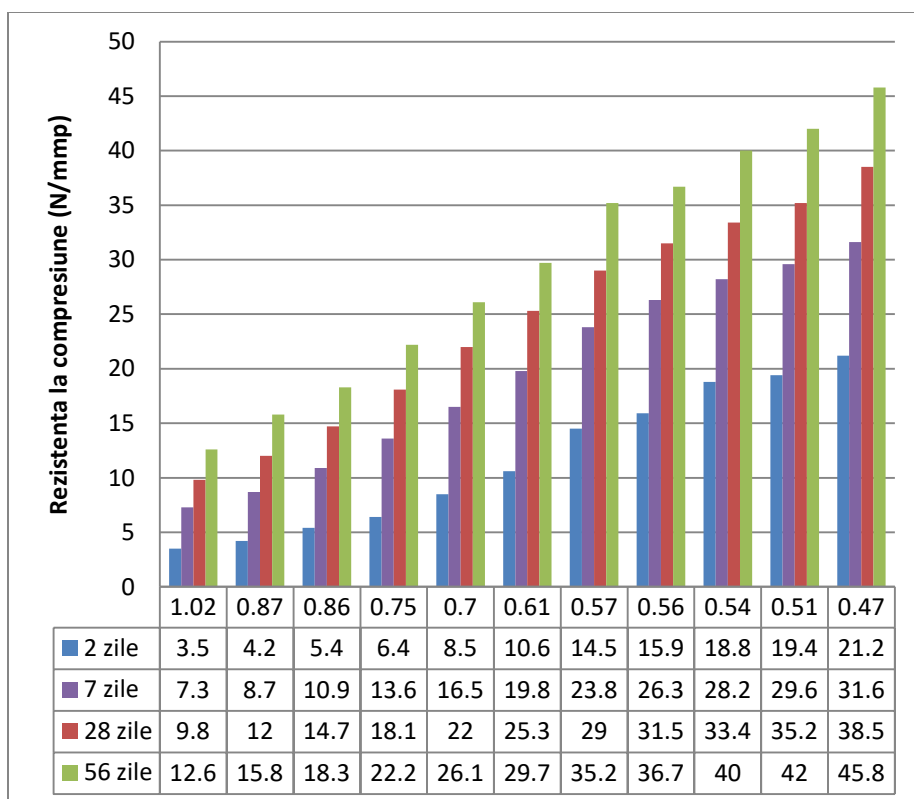


Figura V.3. - Evoluția în timp a rezistenței la compresie a betonului cu CEM II/A-S 42.5 R în funcție de raportul a/c pentru sursa a

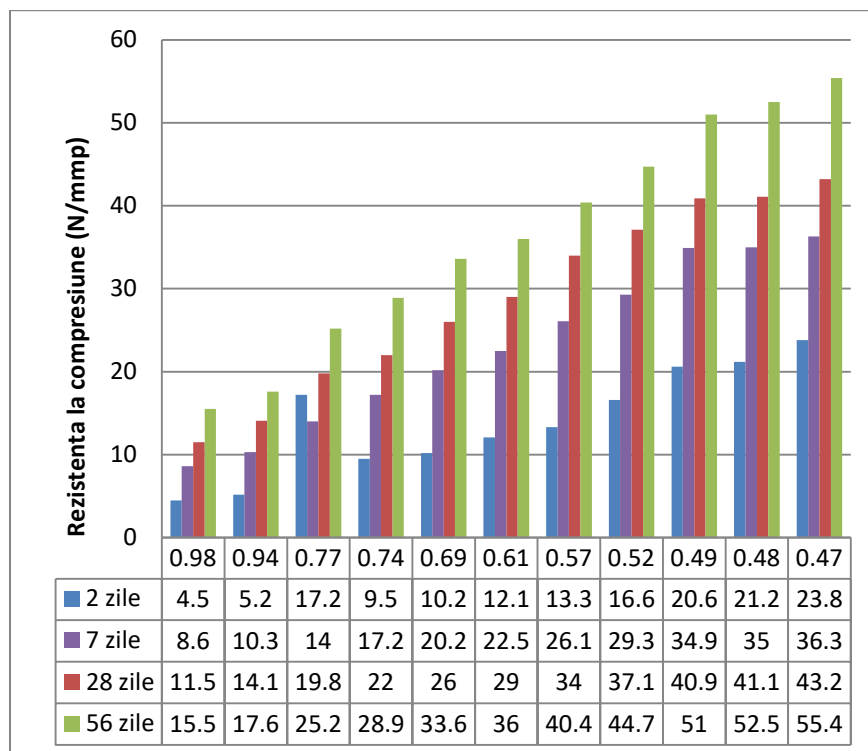


Figura V.4. - Evoluția în timp a rezistenței la compresiune a betonului cu CEM II/A-S 42.5 R în funcție de raportul a/c pentru sursa b

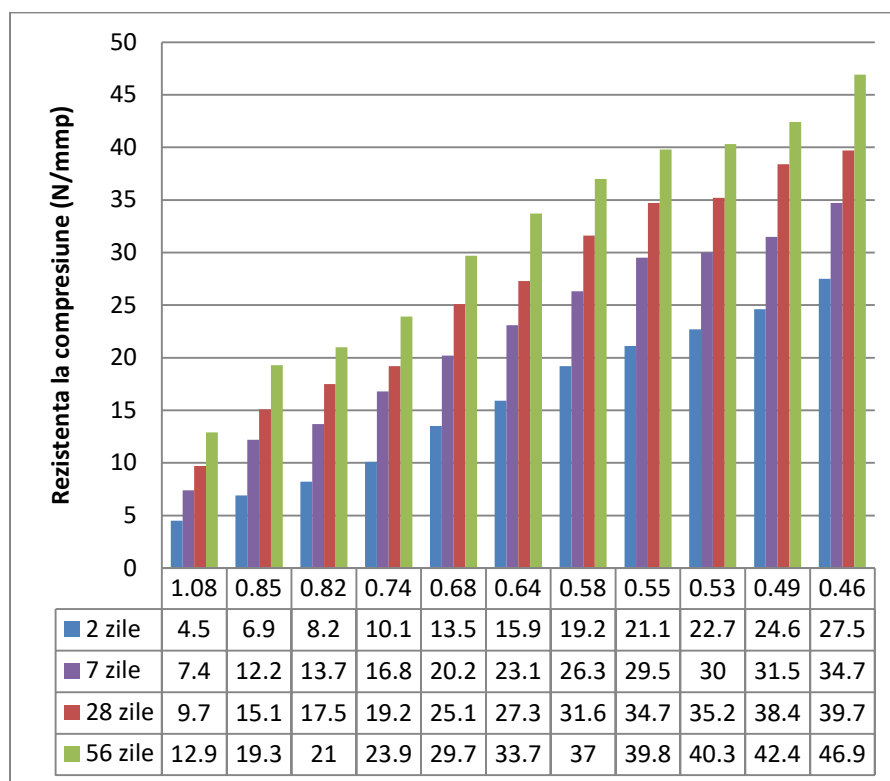


Figura V.5. - Evoluția în timp a rezistenței la compresiune a betonului cu CEM II/A-S 42.5 R în funcție de raportul a/c pentru sursa c

Graficele din figurile V.6.-V.8. indică variația rezistențelor la compresiune în timp a betonului la dozajele de 200, 300 și respectiv 400 kg/mc pentru cele trei surse.

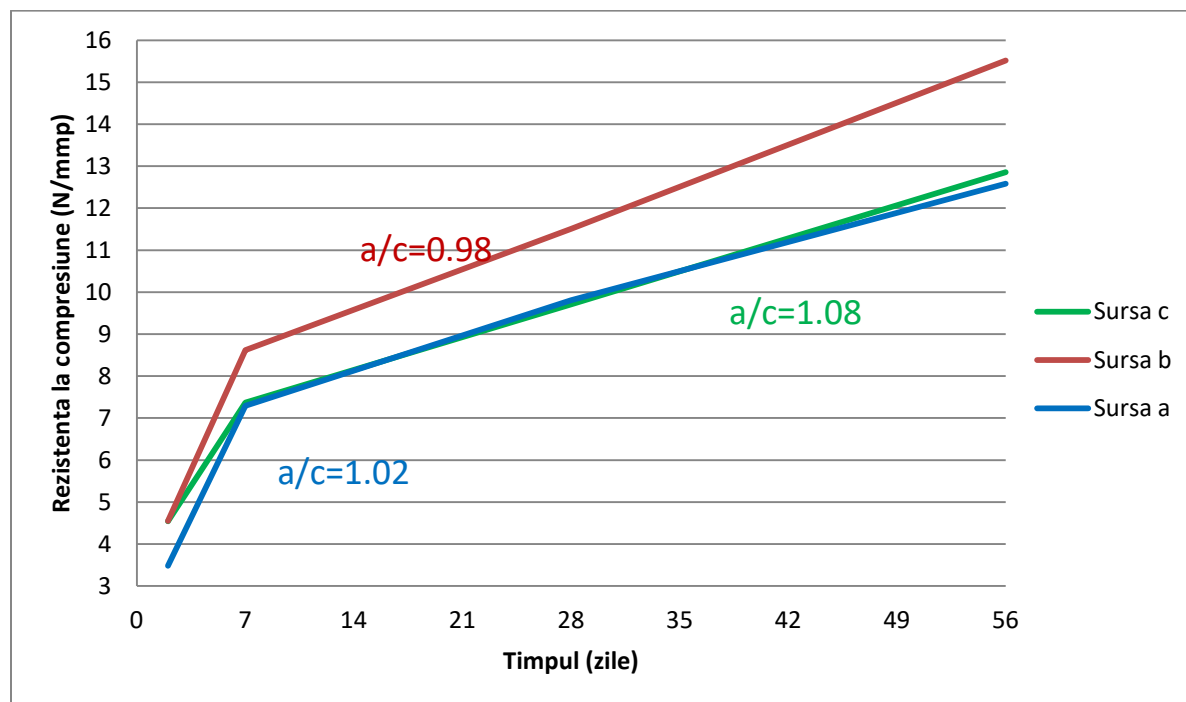


Figura V.6. - Variația în timp a rezistenței la compresiune a betonului cu 200 kg/mc CEM II/A-S 42.5 R în funcție sursă

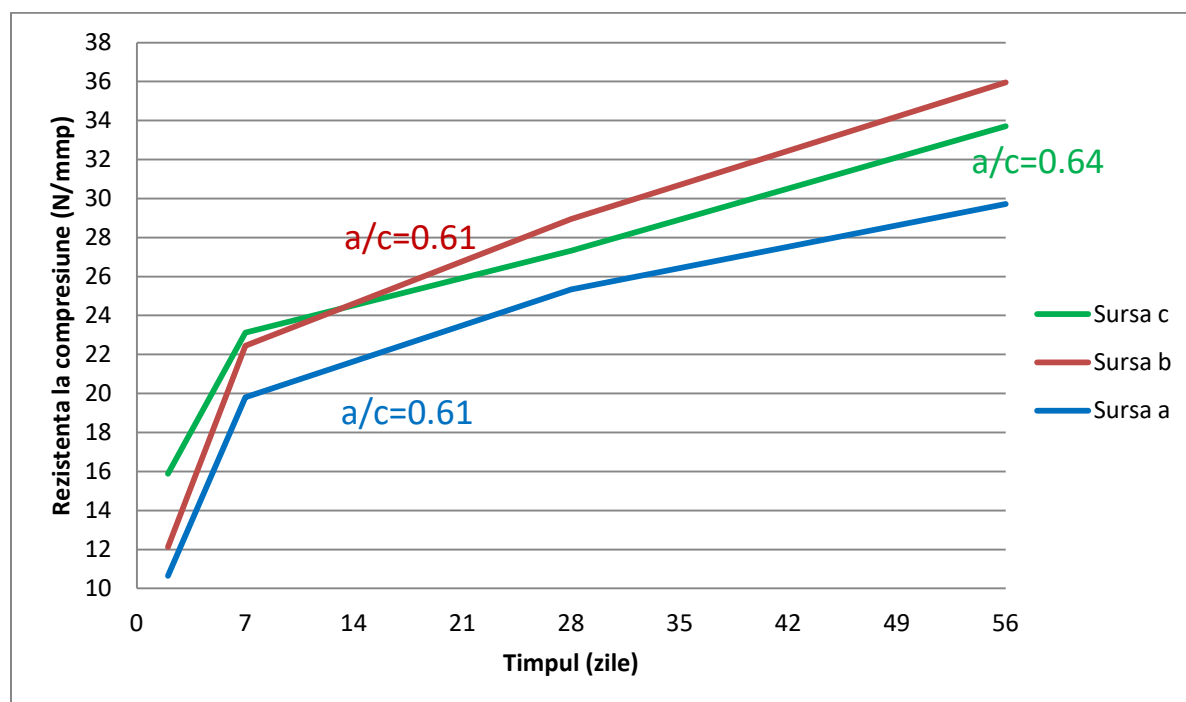


Figura V.7. - Variația în timp a rezistenței la compresiune a betonului cu 300 kg/mc CEM II/ A-S 42.5 R în funcție sursă

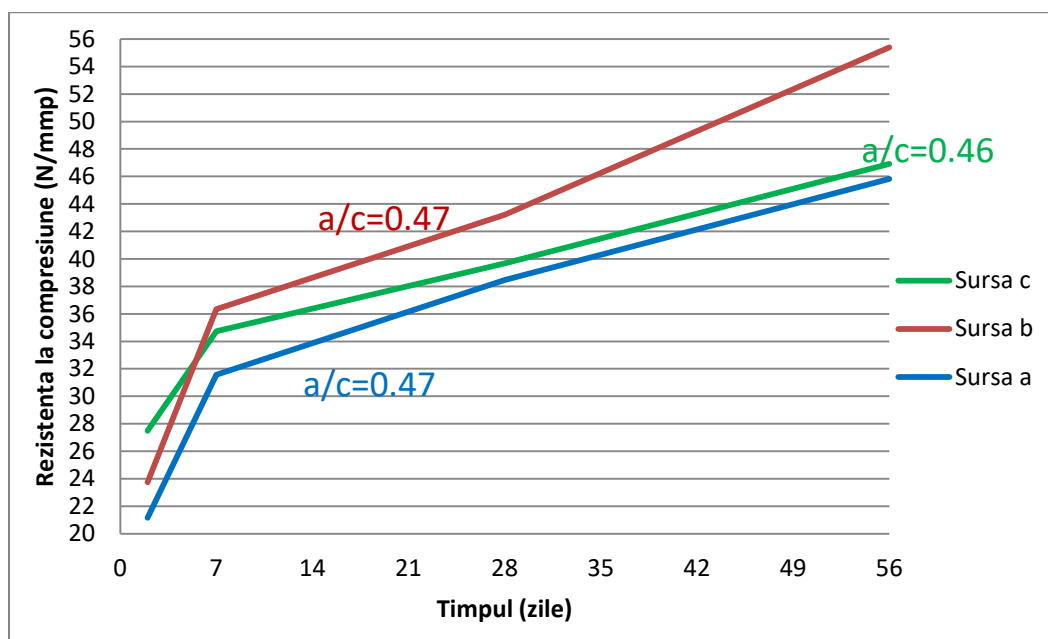


Figura V.8. - Variația în timp a rezistenței la compresiune a betonului cu 400 kg/mc CEM II/A-S 42.5 R în funcție sursă

Se observă că indiferent de dozaj, cimentul din sursa b oferă în general betonului performanțele cele mai ridicate (rezistența la compresiune). Performanțele betonului preparat cu cimenturi din sursele a și c au valori relativ apropiate.

Variația rezistenței la compresiune la 2, 7, 28 și 56 zile în funcție de raportul  $a/c$  și sursa de ciment este prezentată în figurile V.9.-V.12.

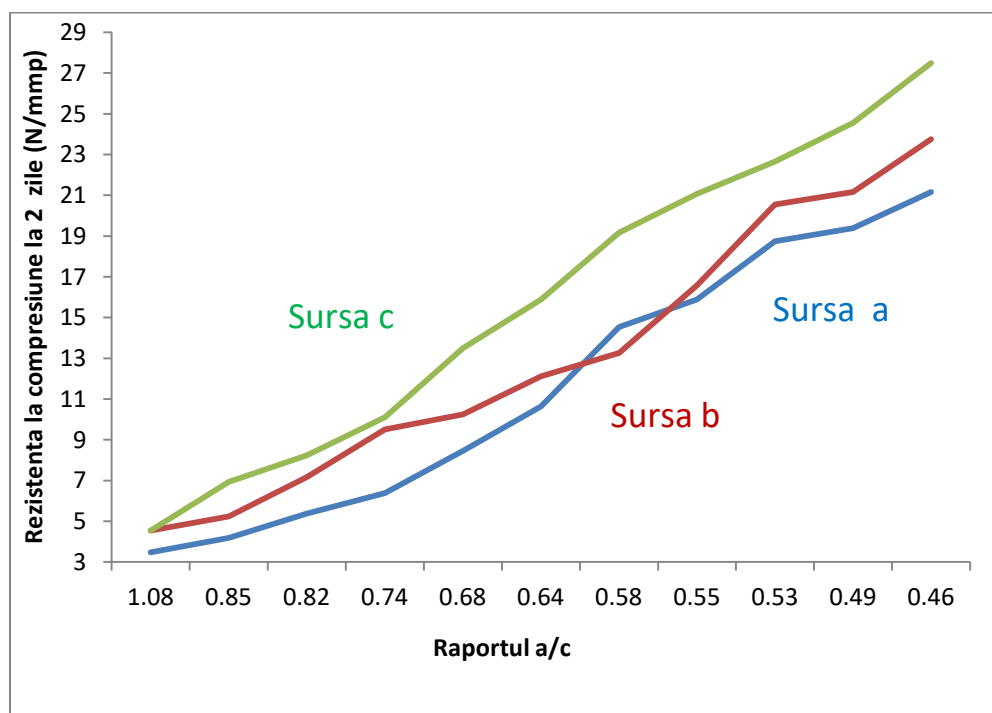


Figura V.9. - Variația rezistenței la compresiune la 2 zile a betonului cu ciment CEM II/A-S 42.5 R în funcție sursă și raport  $a/c$

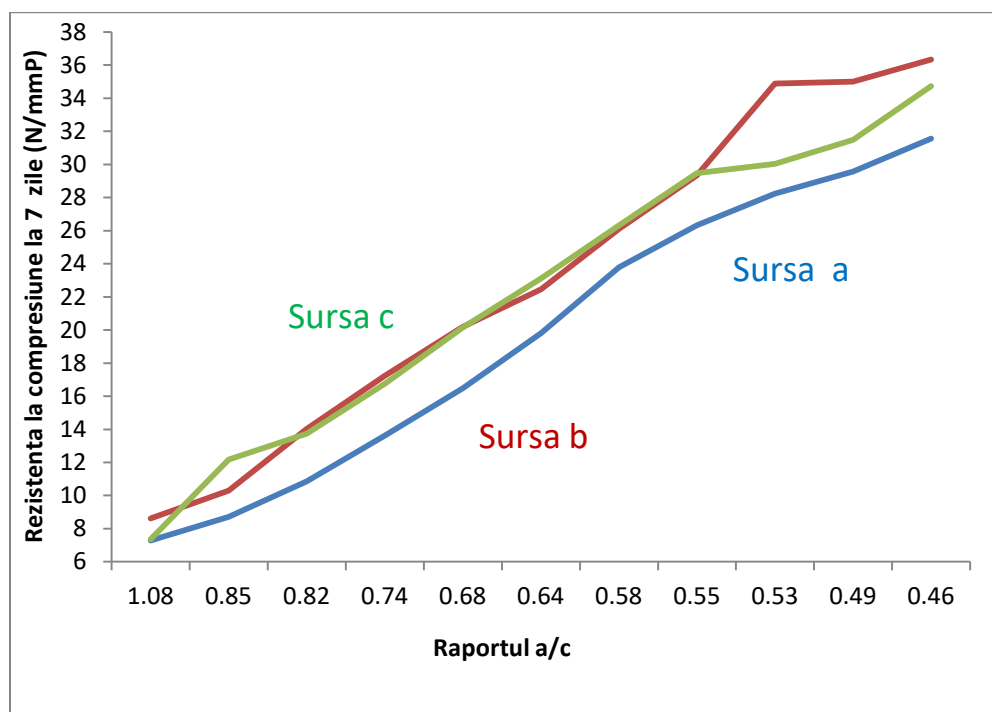


Figura V.10. - Variația rezistenței la compresiune la 7 zile a betonului cu ciment CEM II/A-S 42.5 R în funcție sursă și raport a/c

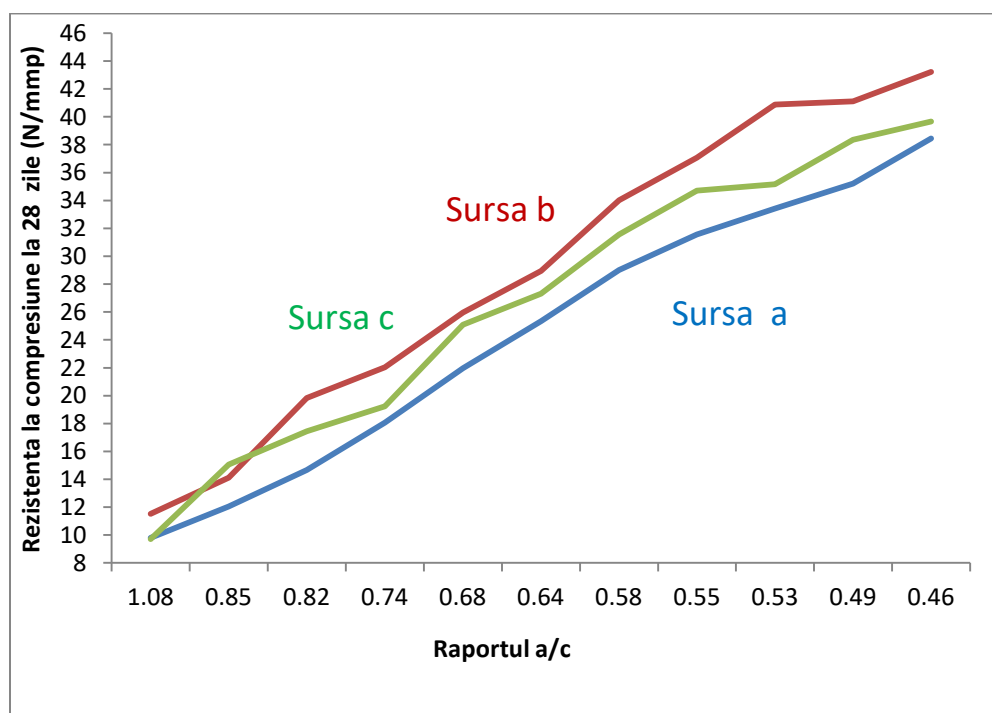


Figura V.11. - Variația rezistenței la compresiune la 28 zile a betonului cu ciment CEM II/A-S 42.5 R în funcție sursă și raport a/c

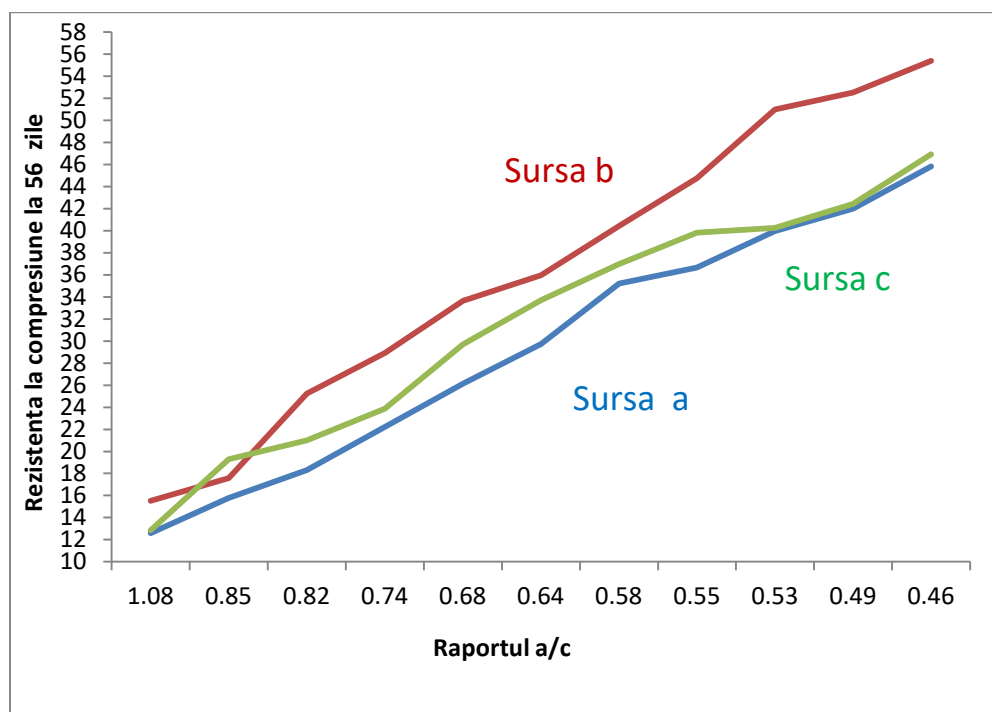


Figura V.12. - Variația rezistenței la compresiune la 56 zile a betonului cu ciment CEM II/A-S 42.5R în funcție sursă și raport a/c

Din figurile prezentate se observă faptul ca betoanele preparate cu cimenturi din sursa b au performantele cele mai bune la 28 si 56 zile, la 2 zile betoanele preparate cu cimentul din sursa c prezintă valori mai mari. Aceeași concluzie se trage și din analiza figurilor V.13. și V.14 în care s-a reprezentat evoluția în timp a rezistențelor betonului pentru cele trei surse la raport a/c constant.

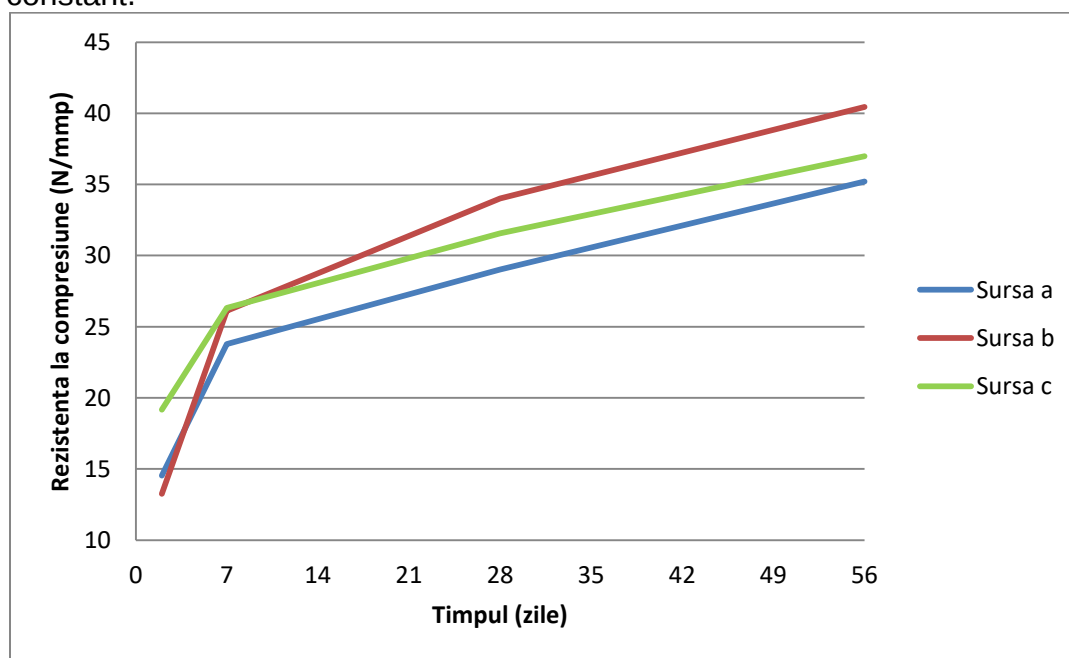


Figura V.13. - Variația rezistenței la compresiune a betonului cu CEM II/A-S 42.5 R în funcție de sursă la raport a/c=0.58

Graficul din figura V.13. arată că la raport a/c constant betoanele preparate cu același tip de ciment dar provenit din surse diferite prezintă valori diferite ale rezistențelor la 2, 7, 28 și 56 de zile, cele mai mari valori înregistrându-se pentru betoanele cu ciment din sursa b. Intervalul de variație al rezistențelor la compresiune la 2 zile este între 9-44%, la 7 zile între 9-10%, la 28 zile 8-17% și pentru 56 zile este cuprins între 5-15%.

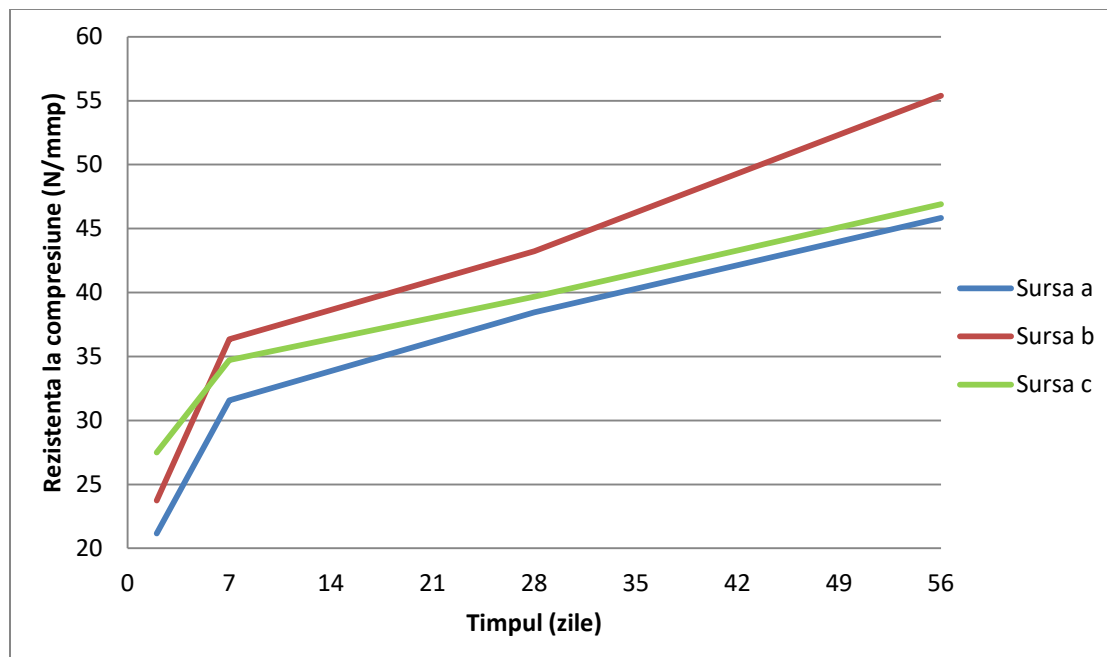


Figura V.14. - Variația rezistenței la compresiune a betonului cu CEM II/A-S 42.5 R în funcție de sursă la raport a/c=0.47

Dacă raportul a/c se reduce se obțin tot valori diferite între rezistențele la 2, 7, 28 și 56 de zile pentru betoanele preparate cu același tip de ciment provenit din surse diferite, intervalul de variație fiind mai restrâns, 12-29% pentru rezistența la compresiune la 2 zile, 10-15% pentru rezistența la compresiune la 7 zile, 3-12% pentru rezistența la compresiune la 28 zile și 2-20% pentru rezistența la compresiune la 56 zile.

Astfel în cazul betoanelor preparate cu ciment CEM II/ A-S pentru dozajele de ciment analizate, rezistențele la compresiune la 28 zile variază cu maxim 5 N/mm<sup>2</sup>, iar la 56 zile diferența maximă este de 9 N/mm<sup>2</sup> corespunzătoare dozajului de ciment de 240 kg/m<sup>3</sup>. Pentru dozajul de 340 kg/m<sup>3</sup>, rezistențele la compresiune au un interval de variație de 5.5 N/mm<sup>2</sup> la 28 zile și respectiv 8 N/mm<sup>2</sup> la 56 zile.

În tabelul V.5 se prezintă clasificarea evoluției rezistenței betonului în funcție de sursă și raportul a/c.

Tabelul V.5. – Încadrarea cimentului compozit CEM II/A-S pe surse (fabrici) diferite sub aspectul coeficientului "r" de caracterizare a evoluției rezistenței betonului, funcție de care se stabilește durata de tratare raportată la temperatura măsurată la suprafața betonului

| Dozaj ciment (kg/m <sup>3</sup> ) | Sursa a |                  | Sursa b |                  | Sursa c |                  |
|-----------------------------------|---------|------------------|---------|------------------|---------|------------------|
|                                   | r       | Evoluție rezist. | r       | Evoluție rezist. | r       | Evoluție rezist. |
| 200                               | 0.35    | medie            | 0.40    | medie            | 0.47    | medie            |
| 220                               | 0.35    | medie            | 0.37    | medie            | 0.46    | medie            |

| Dozaj<br>ciment<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Sursa a |                     | Sursa b |                     | Sursa c |                     |
|-----------------------------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|
|                                         | r       | Evoluție<br>rezist. | r       | Evoluție<br>rezist. | r       | Evoluție<br>rezist. |
| 240                                     | 0.37    | medie               | 0.36    | medie               | 0.47    | medie               |
| 260                                     | 0.35    | medie               | 0.43    | medie               | 0.52    | rapidă              |
| 280                                     | 0.39    | medie               | 0.39    | medie               | 0.54    | rapidă              |
| 300                                     | 0.42    | medie               | 0.42    | medie               | 0.58    | rapidă              |
| 320                                     | 0.50    | rapidă              | 0.39    | medie               | 0.61    | rapidă              |
| 340                                     | 0.50    | rapidă              | 0.45    | medie               | 0.61    | rapidă              |
| 360                                     | 0.56    | rapidă              | 0.50    | rapidă              | 0.64    | rapidă              |
| 380                                     | 0.55    | rapidă              | 0.51    | rapidă              | 0.64    | rapidă              |
| 400                                     | 0.55    | rapidă              | 0.55    | rapidă              | 0.69    | rapidă              |

r - raportul între rezistența la compresiune la 2 zile și cea la 28 de zile ( $r = f_{cm2}/f_{cm28}$ ) în conformitate cu NE 012-2 [4] și SR EN 13670 [84]

S-a notat cu:  $f_{cm2}$ ,  $f_{cm28}$  rezistența medie la compresiune la vârsta de 2 și respectiv 28 zile determinată conform SR EN 12390-3 [21].

Tabelul V.5 arată faptul că, per ansamblu, betoanele preparate cu ciment CEM II/A-S 42.5R au o evoluție rapidă a rezistențelor la compresiune de la un dozaj de ciment de 320 kg/m<sup>3</sup> fiind posibilă și o evoluție medie, înregistrată pentru sursa b. Aceste informații sunt utile în execuție și pe baza valorii coeficientului r se stabilește durata de tratare.

Se poate observa că cele mai mici rapoarte a/c la dozaje egale se înregistrează pentru betoanele preparate cu ciment din sursa b care prezintă și cele mai mari rezistențe după 28 zile. În schimb rezistențele la vârste mici sunt mai mari în cazul sursei c ceea ce conduce la o evoluție mai rapidă a rezistenței pentru betoanele preparate cu acest tip de ciment.

Rezistența la compresiune la vârsta de 28 de zile este considerată corespunzătoare pentru încercările inițiale (preliminare), dacă valorile rezistenței la compresiune a betonului obținute sunt mai mari decât  $f_{ck} + 6 \dots 12$  ( $f_{cm} \geq f_{ck} + 6 \dots 12$  conform SR EN 206 [17]), în care  $f_{ck}$  este rezistența caracteristică corespunzătoare clasei betonului și pentru verificările curente, dacă valorile rezistenței medii sunt mai mari decât  $f_{ck} + 4$  ( $f_{cm} \geq f_{ck} + 4$  conform SR EN 206 [17]).

Rezultatele încercărilor la compresiune și încadrarea în clasele de rezistență la compresiune corespunzătoare sunt în tabelul V.6.

Tabelul V.6. – Clasele de beton obținute conform valorilor rezistențelor la compresiune ale betoanelor preparate cu un dozaj de ciment echivalent în funcție de sursă conform normativului NE 012-1 [3]

| Tip<br>ciment          | Dozaj<br>ciment<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Rezistența la<br>compresiune $f_{cm28}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |            |            | Clasa de beton obținută |          |            |                    |          |         |
|------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------|------------|-------------------------|----------|------------|--------------------|----------|---------|
|                        |                                         |                                                                 |            |            | Încercări inițiale      |          |            | Verificări curente |          |         |
|                        |                                         | Sursa<br>a                                                      | Sursa<br>b | Sursa<br>c | Sursa a                 | Sursa b  | Sursa c    | Sursa a            | Sursa b  | Sursa c |
| CEM<br>II/A-S<br>42.5R | 200                                     | 9.81                                                            | 11.51      | 9.71       | C2.8/3.5**              | C4/5     | C2.8/3.5** | C4/5**             | C6/7.5** | C4/5**  |
|                        | 220                                     | 12.04                                                           | 14.12      | 15.05      | C4/5                    | C6/7.5** | C6/7.5**   | C8/10              | C8/10    | C8/10   |
|                        | 240                                     | 14.67                                                           | 19.83      | 17.45      | C6/7.5*                 | C8/10    | C8/10      | C8/10              | C12/15   | C8/10   |
|                        | 260                                     | 18.07                                                           | 22.03      | 19.24      | C8/10                   | C12/15   | C8/10      | C8/10              | C12/15   | C12/15  |
|                        | 280                                     | 21.97                                                           | 25.96      | 25.08      | C12/15                  | C16/20   | C12/15     | C12/15             | C16/20   | C16/20  |
|                        | 300                                     | 25.34                                                           | 28.95      | 27.32      | C12/15                  | C16/20   | C16/20     | C16/20             | C16/20   | C16/20  |
|                        | 320                                     | 29.01                                                           | 34.01      | 31.56      | C16/20                  | C20/25   | C20/25     | C20/25             | C25/30   | C20/25  |

| Tip<br>ciment | Dozaj<br>ciment<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Rezistența la<br>compresiune $f_{cm28}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |            |            | Clasa de beton obținută |         |         |                    |         |         |
|---------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------|------------|-------------------------|---------|---------|--------------------|---------|---------|
|               |                                         |                                                                 |            |            | Încercări inițiale      |         |         | Verificări curente |         |         |
|               |                                         | Sursa<br>a                                                      | Sursa<br>b | Sursa<br>c | Sursa a                 | Sursa b | Sursa c | Sursa a            | Sursa b | Sursa c |
|               | 340                                     | 31.55                                                           | 37.08      | 34.70      | C20/25                  | C25/30  | C20/25  | C20/25             | C25/30  | C25/30  |
|               | 360                                     | 33.42                                                           | 40.87      | 35.17      | C20/25                  | C25/30  | C20/25  | C20/25             | C30/37  | C25/30  |
|               | 380                                     | 35.21                                                           | 41.11      | 38.35      | C20/25                  | C25/30  | C25/30  | C25/30             | C30/37  | C25/30  |
|               | 400                                     | 38.45                                                           | 43.22      | 39.67      | C25/30                  | C30/37  | C25/30  | C25/30             | C30/37  | C25/30  |

\* Clasa minimă de beton pentru structuri conform SR EN 206 [17] este C8/10

\*\* Clase de rezistență la compresiune care nu se regăsesc în SR EN 206 [17].

❖ **Beton cu ciment CEM III/A 42.5N-LH (clinker 35-64%, zgură granulată de furnal măcinată 36-65%)**

A doua etapă a cercetărilor experimentale a constatat în analiza comparativă a caracteristicilor betonului proaspăt și a caracteristicilor de rezistență ale betonului întărit la vârstele de 2, 7, 28 și 56 zile preparat cu același tip de ciment compozit CEM III/A 42,5N-LH și cu dozaje de ciment cuprinse între 200 – 400 kg/m<sup>3</sup> dar provenind din trei surse diferite.

În tabelele V.7.-V.10. sunt prezentate compozițiile betoanelor și caracteristicile betoanelor proaspete preparate cu CEM III/A 42,5N-LH provenite din sursele a, b și respectiv c.

Tabelul V.7. – Compozițiile betoanelor preparate cu CEM III/A 42,5 N-LH - Sursele a, b și c

| Ciment<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Aditiv<br>(l) | Agregate<br>(kg) | sort 0-4<br>mm<br>(kg) | sort 4-8<br>mm (kg) | sort 8-<br>16 mm<br>(kg) |
|--------------------------------|---------------|------------------|------------------------|---------------------|--------------------------|
| 200                            | 1.89          | 1965             | 786                    | 393                 | 786                      |
| 220                            | 2.08          | 1947             | 779                    | 389                 | 779                      |
| 240                            | 2.26          | 1929             | 771                    | 386                 | 771                      |
| 260                            | 2.45          | 1910             | 764                    | 382                 | 764                      |
| 280                            | 2.64          | 1892             | 757                    | 378                 | 757                      |
| 300                            | 2.83          | 1874             | 750                    | 375                 | 750                      |
| 320                            | 3.02          | 1856             | 742                    | 371                 | 742                      |
| 340                            | 3.21          | 1838             | 735                    | 368                 | 735                      |
| 360                            | 3.40          | 1793             | 717                    | 359                 | 717                      |
| 380                            | 3.58          | 1775             | 710                    | 355                 | 710                      |
| 400                            | 3.77          | 1757             | 703                    | 351                 | 703                      |

Tabelul V.8. – Caracteristicile betoanelor proaspete preparate cu CEM III/A 42.5 N-LH - Sursa a

| Ciment<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Apa (l) | a/c  | Tasare<br>mm | Densitate<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------------|---------|------|--------------|-----------------------------------|
| 200                            | 194     | 0.98 | 185          | 2348                              |
| 220                            | 200     | 0.92 | 180          | 2416                              |
| 240                            | 188     | 0.79 | 190          | 2362                              |
| 260                            | 186     | 0.73 | 195          | 2371                              |
| 280                            | 183     | 0.66 | 175          | 2384                              |
| 300                            | 180     | 0.61 | 180          | 2391                              |
| 320                            | 175     | 0.56 | 180          | 2369                              |

| Ciment<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Apa (l) | a/c  | Tasare<br>mm | Densitate<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------------|---------|------|--------------|-----------------------------------|
| 340                            | 168     | 0.50 | 200          | 2384                              |
| 360                            | 169     | 0.48 | 195          | 2369                              |
| 380                            | 170     | 0.46 | 195          | 2378                              |
| 400                            | 169     | 0.43 | 160          | 2391                              |

Tabelul V.9. – Caracteristicile betoanelor proaspete preparate cu CEM III/A 42.5 N-LH - Sursa b

| Ciment<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Apa (l) | a/c  | Tasare<br>mm | Densitate<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------------|---------|------|--------------|-----------------------------------|
| 200                            | 205     | 1.03 | 195          | 2367                              |
| 220                            | 195     | 0.90 | 185          | 2369                              |
| 240                            | 190     | 0.80 | 180          | 2369                              |
| 260                            | 186     | 0.73 | 195          | 2408                              |
| 280                            | 185     | 0.67 | 195          | 2364                              |
| 300                            | 178     | 0.60 | 195          | 2399                              |
| 320                            | 170     | 0.54 | 175          | 2405                              |
| 340                            | 166     | 0.50 | 175          | 2392                              |
| 360                            | 168     | 0.48 | 195          | 2389                              |
| 380                            | 167     | 0.45 | 180          | 2405                              |
| 400                            | 165     | 0.42 | 170          | 2396                              |

Tabelul V.10. – Caracteristicile betoanelor proaspete preparate cu CEM III/A 42.5 N-LH - Sursa c

| Ciment<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Apa (l) | a/c  | Tasare<br>mm | Densitate<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------------|---------|------|--------------|-----------------------------------|
| 200                            | 166     | 0.84 | 170          | 2388                              |
| 220                            | 166     | 0.77 | 160          | 2349                              |
| 240                            | 163     | 0.69 | 175          | 2338                              |
| 260                            | 161     | 0.63 | 170          | 2408                              |
| 280                            | 165     | 0.60 | 165          | 2368                              |
| 300                            | 165     | 0.56 | 165          | 2395                              |
| 320                            | 167     | 0.53 | 190          | 2356                              |
| 340                            | 163     | 0.49 | 170          | 2346                              |
| 360                            | 162     | 0.46 | 180          | 2378                              |
| 380                            | 162     | 0.44 | 190          | 2398                              |
| 400                            | 156     | 0.40 | 210          | 2407                              |

În figurile V.15 și V.16. se prezintă variația raportului a/c pentru betoanele cu cimentul tip CEM III/A cu dozaje diferite de ciment provenit din cele trei surse.

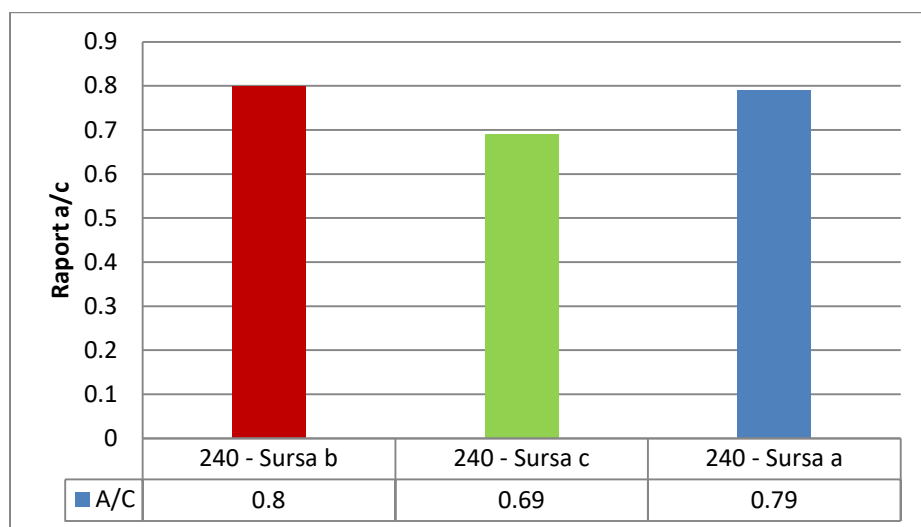


Figura V.15. - Variația raportului a/c pentru betoanele cu CEM III/A cu dozaj de ciment 240 kg/m<sup>3</sup>

Cele mai mici rapoarte a/c s-au obținut pentru betoanele preparate cu ciment CEM III/A provenit din sursa c, mai mici cu 14.4% decât betoanele cu ciment din sursa a și cu 15.9% față de cele preparate cu ciment din sursa b, pentru același dozaj de ciment și respectiv aceeași tasare.

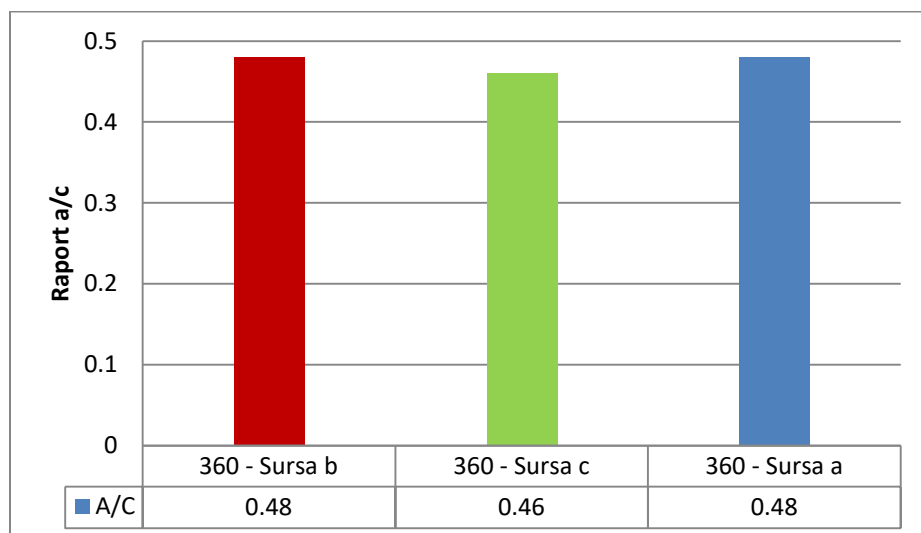


Figura V.16. - Variația raportului a/c pentru betoanele cu CEM III/A cu dozaj de ciment 360 kg/m<sup>3</sup>

Cele mai mici rapoarte a/c s-au obținut pentru betoanele preparate cu ciment CEM III/A provenit din sursa c, mai mici cu 4.3% decât betoanele cu ciment din sursa a și b, pentru același dozaj de ciment și respectiv aceeași tasare.

În figurile V.17.-V.19. se prezintă variația în timp a rezistenței la compresiune a betonului cu CEM III/A în funcție de raportul a/c și sursă.

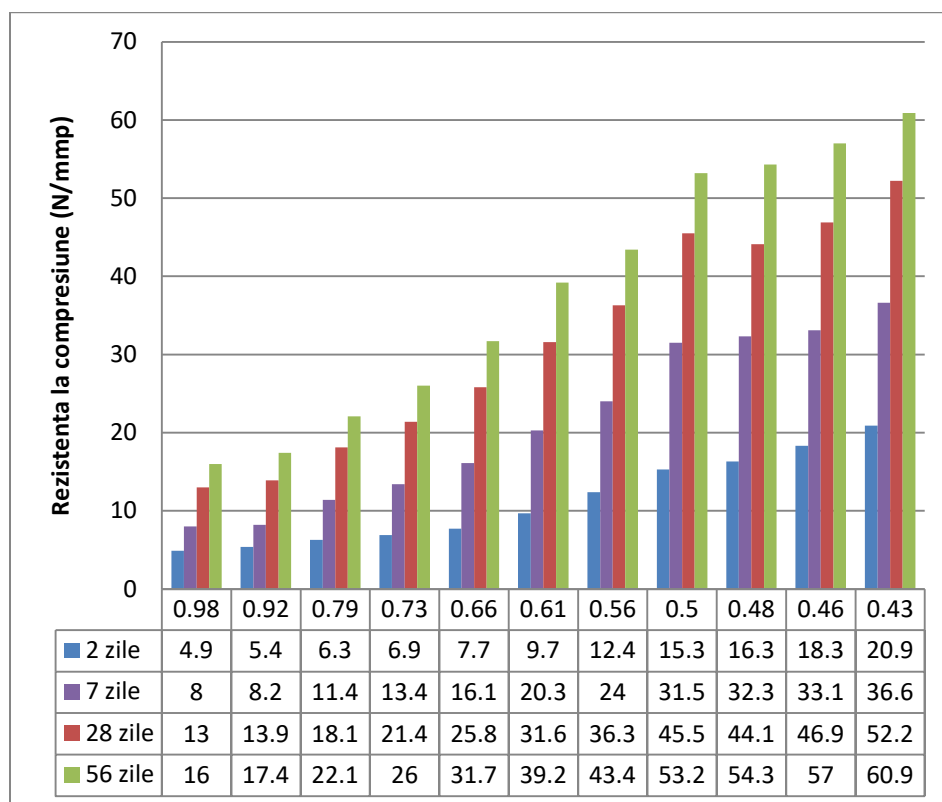


Figura V.17. - Variația în timp a rezistenței la compresiune a betonului cu CEM III/A 42.5N-LH în funcție de raportul  $a/c$  pentru sursa a

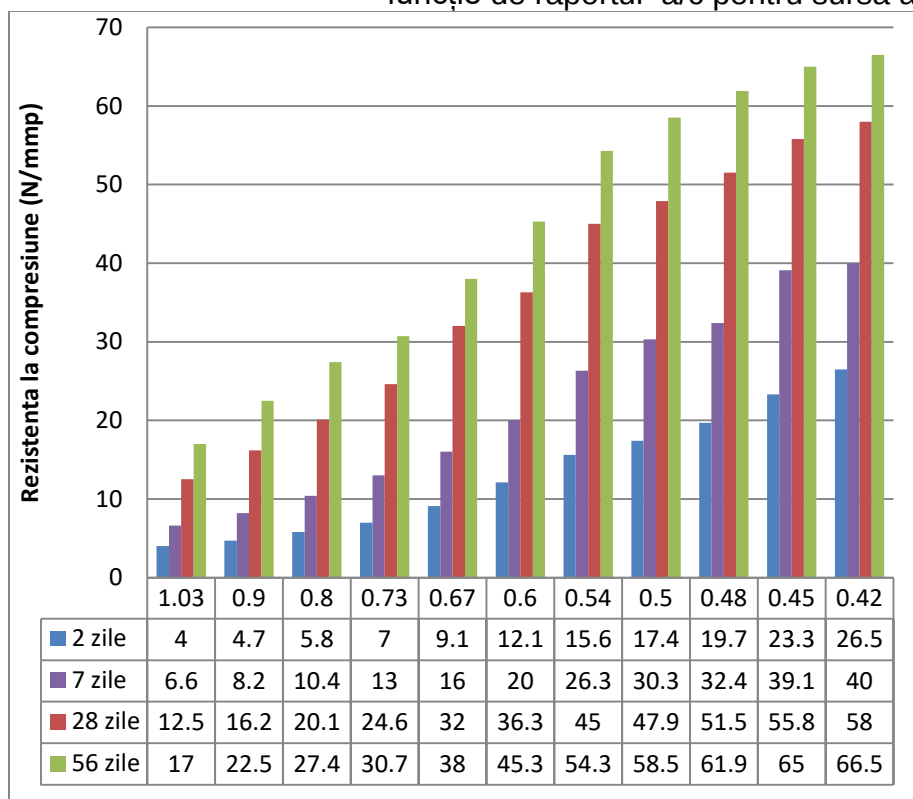


Figura V.18. - Variația în timp a rezistenței la compresiune a betonului cu CEM III/A 42.5N-LH în funcție de raportul  $a/c$  pentru sursa b

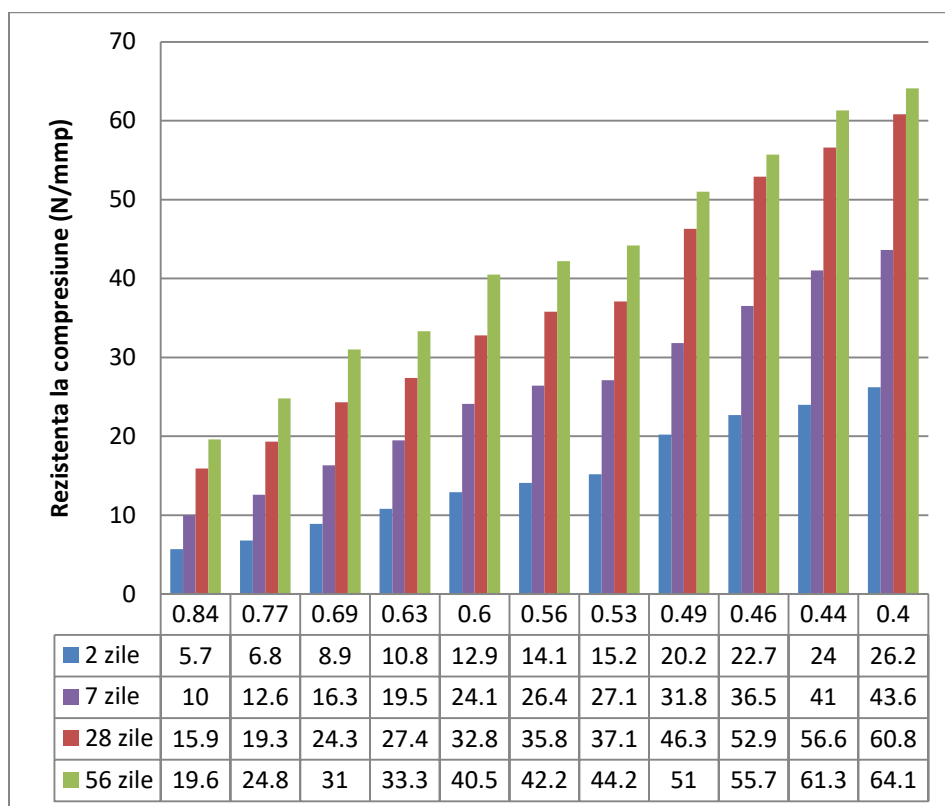


Figura V.19. - Variația în timp a rezistenței la compresiune a betonului cu CEM III/A 42.5N-LH în funcție de raportul  $a/c$  pentru sursa c

Graficele din figurile V.20.-V.22. indică variația rezistențelor la compresiune în timp a betonului la dozajele de 200, 300 și respectiv 400 kg/mc pentru cele trei surse.

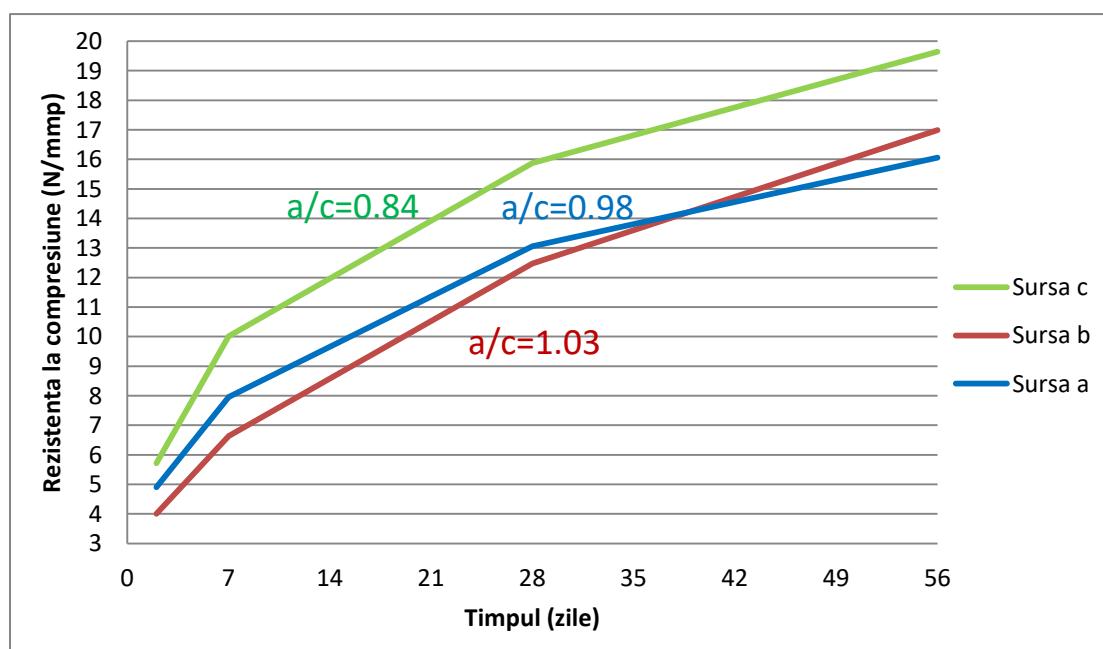


Figura V.20. - Variația în timp a rezistenței la compresiune a betonului cu 200 kg/mc CEM III/A 42.5N-LH în funcție sursă

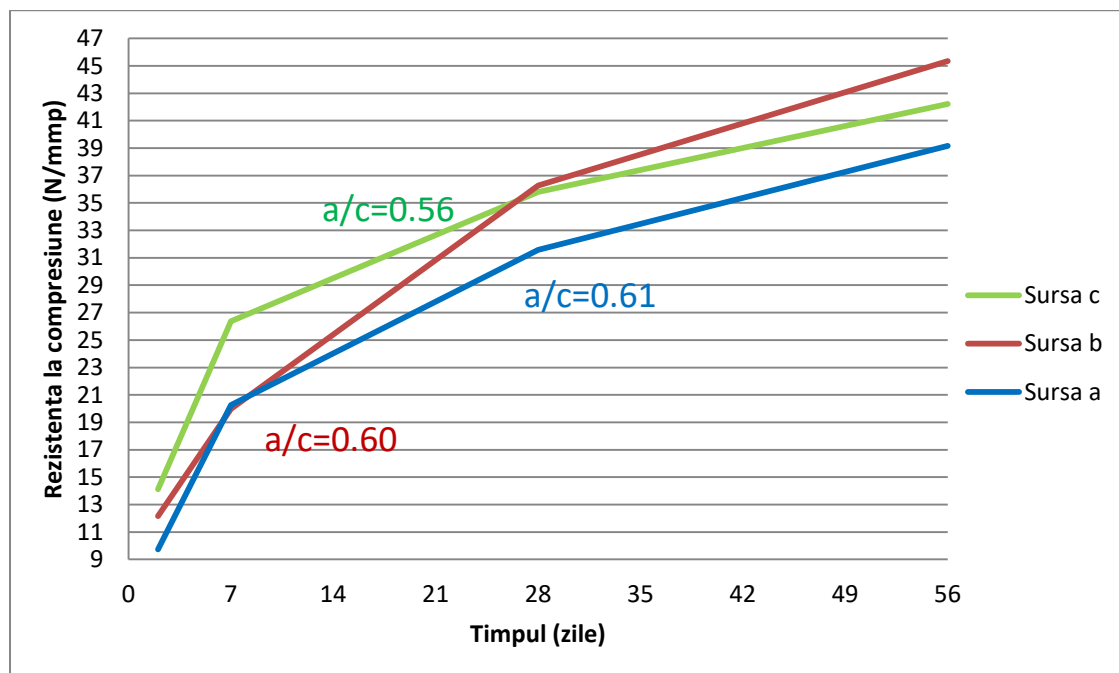


Figura V.21. - Variația în timp a rezistenței la compresiune a betonului cu 300 kg/mc CEM III/A 42.5N-LH în funcție sursă

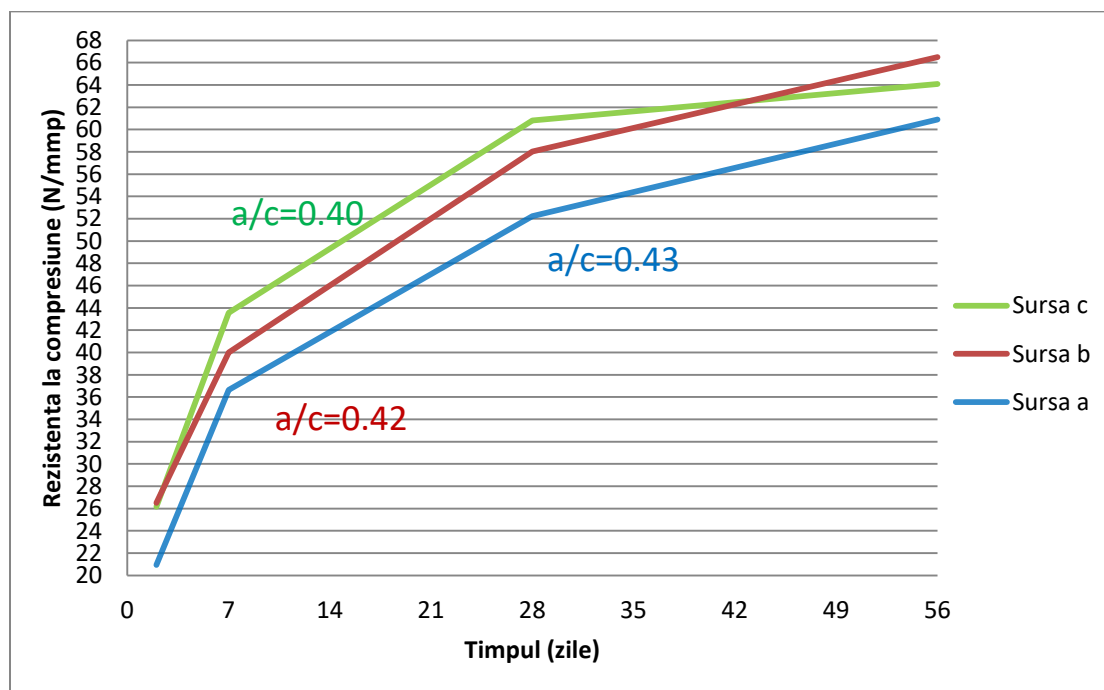


Figura V.22. - Variația în timp a rezistenței la compresiune a betonului cu 400 kg/mc CEM III/A 42.5N-LH în funcție sursă

Se observă că indiferent de dozaj, cimentul din sursa c oferă în general betonului performanțele cele mai ridicate până la vârsta de 28 zile (rezistența la compresiune). Variația rezistenței la compresiune la 2, 7, 28 și 56 zile în funcție de raportul  $a/c$  și sursa de ciment este prezentată în figurile V.23-V.26.

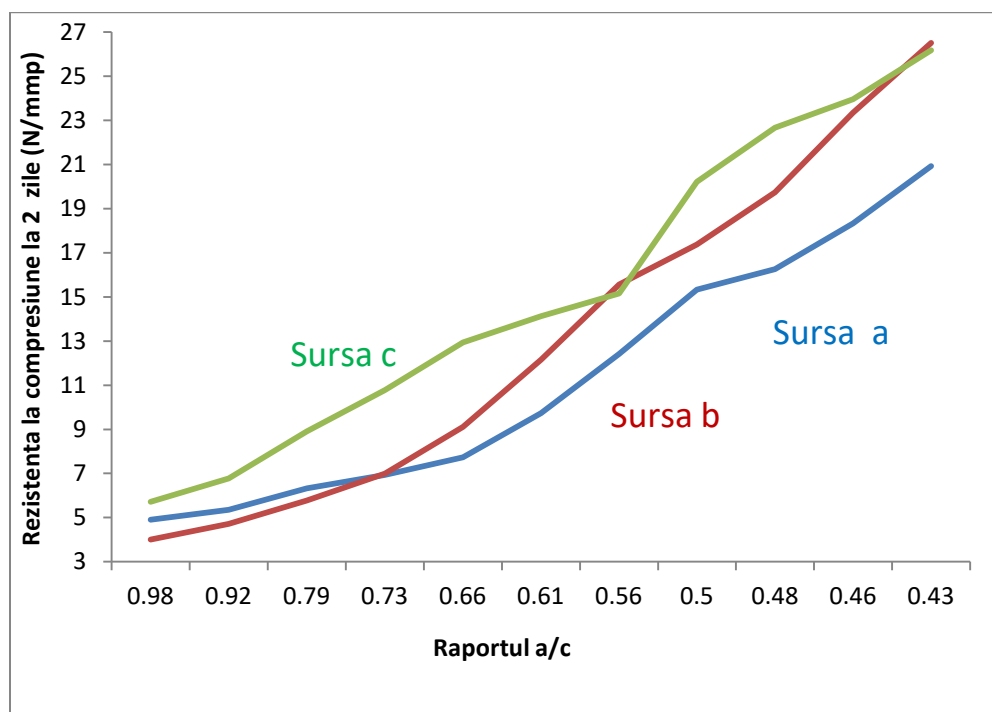


Figura V.23. - Variația rezistenței la compresiune la 2 zile a betonului cu CEM III/A 42.5N-LH în funcție sursă și raport a/c

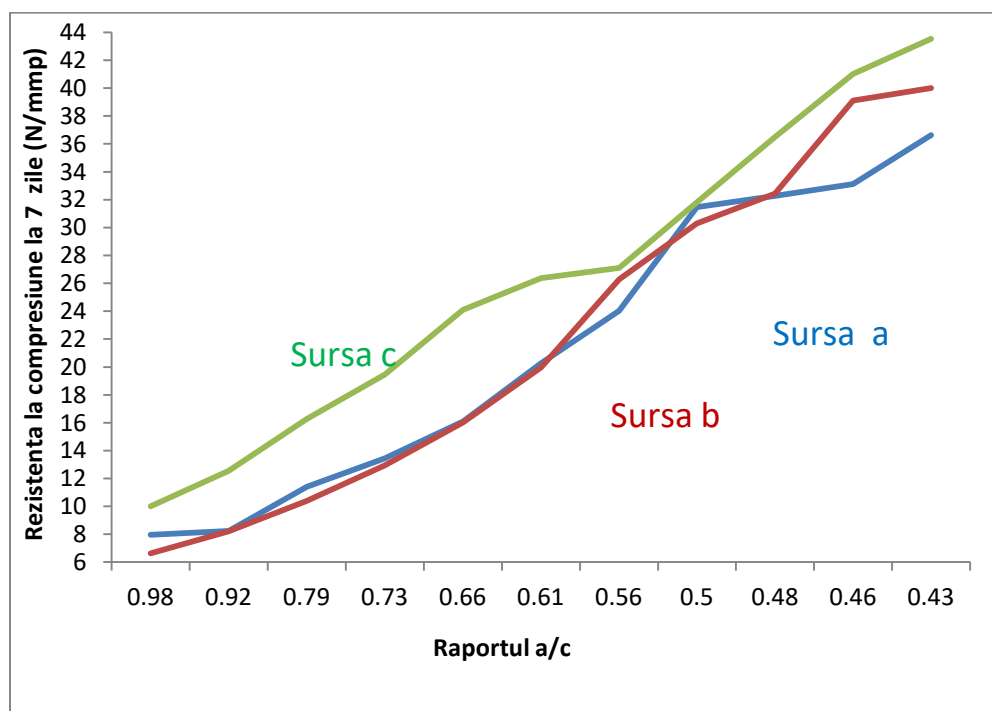


Figura V.24. - Variația rezistenței la compresiune la 7 zile a betonului cu CEM III/A 42.5N-LH în funcție sursă și raport a/c

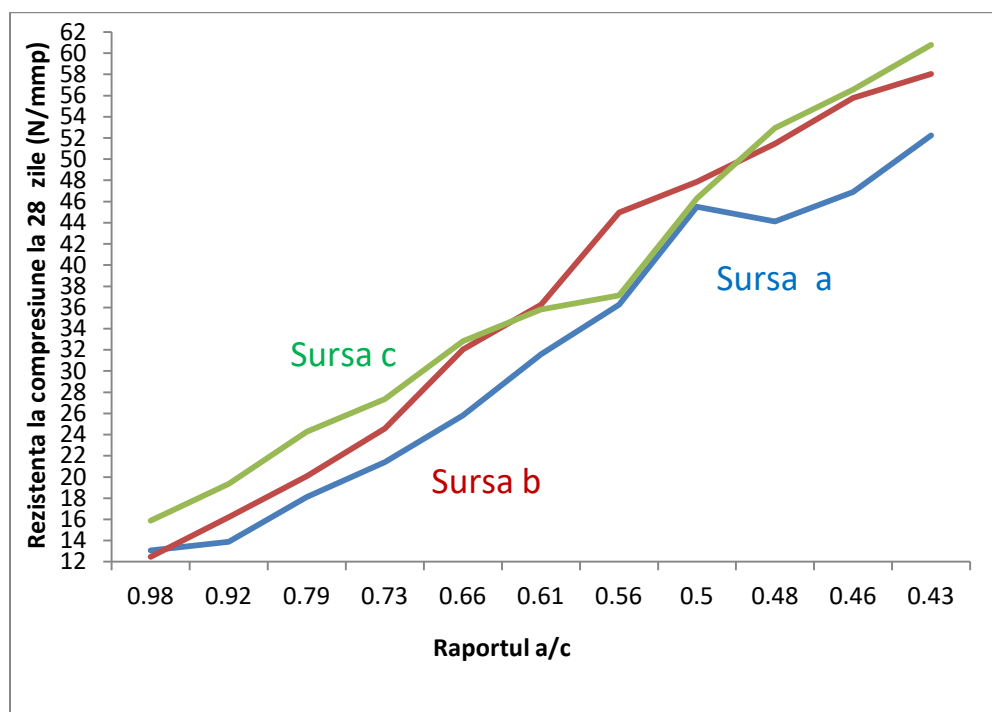


Figura V.25. - Variația rezistenței la compresiune la 28 zile a betonului cu CEM III/A 42.5N-LH în funcție sursă și raport a/c

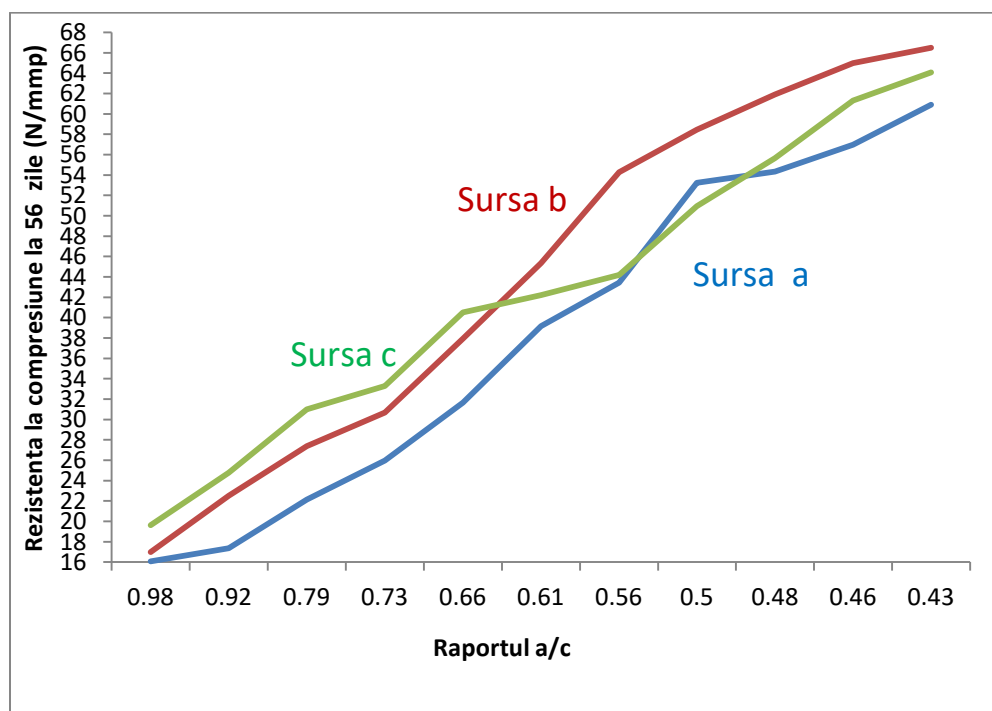


Figura V.26. - Variația rezistenței la compresiune la 56 zile a betonului cu CEM III/A 42.5N-LH în funcție sursă și raport a/c

Din figurile prezentate se observă faptul că betoanele preparate cu cimenturi din sursa c au performanțele cele mai bune la 2 și 7 zile, la 28 și 56 zile betoanele preparate cu cimentul din sursa b prezintă valori mai mari de la rapoarte a/c sub valoarea de 0.60. Aceeași concluzie se

trage și din analiza figurilor V.19. și V.20. în care s-a reprezentat evoluția în timp a rezistențelor betonului pentru cele trei surse la raport  $a/c$  constant.

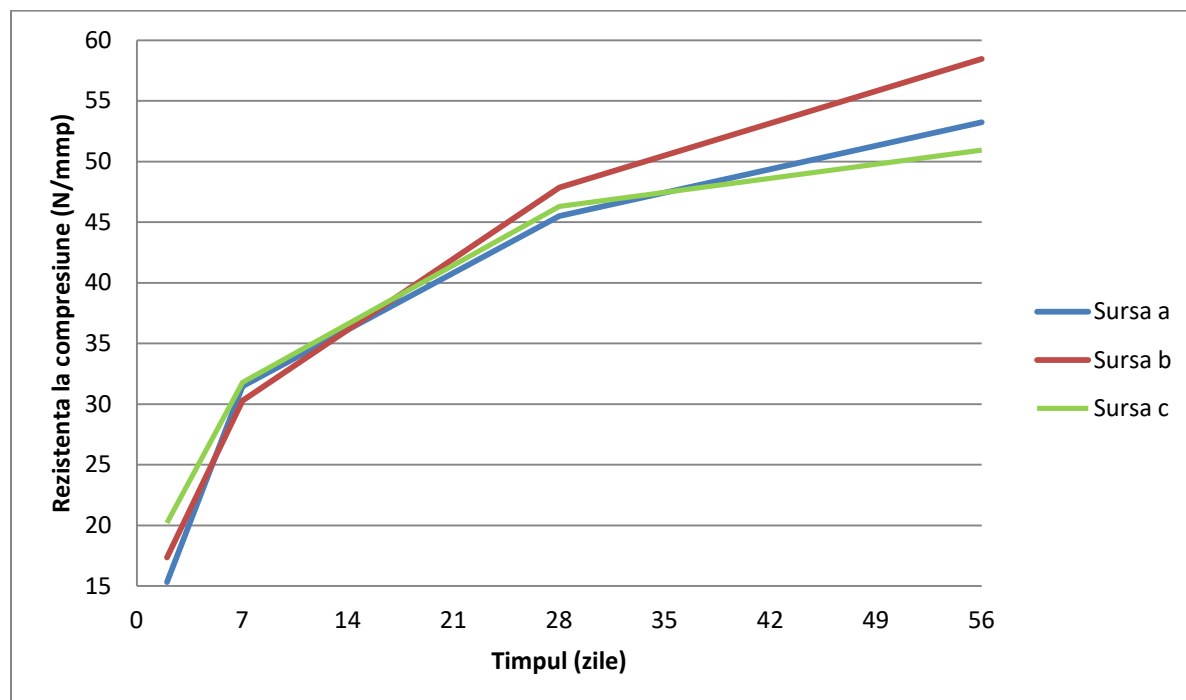


Figura V.27. - Variația rezistenței la compresiune a betonului cu CEM III/A 42.5 N-LH în funcție de sursă la raport  $a/c=0.50$

Graficul din figura V.27. arată că la raport  $a/c$  constant betoanele preparate cu același tip de ciment dar provenit din surse diferite prezintă valori diferite ale rezistențelor la 2, 7, 28 și 56 de zile, cele mai mari valori înregistrându-se pentru betoanele cu ciment din sursa b după vârsta de 21 zile. Intervalul de variație al rezistențelor la compresiune la 2 zile este între 13-31%, la 7 zile între 3-5%, la 28 zile 1-5% și pentru 56 zile este cuprins între 4-14%.

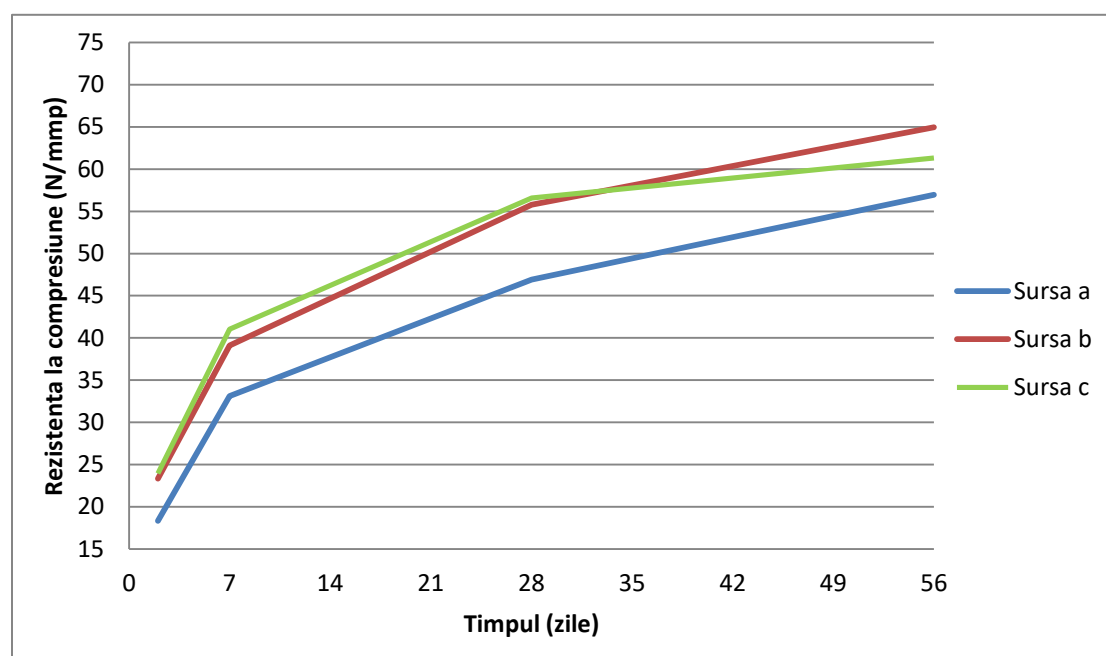


Figura V.28. - Variația rezistenței la compresiune a betonului cu CEM III/A 42.5 N-LH în funcție de sursă la raport  $a/c=0.45$

Dacă raportul a/c se reduce se obțin diferențe mai mari între rezistențele la 2, 7, 28 și 56 de zile pentru betoanele preparate cu același tip de ciment provenit din surse diferite, intervalul de variație fiind mai mare, 27-30% pentru rezistența la compresiune la 2 zile, 18-23% pentru rezistența la compresiune la 7 zile, 18-20% pentru rezistența la compresiune la 28 zile și 7-14% pentru rezistența la compresiune la 56 zile.

Astfel în cazul betoanelor preparate cu ciment CEM III/A, rezistențele la compresiune la 28 zile variază cu maxim 6 N/mm<sup>2</sup>, iar la 56 zile diferența maximă este de 8.8 N/mm<sup>2</sup> corespunzătoare dozajului de ciment de 240 kg/m<sup>3</sup>. Pentru dozajul de 360 kg/m<sup>3</sup>, rezistențele la compresiune au un interval de variație de 8.8 N/mm<sup>2</sup> la 28 zile și respectiv 7.5 N/mm<sup>2</sup> la 56 zile.

În tabelul V.11 se prezintă clasificarea evoluției rezistenței betonului în funcție de sursă și raportul a/c.

Tabelul V.11. – Încadrarea cimentului compozit CEM III/A 42.5N-LH pe surse (fabrici) diferite sub aspectul coeficientului "r" de caracterizare a evoluției rezistenței betonului, funcție de care se stabilește durata de tratare raportată la temperatura măsurată la suprafața betonului

| Dozaj<br>ciment<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Sursa b |                     | Sursa c |                     | Sursa a |                     |
|-----------------------------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|---------|---------------------|
|                                         | r       | Evoluție<br>rezist. | r       | Evoluție<br>rezist. | r       | Evoluție<br>rezist. |
| 200                                     | 0.32    | medie               | 0.36    | medie               | 0.37    | medie               |
| 220                                     | 0.29    | lentă               | 0.35    | medie               | 0.38    | medie               |
| 240                                     | 0.28    | lentă               | 0.37    | medie               | 0.35    | medie               |
| 260                                     | 0.28    | lentă               | 0.39    | medie               | 0.32    | medie               |
| 280                                     | 0.28    | lentă               | 0.39    | medie               | 0.30    | medie               |
| 300                                     | 0.38    | medie               | 0.39    | medie               | 0.30    | medie               |
| 320                                     | 0.34    | medie               | 0.41    | medie               | 0.34    | medie               |
| 340                                     | 0.36    | medie               | 0.44    | medie               | 0.33    | medie               |
| 360                                     | 0.38    | medie               | 0.43    | medie               | 0.36    | medie               |
| 380                                     | 0.42    | medie               | 0.42    | medie               | 0.39    | medie               |
| 400                                     | 0.45    | medie               | 0.43    | medie               | 0.40    | medie               |

Tabelul V.11. arată faptul că, pe ansamblu, betoanele preparate cu ciment CEM III/A 42,5N-LH au o evoluție medie a rezistențelor la compresiune și la un dozaj de ciment de 220-280 kg/m<sup>3</sup> fiind posibilă și o evoluție lentă înregistrată pentru sursa b. Aceste informații referitoare la durata de tratare și măsurile ce trebuie luate pe șantier, în special pentru temperaturi sub 10 °C sunt deosebit de utile în execuție pentru stabilirea termenelor de decofrare.

Se poate observa că la dozaje de ciment între 220-280 kg/m<sup>3</sup> pentru betoanele preparate cu ciment din sursa b se înregistrează o evoluție lentă a rezistenței, în schimb rezistențele în cazul sursei a și c au o evoluție medie indiferent de dozajul de ciment ales.

Rezultatele încercărilor la compresiune și încadrarea în clasele de rezistență la compresiune corespunzătoare sunt în tabelul V.12.

Tabelul V.12. – Clasele de beton obținute conform valorilor rezistențelor la compresiune ale betoanelor preparate cu un dozaj de ciment echivalent în funcție de sursă conform normativului NE 012-1 [3]

| Tip<br>ciment                 | Dozaj<br>ciment<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Rezistența la<br>compresiune $f_{cm28}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |            |            | Clasa de beton obținută |         |          |                    |          |         |
|-------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------|------------|-------------------------|---------|----------|--------------------|----------|---------|
|                               |                                         |                                                                 |            |            | Încercări inițiale      |         |          | Verificări curente |          |         |
|                               |                                         | Sursa<br>a                                                      | Sursa<br>b | Sursa<br>c | Sursa a                 | Sursa b | Sursa c  | Sursa a            | Sursa b  | Sursa c |
| CEM<br>III/A<br>42.5 N-<br>LH | 200                                     | 13.06                                                           | 12.47      | 15.87      | C4/5**                  | C4/5**  | C6/7.5** | C6/7.5**           | C6/7.5** | C8/10   |
|                               | 220                                     | 13.88                                                           | 16.21      | 19.34      | C4/5**                  | C8/10   | C8/10    | C6/7.5**           | C8/10    | C12/15  |
|                               | 240                                     | 18.12                                                           | 20.08      | 24.28      | C8/10                   | C8/10   | C12/15   | C8/10              | C12/15   | C16/20  |
|                               | 260                                     | 21.42                                                           | 24.59      | 27.37      | C12/15                  | C12/15  | C16/20   | C12/15             | C16/20   | C16/20  |
|                               | 280                                     | 25.83                                                           | 32.03      | 32.28      | C12/15                  | C20/25  | C20/25   | C16/20             | C20/25   | C20/25  |
|                               | 300                                     | 31.58                                                           | 36.27      | 35.81      | C20/25                  | C25/30  | C20/25   | C20/25             | C25/30   | C25/30  |
|                               | 320                                     | 36.28                                                           | 44.97      | 37.14      | C25/30                  | C30/37  | C25/30   | C25/30             | C30/37   | C25/30  |
|                               | 340                                     | 45.51                                                           | 47.85      | 46.29      | C30/37                  | C30/37  | C30/37   | C30/37             | C30/37   | C30/37  |
|                               | 360                                     | 44.11                                                           | 51.47      | 52.94      | C30/37                  | C35/45  | C35/45   | C30/37             | C35/45   | C35/45  |
|                               | 380                                     | 46.91                                                           | 55.78      | 56.57      | C30/37                  | C35/45  | C40/50   | C30/37             | C40/50   | C40/50  |
|                               | 400                                     | 52.23                                                           | 58.04      | 60.80      | C35/45                  | C35/45  | C40/50   | C35/45             | C40/50   | C40/50  |

\* Clasa minimă de beton pentru structuri conform SR EN 206 [17] este C8/10.

\*\* Clase de rezistență la compresiune care nu se regăsesc în SR EN 206 [17]

### Concluzii:

- Studiul prezintă rezultatele obținute pe betoane preparate cu aceleași tipuri și dozaje de ciment, provenit din diverse surse, care au indicat o variație importantă a rezistenței la compresiune a betonului la toate vârstele la care s-au făcut încercări, din cauze legate în principal de proveniența, compoziția clincherului și adaosului de zgură granulată de furnal macinată asupra caracteristicilor betonului.
- Betoanele realizate cu compoziții și rapoarte a/c identice, preparate cu cimenturi de același tip, dar din surse diferite se pot încadra în clase de rezistență la compresiune diferite și au evoluții în timp ale rezistențelor diferite.
- Încercările experimentale sunt esențiale și în aceste cazuri pentru stabilirea caracteristicilor betonului în general și a rezistențelor la compresiune în special.

## V.2. Identificarea timpului de referință pentru determinarea valorii rezistenței la compresiune a betonului conform prevederilor actuale din standardul european SR EN 1992-1-1 și a proiectului noului standard prEN 1992-1-1 pentru diferite tipuri de cimenturi

Rezistența la compresiune a betonului determinată la 28 zile este criteriul de apreciere al clasei betonului și în funcție de valorile ei vor fi indicații suficient de precise și asupra altor caracteristici fizico-mecanice ale betonului. În afara factorilor de care depinde rezistența la compresiune a betonului cum ar fi: caracteristicile și proporția constituenților, condițiile de punere în opera și de tratare ulterioară și condițiile de încercare, clasa betonului ar trebui să depindă și de tipul cimentului utilizat și de evoluția în timp a rezistenței betonului. Având în vedere că pentru betoanele cu cimenturi compozite evoluția rezistenței la compresiune este mai lentă și sporul de rezistență după vârsta de 28 de zile este semnificativ, s-au încercat la compresiune betoane cu

tipuri diferite de cimenturi cu adaosuri minerale la vârste peste 28 de zile pentru a se determina timpul de referință indicat pentru astfel de încercări în vederea determinării clasei betonului.

Materialele cimentoide suplimentare (Supplementary Cementing Materials) din ciment sau din beton conferă proprietăți mecanice diferite ale betonului față de cele ale betonului preparat cu ciment Portland. Aceste adaosuri minerale, prin proprietățile lor chimice, fizice și mineralogice, influențează reacțiile de hidratare, evoluția structurii porilor și a compoziției soluțiilor din pori determinând modificări în microstructura betonului care la rândul său, influențează performanța materialului din structurile de beton în condițiile de expunere ale mediului.

Capitolul se referă la influențele prezenței acestor adaosuri minerale asupra evoluției în timp a rezistențelor mecanice ale betoanelor preparate cu diferite tipuri de cimenturi.

Deși bazate pe principii utilizate de mai multă vreme, prevederile actuale din standardul european SR EN 1992-1-1 [33] privind caracterizarea evoluției în timp a rezistenței la compresiune a betonului conduc la obținerea unor rezultate diferite uneori față de realitate. Noul proiect pentru actualizarea standardului european prEN 1992-1-1 [60], elaborat în octombrie 2017, aduce ca element de noutate față de prevederile anterioare valori sporite ale coeficientului  $s$  și posibila considerare a unui timp de referință cuprins între 28 și 90 de zile privind determinarea evoluției în timp a rezistenței la compresiune a betonului. Diferența de abordare între cele două ediții ale standardului aduce după sine o dependență față de evoluția în timp a rezistenței betonului, având în vedere faptul că poate fi acceptat un alt timp de referință față de cel de 28 zile, în cazul unor compoziții cu tipuri de ciment cu evoluție lentă a rezistenței.

În scopul analizării condițiilor de aplicare ale formulei propuse de noua versiune a standardului prEN 1992-1-1 [60] au fost testate o serie de betoane preparate cu cimenturi cu diferite procente de zgură granulată de furnal măcinată (cu/sau fără cenușă zburătoare) la diferite perioade de timp. Programul experimental a constatat în determinarea rezistenței medii la compresiune a betoanelor preparate cu patru tipuri de cimenturi: CEM II/B-S 32.5R, CEM II/B-S 32.5N, CEM II/B-M (S-V) 32.5R și CEM III/A 32.5R, unul cu întărire normală și trei cu întărire rapidă.

S-a analizat, de asemenea, evoluția în timp a rezistențelor la compresiune pentru betoanele realizate cu CEM II/B-S 32.5R, CEM II/B-S 32.5N, CEM II/B-M (S-V) 32.5R și CEM III/A 32.5R comparând rezultatele obținute experimental cu valorile calculate ale rezistențelor la compresiune determinate după prevederile prescripțiilor de proiectare din SR EN 1992-1-1:2004 [33] și după cele ale proiectului de revizuire pentru EN 1992-1-1 [60] luând în considerare, în acest caz, timpi de referință diferiți (28, 56 și respectiv 90 zile).

#### ❖ Beton cu CEM II/B-S 32.5R (clincher 65-79%, zgura granulată de furnal măcinată 21-35%)

Compoziția betoanelor preparate cu CEM II/B-S 32.5 R sunt prezentate în tabelul V.13.  
Tabelul V.13. - Caracteristicile compoziționale și proprietățile betonului proaspăt preparat cu CEM II/B-S 32.5R

| Clasa  | Raport a/c | Dozaj ciment (kg/m <sup>3</sup> ) | Dimensiune maximă granulă agregat (mm) | Aditiv           | Tasare (mm) |
|--------|------------|-----------------------------------|----------------------------------------|------------------|-------------|
| C16/20 | 0.51       | 315                               | 32                                     | superplastifiant | 105         |
| C20/25 | 0.44       | 360                               | 32                                     |                  | 110         |
| C25/30 | 0.39       | 400                               | 32                                     |                  | 110         |
| C30/37 | 0.34       | 460                               | 32                                     |                  | 115         |
| C35/45 | 0.29       | 600                               | 32                                     |                  | 105         |

Rezistența medie la compresiune la o anumită vârstă se determină în funcție de rezistența medie la vârsta de referință aplicând relația:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \times f_{cm}$$

în care termenii au fost definiți la punctul IV.6.

Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM II/B-S 32.5 R pentru diferite rapoarte a/c sunt date în tabelele V.14-V.18.

Tabelul V.14. - Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM II/B-S 32.5 R la raport a/c=0.51

| Vârsta betonului | Valori experimentale $f_{cm}$ la raport <b>a/c = 0.51</b> | Valori calculate $f_{cm}$ (EC 2) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC2*ref28) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC 2*ref 56) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC 2*ref 90) |
|------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 7 zile           | 22.88                                                     |                                  |                                         |                                           |                                           |
| 28 zile          | 33.32                                                     |                                  |                                         |                                           |                                           |
| 56 zile          | 34.73                                                     | $\beta = 1.076$<br>35.85         | $\beta = 1.108$<br>36.92                |                                           |                                           |
| 90 zile          | 36.44                                                     | $\beta = 1.117$<br>37.22         | $\beta = 1.167$<br>38.90                | $\beta = 1.054$<br>36.59                  |                                           |
| 180 zile         | 42.96                                                     | $\beta = 1.163$<br>38.77         | $\beta = 1.236$<br>41.19                | $\beta = 1.116$<br>38.75                  | $\beta = 1.059$<br>38.58                  |
| 360 zile         | 46.22                                                     | $\beta = 1.198$<br>39.90         | $\beta = 1.287$<br>42.89                | $\beta = 1.162$<br>40.34                  | $\beta = 1.103$<br>40.17                  |
| 720 zile         | 49.78                                                     | $\beta = 1.222$<br>40.73         | $\beta = 1.324$<br>44.13                | $\beta = 1.195$<br>41.51                  | $\beta = 1.135$<br>41.34                  |
|                  |                                                           | $\beta_{max}=1.284$<br>42.78     | $\beta_{max}=1.419$<br>47.28            | $\beta_{max}= 1.281$<br>44.48             | $\beta_{max}=1.216$<br>44.29              |

S-a notat cu:  $f_{cm}$ (EC 2) - rezistența medie la compresiune la o vârstă mai mare de 28 zile determinată conform SR EN 1992-1-1 [33], având timpul de referință de 28 de zile;

$f_{cm}$ (prEC 2\*ref 28) - rezistența medie la compresiune la o vârstă mai mare de 28 zile determinată conform proiectului de revizuire pentru prEN 1992-1-1 [60], având timpul de referință de 28 de zile;

$f_{cm}$ (prEC 2\*ref 56) - rezistența medie la compresiune la o vârstă mai mare de 56 zile determinată conform proiectului de revizuire pentru prEN 1992-1-1 [60], având timpul de referință de 56 de zile;

$f_{cm}$ (prEC 2\*ref 90) - rezistența medie la compresiune la o vârstă mai mare de 90 zile determinată conform proiectului de revizuire pentru prEN 1992-1-1 [60], având timpul de referință de 90 de zile.

Tabelul V.15. - Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM II/B-S 32.5 R la raport a/c=0.44

| Vârsta betonului | Valori experimentale $f_{cm}$ la raport <b>a/c = 0.44</b> | Valori calculate $f_{cm}$ (EC 2) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC2*ref28) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC 2*ref 56) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC 2*ref 90) |
|------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 7 zile           | 25.75                                                     |                                  |                                         |                                           |                                           |
| 28 zile          | 36.44                                                     |                                  |                                         |                                           |                                           |
| 56 zile          | 38.08                                                     | $\beta = 1.076$<br>39.21         | $\beta = 1.108$<br>40.37                |                                           |                                           |
| 90 zile          | 40.07                                                     | $\beta = 1.117$<br>40.70         | $\beta = 1.167$<br>42.54                | $\beta = 1.054$<br>40.12                  |                                           |

| Vârsta betonului | Valori experimentale $f_{cm}$ la raport $a/c = 0.44$ | Valori calculate $f_{cm}(EC\ 2)$ | Valori calculate $f_{cm}(prEC2*ref28)$ | Valori calculate $f_{cm}(prEC\ 2*ref\ 56)$ | Valori calculate $f_{cm}(prEC\ 2*ref\ 90)$ |
|------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 180 zile         | 47.40                                                | $\beta = 1.163$<br>42.40         | $\beta = 1.236$<br>45.04               | $\beta = 1.116$<br>42.48                   | $\beta = 1.059$<br>42.43                   |
| 360 zile         | 53.33                                                | $\beta = 1.198$<br>43.64         | $\beta = 1.287$<br>46.90               | $\beta = 1.162$<br>44.24                   | $\beta = 1.103$<br>44.18                   |
| 720 zile         | 56.52                                                | $\beta = 1.222$<br>44.54         | $\beta = 1.324$<br>48.26               | $\beta = 1.195$<br>45.52                   | $\beta = 1.135$<br>45.46                   |
|                  |                                                      | $\beta_{max}=1.284$<br>46.79     | $\beta_{max}=1.419$<br>51.71           | $\beta_{max}= 1.281$<br>48.77              | $\beta_{max}=1.216$<br>48.71               |

Tabelul V.16. - Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM II/B-S 32.5 R la raport  $a/c=0.39$

| Vârsta betonului | Valori experimentale $f_{cm}$ la raport $a/c = 0.39$ | Valori calculate $f_{cm}(EC\ 2)$ | Valori calculate $f_{cm}(prEC2*ref28)$ | Valori calculate $f_{cm}(prEC\ 2*ref\ 56)$ | Valori calculate $f_{cm}(prEC\ 2*ref\ 90)$ |
|------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 7 zile           | 30.22                                                |                                  |                                        |                                            |                                            |
| 28 zile          | 42.51                                                |                                  |                                        |                                            |                                            |
| 56 zile          | 46.96                                                | $\beta = 1.076$<br>45.74         | $\beta = 1.108$<br>47.10               |                                            |                                            |
| 90 zile          | 52.37                                                | $\beta = 1.117$<br>47.48         | $\beta = 1.167$<br>49.63               | $\beta = 1.054$<br>49.48                   |                                            |
| 180 zile         | 53.62                                                | $\beta = 1.163$<br>49.46         | $\beta = 1.236$<br>52.55               | $\beta = 1.116$<br>52.39                   | $\beta = 1.059$<br>55.45                   |
| 360 zile         | 60.59                                                | $\beta = 1.198$<br>50.91         | $\beta = 1.287$<br>54.71               | $\beta = 1.162$<br>54.55                   | $\beta = 1.103$<br>57.74                   |
| 720 zile         | 65.44                                                | $\beta = 1.222$<br>51.96         | $\beta = 1.324$<br>56.30               | $\beta = 1.195$<br>56.13                   | $\beta = 1.135$<br>59.41                   |
|                  |                                                      | $\beta_{max}=1.284$<br>54.58     | $\beta_{max}=1.419$<br>60.32           | $\beta_{max}= 1.281$<br>60.14              | $\beta_{max}=1.216$<br>63.66               |

Tabelul V.17. - Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM II/B-S 32.5 R la raport  $a/c=0.34$

| Vârsta betonului | Valori experimentale $f_{cm}$ la raport $a/c = 0.34$ | Valori calculate $f_{cm}(EC\ 2)$ | Valori calculate $f_{cm}(prEC2*ref28)$ | Valori calculate $f_{cm}(prEC\ 2*ref\ 56)$ | Valori calculate $f_{cm}(prEC\ 2*ref\ 90)$ |
|------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 7 zile           | 39.03                                                |                                  |                                        |                                            |                                            |
| 28 zile          | 49.40                                                |                                  |                                        |                                            |                                            |
| 56 zile          | 50.87                                                | $\beta = 1.076$<br>45.74         | $\beta = 1.108$<br>54.73               |                                            |                                            |
| 90 zile          | 52.67                                                | $\beta = 1.117$<br>55.17         | $\beta = 1.167$<br>57.67               | $\beta = 1.054$<br>53.60                   |                                            |
| 180 zile         | 55.33                                                | $\beta = 1.163$<br>57.47         | $\beta = 1.236$<br>61.06               | $\beta = 1.116$<br>56.75                   | $\beta = 1.059$<br>55.77                   |
| 360 zile         | 60.44                                                | $\beta = 1.198$<br>59.16         | $\beta = 1.287$<br>63.58               | $\beta = 1.162$<br>59.09                   | $\beta = 1.103$<br>58.07                   |
| 720 zile         | 66.89                                                | $\beta = 1.222$<br>60.38         | $\beta = 1.324$<br>65.43               | $\beta = 1.195$<br>60.81                   | $\beta = 1.135$<br>59.75                   |
|                  |                                                      | $\beta_{max}=1.284$<br>63.43     | $\beta_{max}=1.419$<br>70.10           | $\beta_{max}= 1.281$<br>65.15              | $\beta_{max}=1.216$<br>64.02               |

Tabelul V.18. - Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM II/B-S 32.5 R la raport  $a/c=0.29$

| Vârsta betonului | Valori experimentale $f_{cm}$ la raport $a/c = 0.29$ | Valori calculate $f_{cm}$ (EC 2) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC2*ref28) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC 2*ref 56) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC 2*ref 90) |
|------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 7 zile           | 43.99                                                |                                  |                                         |                                           |                                           |
| 28 zile          | 60.37                                                |                                  |                                         |                                           |                                           |
| 56 zile          | 60.70                                                | $\beta = 1.076$<br>64.96         | $\beta = 1.108$<br>66.88                |                                           |                                           |
| 90 zile          | 61.11                                                | $\beta = 1.117$<br>67.43         | $\beta = 1.167$<br>70.47                | $\beta = 1.054$<br>63.95                  |                                           |
| 180 zile         | 61.26                                                | $\beta = 1.163$<br>70.24         | $\beta = 1.236$<br>74.62                | $\beta = 1.116$<br>67.72                  | $\beta = 1.059$<br>64.70                  |
| 360 zile         | 63.26                                                | $\beta = 1.198$<br>72.30         | $\beta = 1.287$<br>77.70                | $\beta = 1.162$<br>70.51                  | $\beta = 1.103$<br>67.37                  |
| 720 zile         | 67.85                                                | $\beta = 1.222$<br>73.79         | $\beta = 1.324$<br>79.95                | $\beta = 1.195$<br>72.56                  | $\beta = 1.135$<br>69.33                  |
|                  |                                                      | $\beta_{max}=1.284$<br>77.52     | $\beta_{max}=1.419$<br>85.67            | $\beta_{max}=1.281$<br>77.74              | $\beta_{max}=1.216$<br>74.28              |

Se poate observa din tabelele V.14.-V.18. că valorile coeficientului  $\beta$  din SR EN 1992-1-1 [33] sunt diferite de cele propuse de standardul european revizuit prEN1992-1-1 [60] și implicit așa vor varia și valorile calculate ale rezistențelor la compresiune ale betonului având drept referință rezistența medie de compresiune la 28 zile. În figurile V.29.-V.30. se prezintă evoluția în timp, reală și estimată, a rezistenței la compresiune pentru betonul cu CEM II/B-S 32.5R.

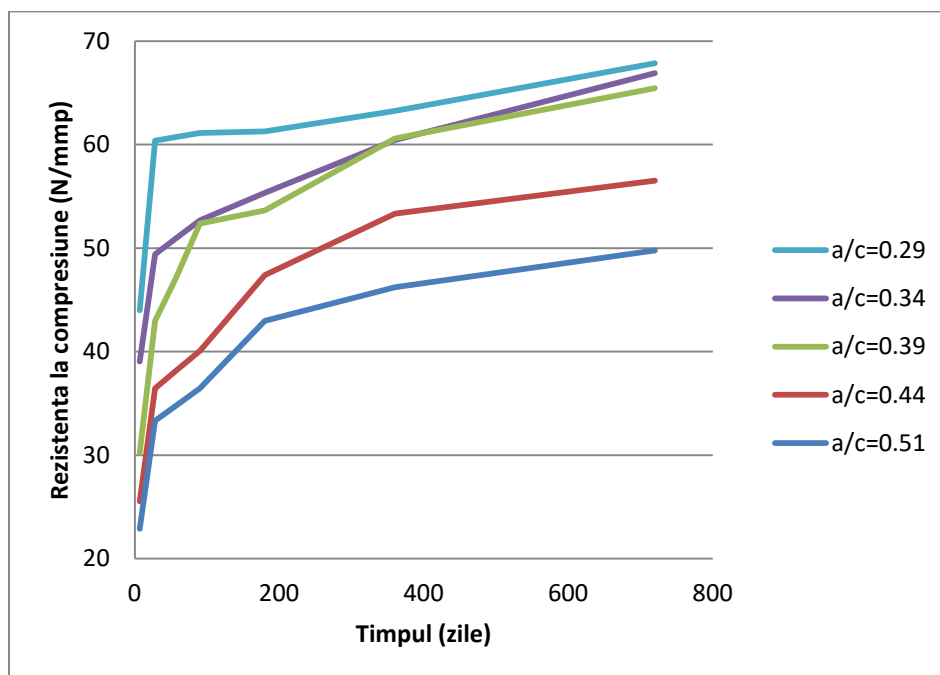


Figura V.29.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu ciment CEM II/B-S 32.5 R în funcție de vârstă și de raportul  $a/c$

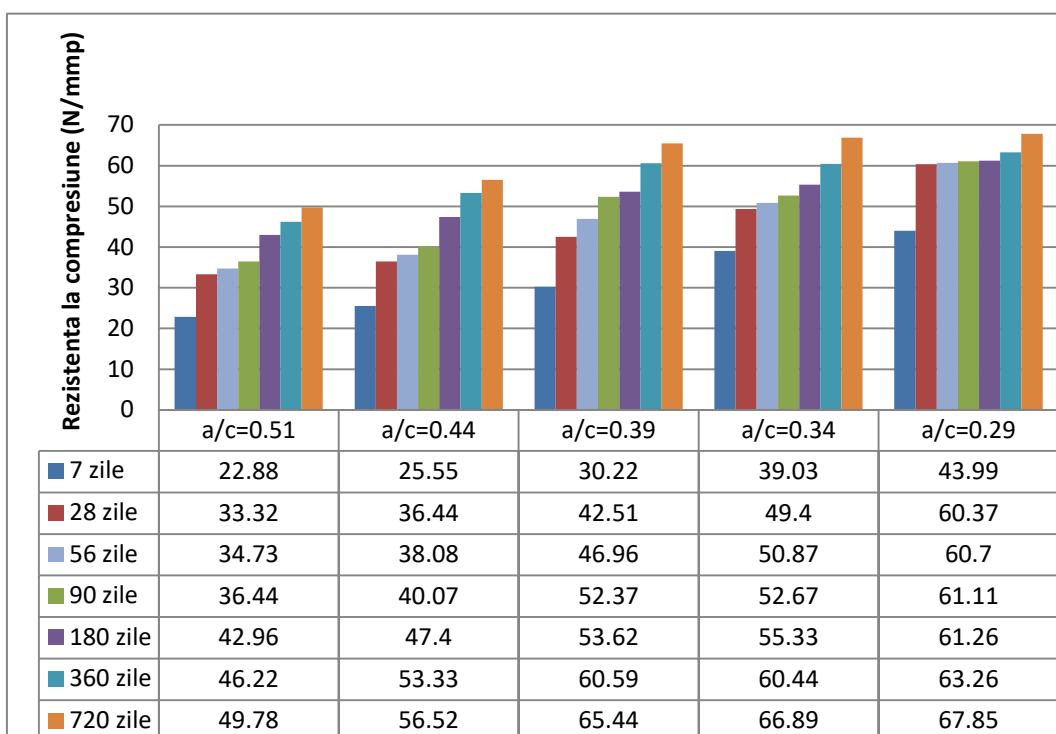


Figura V.30.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu ciment CEM II/B-S 32.5 R în funcție de vârstă și de raportul a/c

În reprezentarea grafică din figura V.30. se poate observa cu ușurință modul de variație în timp al rezistențelor la compresiune ale betonului preparat cu ciment CEM II/B-S 32.5R și faptul că la rapoarte a/c obișnuite rezistențele cresc mult în timp, dar odată cu scăderea raportului a/c se obțin rezistențe la compresiune relativ mari dar care nu mai cresc semnificativ cu trecerea timpului. Deci evoluția rezistențelor la compresiune în timp depinde de raportul a/c, fiind redusă dacă valorile raportului a/c sunt sub 0.30.

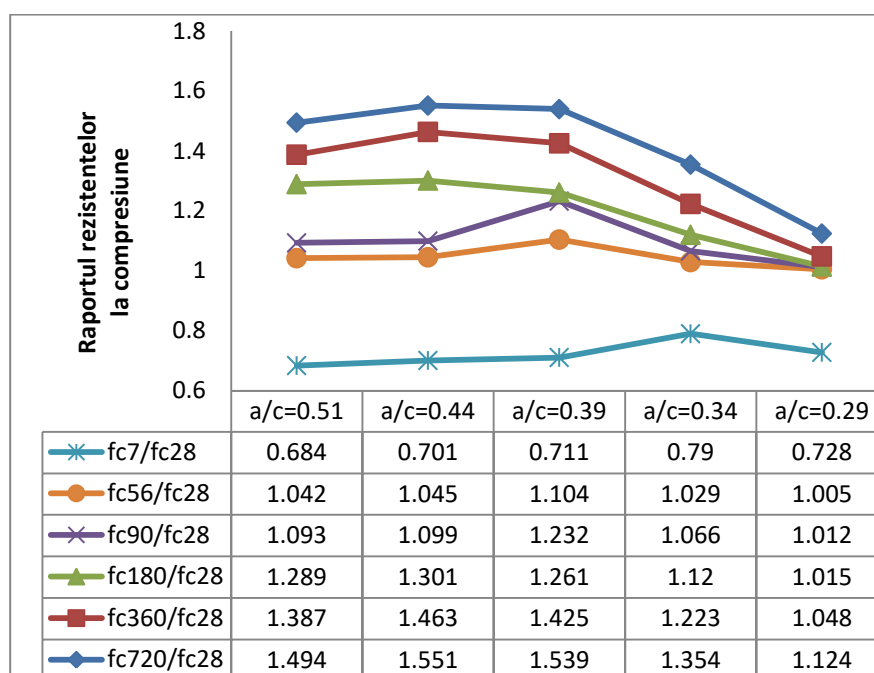


Figura V.31. - Variația rapoartelor dintre rezistențele la compresiune la betoane cu CEM II/B-S 32.5R în funcție de raportul a/c și vârsta betonului în momentul efectuării încercărilor

Creșterea rezistenței de la vârsta de 28 la 56 zile este cuprinsă între 0.5 - 10.45%, de la 28 la 90 zile variază între 1.2 - 23.2%, de la vârsta de 28 la 180 zile este între 1.5 - 30.1%, de la 28 la 360 zile variază între 4.8 - 46.3%, de la 28 la 720 zile sunt între 12.4 - 55.1%, având valoare maximă pentru raportul  $a/c = 0.39$  până la 90 zile, apoi pentru raportul  $a/c = 0.44$  între 180 și 720 zile.

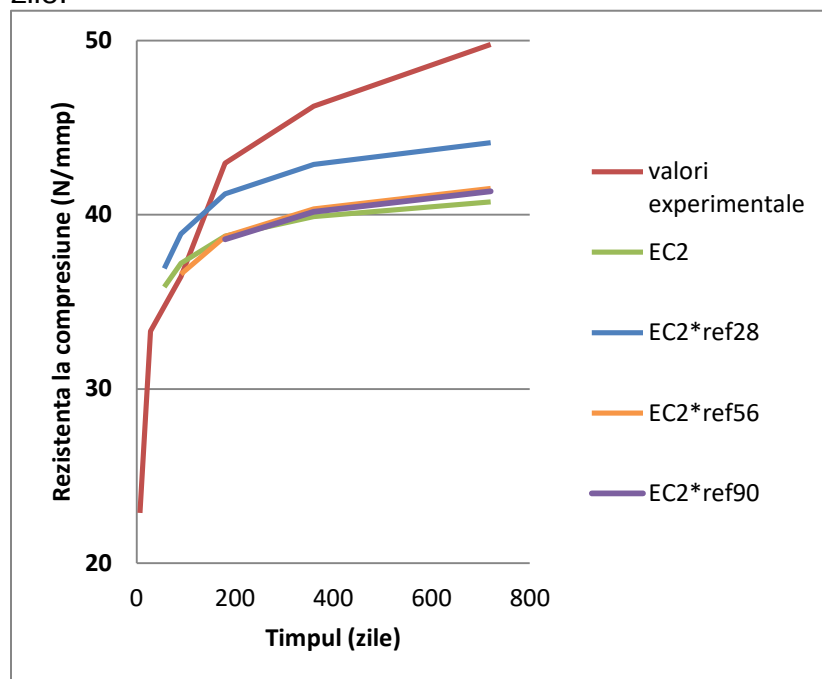


Figura V.32. - Variația rezistenței la compresiune a betonului cu CEM II/B-S 32.5 R cu raport  $a/c=0.51$  în funcție de vârstă

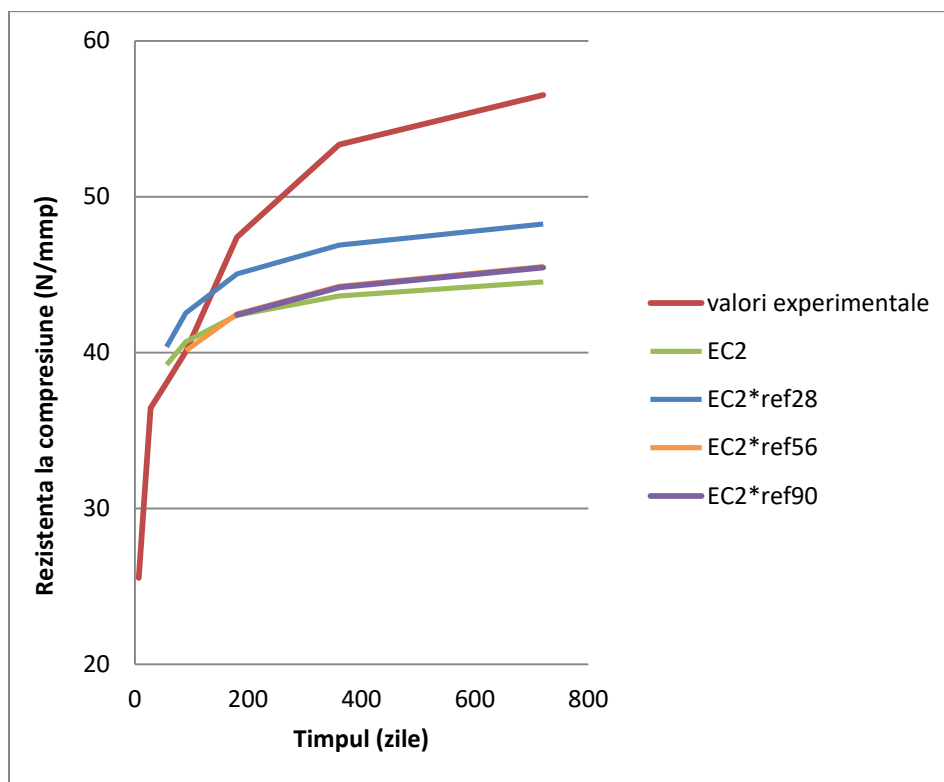


Figura V.33. - Variația rezistenței la compresiune a betonului cu ciment CEM II/B-S 32.5 R cu raport  $a/c=0.44$  în funcție de vârstă

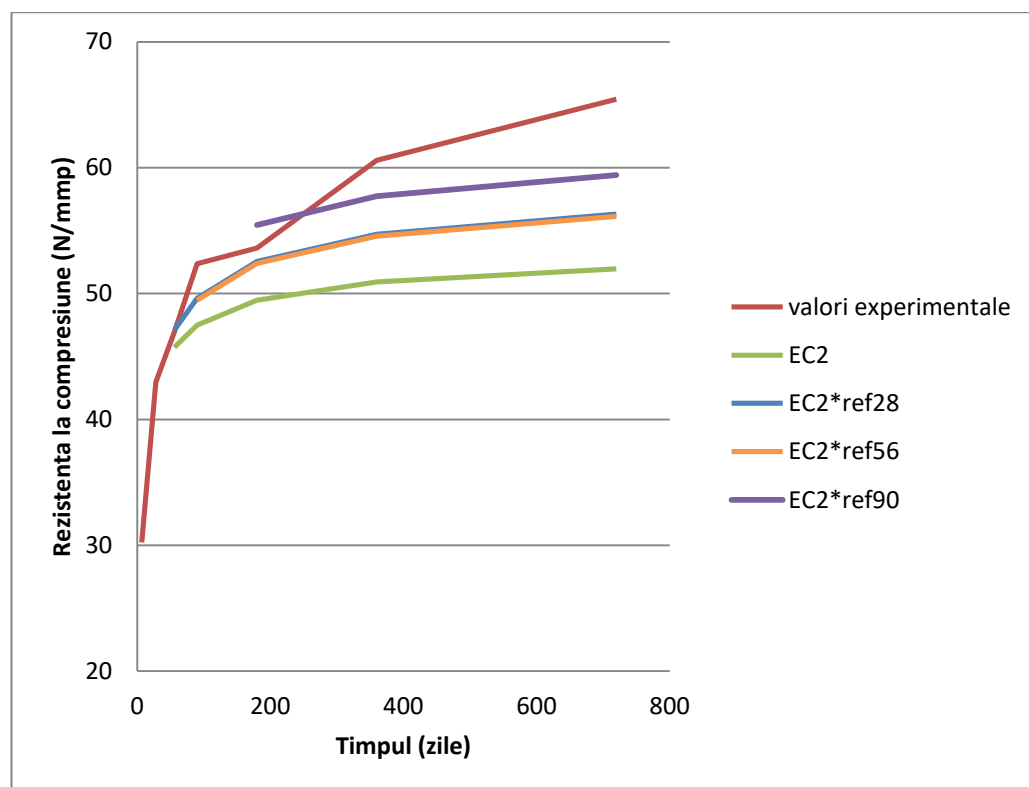


Figura V.34. - Variația rezistenței la compresiune a betonului cu ciment CEM II/B-S 32.5 R cu raport  $a/c=0.39$  în funcție de vârstă

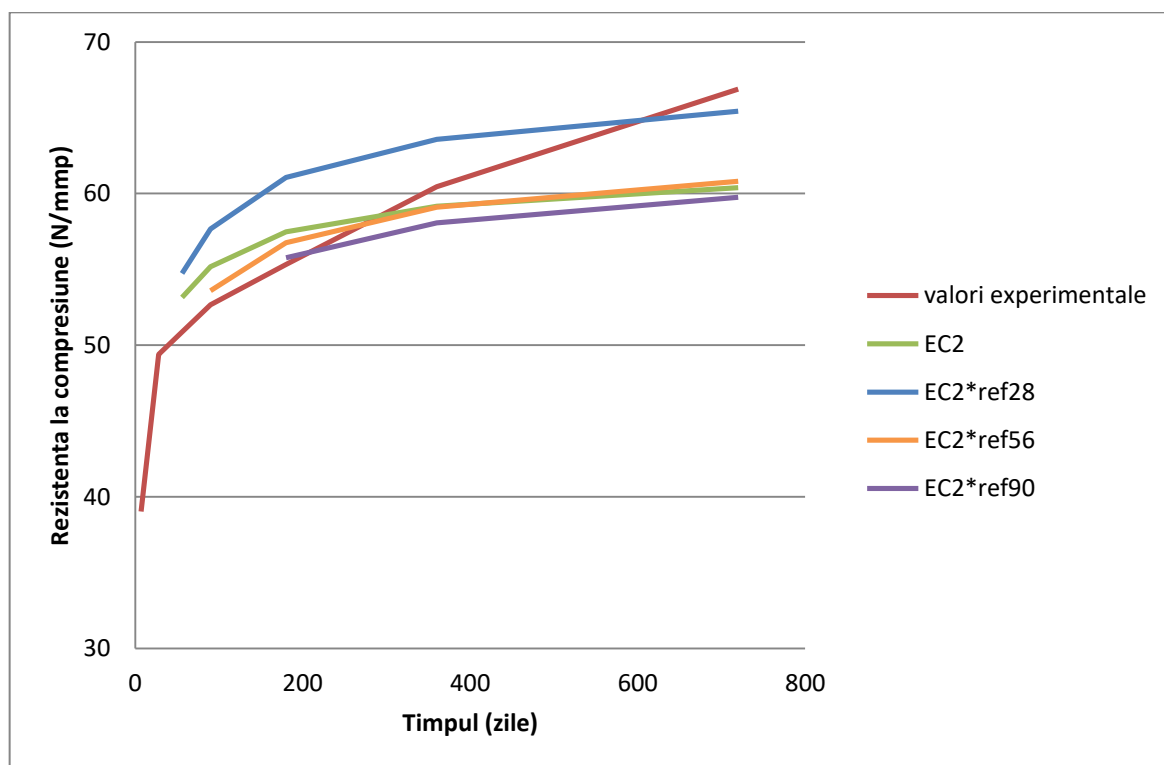


Figura V.35. - Variația rezistenței la compresiune a betonului cu ciment CEM II/B-S 32.5 R cu raport  $a/c=0.34$  în funcție de vârstă

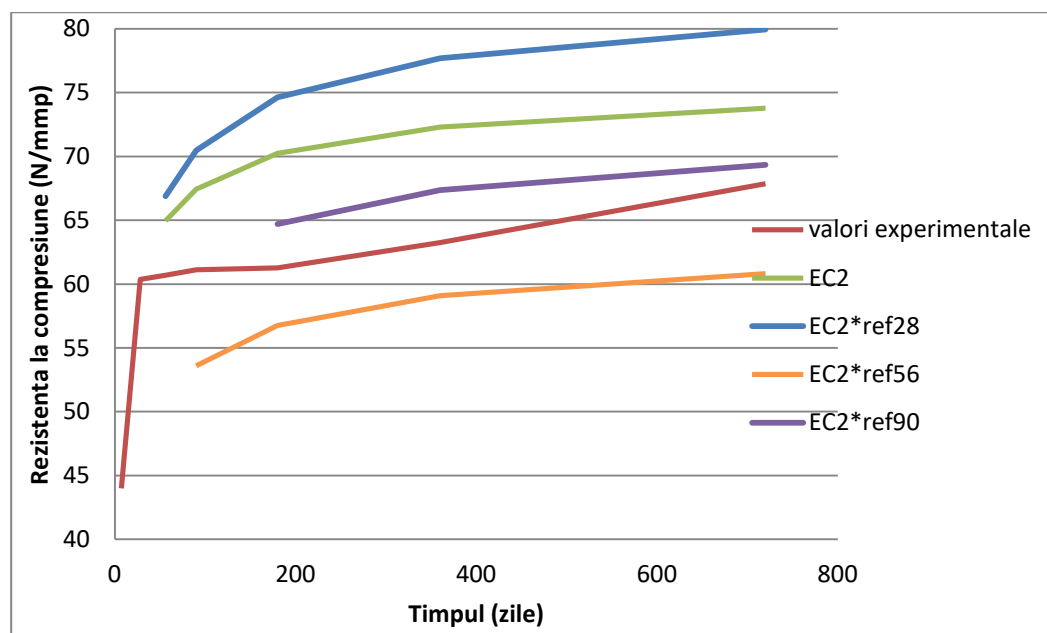


Figura V.36. - Variația rezistenței la compresiune a betonului cu ciment CEM II/ B-S 32.5 R cu raport a/c=0.29 în funcție de vârstă

Din graficele de mai sus rezultă că relațiile de calcul pentru estimarea rezistențelor de compresiune ale betonului în timp indică valori mai mici decât cele obținute experimental, dar aspectul acesta se modifica cu scăderea raportului a/c când apar supraevaluări față de evoluția reală. Pentru rapoartele a/c=0.51 și a/c=0.44 comportarea reală este cea mai apropiată de cea dată de proiectul prEN 1992-1-1 cu referința la 28 de zile, iar pentru rapoarte a/c=0.39 și a/c=0.29 comportarea reală se apropie de cea dată de proiectul prEN 1992-1-1 cu referința la 90 de zile.

Pentru betoanele realizate cu CEM II/B-S 32.5R există o diferență semnificativă între evoluția rezistențelor reale la compresiune și cele calculate indiferent de timpul de referință ales, cu diferență relativ mică între valorile rezistenței la compresiune la 28 și 90 zile.

#### ❖ Beton cu CEM II/B-S 32.5N (clinker 65-79%, zgură granulată de furnal măcinată 21-35%)

S-au comparat rezultatele experimentale cu valorile calculate ale rezistențelor medii la compresiune conform relațiilor date în SR EN 1992-1-1 și cu cele ale propunerii de revizuire pentru prEN 1992-1-1 luând în considerare tot timpi de referință diferiți (28, 60 și respectiv 90 zile) pentru betonul realizat cu ciment CEM II/ B-S 32.5 N.

Compozițiile betoanelor sunt prezentate în tabelul V.19.

Tabelul V.19. - Caracteristicile compoziționale și proprietățile betonului proaspăt preparat cu CEM II/B-S 32.5N

| Clasa  | Raport a/c | Dozaj ciment (kg/m <sup>3</sup> ) | Dimensiune maximă granulă agregat (mm) | Aditiv           | Tasare (mm) |
|--------|------------|-----------------------------------|----------------------------------------|------------------|-------------|
| C12/15 | 0.73       | 260                               | 40                                     | superplastifiant | 145         |
| C16/20 | 0.67       | 280                               | 40                                     |                  | 140         |
| C20/25 | 0.60       | 300                               | 40                                     |                  | 150         |
| C25/30 | 0.53       | 320                               | 40                                     | superplastifiant | 150         |

| Clasa  | Raport a/c | Dozaj ciment (kg/m <sup>3</sup> ) | Dimensiune maximă granulă agregat (mm) | Aditiv                              | Tasare (mm) |
|--------|------------|-----------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|-------------|
| C30/37 | 0.49       | 340                               | 40                                     |                                     | 140         |
| C30/37 | 0.47       | 380                               | 40                                     |                                     | 140         |
| C35/45 | 0.42       | 420                               | 40                                     | superplastifiant si antrenor de aer | 150         |
| C35/45 | 0.35       | 460                               | 40                                     | superplastifiant                    | 150         |

Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM II/B-S 32.5 N pentru diferite rapoarte a/c sunt date în tabelele V.20-V.26.

Tabelul V.20. - Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM II/B-S 32.5 N la raport a/c=0.73

| Vârsta betonului | Valori experimentale $f_{cm}$ la raport a/c = 0.73 | Valori calculate $f_{cm}$ (EC 2) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC2*ref28) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC 2*ref 56) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC 2*ref 90) |
|------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 2 zile           | 5.45                                               |                                  |                                         |                                           |                                           |
| 28 zile          | 23.91                                              |                                  |                                         |                                           |                                           |
| 60 zile          | 26.43                                              | $\beta = 1.128$<br>26.97         | $\beta = 1.135$<br>27.14                |                                           |                                           |
| 90 zile          | 26.87                                              | $\beta = 1.183$<br>28.28         | $\beta = 1.194$<br>28.53                | $\beta = 1.051$<br>27.19                  |                                           |
| 180 zile         | 27.77                                              | $\beta = 1.259$<br>30.09         | $\beta = 1.274$<br>30.46                | $\beta = 1.122$<br>29.66                  | $\beta = 1.068$<br>28.68                  |
| 360 zile         | 27.89                                              | $\beta = 1.315$<br>31.45         | $\beta = 1.334$<br>31.90                | $\beta = 1.176$<br>31.07                  | $\beta = 1.118$<br>30.04                  |
|                  |                                                    | $\beta_{max}=1.462$<br>34.96     | $\beta_{max}=1.492$<br>35.67            | $\beta_{max}=1.314$<br>34.73              | $\beta_{max}=1.250$<br>33.58              |

Tabelul V.21. Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM II/B-S 32.5 N la raport a/c=0.67

| Vârsta betonului | Valori experimentale $f_{cm}$ la raport a/c = 0.67 | Valori calculate $f_{cm}$ (EC 2) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC2*ref28) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC 2*ref 56) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC 2*ref 90) |
|------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 2 zile           | 5.68                                               |                                  |                                         |                                           |                                           |
| 28 zile          | 27.75                                              |                                  |                                         |                                           |                                           |
| 60 zile          | 32.45                                              | $\beta = 1.128$<br>31.30         | $\beta = 1.135$<br>31.50                |                                           |                                           |
| 90 zile          | 33.51                                              | $\beta = 1.183$<br>32.82         | $\beta = 1.194$<br>33.12                | $\beta = 1.051$<br>34.12                  |                                           |
| 180 zile         | 34.44                                              | $\beta = 1.259$<br>34.93         | $\beta = 1.274$<br>35.35                | $\beta = 1.122$<br>36.42                  | $\beta = 1.068$<br>35.77                  |
| 360 zile         | 36.49                                              | $\beta = 1.315$<br>36.50         | $\beta = 1.334$<br>37.03                | $\beta = 1.176$<br>38.14                  | $\beta = 1.118$<br>37.46                  |
|                  |                                                    | $\beta_{max}=1.462$<br>40.58     | $\beta_{max}=1.492$<br>41.40            | $\beta_{max}=1.314$<br>42.65              | $\beta_{max}=1.250$<br>41.88              |

Tabelul V.22. - Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM II/B-S 32.5 N la raport a/c=0.60

| Vârsta betonului | Valori experimentale<br>$f_{cm}$ la raport<br><b>a/c = 0.60</b> | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (EC 2) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC2*ref28) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC 2*ref 56) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC 2*ref 90) |
|------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 2 zile           | 6.46                                                            |                                     |                                            |                                              |                                              |
| 28 zile          | 32.78                                                           |                                     |                                            |                                              |                                              |
| 60 zile          | 34.83                                                           | $\beta = 1.128$<br>36.97            | $\beta = 1.135$<br>37.21                   |                                              |                                              |
| 90 zile          | 35.30                                                           | $\beta = 1.183$<br>38.78            | $\beta = 1.194$<br>39.12                   | $\beta = 1.051$<br>36.62                     |                                              |
| 180 zile         | 37.11                                                           | $\beta = 1.259$<br>41.26            | $\beta = 1.274$<br>41.76                   | $\beta = 1.122$<br>39.09                     | $\beta = 1.068$<br>37.68                     |
| 360 zile         | 37.18                                                           | $\beta = 1.315$<br>43.11            | $\beta = 1.334$<br>43.74                   | $\beta = 1.176$<br>40.94                     | $\beta = 1.118$<br>39.46                     |
|                  |                                                                 | $\beta_{max}=1.462$<br>47.93        | $\beta_{max}=1.492$<br>48.90               | $\beta_{max}=1.314$<br>45.77                 | $\beta_{max}=1.250$<br>44.12                 |

Tabelul V.23. - Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM II/B-S 32.5 N la raport a/c=0.53

| Vârsta betonului | Valori experimentale<br>$f_{cm}$ la raport<br><b>a/c = 0.53</b> | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (EC 2) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC2*ref28) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC 2*ref 56) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC 2*ref 90) |
|------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 2 zile           | 11.10                                                           |                                     |                                            |                                              |                                              |
| 28 zile          | 40.61                                                           |                                     |                                            |                                              |                                              |
| 60 zile          | 48.33                                                           | $\beta = 1.128$<br>45.80            | $\beta = 1.135$<br>46.09                   |                                              |                                              |
| 90 zile          | 50.68                                                           | $\beta = 1.183$<br>48.04            | $\beta = 1.194$<br>48.47                   | $\beta = 1.051$<br>50.18                     |                                              |
| 180 zile         | 53.11                                                           | $\beta = 1.259$<br>51.12            | $\beta = 1.274$<br>51.74                   | $\beta = 1.122$<br>54.24                     | $\beta = 1.068$<br>54.10                     |
| 360 zile         | 54.26                                                           | $\beta = 1.315$<br>53.41            | $\beta = 1.334$<br>54.18                   | $\beta = 1.176$<br>56.81                     | $\beta = 1.118$<br>56.66                     |
|                  |                                                                 | $\beta_{max}=1.462$<br>59.38        | $\beta_{max}=1.492$<br>60.58               | $\beta_{max}=1.314$<br>63.52                 | $\beta_{max}=1.250$<br>63.35                 |

Tabelul V.24. - Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM II/B-S 32.5 N la raport a/c=0.49

| Vârsta betonului | Valori experimentale<br>$f_{cm}$ la raport<br><b>a/c = 0.49</b> | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (EC 2) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC2*ref28) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC 2*ref 56) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC 2*ref 90) |
|------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 2 zile           | 12.61                                                           |                                     |                                            |                                              |                                              |
| 28 zile          | 43.50                                                           |                                     |                                            |                                              |                                              |
| 60 zile          | 54.63                                                           | $\beta = 1.128$<br>49.06            | $\beta = 1.135$<br>49.38                   |                                              |                                              |
| 90 zile          | 55.55                                                           | $\beta = 1.183$<br>51.46            | $\beta = 1.194$<br>51.92                   | $\beta = 1.051$<br>57.44                     |                                              |
| 180 zile         | 58.73                                                           | $\beta = 1.259$<br>54.75            | $\beta = 1.274$<br>55.42                   | $\beta = 1.122$<br>61.32                     | $\beta = 1.068$<br>59.30                     |
| 360 zile         | 63.13                                                           | $\beta = 1.315$<br>57.21            | $\beta = 1.334$<br>58.04                   | $\beta = 1.176$<br>64.22                     | $\beta = 1.118$<br>62.10                     |
|                  |                                                                 | $\beta_{max}=1.462$<br>63.61        | $\beta_{max}=1.492$<br>64.89               | $\beta_{max}=1.314$<br>71.79                 | $\beta_{max}=1.250$<br>69.43                 |

Tabelul V.25. - Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM II/B-S 32.5 N la raport a/c=0.47

| Vârsta betonului | Valori experimentale<br>$f_{cm}$ la raport<br><b>a/c = 0.47</b> | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (EC 2) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC2*ref28) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC 2*ref 56) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC 2*ref 90) |
|------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 2 zile           | 12.53                                                           |                                     |                                            |                                              |                                              |
| 28 zile          | 46.32                                                           |                                     |                                            |                                              |                                              |
| 60 zile          | 56.50                                                           | $\beta = 1.128$<br>52.25            | $\beta = 1.135$<br>52.58                   |                                              |                                              |
| 90 zile          | 56.70                                                           | $\beta = 1.183$<br>54.79            | $\beta = 1.194$<br>55.28                   | $\beta = 1.051$<br>59.40                     |                                              |
| 180 zile         | 57.21                                                           | $\beta = 1.259$<br>58.30            | $\beta = 1.274$<br>59.01                   | $\beta = 1.122$<br>63.41                     | $\beta = 1.068$<br>60.53                     |
| 360 zile         | 57.71                                                           | $\beta = 1.315$<br>58.30            | $\beta = 1.334$<br>59.01                   | $\beta = 1.176$<br>63.41                     | $\beta = 1.118$<br>63.39                     |
|                  |                                                                 | $\beta_{max}=1.462$<br>67.73        | $\beta_{max}=1.492$<br>69.10               | $\beta_{max}=1.314$<br>74.25                 | $\beta_{max}=1.250$<br>70.87                 |

Tabelul V.26. - Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM II/B-S 32.5 N la raport a/c=0.42

| Vârsta betonului | Valori experimentale<br>$f_{cm}$ la raport<br><b>a/c = 0.42</b> | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (EC 2) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC2*ref28) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC 2*ref 56) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC 2*ref 90) |
|------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 2 zile           | 15.00                                                           |                                     |                                            |                                              |                                              |
| 28 zile          | 54.54                                                           |                                     |                                            |                                              |                                              |
| 60 zile          | 64.29                                                           | $\beta = 1.128$<br>61.52            | $\beta = 1.135$<br>61.91                   |                                              |                                              |
| 90 zile          | 66.36                                                           | $\beta = 1.183$<br>64.52            | $\beta = 1.194$<br>65.09                   | $\beta = 1.051$<br>67.59                     |                                              |
| 180 zile         | 68.03                                                           | $\beta = 1.259$<br>68.65            | $\beta = 1.274$<br>69.49                   | $\beta = 1.122$<br>72.16                     | $\beta = 1.068$<br>70.84                     |
| 360 zile         | 70.39                                                           | $\beta = 1.315$<br>71.73            | $\beta = 1.334$<br>72.77                   | $\beta = 1.176$<br>75.57                     | $\beta = 1.118$<br>74.19                     |
|                  |                                                                 | $\beta_{max}=1.462$<br>79.75        | $\beta_{max}=1.492$<br>81.36               | $\beta_{max}=1.314$<br>84.49                 | $\beta_{max}=1.250$<br>82.94                 |

Se poate observa din tabelele de mai sus că, pentru clasa de rezistență a cimentului 32.5N, valorile coeficientului  $\beta$  din SR EN 1992-1-1 sunt aproximativ egale cu cele propuse de standardul european revizuit și implicit așa vor evolua și valorile rezistentelor medii la compresiune ale betonului având drept referință rezistența de compresiune la 28 zile.

În figurile V.37.-V.38. se prezintă evoluția în timp, reală și estimată, a rezistenței la compresiune pentru betonul cu CEM II/B-S 32.5N.

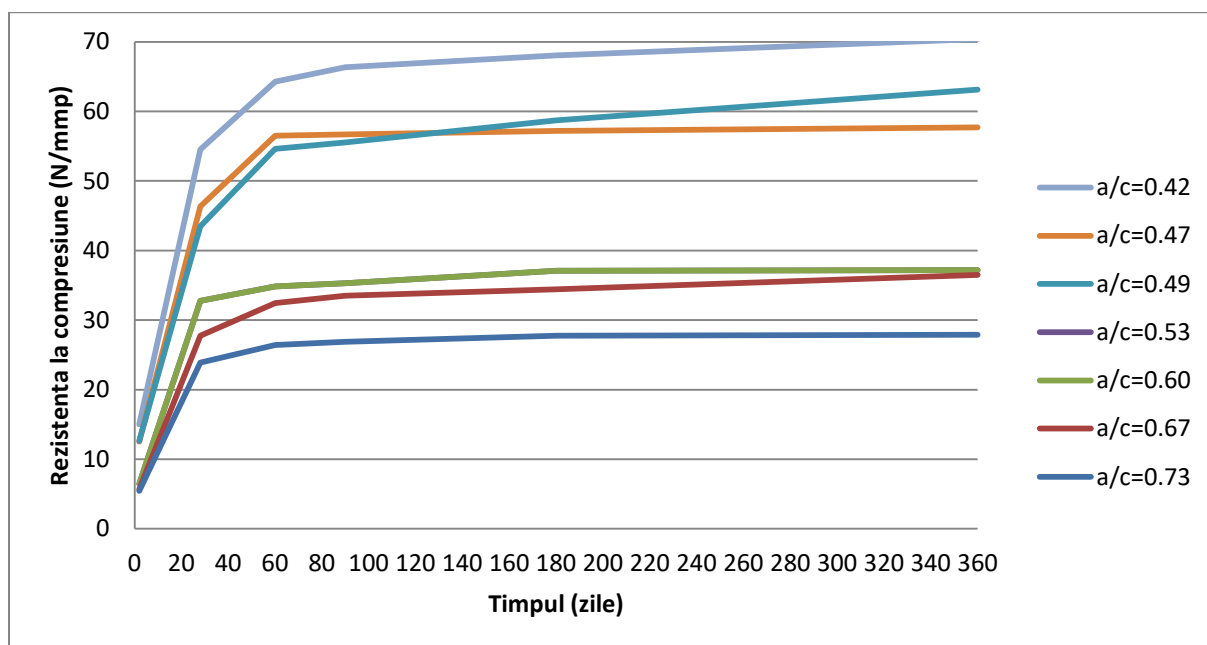


Figura V.37.- Variația rezistenței la compresie a betonului cu CEM II/B-S 32.5N în funcție de vârstă și raport  $a/c$

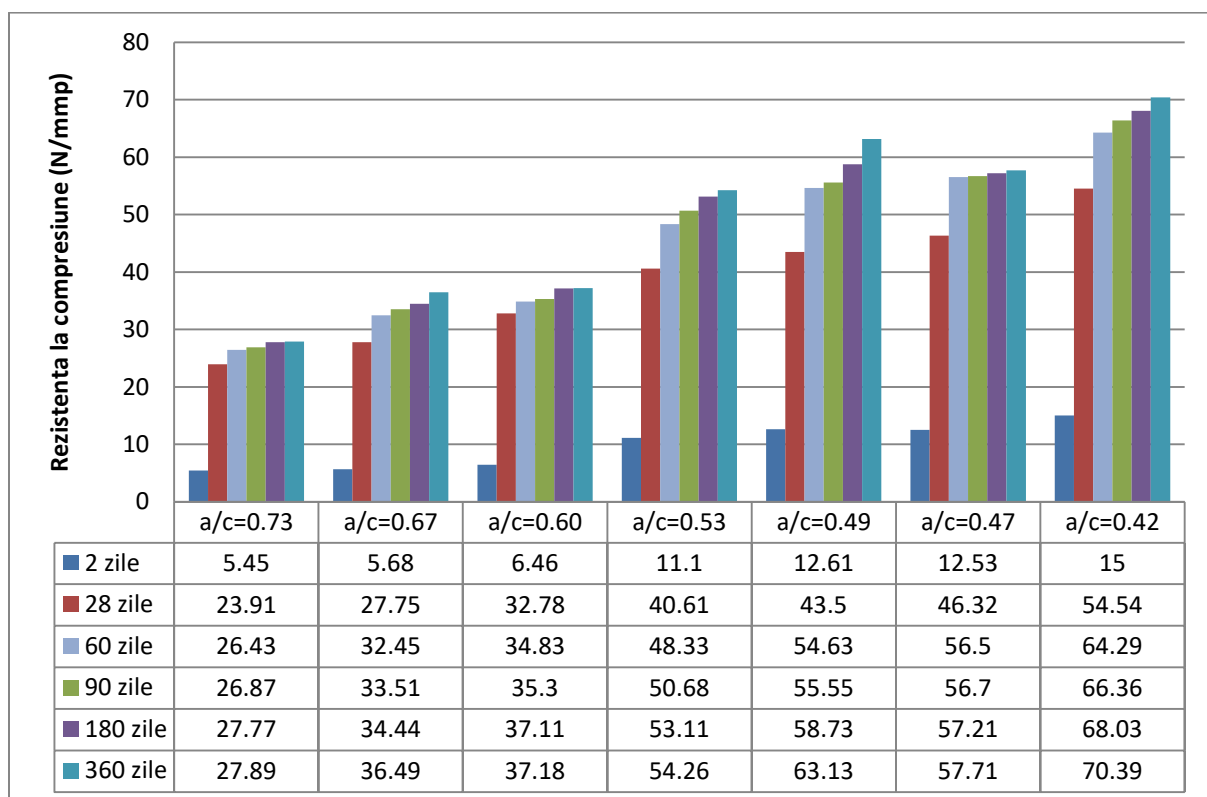


Figura V.38.- Variația rezistenței la compresie a betonului cu ciment CEM II/B-S 32.5N la  $n$  zile în funcție de raportul  $a/c$

Se remarcă din nou creșteri semnificative în timp ale rezistenței medii la compresie a betonului în jurul rapoartelor  $a/c$  uzuale (între 0.4-0.5) comparativ cu valoarea rezistenței la compresie la 28 zile.

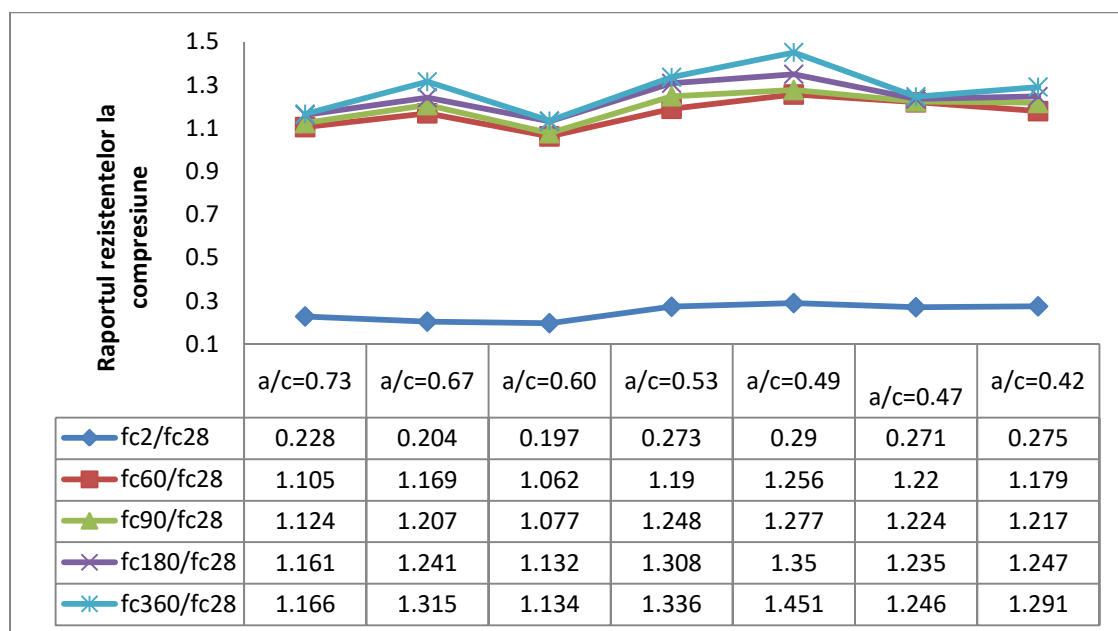


Figura V.39.- Variația rapoartelor dintre rezistențele la compresiune la betoane cu CEM II/B-S 32.5N în funcție de raportul a/c

Creșterea de rezistență de la vârsta de 28 la 60 zile este cuprinsă între 10.5 - 25.6%, de la 28 la 90 zile variază între 7.7 - 27.7%, de la 28 la 360 zile variază între 30.8 - 45%, având mereu valoare maximă pentru raportul a/c = 0.49.

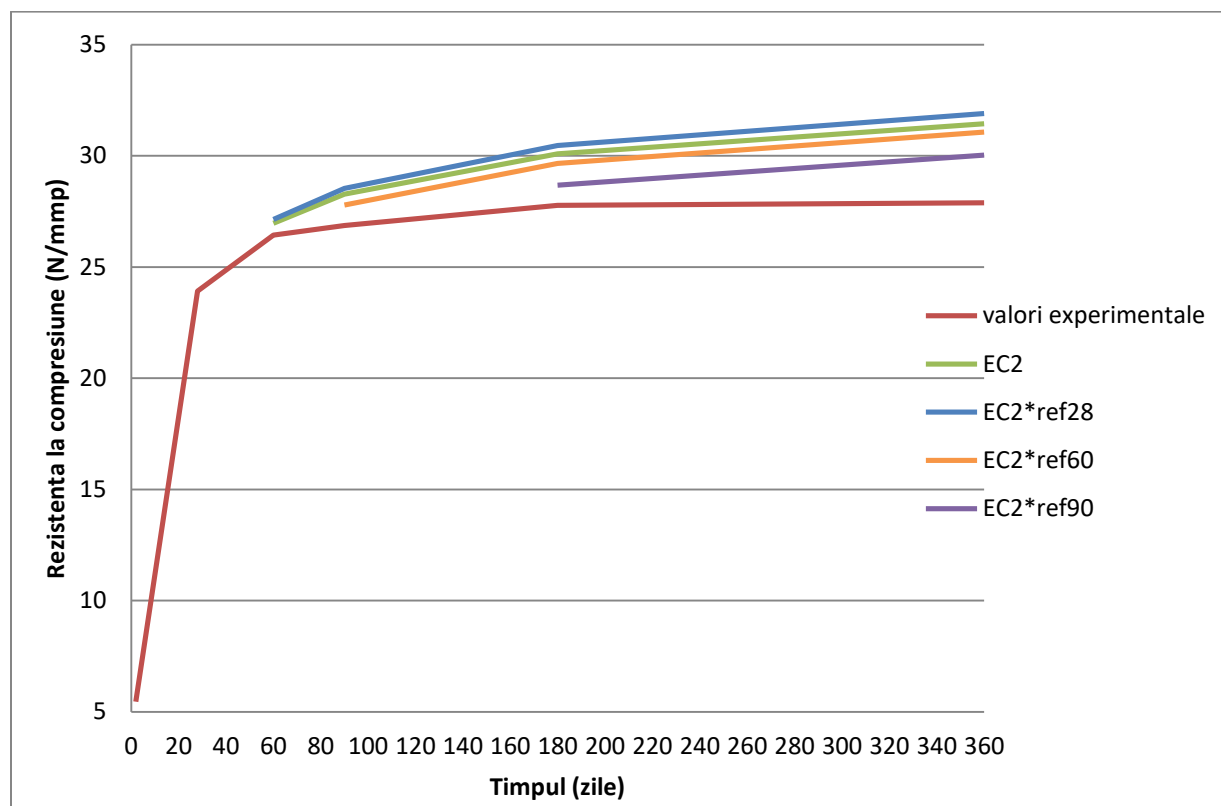


Figura V.40.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu ciment CEM II/B-S 32.5N cu raport a/c=0.73 în funcție de vârstă

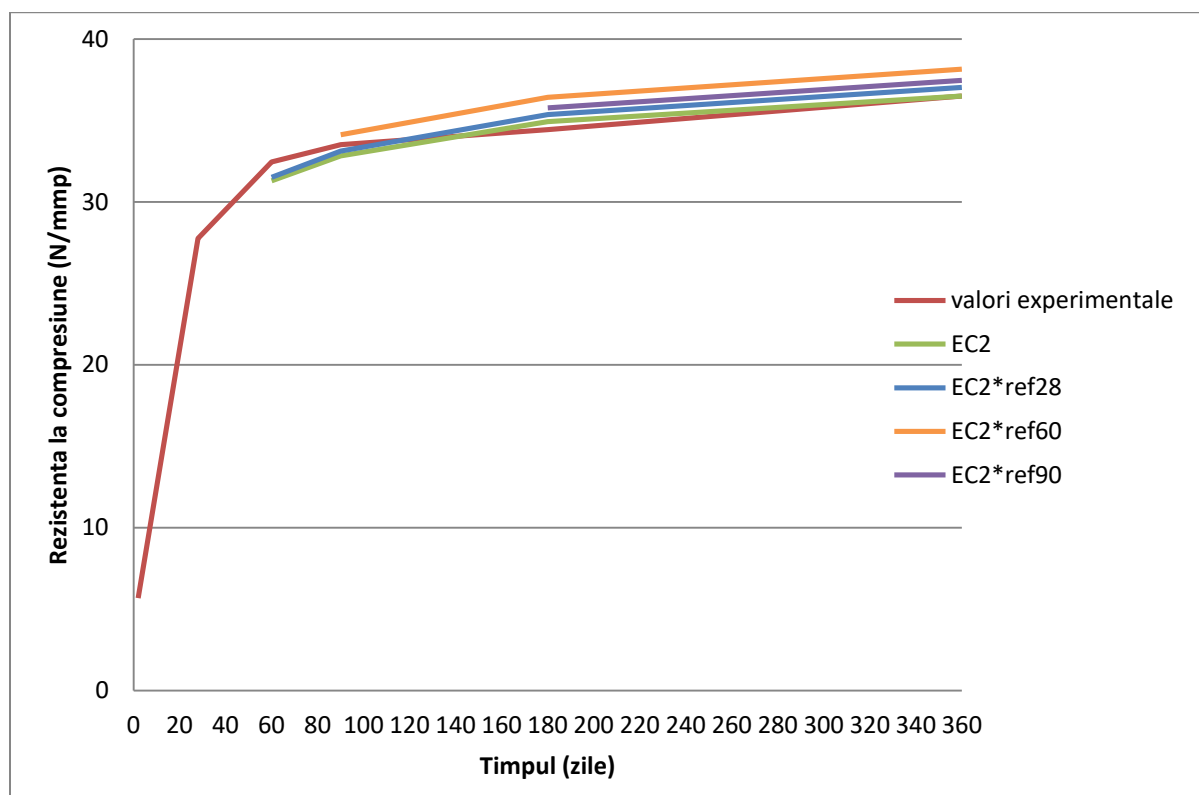


Figura V.41.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu ciment CEM II/B-S 32.5N cu raport a/c=0.67 în funcție de vârstă

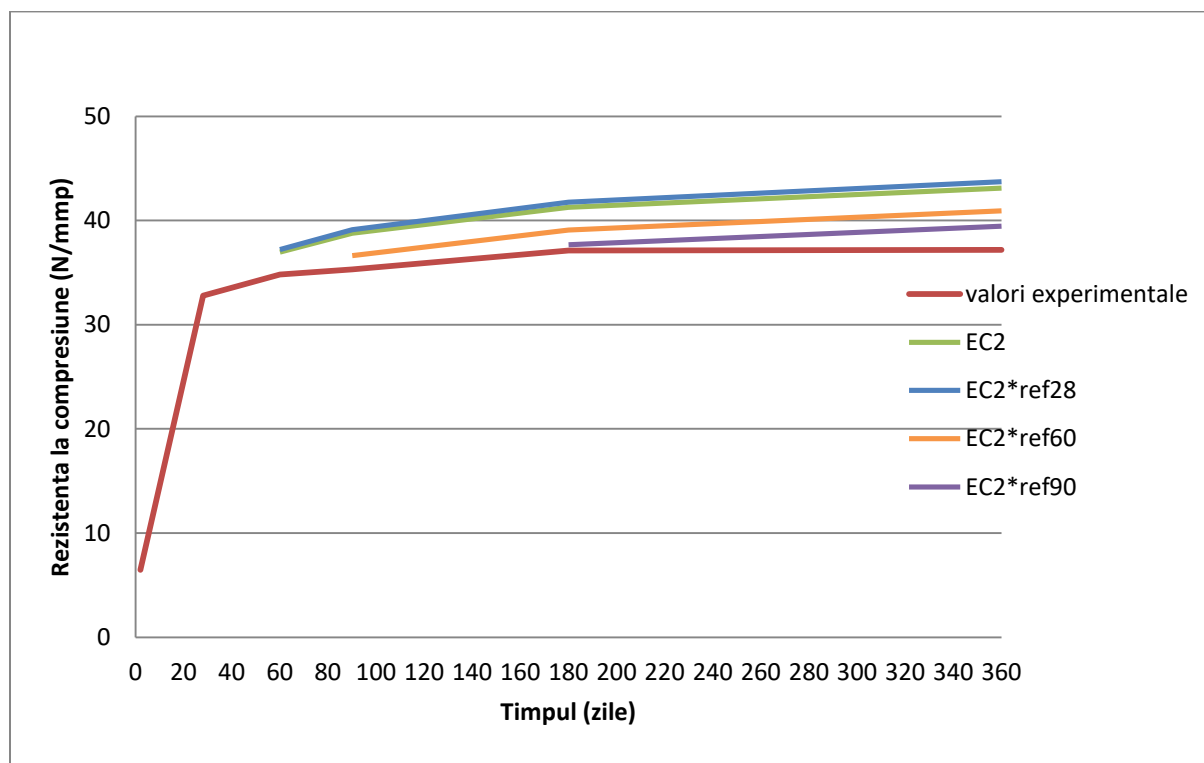


Figura V.42.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu ciment CEM II/B-S 32.5N cu raport a/c=0.60 în funcție de vârstă

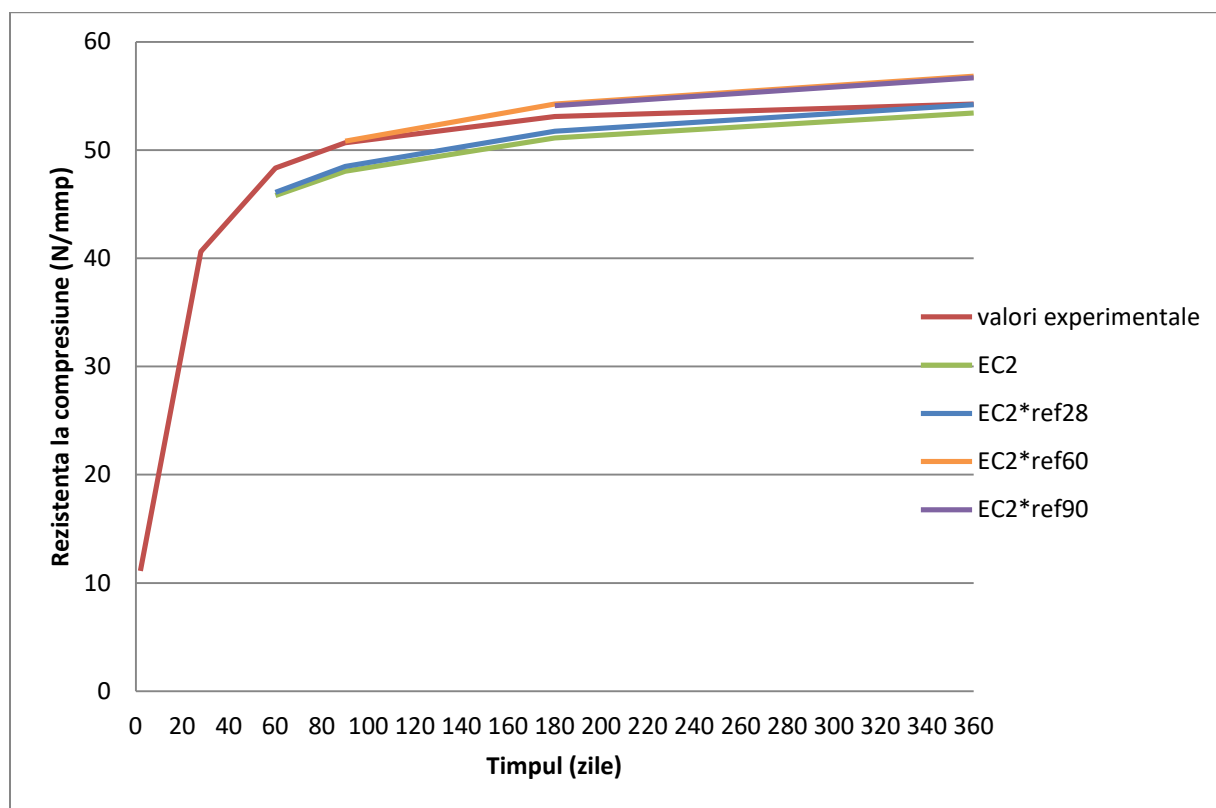


Figura V.43.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu CEM II/B-S 32.5N cu raport  $a/c=0.53$  în funcție de vârstă

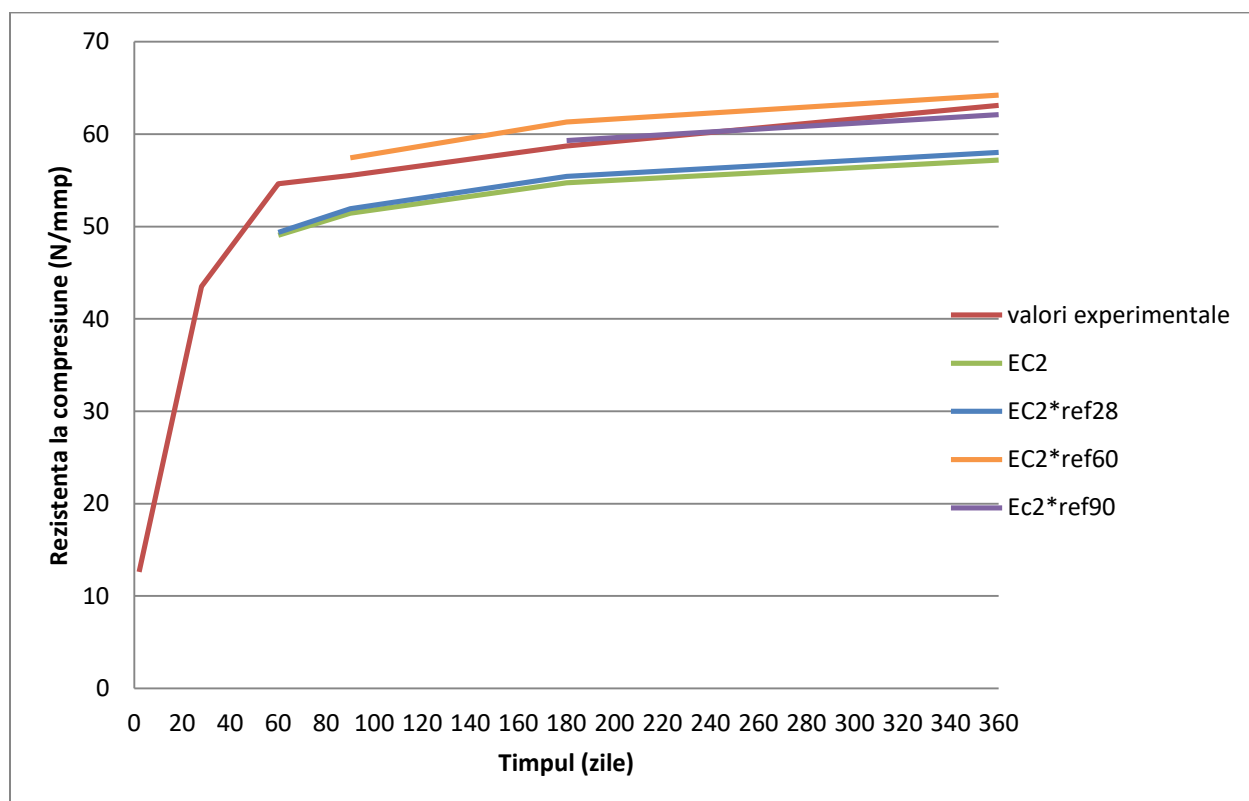


Figura V.44.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu ciment CEM II/B-S 32.5N cu raport  $a/c=0.49$  în funcție de vârstă

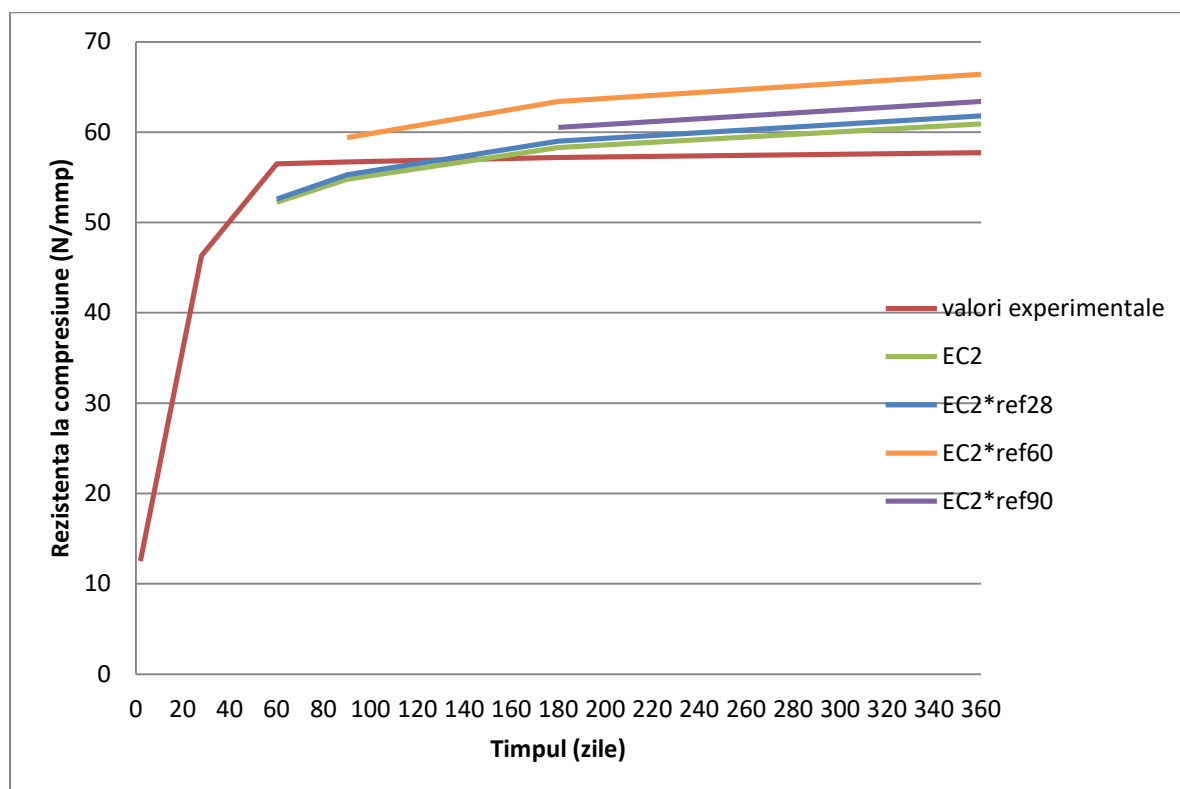


Figura V.45.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu ciment CEM II/B-S 32.5N cu raport a/c=0.47 în funcție de vârstă

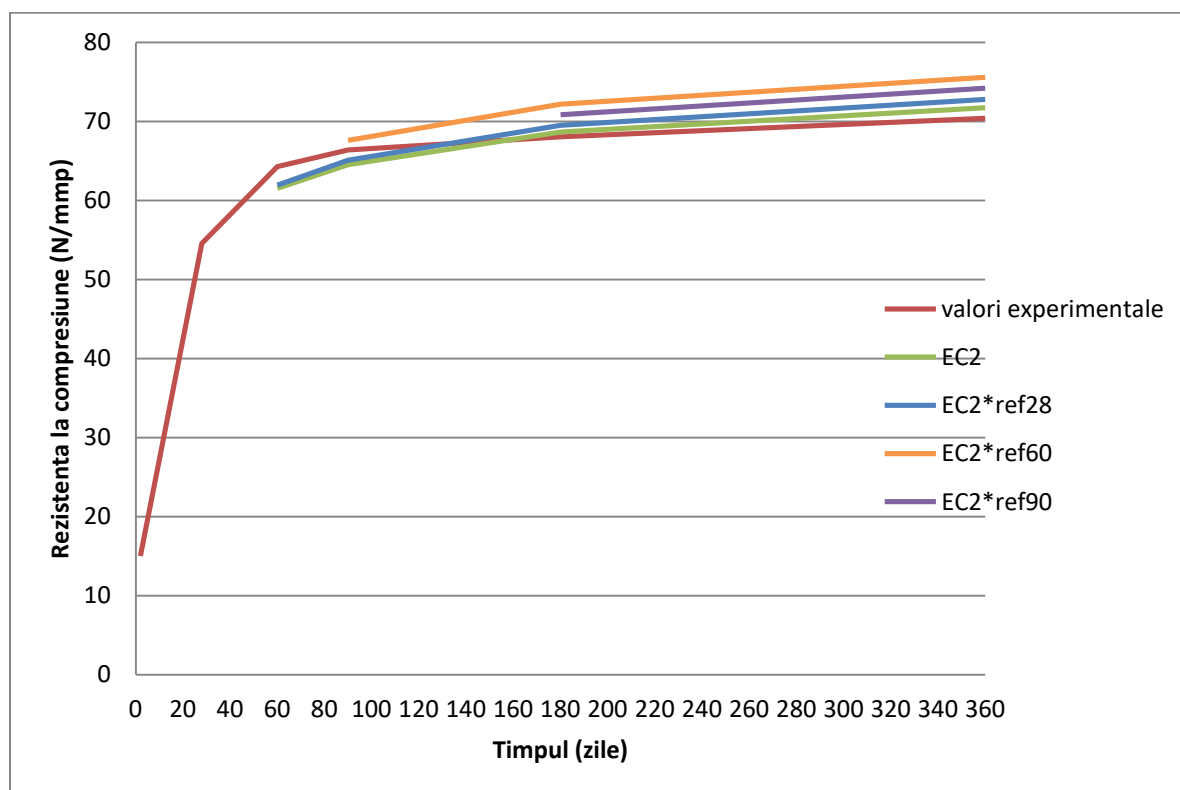


Figura V.46.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu ciment CEM II/B-S 32.5N cu raport a/c=0.42 în funcție de vârstă

Din studiul graficelor obținute se remarcă faptul că evoluția rezistenței medii la compresiune a betoanelor cu CEM II/B-S 32.5N obținută experimental și prin aplicarea formulelor este asemănătoare, dar între rezistențele la compresiune la 28 și 56 zile este o diferență mare.

❖ **Beton cu CEM II/B-M (S-V) 32.5R (clinker 65-79%, zgură granulată de furnal măcinată+cenușă zburătoare 21-35%)**

Aceeași analiză comparativă a fost făcută de data aceasta și pentru betonul preparat cu ciment compozit CEM II/B-M (S-V) 32.5R pentru a vedea cum influențează ambele tipuri de adaosuri minerale din ciment evoluția în timp a rezistențelor medii la compresiune ale betonului, comparativ cu betonul cu CEM II/B-S 32.5R, cu aceeași clasă de rezistență a cimentului.

Compozițiile betoanelor sunt prezentate în tabelul V.27.

Tabelul V.27. - Caracteristicile compoziționale și proprietățile betonului proaspăt preparat cu CEM II/B-M (S-V) 32.5R

| Clasa  | Raport a/c | Dozaj ciment (kg/m <sup>3</sup> ) | Dimensiune maximă granulă agregat (mm) | Aditiv                  | Tasare (mm) |
|--------|------------|-----------------------------------|----------------------------------------|-------------------------|-------------|
| C16/20 | 0.49       | 325                               | 32                                     | Aditiv superplastifiant | 110         |
| C20/25 | 0.43       | 370                               | 32                                     |                         | 115         |
| C25/30 | 0.39       | 420                               | 32                                     |                         | 120         |
| C30/37 | 0.37       | 470                               | 32                                     |                         | 120         |

Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM II/B-S 32.5 R pentru diferite rapoarte a/c sunt date în tabelele V.28-V.31.

Tabelul V.28. - Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM II/B-M (S-V) 32.5 R la raport a/c=0.49

| Vârsta betonului | Valori experimentale $f_{cm}$ la raport a/c = 0.49 | Valori calculate $f_{cm}$ (EC 2) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC2*ref28) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC 2*ref 56) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC 2*ref 90) |
|------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 7 zile           | 28.14                                              |                                  |                                         |                                           |                                           |
| 28 zile          | 39.10                                              |                                  |                                         |                                           |                                           |
| 56 zile          | 41.04                                              | $\beta = 1.076$<br>42.07         | $\beta = 1.108$<br>43.32                |                                           |                                           |
| 90 zile          | 43.40                                              | $\beta = 1.117$<br>43.67         | $\beta = 1.167$<br>45.64                | $\beta = 1.054$<br>43.24                  |                                           |
| 180 zile         | 44.29                                              | $\beta = 1.163$<br>45.49         | $\beta = 1.236$<br>48.33                | $\beta = 1.116$<br>45.78                  | $\beta = 1.059$<br>45.95                  |
| 360 zile         | 46.07                                              | $\beta = 1.198$<br>46.82         | $\beta = 1.287$<br>50.32                | $\beta = 1.162$<br>47.67                  | $\beta = 1.103$<br>47.85                  |
| 720 zile         | 50.07                                              | $\beta = 1.222$<br>49.79         | $\beta = 1.324$<br>51.78                | $\beta = 1.195$<br>49.06                  | $\beta = 1.135$<br>49.24                  |
|                  |                                                    | $\beta_{max}=1.284$<br>50.20     | $\beta_{max}=1.419$<br>55.48            | $\beta_{max}=1.281$<br>52.56              | $\beta_{max}=1.216$<br>52.75              |

Tabelul V.29. - Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM II/B-M (S-V) 32.5 R la raport a/c=0.43

| Vârsta betonului | Valori experimentale<br>$f_{cm}$ la raport<br><b>a/c = 0.43</b> | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (EC 2) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC2*ref28) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC 2*ref 56) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC 2*ref 90) |
|------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 7 zile           | 32.66                                                           |                                     |                                            |                                              |                                              |
| 28 zile          | 43.10                                                           |                                     |                                            |                                              |                                              |
| 56 zile          | 45.24                                                           | $\beta = 1.076$<br>46.37            | $\beta = 1.108$<br>47.75                   |                                              |                                              |
| 90 zile          | 47.84                                                           | $\beta = 1.117$<br>48.14            | $\beta = 1.167$<br>50.31                   | $\beta = 1.054$<br>47.66                     |                                              |
| 180 zile         | 49.33                                                           | $\beta = 1.163$<br>50.14            | $\beta = 1.236$<br>53.27                   | $\beta = 1.116$<br>50.47                     | $\beta = 1.059$<br>50.65                     |
| 360 zile         | 51.40                                                           | $\beta = 1.198$<br>51.61            | $\beta = 1.287$<br>55.47                   | $\beta = 1.162$<br>52.55                     | $\beta = 1.103$<br>52.74                     |
| 720 zile         | 54.67                                                           | $\beta = 1.222$<br>52.68            | $\beta = 1.324$<br>57.08                   | $\beta = 1.195$<br>54.08                     | $\beta = 1.13451$<br>54.27                   |
|                  |                                                                 | $\beta_{max}=1.284$<br>55.34        | $\beta_{max}=1.419$<br>61.16               | $\beta_{max}=1.281$<br>57.94                 | $\beta_{max}=1.216$<br>58.15                 |

Tabelul V.30. - Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM II/B-M (S-V) 32.5 R la raport a/c=0.39

| Vârsta betonului | Valori experimentale<br>$f_{cm}$ la raport<br><b>a/c = 0.39</b> | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (EC 2) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC2*ref28) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC 2*ref 56) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC 2*ref 90) |
|------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 7 zile           | 36.14                                                           |                                     |                                            |                                              |                                              |
| 28 zile          | 49.40                                                           |                                     |                                            |                                              |                                              |
| 56 zile          | 49.53                                                           | $\beta = 1.076$<br>53.15            | $\beta = 1.108$<br>54.73                   |                                              |                                              |
| 90 zile          | 49.70                                                           | $\beta = 1.117$<br>55.17            | $\beta = 1.167$<br>57.67                   | $\beta = 1.054$<br>52.16                     |                                              |
| 180 zile         | 50.69                                                           | $\beta = 1.163$<br>57.47            | $\beta = 1.236$<br>61.06                   | $\beta = 1.116$<br>55.26                     | $\beta = 1.059$<br>52.62                     |
| 360 zile         | 54.66                                                           | $\beta = 1.198$<br>59.16            | $\beta = 1.287$<br>63.58                   | $\beta = 1.162$<br>57.54                     | $\beta = 1.103$<br>54.79                     |
| 720 zile         | 56.59                                                           | $\beta = 1.222$<br>60.38            | $\beta = 1.324$<br>65.43                   | $\beta = 1.195$<br>59.21                     | $\beta = 1.135$<br>56.38                     |
|                  |                                                                 | $\beta_{max}=1.284$<br>63.43        | $\beta_{max}=1.419$<br>70.10               | $\beta_{max}=1.281$<br>63.44                 | $\beta_{max}=1.216$<br>60.41                 |

Tabelul V.31. - Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM II/B-M (S-V) 32.5 R la raport a/c=0.37

| Vârsta betonului | Valori experimentale<br>$f_{cm}$ la raport<br><b>a/c = 0.37</b> | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (EC 2) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC2*ref28) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC 2*ref 56) | Valori calculate<br>$f_{cm}$ (prEC 2*ref 90) |
|------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 7 zile           | 37.70                                                           |                                     |                                            |                                              |                                              |
| 28 zile          | 50.29                                                           |                                     |                                            |                                              |                                              |
| 56 zile          | 50.36                                                           | $\beta = 1.076$<br>54.11            | $\beta = 1.108$<br>55.72                   |                                              |                                              |
| 90 zile          | 50.44                                                           | $\beta = 1.117$<br>56.17            | $\beta = 1.167$<br>58.71                   | $\beta = 1.054$<br>53.06                     |                                              |
| 180 zile         | 51.40                                                           | $\beta = 1.163$<br>58.51            | $\beta = 1.236$<br>62.16                   | $\beta = 1.116$<br>56.18                     | $\beta = 1.059$<br>53.41                     |

| Vârsta betonului | Valori experimentale $f_{cm}$ la raport $a/c = 0.37$ | Valori calculate $f_{cm}$ (EC 2) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC2*ref28) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC 2*ref 56) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC 2*ref 90) |
|------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 360 zile         | 58.96                                                | $\beta = 1.198$<br>60.22         | $\beta = 1.287$<br>64.73                | $\beta = 1.162$<br>58.50                  | $\beta = 1.103$<br>55.61                  |
| 720 zile         | 59.30                                                | $\beta = 1.222$<br>61.47         | $\beta = 1.324$<br>66.60                | $\beta = 1.195$<br>60.20                  | $\beta = 1.135$<br>57.22                  |
|                  |                                                      | $\beta_{max}=1.284$<br>64.57     | $\beta_{max}=1.419$<br>71.36            | $\beta_{max}=1.281$<br>64.50              | $\beta_{max}=1.216$<br>61.31              |

În figurile V.47.-V.48. se prezintă evoluția în timp, reală și estimată, a rezistenței la compresiune pentru betonul cu CEM II/B-M (S-V) 32.5R.

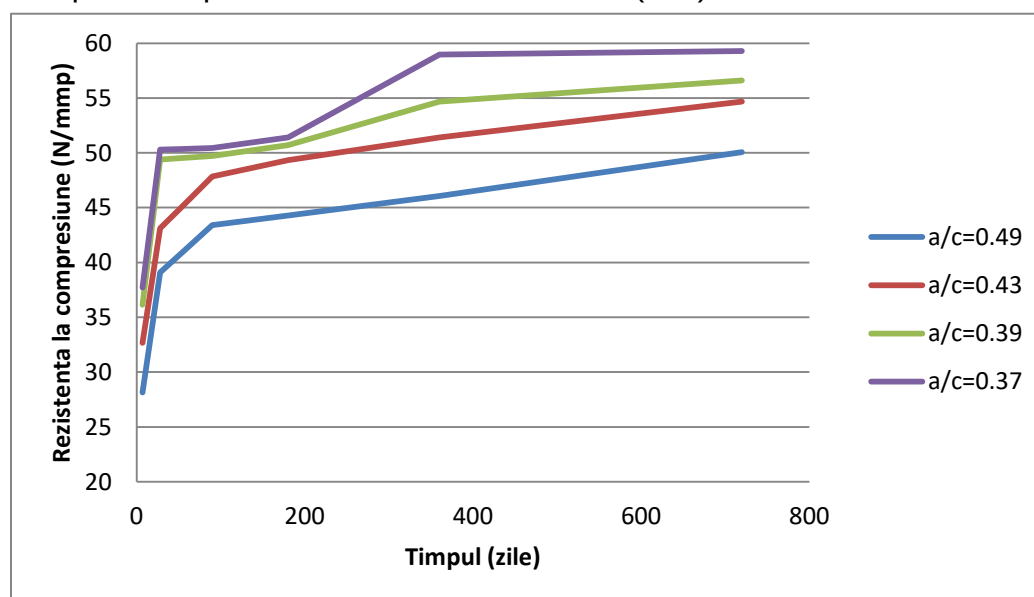


Figura V.47.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu CEM II/B-M (S-V) 32.5R în funcție de vârstă și raport a/c

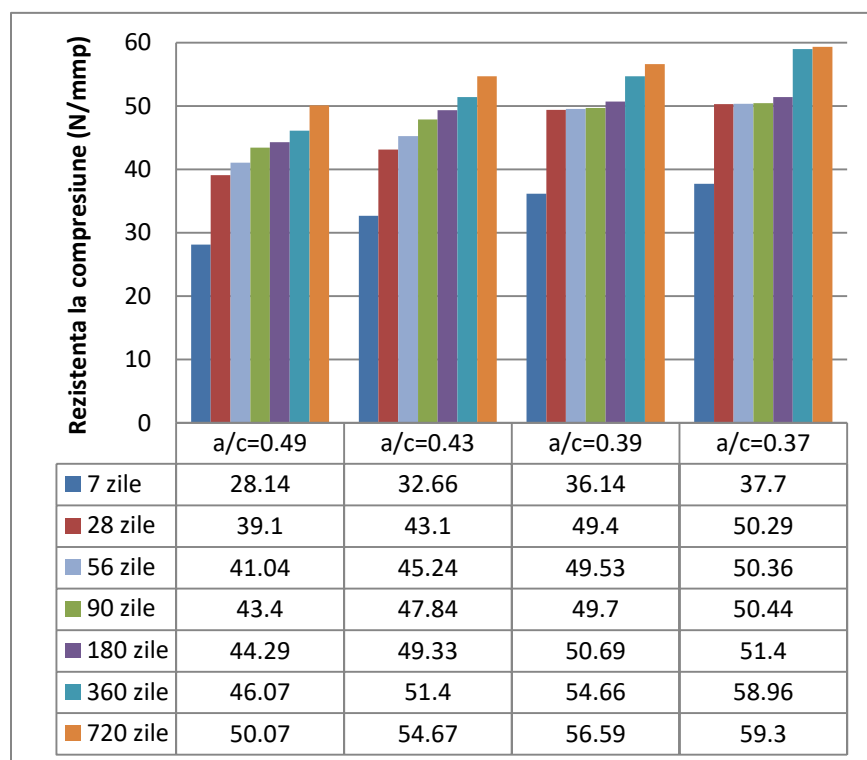


Figura V.48.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu CEM II/B-M (S-V) 32.5R în funcție de vârstă și raport a/c

Din aceasta reprezentare grafică se poate observa cu ușurință modul de variație în timp al rezistențelor la compresiune ale betonului preparat cu ciment CEM II/B-M (S-V) 32.5R și faptul că la rapoarte  $a/c > 0.4$  rezistențele cresc mult în timp, în schimb, odată cu scăderea raportului  $a/c$  sub 0.4 se obțin rezistențe la compresiune mai mari dar care nu mai cresc semnificativ cu creșterea vârstei. Deci evoluția rezistențelor la compresiune în timp depinde de raportul  $a/c$ , chiar dacă acest parametru nu intervine în nici una dintre cele două relații de calcul.

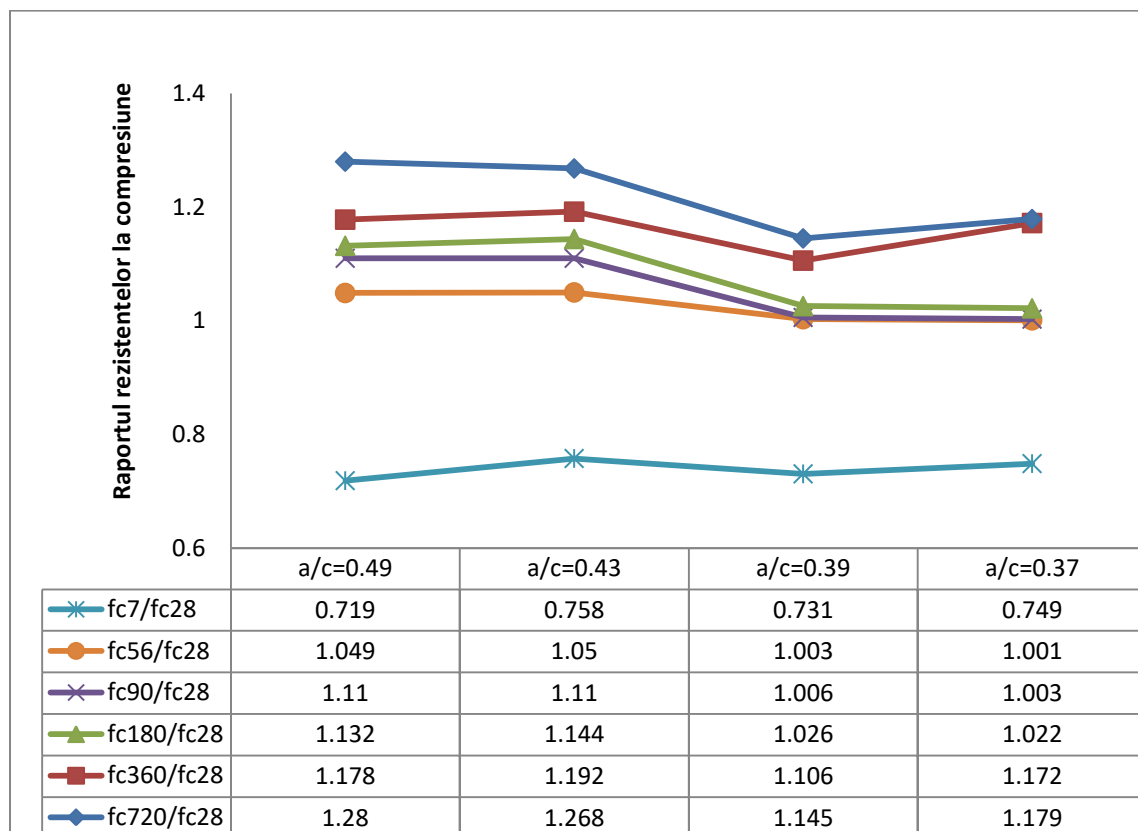


Figura V.49.- Variația rapoartelor dintre rezistențele la compresiune la betoane cu CEM II/B-M (S-V) 32.5R în funcție de vârstă și raportul  $a/c$

Creșterea de rezistență de la vârsta de 28 la 56 zile este cuprinsă între 0.1-5%, de la 28 la 90 zile variază între 0.3 - 11%, de la 28 la 180 zile variază între 2.2 - 14.4%, de la 28 la 360 zile este între 10.6 - 19.2%, de la 28 la 180 zile variază între 2.2 - 14.4%, de la vârsta de 28 la 720 zile este între 14.5 - 28%, având mereu valori maxime pentru raportul  $a/c = 0.49$  sau  $a/c = 0.43$ .

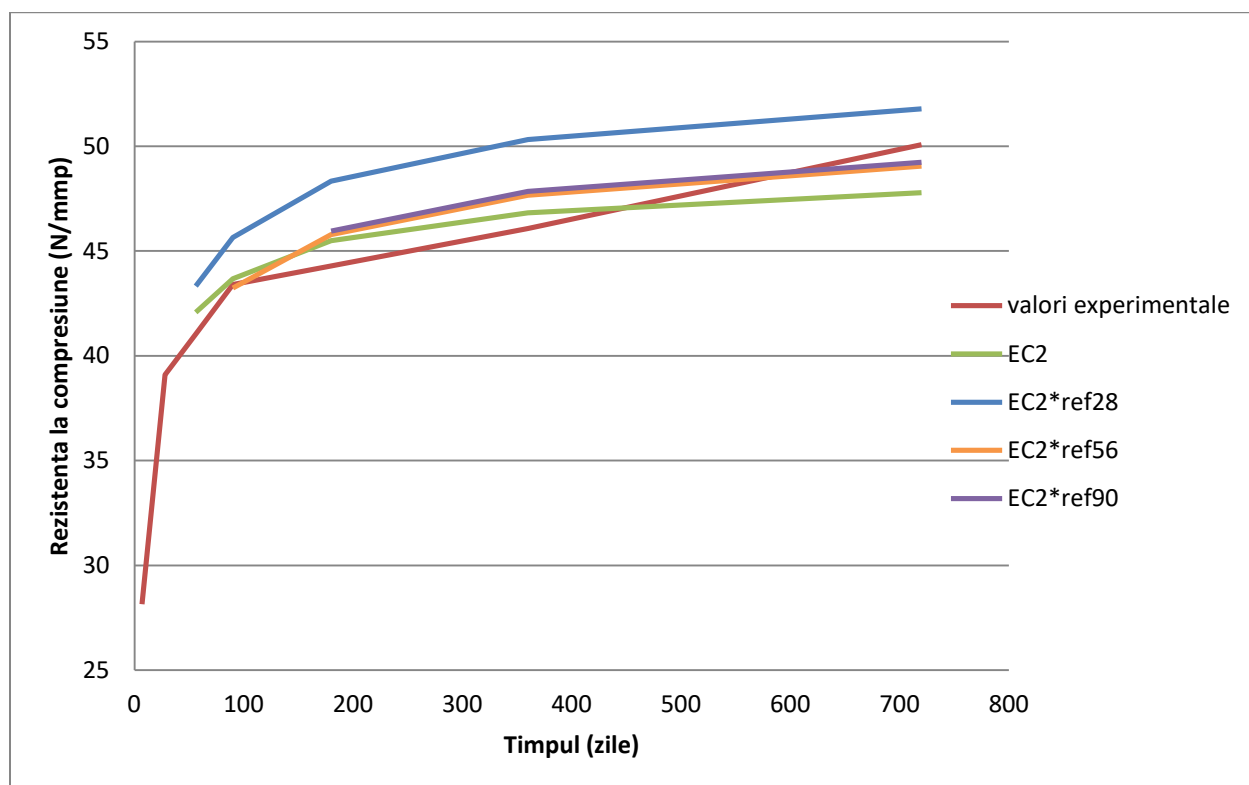


Figura V.50.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu CEM II/B-M (S-V) 32.5R cu raport  $a/c=0.49$  în funcție de vârstă

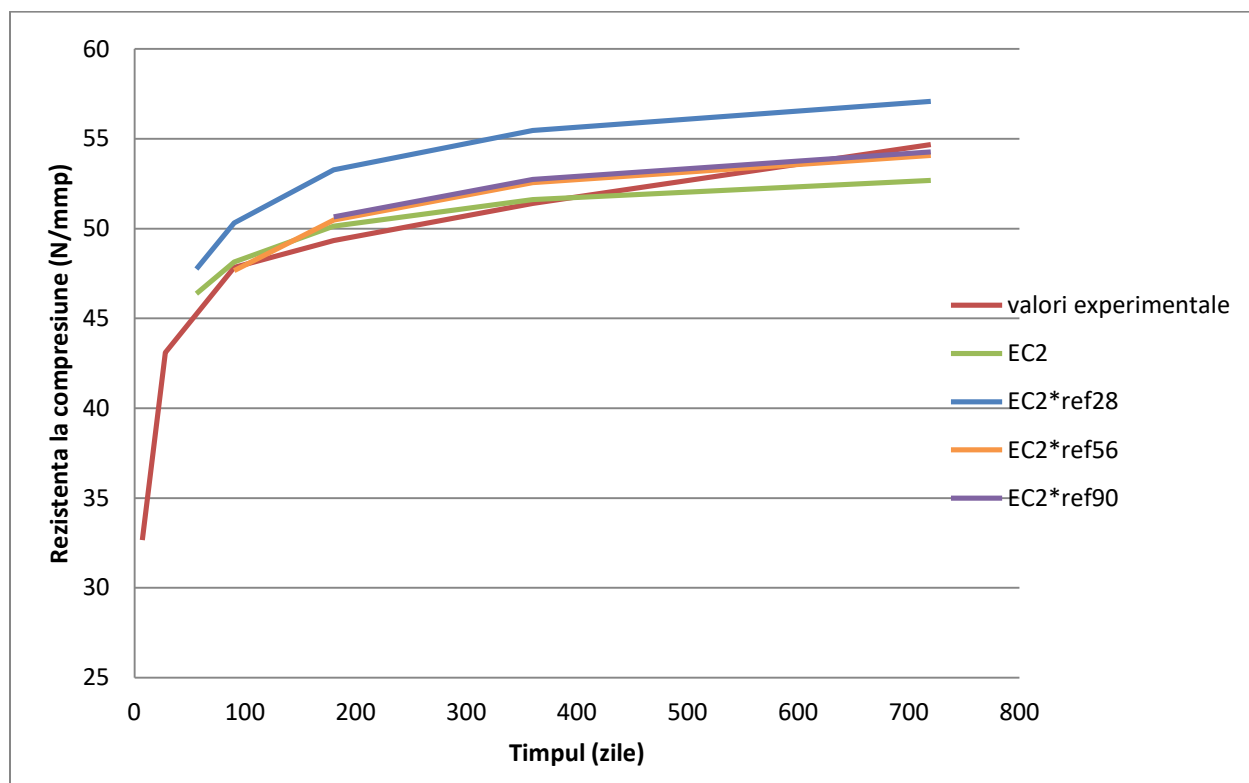


Figura V.51.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu CEM II/B-M (S-V) 32.5R cu raport  $a/c=0.43$  în funcție de vârstă

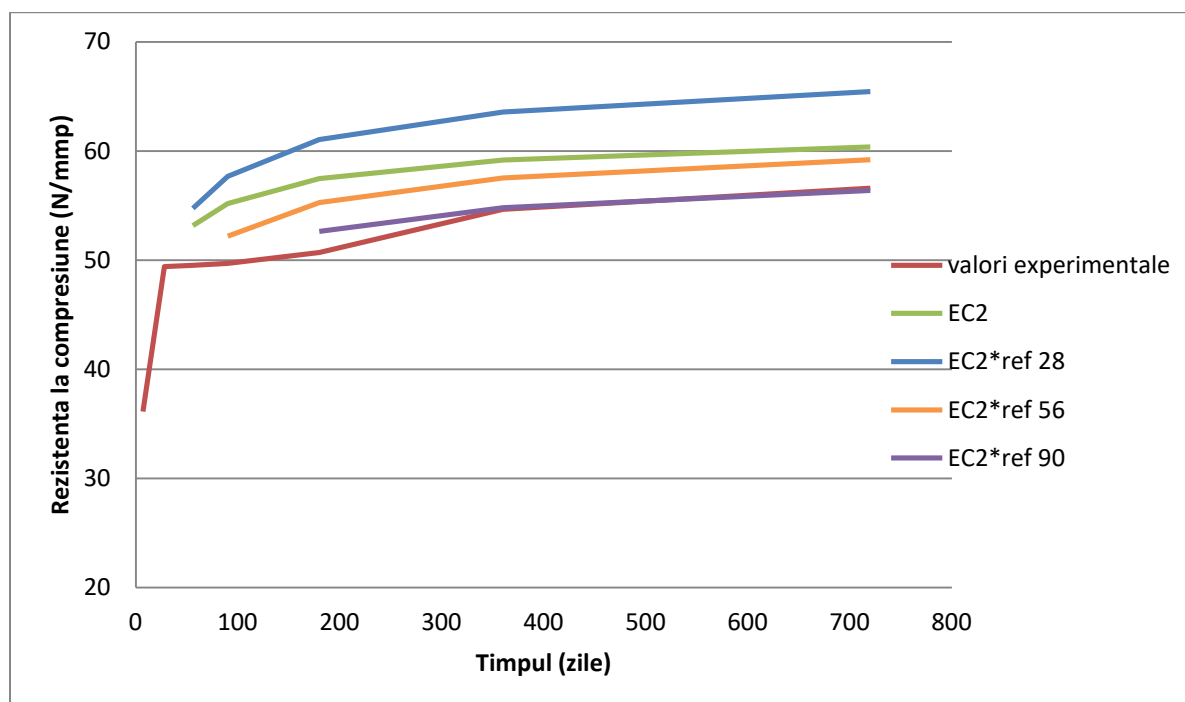


Figura V.52.- Variația rezistenței la compresie a betonului cu CEM II/B-M (S-V) 32.5R cu raport  $a/c=0.39$  în funcție de vârstă

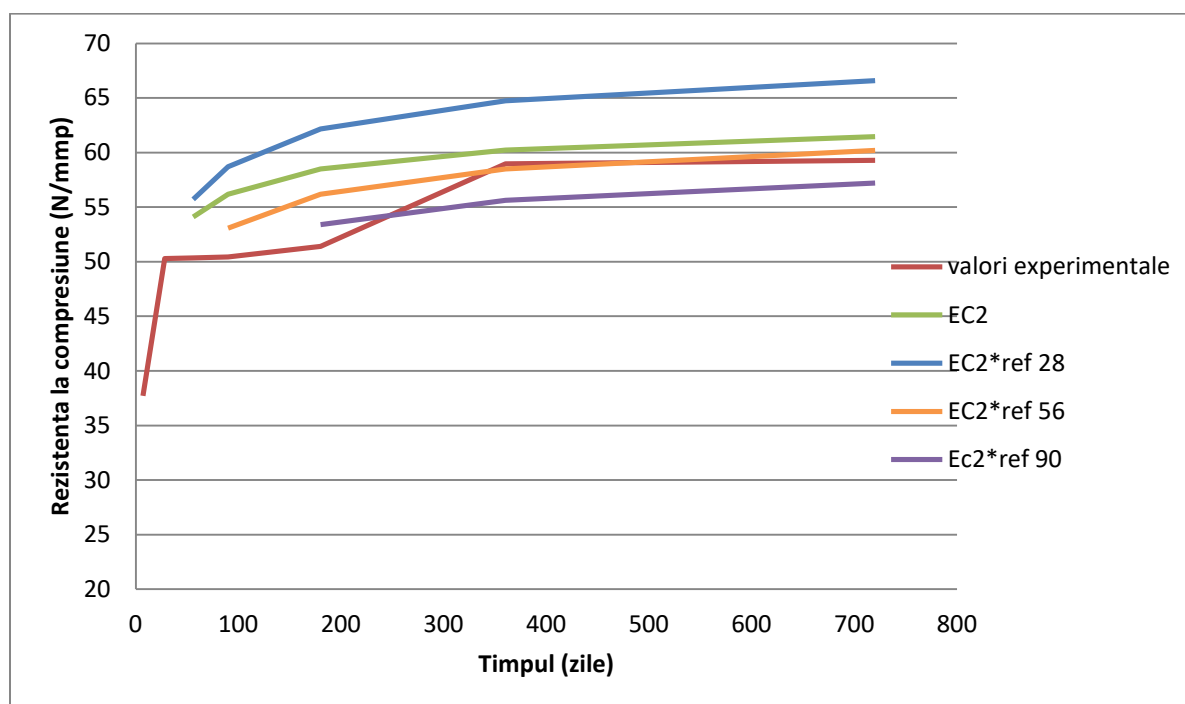


Figura V.53.- Variația rezistenței la compresie a betonului cu CEM II/B-M (S-V) 32.5R cu raport  $a/c=0.37$  în funcție de vârstă

Ca o concluzie în urma graficelor trasate mai sus putem spune că rezistența medie la compresie a betonului având ca termene de referință 56 sau 90 zile caracterizează cel mai bine evoluția reală în timp a rezistenței medii la compresie, alegerea dintre cele două repere fiind în funcție de raportul  $a/c$ .

❖ **Beton cu CEM III/A 32.5R (clinker 35-64%, zgură granulată de furnal măcinată 36-65%)**

Compozițiile betoanelor sunt prezentate în tabelul V.32.

Tabelul V.32. - Caracteristicile compoziționale și proprietățile betonului proaspăt preparat cu CEM III/A 32.5R

| Clasa  | Raport a/c | Dozaj ciment (kg/m <sup>3</sup> ) | Dimensiune maximă granulă agregat (mm) | Aditiv           | Tasare (mm) |
|--------|------------|-----------------------------------|----------------------------------------|------------------|-------------|
| C16/20 | 0.47       | 320                               | 32                                     | superplastifiant | 115         |
| C20/25 | 0.41       | 370                               | 32                                     |                  | 110         |
| C25/30 | 0.37       | 420                               | 32                                     |                  | 110         |
| C30/37 | 0.35       | 470                               | 32                                     |                  | 110         |

Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM II/B-S 32.5 R pentru diferite rapoarte a/c sunt date în tabelele V.33-V.36.

Tabelul V.33. - Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM III/ A 32.5R la raport a/c=0.47

| Vârsta betonului | Valori experimentale $f_{cm}$ la raport a/c = 0.47 | Valori calculate $f_{cm}$ (EC 2) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC2*ref28) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC 2*ref 56) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC 2*ref 90) |
|------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 7 zile           | 24.74                                              |                                  |                                         |                                           |                                           |
| 28 zile          | 41.48                                              |                                  |                                         |                                           |                                           |
| 56 zile          | 42.08                                              | $\beta = 1.076$<br>44.63         | $\beta = 1.108$<br>45.96                |                                           |                                           |
| 90 zile          | 42.81                                              | $\beta = 1.117$<br>46.33         | $\beta = 1.167$<br>48.42                | $\beta = 1.054$<br>44.34                  |                                           |
| 180 zile         | 43.07                                              | $\beta = 1.163$<br>48.26         | $\beta = 1.236$<br>51.27                | $\beta = 1.116$<br>46.94                  | $\beta = 1.059$<br>45.33                  |
|                  |                                                    | $\beta_{max}=1.284$<br>53.26     | $\beta_{max}=1.419$<br>58.86            | $\beta_{max}=1.281$<br>53.89              | $\beta_{max}=1.216$<br>52.04              |

Tabelul V.34. - Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM III/A 32.5R la raport a/c=0.41

| Vârsta betonului | Valori experimentale $f_{cm}$ la raport a/c = 0.41 | Valori calculate $f_{cm}$ (EC 2) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC2*ref28) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC 2*ref 56) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC 2*ref 90) |
|------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 7 zile           | 29.33                                              |                                  |                                         |                                           |                                           |
| 28 zile          | 47.11                                              |                                  |                                         |                                           |                                           |
| 56 zile          | 50.25                                              | $\beta = 1.076$<br>50.69         | $\beta = 1.108$<br>52.19                |                                           |                                           |
| 90 zile          | 54.07                                              | $\beta = 1.117$<br>52.62         | $\beta = 1.167$<br>54.99                | $\beta = 1.054$<br>52.94                  |                                           |
| 180 zile         | 54.22                                              | $\beta = 1.163$<br>54.81         | $\beta = 1.236$<br>58.23                | $\beta = 1.116$<br>56.06                  | $\beta = 1.059$<br>57.25                  |
|                  |                                                    | $\beta_{max}=1.284$<br>60.49     | $\beta_{max}=1.419$<br>66.85            | $\beta_{max}=1.281$<br>64.36              | $\beta_{max}=1.216$<br>65.72              |

Tabelul V.35. - Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM III/A 32.5R la raport a/c=0.37

| Vârsta betonului | Valori experimentale $f_{cm}$ la raport $a/c = 0.37$ | Valori calculate $f_{cm}$ (EC 2) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC2*ref28) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC 2*ref 56) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC 2*ref 90) |
|------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 7 zile           | 36.44                                                |                                  |                                         |                                           |                                           |
| 28 zile          | 54.81                                                |                                  |                                         |                                           |                                           |
| 56 zile          | 57.08                                                | $\beta = 1.076$<br>58.97         | $\beta = 1.108$<br>60.72                |                                           |                                           |
| 90 zile          | 59.85                                                | $\beta = 1.117$<br>61.22         | $\beta = 1.167$<br>63.98                | $\beta = 1.054$<br>60.14                  |                                           |
| 180 zile         | 60.30                                                | $\beta = 1.163$<br>63.77         | $\beta = 1.236$<br>67.75                | $\beta = 1.116$<br>63.68                  | $\beta = 1.059$<br>63.37                  |
|                  |                                                      | $\beta_{max}=1.284$<br>70.38     | $\beta_{max}=1.419$<br>77.78            | $\beta_{max}=1.281$<br>73.11              | $\beta_{max}=1.216$<br>72.75              |

Tabelul V.36. - Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM III/A 32.5R la raport a/c=0.35

| Vârsta betonului | Valori experimentale $f_{cm}$ la raport $a/c = 0.35$ | Valori calculate $f_{cm}$ (EC 2) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC2*ref28) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC 2*ref 56) | Valori calculate $f_{cm}$ (prEC 2*ref 90) |
|------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 7 zile           | 39.33                                                |                                  |                                         |                                           |                                           |
| 28 zile          | 60.29                                                |                                  |                                         |                                           |                                           |
| 56 zile          | 62.03                                                | $\beta = 1.076$<br>64.87         | $\beta = 1.108$<br>66.80                |                                           |                                           |
| 90 zile          | 64.14                                                | $\beta = 1.117$<br>67.33         | $\beta = 1.167$<br>70.38                | $\beta = 1.054$<br>65.36                  |                                           |
| 180 zile         | 65.40                                                | $\beta = 1.163$<br>70.14         | $\beta = 1.236$<br>74.52                | $\beta = 1.116$<br>69.20                  | $\beta = 1.059$<br>67.91                  |
|                  |                                                      | $\beta_{max}=1.284$<br>77.41     | $\beta_{max}=1.419$<br>85.55            | $\beta_{max}=1.281$<br>79.45              | $\beta_{max}=1.216$<br>77.97              |

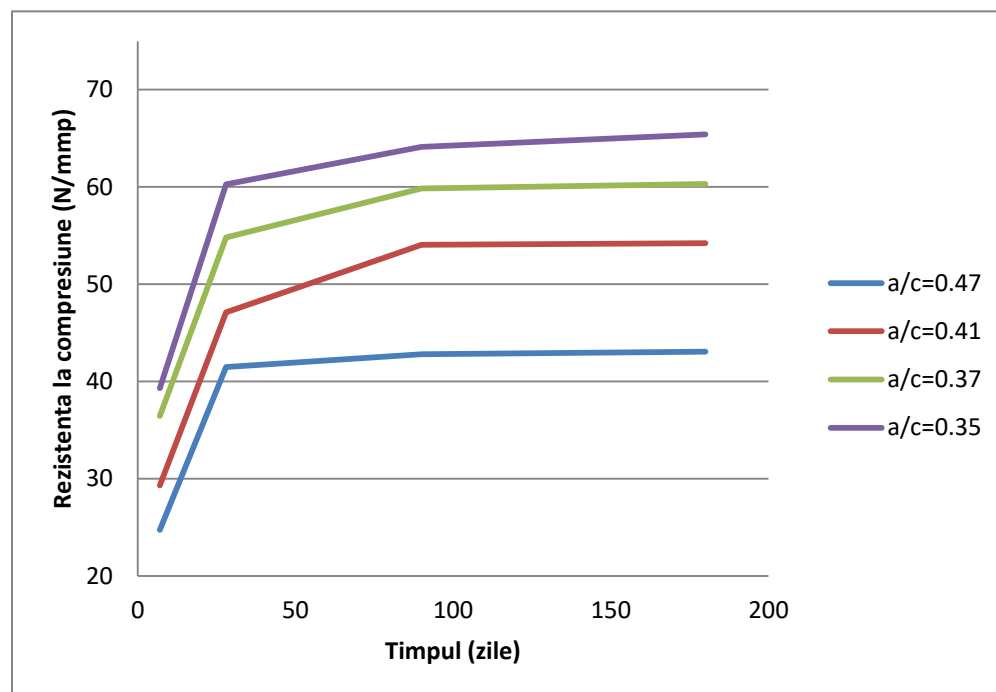


Figura V.54.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu CEM III/A 32.5R în funcție de vârstă și raport a/c

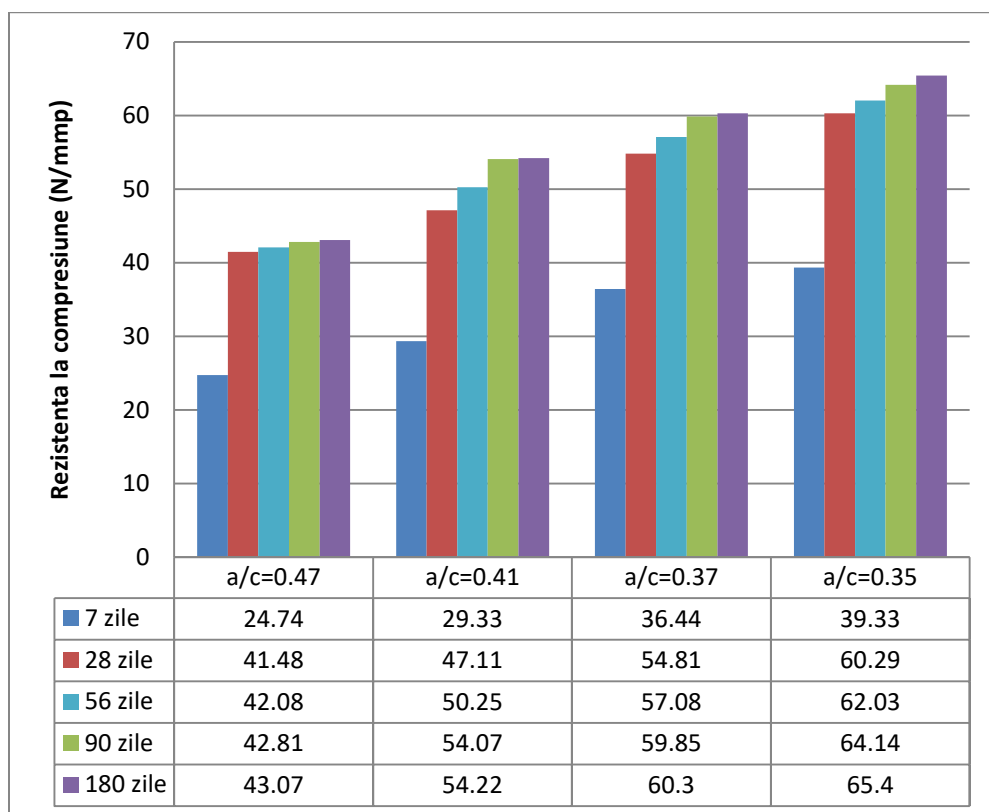


Figura V.55.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu CEM III/A 32.5R în funcție de vârstă și raport a/c

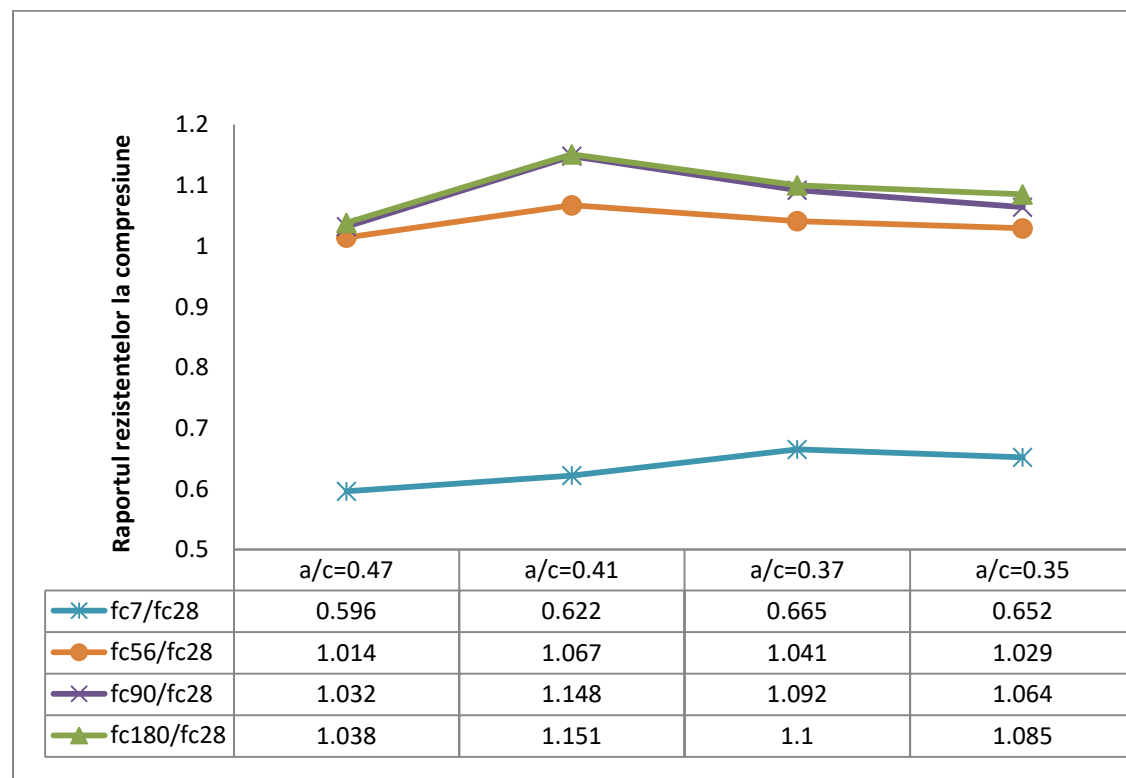


Figura V.56.- Variația rapoartelor dintre rezistențele la compresiune la betoane cu CEM III/A 32.5R în funcție de vârstă și raport a/c

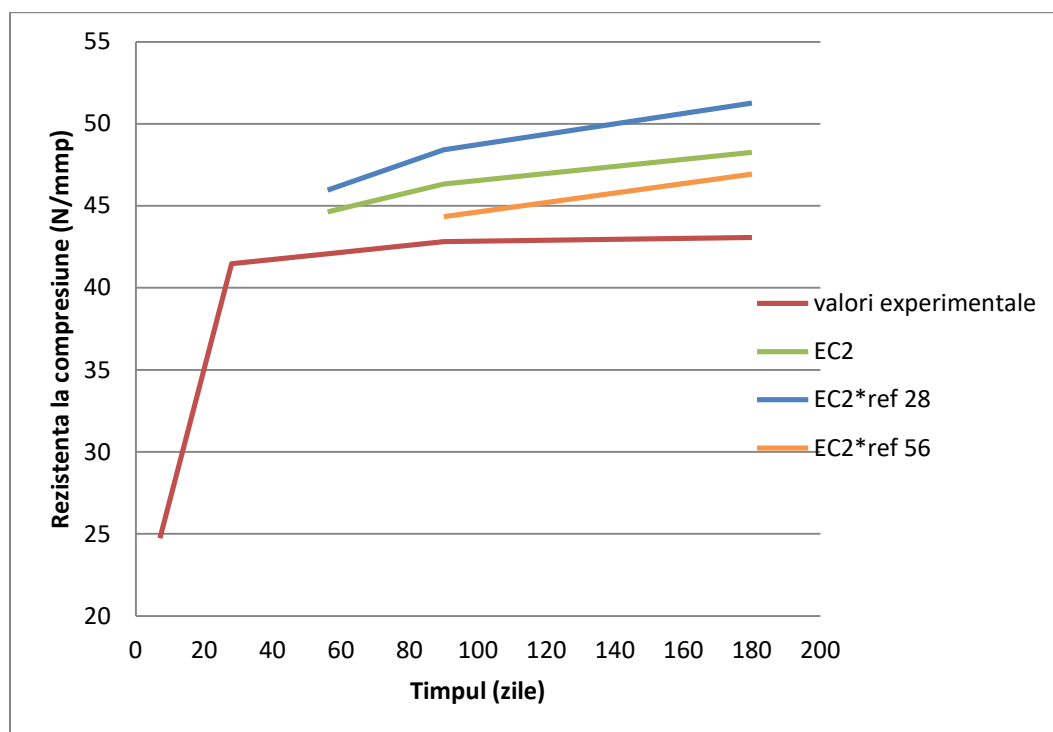


Figura V.57.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu CEM III/A 32.5R cu raport  $a/c=0.47$  în funcție de vârstă

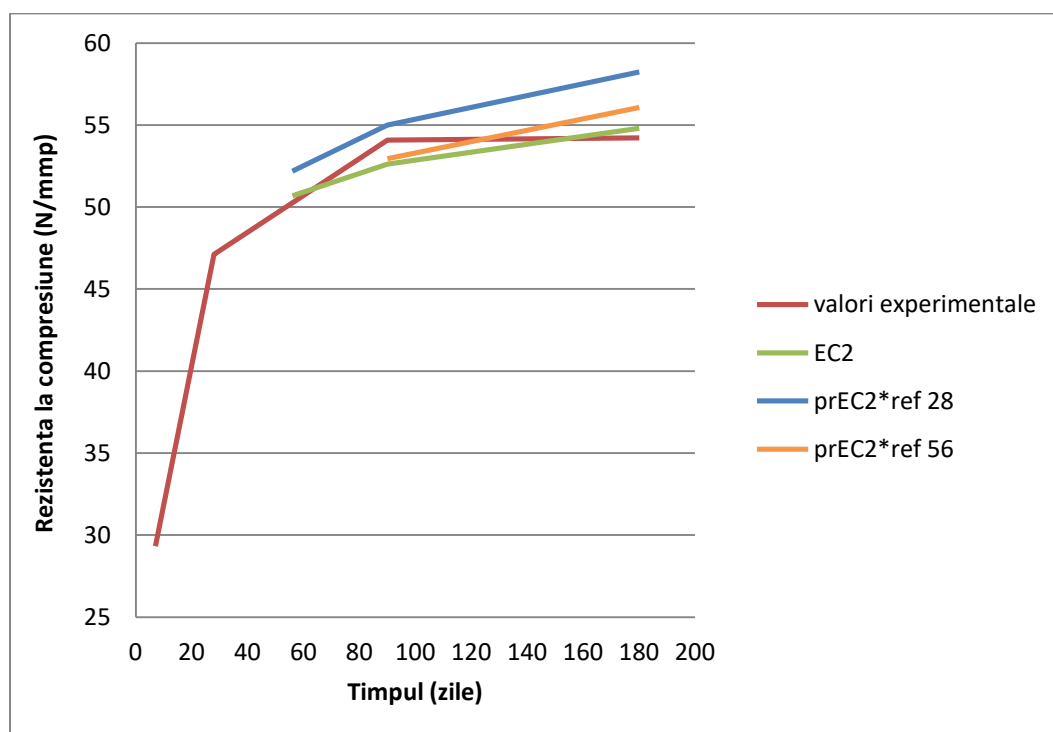


Figura V.58.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu CEM III/A 32.5R cu raport  $a/c=0.41$  în funcție de vârstă

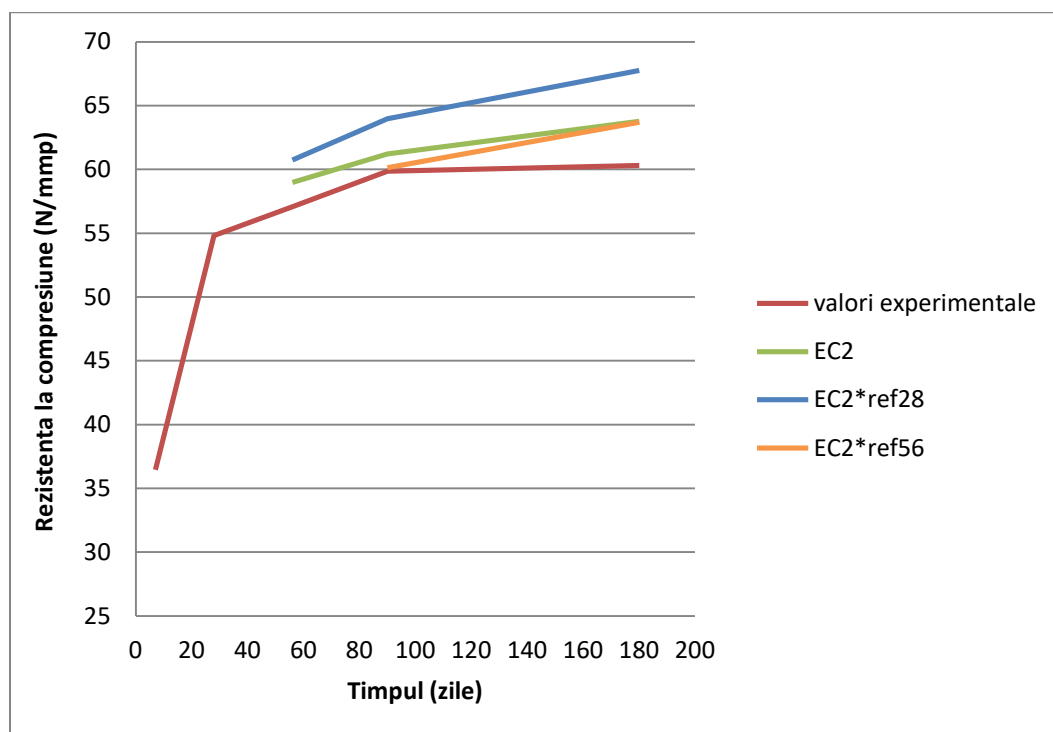


Figura V.59.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu CEM III/A 32.5R cu raport  $a/c=0.37$  în funcție de vârstă

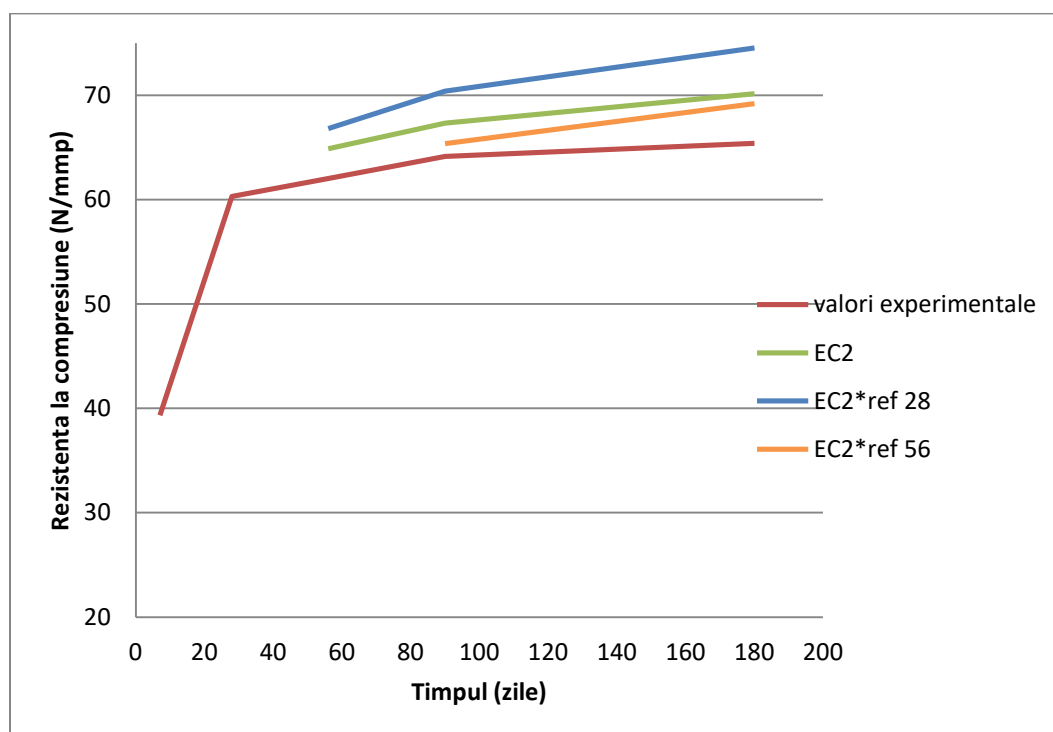


Figura V.60.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu ciment CEM III/A 32.5R cu raport  $a/c=0.35$  în funcție de vârstă

În cazul betoanelor realizate cu CEM III/A 32.5R, s-a obținut o rezistență medie la compresiune la 90 zile cu circa 15% mai mare decât cea corespunzătoare la 28 de zile, dar după

această perioadă nu s-a mai înregistrat o creștere a rezistențelor medii, cea mai apropiată valoare de referință fiind la 56 de zile.

#### **Concluzii:**

1) Studiile realizate în cuprinsul acestui capitol reprezintă o introducere în domeniul analizei rezistenței la compresiune calculate pentru betoane cu vârste mai mari de 28 zile, având rolul de exemplificare și aplicare a cunoștințelor din noua propunere pentru actualizarea standardului european prEN 1992-1-1 [60], elaborată în octombrie 2017, pentru asigurarea exigențelor de siguranță în exploatare a structurilor din beton armat realizate cu cimenturi cu adaosuri minerale;

2) Timpul de referință pentru determinarea clasei betonului poate fi cuprins între 28 și 91 de zile în conformitate cu proiectul de revizuire prEN1992-1-1 [60];

3) Valoarea coeficientului  $s$  pentru determinarea rezistenței betonului la alte termene decât 28 de zile este calculată în propunerea de revizuire prEN1992-1-1 [60] în funcție de tipul de ciment și clasa betonului spre deosebire de actuala ediție în care  $s$  depinde numai de tipul de ciment (rezistența acestuia la termene scurte și la 28 de zile);

4) În prezentul capitol s-au prezentat rezultatele cercetărilor experimentale efectuate pe betoane preparate cu patru tipuri de cimenturi cu zgură în diferite proporții, unul de tip N și trei de tip R, la rapoarte a/c asemănătoare, deci pentru care betonul ar fi trebuit să atingă rezistențe similare.

5) Rezultatele obținute privind evoluția în timp a rezistențelor la compresiune au indicat faptul că valoarea lui  $s$  nu poate fi considerată aceeași numai pe considerente legate de tipul cimentului caracterizat prin rezistența sa (de ex. 32.5R sau N). De exemplu, în cazul betonului cu CEM II/B-S 32.5R există o diferență mare între evoluția reală a rezistenței și cea determinată cu formula propusă în proiectul de revizuire prEN1992-1-1 [60]. De asemenea, în cazul betonului preparat cu ciment CEM II/B-S 32.5N aplicând formula ar rezulta că timpul de referință ar trebui să fie 28 de zile, însă există o diferență evidentă între rezultatele obținute la 28 și respectiv 56 de zile.

6) Determinarea experimentală a timpului de referință pentru stabilirea clasei betonului se va face, în principal în funcție de rapoartele între rezistențele obținute la 56 și 90 de zile și respectiv la 28 de zile ținându-se seama și de evoluția în timp a rezistenței betonului. În cazul obținerii unui spor mai mare de 15% al rezistenței față de cea la 28 de zile și al încadrării în altă clasă la 56 sau 90 zile față de 28 de zile (criteriul  $f_{ck}+4$ ) se propune alegerea unui timp de referință mai mare de 28 de zile. Cunoscând valoarea timpului de referință astfel calculat se poate aplica formula propusă în proiectul de revizuire prEN1992-1-1 [60]. Se recomandă totuși efectuarea unor încercări pentru determinarea rezistenței la compresiune a betonului până la vârsta de 1 an și compararea evoluției reale cu cea rezultată din aplicarea formulei. În cazul în care există diferențe importante, coeficientul  $s$  din formula ar trebui corectat.

### **V.3. Aplicarea conceptului de performanță echivalentă a betonului pentru determinarea caracteristicilor de rezistență și durabilitate a betoanelor preparate cu cimenturi tip II/A-S 42.5R, III/A 42.5N-LH și respectiv cu ciment tip I 42.5R și adaosuri de 10% și 37% zgură**

Utilizarea adaosurilor la prepararea cimentului și betonului reprezintă deja o soluție larg răspândită pe plan național și european. Se pune deseori problema utilizării unor compoziții noi având diverse procente și tipuri de adaosuri pentru anumite aplicații și medii de expunere,

principala problemă fiind cea legată de asigurarea unei bune comportări în timp și asigurarea unei durate de viață corespunzătoare. Studiul prezintă aplicații ale unor metode asociate performanțelor utilizate pe plan european pentru verificarea posibilității utilizării unor compoziții noi în anumite medii de expunere. Aceste metode reprezintă instrumente utile, în completarea metodei raportului apă/ciment echivalent, presupus a asigura comportări în timp similare cu ale unei compoziții de referință. În studiu se prezintă aplicarea unor metode asociate performanței betonului în ceea ce privește rezistența la carbonatare și la îngheț-dezghet a betonului pe baza rezultatelor unor cercetări experimentale.

Se prezintă o analiză a aplicării diferitelor metode asociate performanțelor betonului luând drept studiu de caz rezultatele unor cercetări experimentale efectuate pe beton preparat cu cimenturi cu adaos tip CEM II/A-S 42,5R și CEM III/A 42,5N-LH, respectiv betoane cu adaosuri în aceeași proporție, CEM I 42,5R+10% zgură și CEM I 42,5R+37% zgură. Această analiză pornește de la aplicarea conceptului prescriptiv  $k$  [17] care se bazează pe compararea performanțelor unui beton preparat cu un ciment « A » cu cele ale unui beton în care o parte din cimentul « A » a fost înlocuit cu un adaos, adică înlocuirea raportului  $a/c$  cu  $a/c+k \times$  adaos (teoretic) echivalent. S-a urmărit să se analizeze dacă aplicarea acestui concept este « acoperitoare » în atingerea unor performanțe echivalente. Pentru aceasta, a fost aplicat și conceptul principiilor de performanță echivalentă a betonului în diferite propuneri efectuate la nivel european [59] sau al unor documente naționale din Europa [61].

Cercetările experimentale au constatat în determinarea unor performanțe ale betonului preparat cu ciment tip II/A-S 42,5R și CEM III/A 42,5N-LH, respectiv a unui beton realizat din CEM I 42,5R cu adaos de 10% zgură și CEM I 42,5R cu adaos de 37% zgură, în ceea ce privește rezistența la compresiune, absorbție și porozitate, permeabilitate, rezistența la carbonatare, rezistența la îngheț-dezghet și la atac sulfatic.

Prima etapă a cercetărilor experimentale a constatat în determinarea coeficientului  $k$  [81], [82]. În tabelul V.37. sunt prezentate compozițiile și caracteristicile betoanelor preparate cu CEM I 42,5R, iar în Tabelul V.38. și V.39. se prezintă compozițiile și caracteristicile betonului preparat cu CEM I 42,5R și 10% zgură, respectiv CEM I 42,5R și 37% zgură.

Tabelul V.37. – Compozițiile și caracteristicile betoanelor proaspete preparate cu CEM I 42,5R

| Ciment<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Apă<br>(l) | Aditiv<br>(l) | Raport<br>$a/l$ | Agregate<br>(kg) | sort 0-4<br>mm<br>(kg) | sort 4-8<br>mm<br>(kg) | sort 8-<br>16 mm<br>(kg) | Tasare<br>(mm) | Densitate<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------------|------------|---------------|-----------------|------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|----------------|-----------------------------------|
| 270                            | 170.8      | 2.55          | 0.64            | 1893.4           | 757.4                  | 378.7                  | 757.4                    | 150            | 2379                              |
| 300                            | 159.3      | 2.83          | 0.54            | 1855             | 742                    | 371                    | 742                      | 150            | 2405                              |
| 340                            | 154.3      | 3.21          | 0.46            | 1801.1           | 720.4                  | 360.2                  | 720.4                    | 150            | 2439                              |
| 370                            | 158.3      | 3.49          | 0.44            | 1779.9           | 712                    | 356                    | 712                      | 150            | 2400                              |
| 430                            | 166.7      | 4.06          | 0.40            | 1704.4           | 681.7                  | 340.9                  | 681.7                    | 150            | 2433                              |

Tabelul V.38. – Compozițiile și caracteristicile betoanelor proaspete preparate cu CEM I 42,5R și 10% zgură

| Ciment<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Zgură<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Apă<br>(l) | Aditiv<br>(l) | $a/l$ | Agregate<br>(kg) | sort 0-<br>4 mm<br>(kg) | sort 4-8<br>mm<br>(kg) | sort 8-<br>16 mm<br>(kg) | Tasare<br>(mm) | Densitate<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------------|-------------------------------|------------|---------------|-------|------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|----------------|-----------------------------------|
| 243                            | 27                            | 160        | 2.55          | 0.60  | 1893.4           | 757.4                   | 378.7                  | 757.4                    | 110            | 2398                              |
| 270                            | 30                            | 156        | 2.83          | 0.53  | 1855             | 742                     | 371                    | 742                      | 135            | 2424                              |
| 306                            | 34                            | 143.3      | 3.21          | 0.43  | 1801.1           | 720.4                   | 360.2                  | 720.4                    | 125            | 2446                              |
| 333                            | 37                            | 152.5      | 3.49          | 0.42  | 1779.9           | 712                     | 356                    | 712                      | 145            | 2414                              |
| 387                            | 43                            | 153.3      | 4.06          | 0.37  | 1704.4           | 681.7                   | 340.9                  | 681.7                    | 105            | 2418                              |

Obs: La dozajele de zgura de 27 si 30 kg/m<sup>3</sup> s-a obținut un beton necoeziv.

Tabelul V.39. – Compozițiile și caracteristicile betoanelor proaspete preparate cu CEM I 42,5R și 37% zgură

| Ciment (kg/m <sup>3</sup> ) | Zgură (kg/m <sup>3</sup> ) | Apă (l) | Aditiv (l) | a/l  | Agregate (kg) | sort 0-4 mm (kg) | sort 4-8 mm (kg) | sort 8-16 mm (kg) | Tasare (mm) | Densitate (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-----------------------------|----------------------------|---------|------------|------|---------------|------------------|------------------|-------------------|-------------|--------------------------------|
| 170.10                      | 99.9                       | 156.7   | 2.55       | 0.59 | 1893.4        | 757.4            | 378.7            | 757.4             | 120         | 2424                           |
| 189.00                      | 111                        | 146     | 2.83       | 0.50 | 1855          | 742              | 371              | 742               | 150         | 2420                           |
| 214.20                      | 125.8                      | 141.7   | 3.21       | 0.43 | 1801.1        | 720.4            | 360.2            | 720.4             | 145         | 2445                           |
| 233.10                      | 136.9                      | 150     | 3.49       | 0.41 | 1779.9        | 712              | 356              | 712               | 150         | 2421                           |
| 270.90                      | 159.1                      | 147.7   | 4.06       | 0.35 | 1704.4        | 681.7            | 340.9            | 681.7             | 145         | 2443                           |

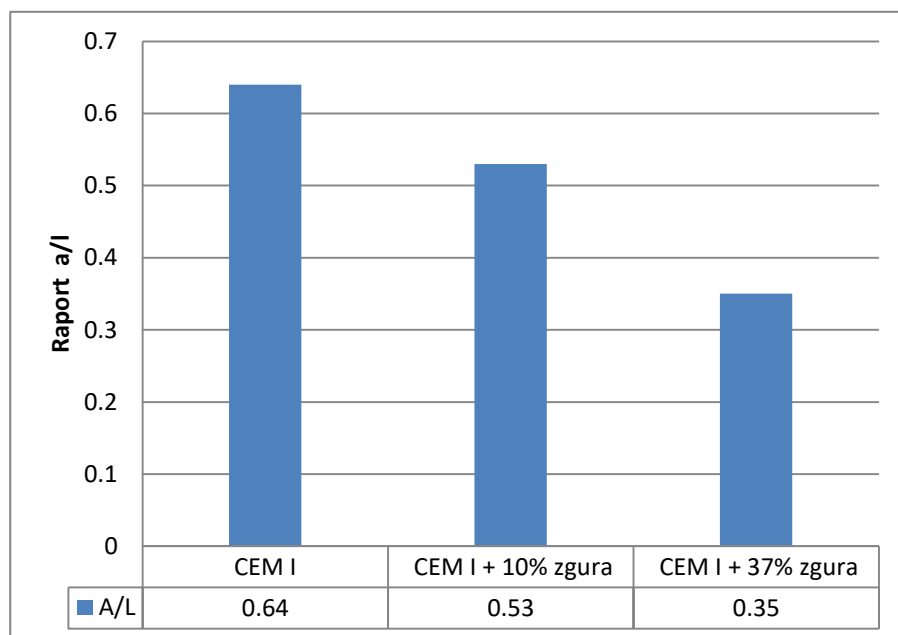


Figura V.61.- Variația raportului a/l pentru betoanele preparate cu dozajul de ciment de 270 kg/m<sup>3</sup>

S-au obținut rapoarte a/l mai mici cu 17% și respectiv 45% decât cel obținut pentru betonul preparat cu CEM I 42.5R, pentru același dozaj de ciment.

Tabelul V.40. – Caracteristicile de rezistență ale betoanelor întărite preparate cu CEM I 42,5R (probe menținute în apă până la termenul de încercare)

| Dozaj<br>ciment<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | a/l  | Rezistența la compresiune (N/mm <sup>2</sup> ) |       |        |       |         |       | f <sub>cm</sub> 2/<br>f <sub>cm</sub> 28 |
|-----------------------------------------|------|------------------------------------------------|-------|--------|-------|---------|-------|------------------------------------------|
|                                         |      | 2 zile                                         |       | 7 zile |       | 28 zile |       |                                          |
| 270                                     | 0.64 | 20.24                                          | 19.96 | 33.66  | 31.92 | 36.62   | 36.85 | 0.54                                     |
|                                         |      | 20.00                                          |       | 30.47  |       | 36.41   |       |                                          |
|                                         |      | 19.65                                          |       | 31.64  |       | 37.52   |       |                                          |
| 300                                     | 0.54 | 27.72                                          | 27.51 | 40.91  | 41.66 | 48.18   | 48.51 | 0.56                                     |
|                                         |      | 26.96                                          |       | 42.14  |       | 48.38   |       |                                          |
|                                         |      | 27.85                                          |       | 41.93  |       | 48.96   |       |                                          |
| 340                                     | 0.46 | 37.00                                          | 36.55 | 49.79  | 48.86 | 51.55   | 54.72 | 0.66                                     |
|                                         |      | 36.28                                          |       | 48.44  |       | 56.66   |       |                                          |

| Dozaj<br>ciment<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | a/l  | Rezistența la compresiune (N/mm <sup>2</sup> ) |       |        |       |         |       | f <sub>cm</sub> 2/<br>f <sub>cm</sub> 28 |
|-----------------------------------------|------|------------------------------------------------|-------|--------|-------|---------|-------|------------------------------------------|
|                                         |      | 2 zile                                         |       | 7 zile |       | 28 zile |       |                                          |
|                                         |      | 36.38                                          |       | 48.34  |       | 55.94   |       |                                          |
| 370                                     | 0.44 | 40.24                                          | 40.96 | 48.54  | 50.15 | 56.25   | 55.74 | 0.73                                     |
|                                         |      | 41.46                                          |       | 51.47  |       | 56.66   |       |                                          |
|                                         |      | 41.18                                          |       | 50.45  |       | 54.31   |       |                                          |
| 430                                     | 0.40 | 45.27                                          | 45.32 | 52.18  | 51.12 | 61.61   | 61.90 | 0.73                                     |
|                                         |      | 46.78                                          |       | 50.84  |       | 61.63   |       |                                          |
|                                         |      | 43.90                                          |       | 50.33  |       | 62.46   |       |                                          |

Tabelul V.41. – Caracteristicile de rezistență ale betoanelor întărite preparate cu CEM I 42,5R și 10% zgură (probe menținute în apă până la termenul de încercare)

| Dozaj<br>zgură<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Dozaj<br>ciment<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | a/l  | Rezistența la compresiune (N/mm <sup>2</sup> ) |       |        |       |         |       | f <sub>cm</sub> 2/<br>f <sub>cm</sub> 28 |
|----------------------------------------|-----------------------------------------|------|------------------------------------------------|-------|--------|-------|---------|-------|------------------------------------------|
|                                        |                                         |      | 2 zile                                         |       | 7 zile |       | 28 zile |       |                                          |
| 27                                     | 243                                     | 0.60 | 19.56                                          | 19.62 | 31.15  | 30.93 | 38.44   | 37.81 | 0.51                                     |
|                                        |                                         |      | 19.44                                          |       | 30.42  |       | 38.01   |       |                                          |
|                                        |                                         |      | 19.87                                          |       | 31.22  |       | 36.99   |       |                                          |
| 30                                     | 270                                     | 0.53 | 27.94                                          | 27.81 | 39.00  | 39.77 | 44.88   | 46.12 | 0.60                                     |
|                                        |                                         |      | 27.61                                          |       | 40.09  |       | 48.33   |       |                                          |
|                                        |                                         |      | 27.89                                          |       | 40.22  |       | 45.14   |       |                                          |
| 34                                     | 306                                     | 0.43 | 36.07                                          | 36.69 | 47.25  | 48.40 | 58.52   | 56.45 | 0.64                                     |
|                                        |                                         |      | 36.47                                          |       | 49.62  |       | 56.39   |       |                                          |
|                                        |                                         |      | 37.53                                          |       | 48.33  |       | 54.44   |       |                                          |
| 37                                     | 333                                     | 0.42 | 38.46                                          | 39.31 | 52.47  | 50.34 | 57.16   | 58.70 | 0.67                                     |
|                                        |                                         |      | 40.36                                          |       | 50.33  |       | 59.52   |       |                                          |
|                                        |                                         |      | 39.11                                          |       | 48.21  |       | 59.41   |       |                                          |
| 43                                     | 387                                     | 0.37 | 42.06                                          | 43.16 | 55.35  | 55.15 | 60.24   | 60.39 | 0.71                                     |
|                                        |                                         |      | 42.32                                          |       | 54.88  |       | 59.37   |       |                                          |
|                                        |                                         |      | 45.11                                          |       | 55.22  |       | 61.57   |       |                                          |

Tabelul V.42. – Caracteristicile de rezistență ale betoanelor întărite preparate cu CEM I 42,5R și 37% zgură (probe menținute în apă până la termenul de încercare)

| Dozaj<br>zgură<br>(kg/m³) | Dozaj<br>ciment<br>(kg/m³) | a/l  | Rezistența la compresiune (N/mm²) |       |        |       |         |       | f <sub>cm</sub> 2/<br>f <sub>cm</sub> 28 |
|---------------------------|----------------------------|------|-----------------------------------|-------|--------|-------|---------|-------|------------------------------------------|
|                           |                            |      | 2 zile                            |       | 7 zile |       | 28 zile |       |                                          |
| 99.9                      | 170.1                      | 0.59 | 11.93                             | 12.30 | 22.13  | 21.66 | 31.38   | 30.62 | 0.40                                     |
|                           |                            |      | 12.79                             |       | 21.52  |       | 29.51   |       |                                          |
|                           |                            |      | 12.17                             |       | 21.34  |       | 30.98   |       |                                          |
| 111.0                     | 189.0                      | 0.50 | 17.13                             | 17.25 | 31.74  | 31.97 | 43.61   | 43.27 | 0.40                                     |
|                           |                            |      | 17.80                             |       | 31.78  |       | 41.58   |       |                                          |
|                           |                            |      | 16.82                             |       | 32.39  |       | 44.63   |       |                                          |
| 125.8                     | 214.2                      | 0.43 | 22.33                             | 22.67 | 38.60  | 39.72 | 54.63   | 52.77 | 0.43                                     |
|                           |                            |      | 22.84                             |       | 40.44  |       | 52.80   |       |                                          |
|                           |                            |      | 22.84                             |       | 40.11  |       | 50.88   |       |                                          |
| 136.9                     | 233.1                      | 0.41 | 24.05                             | 24.32 | 42.43  | 43.53 | 54.75   | 54.89 |                                          |

| Dozaj<br>zgură<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Dozaj<br>ciment<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | a/l  | Rezistența la compresiune (N/mm <sup>2</sup> ) |       |        |       |         |       | f <sub>cm</sub> 2/<br>f <sub>cm</sub> 28 |      |
|----------------------------------------|-----------------------------------------|------|------------------------------------------------|-------|--------|-------|---------|-------|------------------------------------------|------|
|                                        |                                         |      | 2 zile                                         |       | 7 zile |       | 28 zile |       |                                          |      |
|                                        |                                         |      | 24.87                                          |       | 44.89  |       | 54.61   |       | 0.44                                     |      |
|                                        |                                         |      | 24.03                                          |       | 43.27  |       | 55.31   |       |                                          |      |
| 159.1                                  | 270.9                                   | 0.35 | 30.96                                          | 31.45 | 50.84  | 49.98 | 56.84   | 57.67 |                                          | 0.54 |
|                                        |                                         |      | 31.75                                          |       | 48.76  |       | 58.20   |       |                                          |      |
|                                        |                                         |      | 31.64                                          |       | 50.33  |       | 57.98   |       |                                          |      |

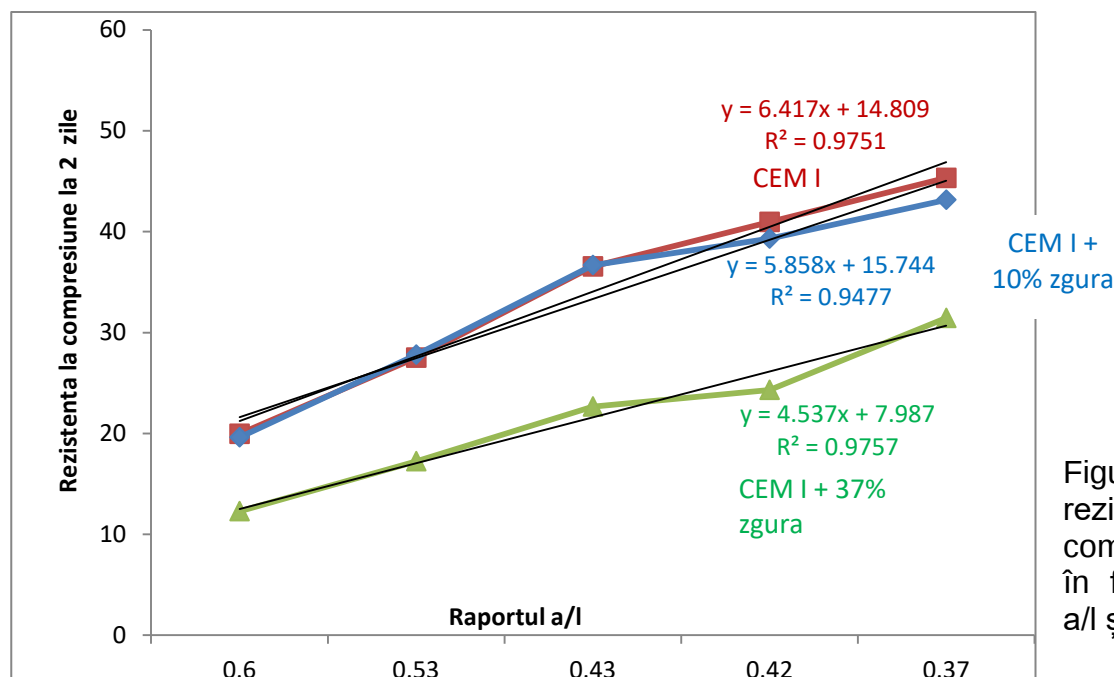


Figura V.62.- Variația rezistenței la compresiune la 2 zile în funcție de raportul a/l și tipul betonului

Din figura V.62. se observă că rezultatele obținute pentru rezistențele la compresiune la 2 zile, pentru același raport a/l, diferă în funcție de tipul de ciment. Betoanele preparate cu CEM I și cu CEM I + 10% zgură se comportă similar la vârsta de 2 zile, rezistențele obținute pentru acestea fiind semnificativ mai mari decât cele obținute pentru betonul cu CEM I + 37% zgură (cu aprox. 7-12 N/mm<sup>2</sup>), diferențe importante întâlnindu-se la toate rapoartele a/l.

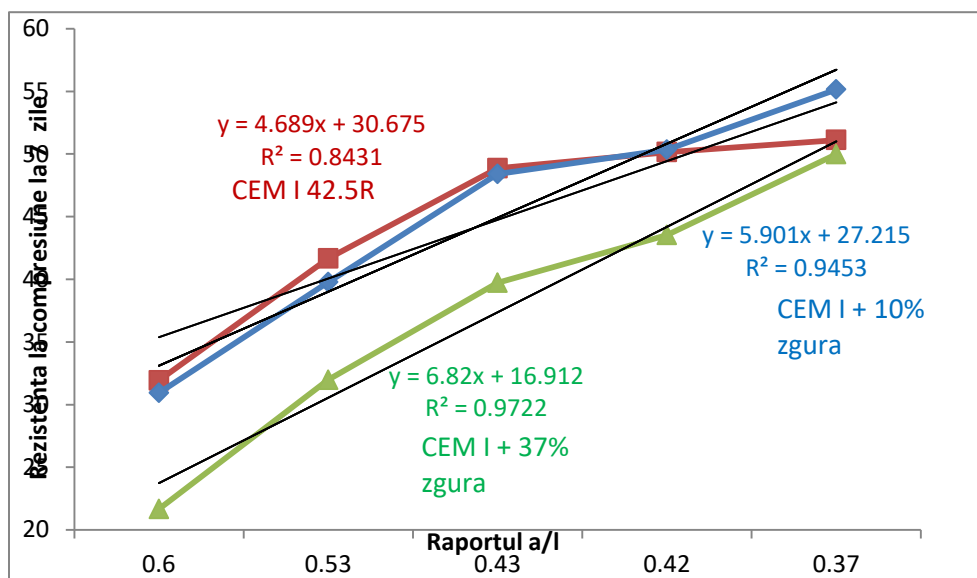


Figura V.63.- Variația rezistenței la compresiune la 7 zile în funcție de raportul a/l și tipul betonului

La vârsta de 7 zile, betoanele preparate cu CEM I și cu CEM I + 10% zgură își mențin tendința obținută la vârsta de 2 zile, în schimb diferențele dintre rezistențele la compresiune obținute pentru betoanele preparate cu cele trei variante de cimenturi, sunt puțin mai mici decât cele obținute la vârsta de 2 zile, pentru același raport a/l.

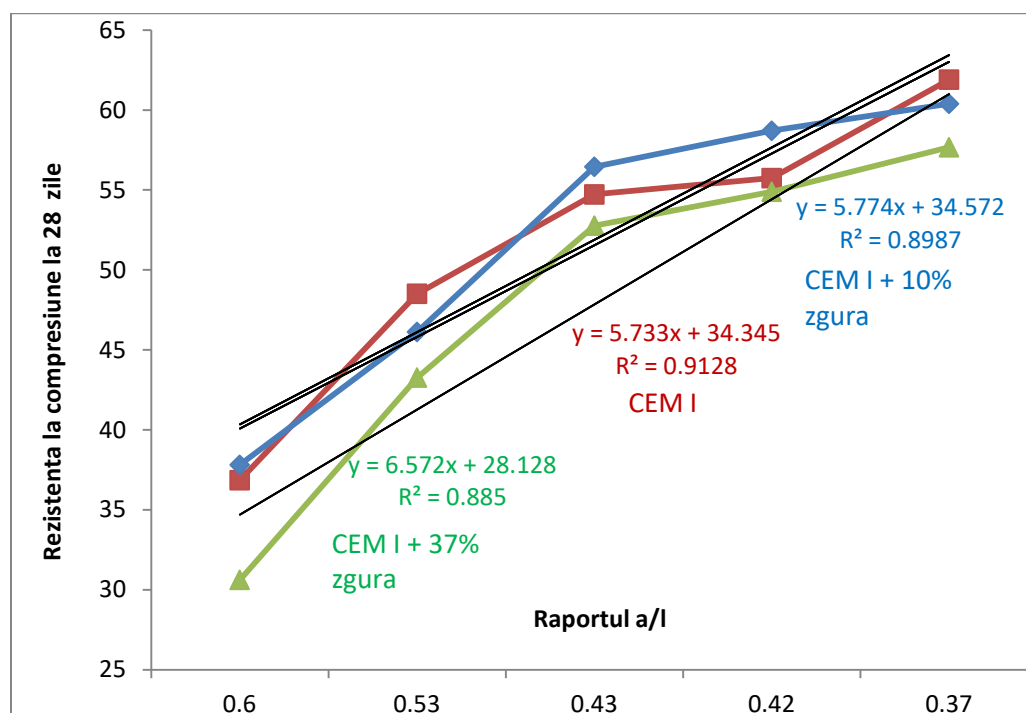


Figura V.64.- Variația rezistenței la compresiune la 28 zile în funcție de raportul a/l și tipul betonului

Diferențele obținute la vârsta de 28 zile pentru betoanele preparate cu cele trei variante de cimenturi, pentru același raport a/l sunt mult mai mici decât cele obținute la vârstele de 2 și 7 zile și comportarea betoanelor este aproximativ la fel în domeniul rapoartelor a/l mai mici de 0.5. În cazul betoanelor preparate cu CEM I și cu CEM I + 10% zgură, evoluția rezistențelor este rapidă, iar pentru betoanelor preparate cu CEM I + 37% zgură, evoluția rezistențelor este medie. Evoluția rezistenței betonului reprezintă un indicator esențial pentru stabilirea duratei minime de tratare. Din modelarea matematică a funcțiilor de predicție pentru betonul cu cele trei tipuri de ciment, utilizând regresia matematică și datele existente din încercări la 2, 7 și respectiv 28 zile se pot defini drepte  $f(x)$  cu coeficienți calculați cu ajutorul metodei celor mai mici pătrate a lui Gauss care pot indica valoarea rezistenței la compresiune funcție de raportul a/l cu un grad de aproximare dat de coeficientul de corelație  $R$ . Valoarea rezistenței este cu atât mai bună cu cât coeficientul de corelație  $R$  este mai aproape de 1.

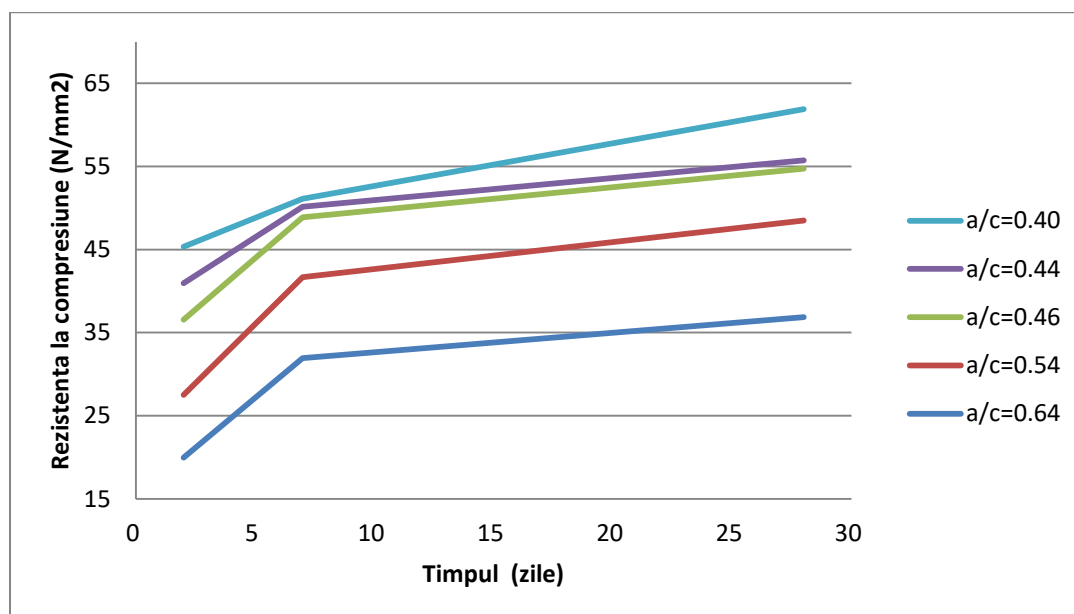


Figura V.65.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu ciment CEM I 42.5R în funcție de vârstă și raportul  $a/c$

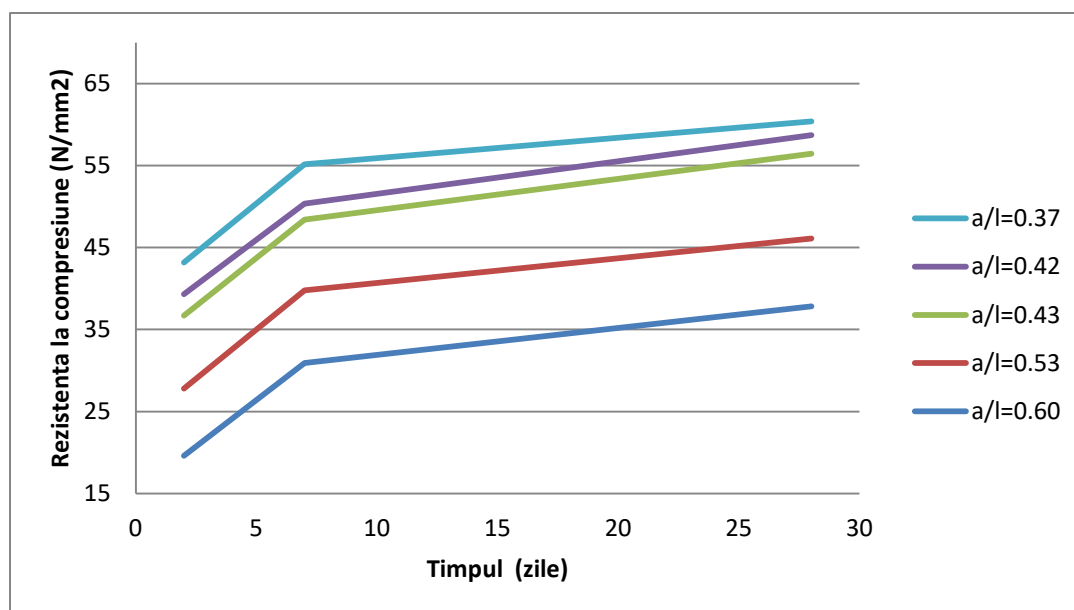


Figura V.66.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu ciment CEM I 42.5R și 10% zgură în funcție de vârstă și raportul  $a/l$

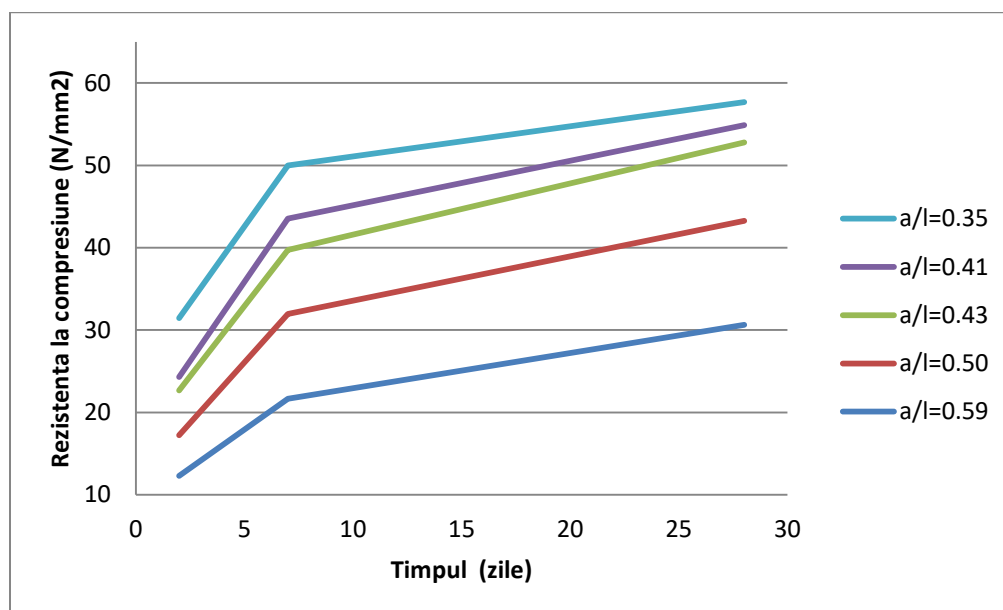


Figura V.67.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu ciment CEM I 42.5R și 37% zgură în funcție de vârstă și raportul a/l

Din punct de vedere al rezistențelor la compresiune obținute la vârsta de 28 zile se poate observa că valorile sunt asemănătoare pentru betoanele cu CEM I și cu CEM I + 10% zgură și mai mici pentru betoanele cu CEM I + 37% zgură, fiind proporționale cu dozajul de ciment. S-a urmărit în mod special compararea rezultatelor obținute pentru betoanele realizate cu adaosuri de zgură, CEM I 42.5R+10% zgură și CEM I 42.5R+37% zgură, față de betoane preparate cu cimenturi cu adaosuri de zgură granulată de furnal măcinată, CEM II/A-S 42.5R și CEM III/A 42.5N-LH, la proporții egale de adaosuri și la același raport a/c echivalent (apa+aditiv)/(ciment+k x zgură). Metoda de calcul a coeficientului de echivalență k este prezentată în capitolul 4 din relația IV. 6 [82] și pe bază experimentală din [82], [83] s-a stabilit valoarea lui k de 0.5. Pentru cele patru tipuri de betoane s-au efectuat încercări pentru determinarea unor caracteristici ale betonului:

- Rezistența la compresiune;
- Absorbție și porozitate;
- Permeabilitate;
- Carbonatare;
- Rezistența la îngheț-dezghet;
- Rezistența la sulfatați.

S-au propus amestecuri de betoane pentru două clase de rezistență prescrise C16/20 cu raport echivalent a/c=0.65 și C20/25a cu raport echivalent a/c=0.50, având compozițiile betonului proaspăt prezentate în tabelele V.43. și V.44. pentru care s-au determinat caracteristici de rezistență și de durabilitate. Stabilirea cantității necesare de zgură a rezultat din alegerea unui dozaj de ciment ( $260 \text{ kg/m}^3$  pentru clasa C16/20 și respectiv  $330 \text{ kg/m}^3$  pentru clasa C20/25a) și prin considerarea coeficientului de echivalență  $k=0.5$ .

#### Clasa de beton C 16/20

- S-au preparat betoane cu ciment tip CEM II/ A–S 42,5R (10% zgură) cu dozaj de ciment de  $260 \text{ kg/m}^3$ , raport a/c = 0.65
- S-au preparat betoane cu adaosuri de zgură de 10% ( $k=0.5$ )  
 $c_1 + 0.5 \cdot 0.1 c_1 = 260 \text{ kg/m}^3$ ;  $c_1 = 248 \text{ kg/m}^3$ , zgură =  $24.8 \text{ kg/m}^3$

- S-au preparat betoane cu ciment CEM III/ A 42,5 N-LH (37% zgură), dozaj  $260 \text{ kg/m}^3$
- S-au preparat betoane cu adaos de zgură de 37% ( $k=0.5$ )  
 $c_2 + 0.5 \cdot 0.37 c_2 = 260 \text{ kg/m}^3$  ;  $c_2 = 219 \text{ kg/m}^3$ , zgură =  $81 \text{ kg/m}^2$

### Clasa de beton C20/25a

- S-au preparat betoane cu ciment tip CEM II/A-S 42,5R (10% zgură) cu dozaj de ciment de  $330 \text{ kg/m}^3$ , raport  $a/c = 0.50$
- S-au preparat betoane cu adaosuri de zgură 10%  
 $c_1 + 0.5 \cdot 0.1 c_1 = 330 \text{ kg/m}^3$  ;  $c_1 = 314 \text{ kg/m}^3$ , zgură =  $31.41 \text{ kg/m}^2$
- S-au preparat betoane cu ciment CEM III/A 42,5N-LH (37% zgură)
- S-au preparat betoane cu adaosuri de zgură 37%  
 $c_2 + 0.5 \cdot 0.37 c_2 = 330 \text{ kg/m}^3$  ;  $c_2 = 278 \text{ kg/m}^3$ , zgură =  $103 \text{ kg/m}^2$

Tabelul V.43. – Compozițiile și caracteristicile betoanelor de clasă C16/20 preparate cu un raport  $a/c$  echivalent de 0.65

| Tip ciment  | Dozaj ciment ( $\text{kg/m}^3$ ) | Dozaj zgură ( $\text{kg/m}^3$ ) | Apă (l) | Aditiv super-plastifiant (l) | Agregate (kg) | sort 0-4 mm (kg) | sort 4-8 mm (kg) | sort 8-16 mm (kg) | Tasare (mm) | Densitate ( $\text{kg/m}^3$ ) |
|-------------|----------------------------------|---------------------------------|---------|------------------------------|---------------|------------------|------------------|-------------------|-------------|-------------------------------|
| I+10% zgură | 248                              | 24.8                            | 166.4   | 2.57                         | 1908.2        | 763.3            | 381.6            | 763.3             | 195         | 2361                          |
| I+37% zgură | 219                              | 81                              | 166.2   | 2.83                         | 1884.2        | 753.7            | 376.8            | 753.7             | 155         | 2372                          |
| II/A-S      | 260                              | 0                               | 166.5   | 2.45                         | 1919.5        | 767.8            | 383.9            | 767.8             | 200         | 2338                          |
| III/A       | 260                              | 0                               | 166.5   | 2.45                         | 1919.5        | 767.8            | 383.9            | 767.8             | 200         | 2369                          |

Tabelul V.44. – Compozițiile și caracteristicile betoanelor de clasă C20/25a preparate cu un raport  $a/c$  echivalent de 0.5

| Tip ciment  | Dozaj ciment ( $\text{kg/m}^3$ ) | Dozaj zgură ( $\text{kg/m}^3$ ) | Apă (l) | Aditiv super-plastifiant (l) | Aditiv antrenor de aer (l) | Agregate (kg) | sort 0-4 mm (kg) | sort 4-8 mm (kg) | sort 8-16 mm (kg) | Tasare (mm) | Densitate ( $\text{kg/m}^3$ ) | Aer (%) |
|-------------|----------------------------------|---------------------------------|---------|------------------------------|----------------------------|---------------|------------------|------------------|-------------------|-------------|-------------------------------|---------|
| I+10% zgură | 314                              | 31.4                            | 161     | 3.26                         | 0.69                       | 1856.5        | 742.6            | 371.3            | 742.6             | 210         | 2192                          | 10      |
| I+37% zgură | 278                              | 103                             | 160.6   | 3.59                         | 0.76                       | 1825.2        | 730.1            | 365              | 730.1             | 210         | 2151                          | 10      |
| II/A-S      | 330                              | 0                               | 161.2   | 3.11                         | 0.66                       | 1870          | 748              | 374              | 748               | 205         | 2180                          | 9.2     |
| III/A       | 330                              | 0                               | 161.2   | 3.11                         | 0.66                       | 1870          | 748              | 374              | 748               | 235         | 2235                          | 8.9     |

Betoanele preparate cu aditiv superplastifiant și aditiv antrenor de aer, cu efect de superplastifiant au tasări mai mari, cuprinse între 205 și 235 mm, neîncadrându-se în aceeași clasă de lucrabilitate.

În tabelul V.45. și V.46. se indică rezultatele obținute pentru rezistența la compresie la diferite vârste. Probele au fost menținute în apa până la 2 și respectiv 28 de zile. În cazul încercărilor la 90 și 180 de zile, probele au fost menținute în apa până la vârsta de 7 zile apoi în laborator în condiții standardizate de temperatura și umiditate ( $20^\circ\text{C}$  și 65% RH).

Tabelul V.45. – Valorile rezistențelor la compresiune ale betoanelor de clasa C16/20 preparate cu un raport a/c echivalent =0.65

| Tip<br>ciment  | Dozaj<br>ciment<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Dozaj<br>zgură<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Rezistența la compresiune<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |       |         |       | f <sub>cm2</sub> /<br>f <sub>cm28</sub> | Clasa<br>de<br>beton<br>obținută |
|----------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------|-------|---------|-------|-----------------------------------------|----------------------------------|
|                |                                         |                                        | 2 zile                                            |       | 28 zile |       |                                         | Verificări<br>curente            |
| I+10%<br>zgură | 248                                     | 24.8                                   | 18.07                                             | 18.50 | 26.16   | 26.16 | 0.71                                    | C16/20                           |
|                |                                         |                                        | 19.40                                             |       | 25.84   |       |                                         |                                  |
|                |                                         |                                        | 18.03                                             |       | 26.48   |       |                                         |                                  |
| I+37%<br>zgură | 219                                     | 81                                     | 17.32                                             | 17.43 | 26.14   | 25.76 | 0.67                                    | C16/20                           |
|                |                                         |                                        | 17.29                                             |       | 26.64   |       |                                         |                                  |
|                |                                         |                                        | 17.67                                             |       | 24.49   |       |                                         |                                  |
| II/A-S         | 260                                     | 0                                      | 16.74                                             | 16.77 | 27.40   | 28.81 | 0.58                                    | C16/20                           |
|                |                                         |                                        | 16.39                                             |       | 29.44   |       |                                         |                                  |
|                |                                         |                                        | 17.18                                             |       | 29.60   |       |                                         |                                  |
| III/A          | 260                                     | 0                                      | 12.18                                             | 11.83 | 25.38   | 26.31 | 0.45                                    | C16/20                           |
|                |                                         |                                        | 12.22                                             |       | 26.85   |       |                                         |                                  |
|                |                                         |                                        | 11.08                                             |       | 26.70   |       |                                         |                                  |

Tabelul V.46. – Evoluția în timp a rezistențelor la compresiune ale betoanelor de clasa C16/20 preparate cu un raport a/c echivalent =0.65

| Tip ciment  | Dozaj ciment (kg/m <sup>3</sup> ) | Dozaj zgură (kg/m <sup>3</sup> ) | Rezistența la compresiune (N/mm <sup>2</sup> ) |       |         |       |         |       |          |       |
|-------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|-------|---------|-------|---------|-------|----------|-------|
|             |                                   |                                  | 2 zile                                         |       | 28 zile |       | 90 zile |       | 180 zile |       |
| I+10% zgură | 248                               | 24.8                             | 18.07                                          | 18.50 | 26.16   | 26.16 | 42.80   | 40.73 | 42.58    | 41.25 |
|             |                                   |                                  | 19.40                                          |       | 25.84   |       | 39.00   |       | 39.15    |       |
|             |                                   |                                  | 18.03                                          |       | 26.48   |       | 40.40   |       | 42.02    |       |
| I+37% zgură | 219                               | 81                               | 17.32                                          | 17.43 | 26.14   | 25.76 | 37.54   | 37.81 | 43.70    | 44.20 |
|             |                                   |                                  | 17.29                                          |       | 26.64   |       | 38.90   |       | 43.63    |       |
|             |                                   |                                  | 17.67                                          |       | 24.49   |       | 37.00   |       | 45.28    |       |
| II/A-S      | 260                               | 0                                | 16.74                                          | 16.77 | 27.40   | 28.81 | 34.18   | 35.13 | 36.62    | 36.51 |
|             |                                   |                                  | 16.39                                          |       | 29.44   |       | 36.16   |       | 37.11    |       |
|             |                                   |                                  | 17.18                                          |       | 29.60   |       | 35.04   |       | 35.82    |       |
| III/A       | 260                               | 0                                | 12.18                                          | 11.83 | 25.38   | 26.31 | 30.18   | 30.53 | 38.59    | 35.68 |
|             |                                   |                                  | 12.22                                          |       | 26.85   |       | 29.68   |       | 32.75    |       |
|             |                                   |                                  | 11.08                                          |       | 26.70   |       | 31.72   |       | 35.70    |       |

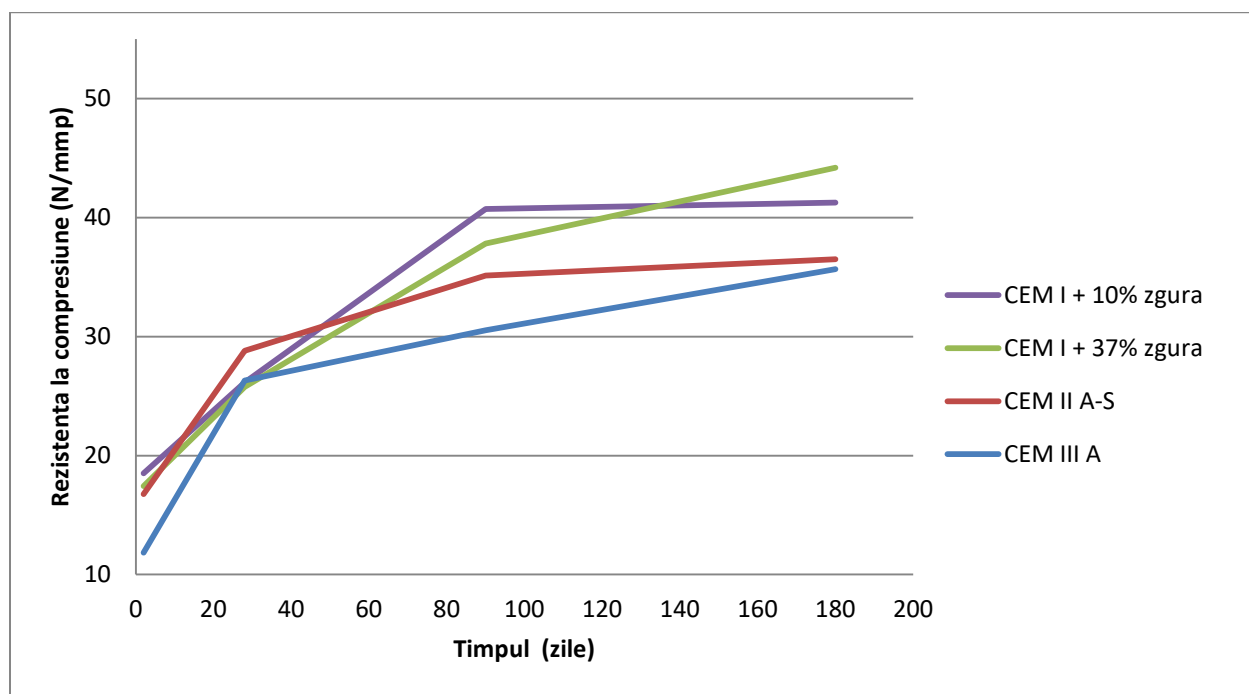


Figura V.68.- Variația rezistenței la compresiune a betonului clasa C16/25 cu ciment CEM I 42.5R și 10% zgură, respectiv 37% zgură, CEM II/A-S și CEM III/A cu raport  $a/c=0.65$  în funcție de vârstă

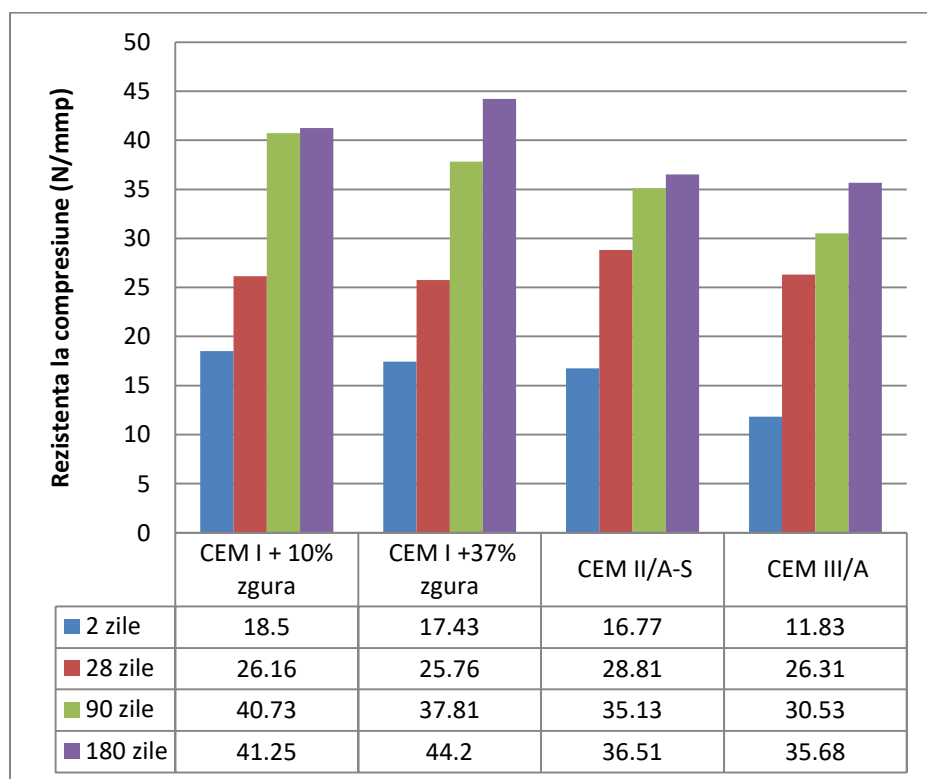


Figura V.69.- Variația rezistenței la compresiune a betonului de clasa C16/20 cu raport  $a/c = 0.65$  în funcție de vârstă și tipul cimentului

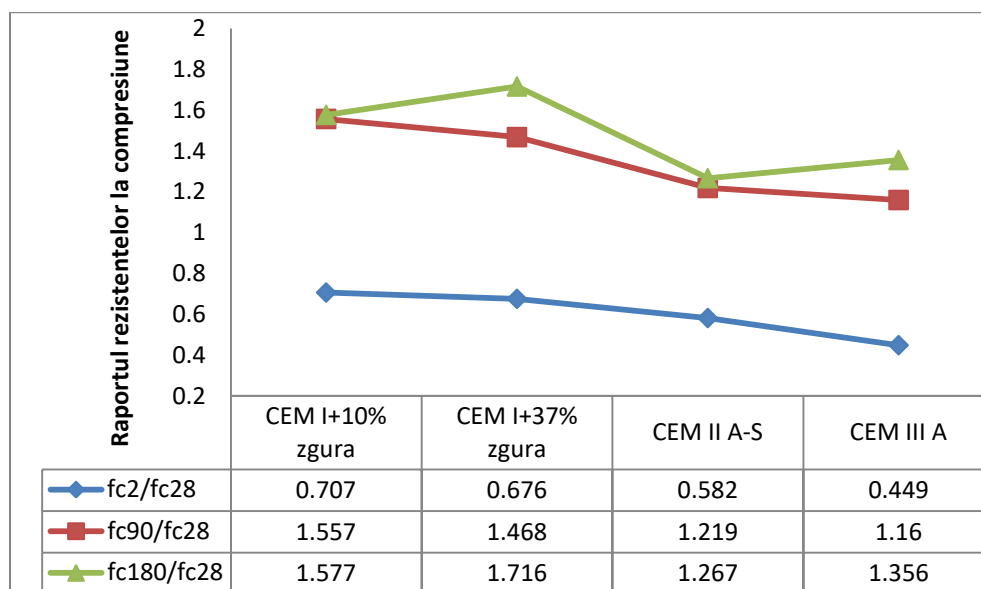


Figura V.70.- Variația rapoartelor rezistențelor la compresiune pentru betoane clasa C16/20 în funcție de tipul cimentului

Creșterile de rezistență între 28 și 180 zile pentru betonul cu CEM I + 10% zgură sunt în jur de 55%, pentru betonul cu CEM I + 37% zgură sunt cuprinse între 46-71%, pentru betonul cu CEM II/A-S variază între 22-26%, iar pentru betonul cu CEM III/A sunt între 16-35%. Pentru clasa de beton C16/20 cu raport a/c echivalent de 0.65, evoluția rezistențelor este rapidă pentru primele trei tipuri de cimenturi, iar pentru betoanele preparate cu CEM I + 37% zgură, evoluția rezistențelor este medie.

Tabelul V.47. – Valorile rezistenței la compresiune obținute pentru betoane de clasa C20/25a preparate cu a/c echivalent de 0.5

| cu un echivalent de C-25 |                                         |                                        |                                                   |       |         |       |                                         |                               |
|--------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------|-------|---------|-------|-----------------------------------------|-------------------------------|
| Tip<br>ciment            | Dozaj<br>ciment<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Dozaj<br>zgură<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Rezistența la compresiune<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |       |         |       | f <sub>cm2</sub> /<br>f <sub>cm28</sub> | Clasa<br>de beton<br>obținută |
|                          |                                         |                                        | 2 zile                                            |       | 28 zile |       |                                         | Verificări<br>curente         |
| I+10%<br>zgură           | 314                                     | 31.41                                  | 19.07                                             | 18.45 | 31.92   | 31.49 | 0.58                                    | C20/25                        |
|                          |                                         |                                        | 18.15                                             |       | 31.57   |       |                                         |                               |
|                          |                                         |                                        | 18.14                                             |       | 30.97   |       |                                         |                               |
| I+37%<br>zgură           | 278                                     | 103.0                                  | 18.36                                             | 18.10 | 34.51   | 32.86 | 0.55                                    | C20/25                        |
|                          |                                         |                                        | 18.09                                             |       | 31.99   |       |                                         |                               |
|                          |                                         |                                        | 17.84                                             |       | 32.08   |       |                                         |                               |
| II/A-S                   | 330                                     | 0                                      | 18.32                                             | 17.95 | 29.18   | 29.84 | 0.60                                    | C20/25                        |
|                          |                                         |                                        | 18.17                                             |       | 30.86   |       |                                         |                               |
|                          |                                         |                                        | 17.35                                             |       | 29.47   |       |                                         |                               |
| III/A                    | 330                                     | 0                                      | 12.72                                             | 13.14 | 30.23   | 30.69 | 0.43                                    | C20/25                        |
|                          |                                         |                                        | 13.29                                             |       | 31.01   |       |                                         |                               |
|                          |                                         |                                        | 13.40                                             |       | 30.84   |       |                                         |                               |

Tabelul V.48. – Evoluția în timp a rezistențelor la compresiune ale betoanelor de clasa C20/25a preparate cu un raport a/c echivalent =0.5

| Tip ciment  | Dozaj ciment (kg/m <sup>3</sup> ) | Dozaj zgură (kg/m <sup>3</sup> ) | Rezistența la compresiune (N/mm <sup>2</sup> ) |       |         |       |         |       |          |       |
|-------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|-------|---------|-------|---------|-------|----------|-------|
|             |                                   |                                  | 2 zile                                         |       | 28 zile |       | 90 zile |       | 180 zile |       |
| I+10% zgură | 314                               | 31.41                            | 19.07                                          | 18.45 | 31.92   | 31.49 | 33.32   | 32.55 | 34.74    | 34.05 |
|             |                                   |                                  | 18.15                                          |       | 31.57   |       | 32.22   |       | 32.56    |       |
|             |                                   |                                  | 18.14                                          |       | 30.97   |       | 32.10   |       | 34.87    |       |
| I+37% zgură | 278                               | 103.0                            | 18.36                                          | 18.10 | 34.51   | 32.86 | 33.56   | 33.68 | 34.96    | 35.76 |
|             |                                   |                                  | 18.09                                          |       | 31.99   |       | 32.56   |       | 35.69    |       |
|             |                                   |                                  | 17.84                                          |       | 32.08   |       | 34.92   |       | 36.64    |       |
| II/A-S      | 330                               | 0                                | 18.32                                          | 17.95 | 29.18   | 29.84 | 32.45   | 30.51 | 32.05    | 33.25 |
|             |                                   |                                  | 18.17                                          |       | 30.86   |       | 30.94   |       | 34.90    |       |
|             |                                   |                                  | 17.35                                          |       | 29.47   |       | 28.15   |       | 32.81    |       |
| III/A       | 330                               | 0                                | 12.72                                          | 13.14 | 30.23   | 30.69 | 30.23   | 34.01 | 34.73    | 36.38 |
|             |                                   |                                  | 13.29                                          |       | 31.01   |       | 35.86   |       | 37.87    |       |
|             |                                   |                                  | 13.40                                          |       | 30.84   |       | 35.95   |       | 36.56    |       |

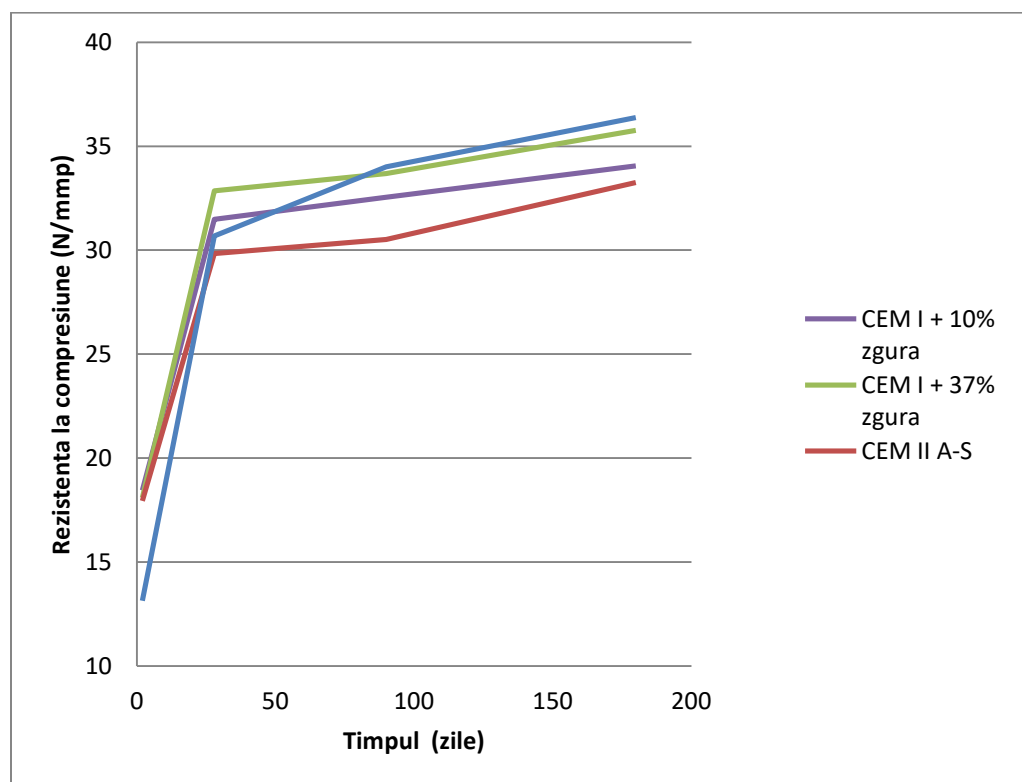


Figura V.71.- Variația rezistenței la compresiune a betonului clasa C20/25a cu ciment CEM I 42.5 R și 10% zgură, respectiv 37% zgură, CEM II/A-S și CEM III/A cu raport a/c=0.50 în funcție de vârstă

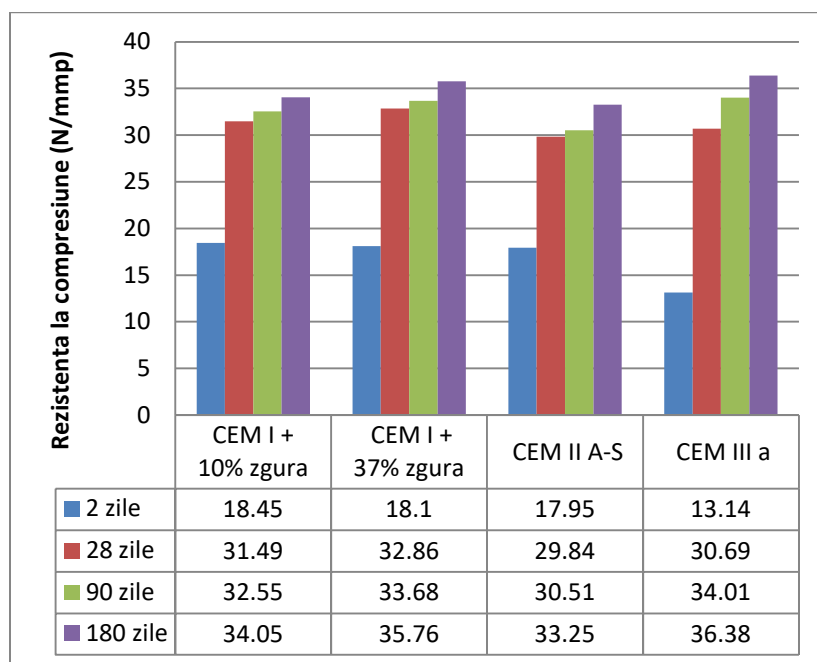


Figura V.72.- Variația rezistenței la compresiune a betonului de clasa C20/25a cu raport a/c = 0.50 în funcție de vârstă și de tipul cimentului

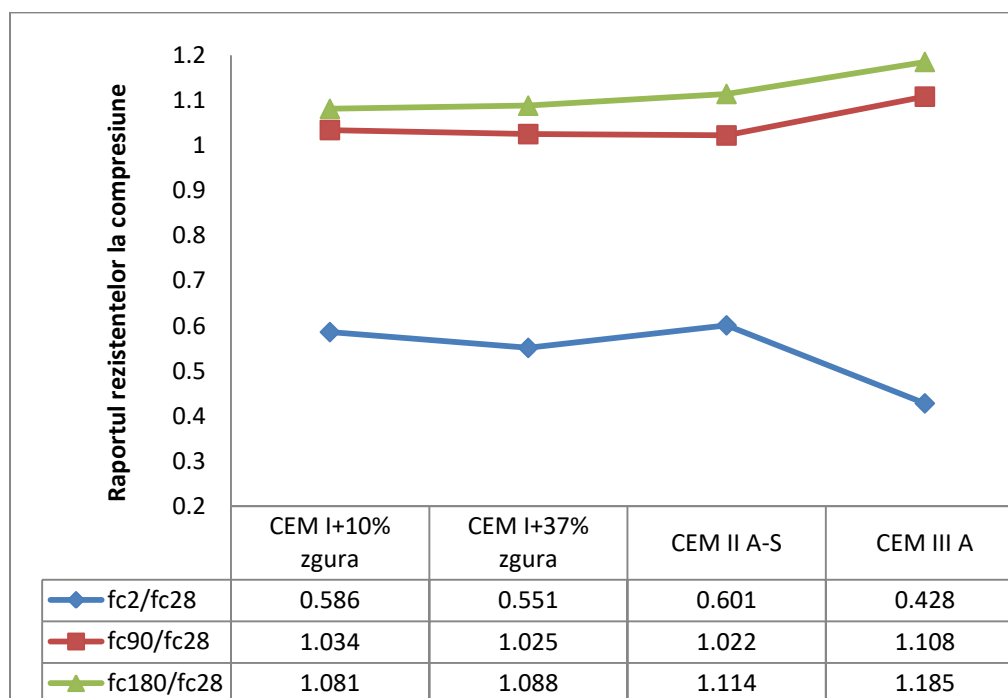


Figura V.73.- Variația rapoartelor rezistențelor la compresiune pentru betoane clasa C20/25a în funcție de tipul cimentului

Pentru clasa de beton C20/25a cu raport a/c echivalent = 0.50, creșterile de rezistență între 28 și 180 zile pentru betonul cu CEM I + 10% zgură sunt între 3-8%, pentru betonul cu CEM I + 37% zgură sunt cuprinse între 2-8%, pentru betonul cu CEM II/A-S variază între 2-11%, iar pentru betonul cu CEM III/A sunt între 10-18%. Evoluția rezistențelor este rapidă pentru primele

trei tipuri de cimenturi și medie pentru betoanelor preparate cu CEM III/A. Comparând creșterile de rezistență de la vârsta de 28 la 180 zile ale betoanelor din cele două clase de rezistență analizate se constată că:

- la betoanele din clasa C16/20, cea mai rapidă evoluție a avut-o betonul cu CEM I + 10% zgură, iar cea mai lentă evoluție s-a înregistrat pentru betonul cu CEM III/A;
- pentru toate betoanele, creșterile mai mari de rezistență în timp au fost pentru clasa C16/20 și mult mai lente pentru clasa C20/25a.

O alta etapă în desfășurarea programului de cercetare, în afara rezistențelor la compresiune ale betoanelor cu diferite tipuri de cimenturi și evoluția în timp a acestor rezistențe pentru termene diferite, a constat în determinarea porozității, absorbției de apă și a permeabilității acestor betoane.

**Porozitatea aparentă** a fost determinată pe un număr de 12 epruvete cubice pentru fiecare clasă de beton (câte trei probe pentru fiecare amestec de beton) cu latura de 150 mm, menținute 7 zile în apă, apoi până la vârsta de 28 zile în condiții standardizate de temperatură și umiditate. Probele pentru determinarea porozității au fost uscate și apoi au fost imersate în apă până la obținerea unei mase constante.

**Absorbția de apă** la masă constantă, a fost determinată pe un număr de 12 epruvete cubice pentru fiecare clasă de beton (cate trei probe pentru fiecare amestec de beton) cu latura de 150 mm, menținute 7 zile în apă, apoi până la vârsta de 28 zile în condiții standardizate de temperatură și umiditate, cântărite până la masă constantă, apoi saturate prin imersie în apă cicluri de timp de 24 ore și din nou recântărite până la masă constantă.

**Permeabilitatea la apă** s-a determinat tot pe 12 epruvete cubice cu latura de 150 mm ( 3 probe pentru fiecare tip de ciment), menținute 7 zile în apa, apoi până la vârsta de 28 zile în condiții standardizate de temperatură și umiditate. Acestea au fost supuse la o presiune a apei de  $(500 \pm 50)$  kPa (5 barr, pentru un grad de permeabilitate P5) aplicată timp de  $(72 \pm 2)$  ore. După încheierea încercării epruvetele au fost despicate și s-a măsurat imediat adâncimea de pătrundere a apei sub presiune, începând de la fața de infiltrație.

Tabelul V.49. – Valorile obținute pentru porozitate, absorbție și permeabilitate la vârsta de 28 de zile pentru betoanele de clasa C16/20 cu raport a/c echivalent = 0.65

| Tip ciment  | Dozaj ciment (kg/m <sup>3</sup> ) | Dozaj zgură (kg/m <sup>3</sup> ) | Porozitate, (masă const.), % |           | Absorbție, (masă const.), % |           | Adâncime de pătrundere a apei, cm |           |
|-------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
|             |                                   |                                  | val.indiv.                   | val.medie | val.indiv                   | val.medie | val.indiv.max                     | val.medie |
| I+10% zgură | 248                               | 24.8                             | 6.93                         | 7.26      | 3.27                        | 3.42      | 2.05                              | 2.10      |
|             |                                   |                                  | 7.53                         |           | 3.55                        |           | 2.52                              |           |
|             |                                   |                                  | 7.32                         |           | 3.45                        |           | 1.73                              |           |
| I+37% zgură | 219                               | 81                               | 6.22                         | 6.41      | 2.90                        | 3.01      | 2.31                              | 2.30      |
|             |                                   |                                  | 6.55                         |           | 3.07                        |           | 2.39                              |           |
|             |                                   |                                  | 6.46                         |           | 3.05                        |           | 2.19                              |           |
| II/A-S      | 260                               | 0                                | 6.81                         | 6.81      | 3.22                        | 3.22      | 2.09                              | 2.18      |
|             |                                   |                                  | 6.90                         |           | 3.23                        |           | 2.25                              |           |
|             |                                   |                                  | 6.73                         |           | 3.20                        |           | 2.20                              |           |
| III/A       | 260                               | 0                                | 7.76                         | 8.30      | 3.58                        | 3.86      | 1.57                              | 1.67      |
|             |                                   |                                  | 8.23                         |           | 3.83                        |           | 1.81                              |           |
|             |                                   |                                  | 8.92                         |           | 4.16                        |           | 1.62                              |           |

Tabelul V.50. – Valorile obținute pentru porozitate, absorbție și permeabilitate la vârsta de 28 de zile pentru betoanele de clasa C20/25a cu raport a/c echivalent = 0.50

| Tip ciment  | Dozaj ciment (kg/m <sup>3</sup> ) | Dozaj zgură (kg/m <sup>3</sup> ) | Porozitate, (masă const.), % |           | Absorbție, (masă const.), % |           | Adâncime de pătrundere a apei, cm |           |
|-------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
|             |                                   |                                  | val.indiv.                   | val.medie | val.indiv                   | val.medie | val.indiv. max                    | val.medie |
| I+10% zgură | 314                               | 31.41                            | 5.84                         | 5.80      | 2.56                        | 2.55      | 2.01                              | 2.00      |
|             |                                   |                                  | 5.93                         |           | 2.62                        |           | 2.02                              |           |
|             |                                   |                                  | 5.63                         |           | 2.46                        |           | 1.98                              |           |

| Tip ciment  | Dozaj ciment (kg/m <sup>3</sup> ) | Dozaj zgură (kg/m <sup>3</sup> ) | Porozitate, (masă const.), % |           | Absorbție, (masă const.), % |           | Adâncime de pătrundere a apei, cm |           |
|-------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
|             |                                   |                                  | val.indiv.                   | val.medie | val.indiv                   | val.medie | val.indiv. max                    | val.medie |
| I+37% zgură | 278                               | 103                              | 5.84                         | 5.69      | 2.53                        | 2.46      | 2.00                              | 1.97      |
|             |                                   |                                  | 5.51                         |           | 2.39                        |           | 1.98                              |           |
|             |                                   |                                  | 5.72                         |           | 2.46                        |           | 1.94                              |           |
| II/A-S      | 330                               | 0                                | 6.01                         | 6.25      | 2.69                        | 3.01      | 1.99                              | 2.19      |
|             |                                   |                                  | 6.28                         |           | 2.82                        |           | 1.63                              |           |
|             |                                   |                                  | 6.46                         |           | 2.91                        |           | 2.96                              |           |
| III/A       | 330                               | 0                                | 7.32                         | 7.96      | 3.37                        | 3.69      | 1.83                              | 1.62      |
|             |                                   |                                  | 8.53                         |           | 3.99                        |           | 1.87                              |           |
|             |                                   |                                  | 8.03                         |           | 3.72                        |           | 1.46                              |           |

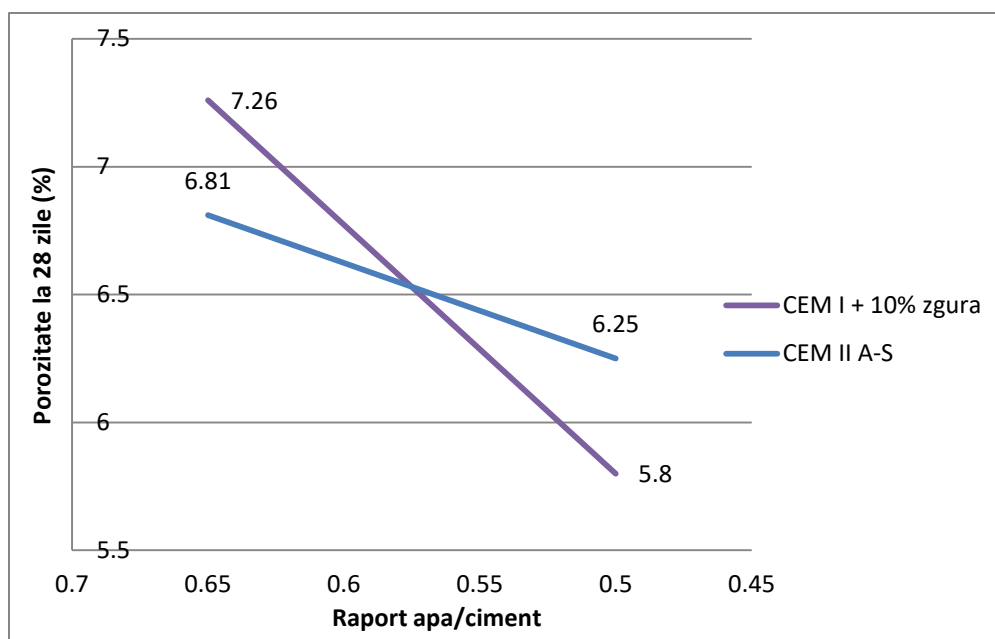


Figura V.74.- Variația porozității pentru betonul de clasa C16/20 și C20/25a preparat cu ciment CEM I 42.5 R + 10% zgură sau CEM II/A-S în funcție de raportul a/c

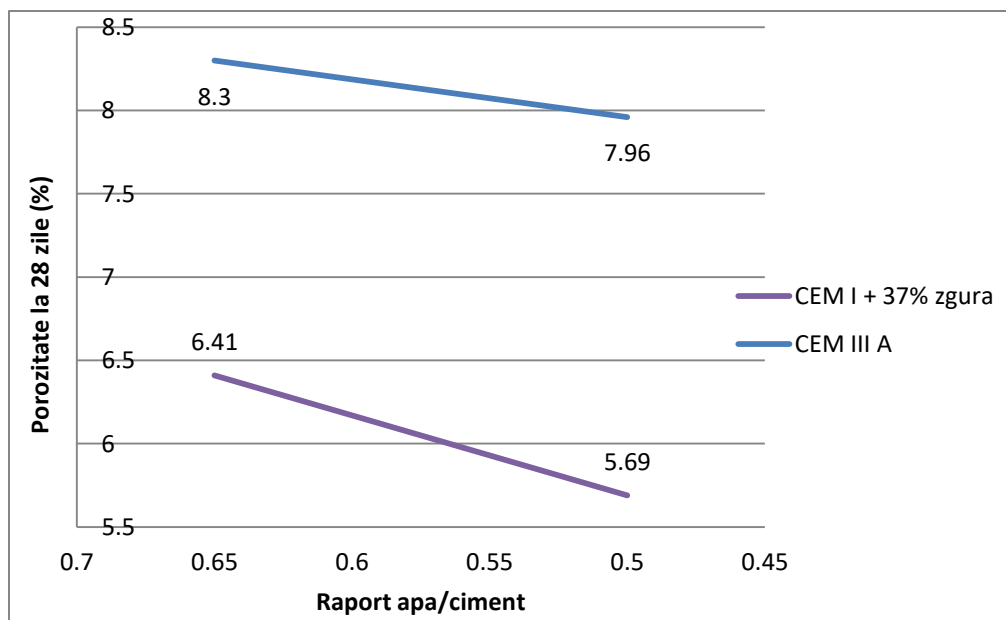


Figura V.75.- Variația porozității pentru betonul de clasa C16/20 și C20/25a preparat cu ciment CEM I 42.5 R + 37% zgură sau CEM III/A în funcție de raportul a/c

Din analiza rezultatelor experimentale, valorile obținute pentru porozitatea la 28 zile a betoanelor studiate conduc la următoarele aprecieri:

- cea mai redusă porozitate a fost înregistrată pentru betoanele din clasa C20/25a preparate cu CEM I + 37% zgură ( ~5.7 %) și foarte apropiată pentru betoanele cu CEM I + 10% zgură din aceeași clasa;
- porozitatea betoanelor preparate cu CEM I + 10% zgură în clasa C16/20 crește cu 27% față de betoanele preparate cu CEM I + 37% zgură în clasa C20/25a;
- porozitatea betoanelor preparate cu CEM II/A-S este mai mare cu 20% în clasa C16/20 și cu 10% în clasa C20/25a față de betoanele preparate cu CEM I + 37% zgură;
- porozitatea betoanelor preparate cu CEM III/A este mai mare cu 46% în clasa C16/20 și cu 40% în clasa C 20/25a față de betoanele preparate cu CEM I + 37% zgură din clasa C20/25a.

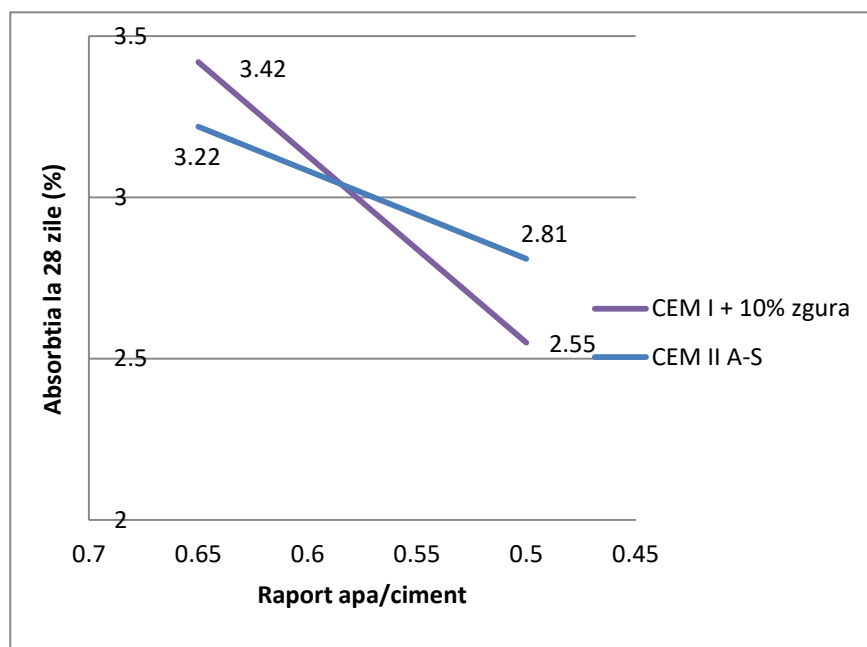


Figura V.76.- Variația absorbției pentru betonul de clasa C16/20 și C20/25a preparat cu ciment CEM I 42.5 R + 10% zgură sau CEM II/A-S în funcție de raportul a/c

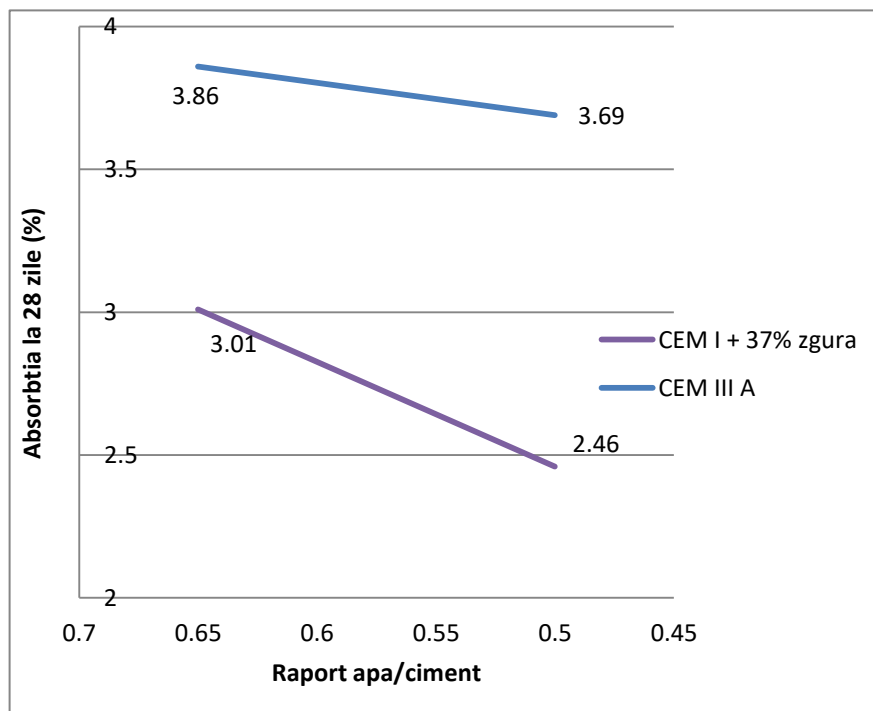


Figura V.77.- Variația absorbției pentru betonul de clasa C16/20 și C20/25a preparat cu ciment CEM I 42.5 R + 37% zgură sau CEM III/A în funcție de raportul a/c

Din analiza rezultatelor experimentale, valorile obținute pentru absorbția de apă a betoanelor studiate conduc la următoarele aprecieri:

- cea mai redusă absorbție de apă s-a obținut pentru betoanele din clasa C20/25a preparate cu CEM I+37% zgură (~2.5%); cea mai mare valoare a absorbției de apă s-a obținut pentru betoanele din clasa C20/25a preparate cu CEM III/A (~4 %);
- absorbția de apă a betoanelor preparate cu CEM I+10% zgură este mai mare cu 39% în clasa C16/20 și cu 4% în clasa C20/25a față de betoanele preparate cu CEM I+37% zgură din clasa C20/25a ;
- absorbția de apă a betoanelor preparate cu CEM II/A-S este mai mare cu 31% în clasa C16/20 și cu 14% în clasa C20/25a față de betoanele preparate cu CEM I+37% zgură;
- absorbția de apă a betoanelor preparate cu CEM III/A se mărește cu 57% în clasa C16/20 și cu 50% în clasa C20/25a comparativ cu betoanele preparate cu CEM I+37% zgură din clasa C20/25a.

Din punct de vedere al porozității și absorbției betoanelor testate, măsurate la masă constantă se poate afirma că valorile lor scad cu reducerea raportului a/c și cresc cu suplimentarea procentelor de adaosuri din cimenturile utilizate la prepararea betoanelor.

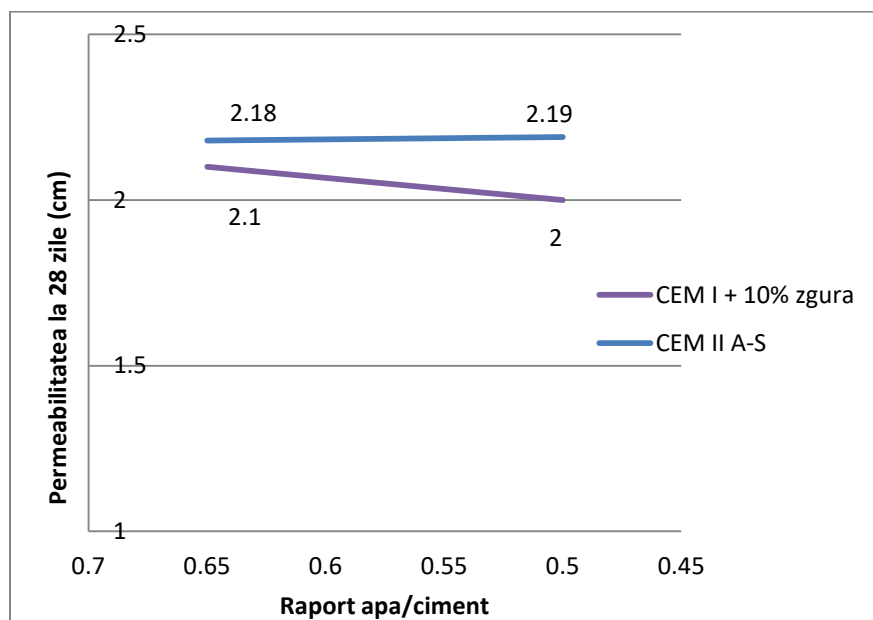


Figura V.78.- Variația permeabilității pentru betonul de clasa C16/20 și C20/25a preparat cu ciment CEM I 42.5 R + 10% zgură sau CEM II/A-S în funcție de raportul a/c

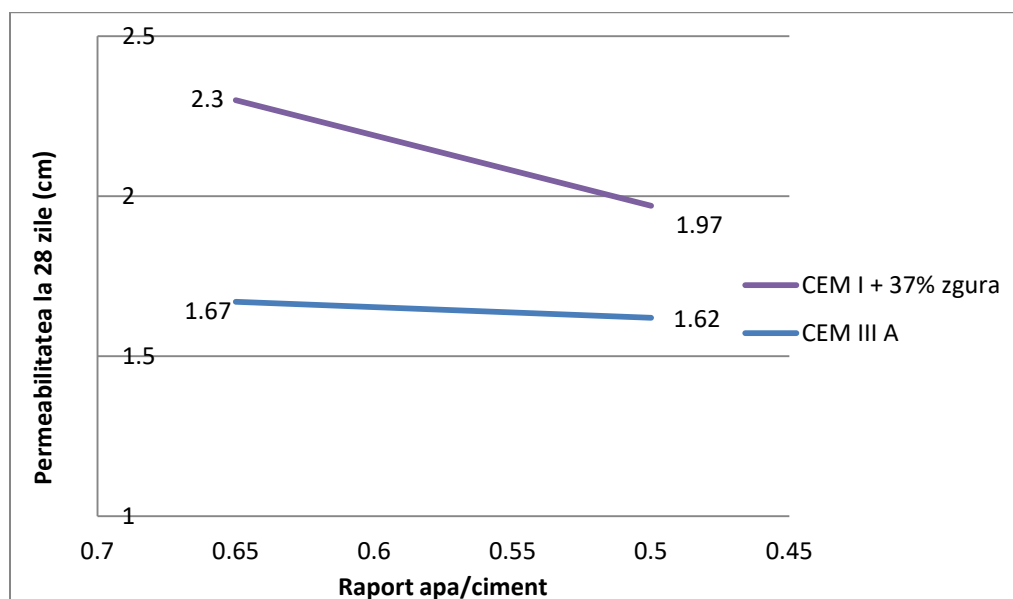


Figura V.79.- Variația permeabilității pentru betonul de clasa C16/20 și C20/25a preparat cu ciment CEM I 42.5R + 37% zgură sau CEM III/A în funcție de raportul a/c

- Valorile obținute pentru adâncimile de pătrundere a apei în betoanele preparate cu CEM II/A-S sunt sensibil mai mari decât cele obținute pentru betoanele cu CEM I + 10% zgură.
- Pentru betoanele de clasa C 20/25a cu ciment CEM I + 37% zgură și CEM III/A se observă o uniformizare a valorilor obținute pentru adâncimile de pătrundere a apei, între 1.6 și 2 cm. Din punct de vedere al permeabilității, betoanele preparate cu toate tipurile de ciment se comportă similar.

### Gradul de carbonatare a betonului

Probele utilizate pentru determinarea adâncimii de carbonatare au fost menținute 7 zile în apa și apoi în condiții standardizate de laborator (umiditate 65% și temperatura 20°C) până la data încercării. Evoluția carbonatării a fost urmărită pe probele păstrate în laborator și examinate la diferite termene, 90 și 180 de zile. Imediat după solicitarea la despicare, secțiunea betonului a fost umezită cu o soluție alcoolică de fenolftaleină de concentrație 1%. După aplicarea soluției de indicator, zona carbonată păstrează culoarea inițială a betonului, iar zona necarbonată capătă culoarea roșu-violet (fenolftaleina își modifică culoarea la un pH < 9.2). Pentru determinarea adâncimii de carbonatare în condiții accelerate, probele au fost expuse 72 de ore la o concentrație de CO<sub>2</sub> de 0.2 MPa, în conformitate cu SR 13379 [104]. Adâncimea stratului de carbonatare al betonului întărit s-a determinat conform SR CR 12793 [105].

În tabelele V.51-V.54. sunt prezentate rezultatele înregistrate pentru valorile adâncimilor de carbonatare în condiții de laborator, respectiv în condiții accelerate, pentru clasa de beton C16/20 și C20/25a.

Tabelul V.51. – Valorile obținute pentru adâncimea de carbonatare a betoanelor de clasa C16/20 menținute în condiții de laborator

| Tip ciment  | Dozaj ciment (kg/m <sup>3</sup> ) | Dozaj zgură (kg/m <sup>3</sup> ) | Condiții laborator 90 zile / 7 zile apă |            |                   |            | Condiții laborator 180 zile/7 zile apă |            |                   |            |
|-------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|------------|-------------------|------------|----------------------------------------|------------|-------------------|------------|
|             |                                   |                                  | val.indiv. medie                        | val. medie | val.indiv. maximă | val. medie | val.indiv. medie                       | val. medie | val.indiv. maximă | val. medie |
| I+10% zgură | 248                               | 24.8                             | 1.10                                    | 1.20       | 3.17              | 3.12       | 3.45                                   | 3.13       | 4.66              | 5.01       |
|             |                                   |                                  | 1.60                                    |            | 2.97              |            | 2.85                                   |            | 5.41              |            |
|             |                                   |                                  | 0.90                                    |            | 3.23              |            | 3.08                                   |            | 4.95              |            |

| Tip ciment  | Dozaj ciment (kg/m <sup>3</sup> ) | Dozaj zgură (kg/m <sup>3</sup> ) | Condiții laborator<br>90 zile / 7 zile apă |            |                   |            | Condiții laborator<br>180 zile/7 zile apă |            |                   |            |
|-------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------|------------|-------------------|------------|-------------------------------------------|------------|-------------------|------------|
|             |                                   |                                  | val.indiv. medie                           | val. medie | val.indiv. maximă | val. medie | val.indiv. medie                          | val. medie | val.indiv. maximă | val. medie |
| I+37% zgură | 219                               | 81                               | 1.90                                       | 1.43       | 4.69              | 3.98       | 3.45                                      | 3.39       | 6.91              | 6.48       |
|             |                                   |                                  | 1.18                                       |            | 3.73              |            | 3.54                                      |            | 6.43              |            |
|             |                                   |                                  | 1.21                                       |            | 3.51              |            | 3.18                                      |            | 6.10              |            |
| II/A-S      | 260                               | 0                                | 0.80                                       | 0.89       | 3.04              | 3.73       | 1.27                                      | 2.02       | 6.23              | 5.85       |
|             |                                   |                                  | 1.10                                       |            | 4.18              |            | 2.62                                      |            | 5.51              |            |
|             |                                   |                                  | 0.78                                       |            | 3.96              |            | 2.18                                      |            | 5.81              |            |
| III/A       | 260                               | 0                                | 5.10                                       | 5.36       | 6.99              | 8.15       | 5.95                                      | 6.13       | 10.69             | 9.73       |
|             |                                   |                                  | 5.64                                       |            | 7.88              |            | 6.10                                      |            | 9.55              |            |
|             |                                   |                                  | 5.35                                       |            | 9.58              |            | 6.35                                      |            | 8.94              |            |

Tabelul V.52. – Valorile obținute pentru adâncimea de carbonatare a betoanelor de clasa C16/20 menținute în condiții accelerate

| Tip ciment  | Dozaj ciment (kg/m <sup>3</sup> ) | Dozaj zgură (kg/m <sup>3</sup> ) | Condiții accelerate<br>28 zile/7 zile apă |            |                   |            |
|-------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|------------|-------------------|------------|
|             |                                   |                                  | val.indiv. medie                          | val. medie | val.indiv. maximă | val. medie |
| I+10% zgură | 248                               | 24.8                             | 3.22                                      | 3.19       | 5.90              | 5.35       |
|             |                                   |                                  | 3.23                                      |            | 5.22              |            |
|             |                                   |                                  | 3.11                                      |            | 4.92              |            |
| I+37% zgură | 219                               | 81                               | 3.00                                      | 3.63       | 5.87              | 5.55       |
|             |                                   |                                  | 4.67                                      |            | 6.67              |            |
|             |                                   |                                  | 3.21                                      |            | 4.11              |            |
| II/A-S      | 260                               | 0                                | 2.73                                      | 2.28       | 5.86              | 5.18       |
|             |                                   |                                  | 2.11                                      |            | 4.23              |            |
|             |                                   |                                  | 2.01                                      |            | 5.45              |            |
| III/A       | 260                               | 0                                | 20.48                                     | 19.13      | 35.02             | 31.68      |
|             |                                   |                                  | 19.34                                     |            | 30.56             |            |
|             |                                   |                                  | 17.56                                     |            | 29.45             |            |

Tabelul V.53. – Valorile obținute pentru adâncimea de carbonatare a betoanelor de clasa C20/25a menținute în condiții de laborator

| Tip ciment  | Dozaj ciment (kg/m <sup>3</sup> ) | Dozaj zgură (kg/m <sup>3</sup> ) | Condiții laborator<br>90 zile / 7 zile apă |            |                   |            | Condiții laborator<br>180 zile/7 zile apă |            |                   |            |
|-------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------|------------|-------------------|------------|-------------------------------------------|------------|-------------------|------------|
|             |                                   |                                  | val.indiv. medie                           | val. medie | val.indiv. maximă | val. medie | val.indiv. medie                          | val. medie | val.indiv. maximă | val. medie |
| I+10% zgură | 314                               | 31.41                            | 3.23                                       | 3.33       | 4.67              | 4.70       | 4.02                                      | 4.11       | 6.17              | 5.98       |
|             |                                   |                                  | 3.91                                       |            | 5.32              |            | 4.10                                      |            | 6.02              |            |
|             |                                   |                                  | 2.86                                       |            | 4.12              |            | 4.20                                      |            | 5.76              |            |
| I+37% zgură | 278                               | 103                              | 4.23                                       | 3.74       | 5.67              | 5.23       | 3.90                                      | 3.89       | 4.96              | 5.72       |
|             |                                   |                                  | 3.21                                       |            | 5.12              |            | 3.72                                      |            | 5.68              |            |
|             |                                   |                                  | 3.78                                       |            | 4.89              |            | 4.05                                      |            | 6.51              |            |
| II/A-S      | 330                               | 0                                | 0.80                                       | 0.70       | 2.80              | 2.95       | 1.95                                      | 1.80       | 5.90              | 6.09       |
|             |                                   |                                  | 0.73                                       |            | 3.10              |            | 1.81                                      |            | 6.27              |            |
|             |                                   |                                  | 0.56                                       |            | 2.95              |            | 1.63                                      |            | 6.10              |            |
| III/A       | 330                               | 0                                | 4.38                                       | 3.81       | 5.22              | 5.35       | 5.85                                      | 4.96       | 8.61              | 7.57       |
|             |                                   |                                  | 3.42                                       |            | 5.48              |            | 4.83                                      |            | 7.15              |            |
|             |                                   |                                  | 3.64                                       |            | 5.35              |            | 4.20                                      |            | 6.96              |            |

Tabelul V.54. – Valorile obținute pentru adâncimea de carbonatare a betoanelor de clasa C20/25a menținute în condiții accelerate

| Tip ciment  | Dozaj ciment (kg/m <sup>3</sup> ) | Dozaj zgură (kg/m <sup>3</sup> ) | Condiții accelerate<br>28 zile/7 zile apă |            |                   |            |
|-------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|------------|-------------------|------------|
|             |                                   |                                  | val.indiv. medie                          | val. medie | val.indiv. maximă | val. medie |
| I+10% zgură | 314                               | 31.41                            | 7.21                                      | 6.65       | 9.70              | 8.69       |
|             |                                   |                                  | 6.28                                      |            | 7.55              |            |
|             |                                   |                                  | 6.45                                      |            | 8.82              |            |
| I+37% zgură | 278                               | 103                              | 5.20                                      | 5.29       | 8.75              | 8.40       |
|             |                                   |                                  | 5.37                                      |            | 8.46              |            |
|             |                                   |                                  | 5.29                                      |            | 7.98              |            |
| II/A-S      | 330                               | 0                                | 1.43                                      | 2.10       | 9.50              | 8.98       |
|             |                                   |                                  | 2.91                                      |            | 8.11              |            |
|             |                                   |                                  | 1.97                                      |            | 9.34              |            |
| III/A       | 330                               | 0                                | 8.64                                      | 10.30      | 12.69             | 15.32      |
|             |                                   |                                  | 10.87                                     |            | 16.18             |            |
|             |                                   |                                  | 11.39                                     |            | 17.10             |            |

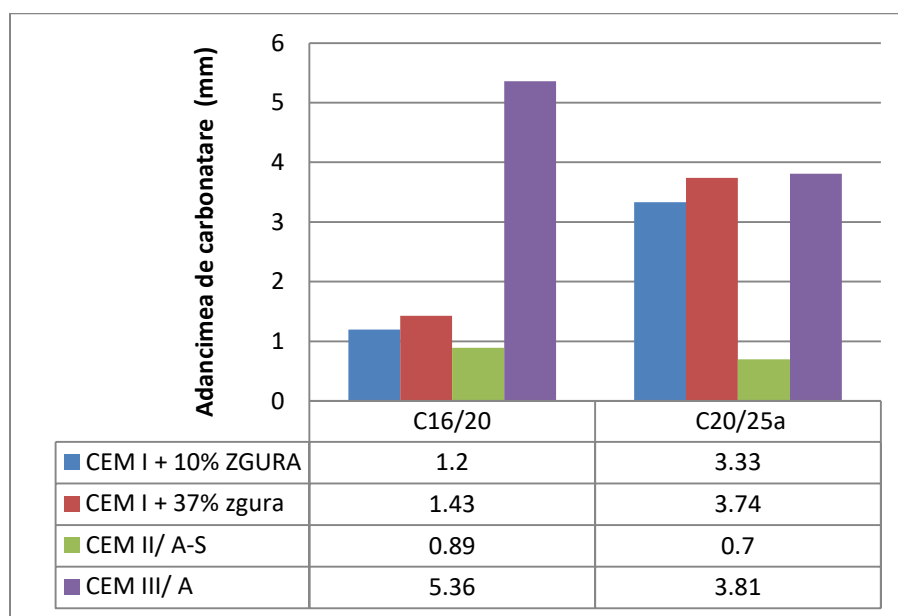


Figura V.80.- Adâncimea de carbonatare a betoanelor la vârsta de 90 de zile

La vârsta de 90 de zile, adâncimile de carbonatare obținute pentru betoanele studiate prezintă următoarele particularități:

- cea mai mare valoare se înregistrează pentru betoanele preparate cu CEM III/A indiferent de clasa betonului, valori care descresc cu creșterea dozajului de ciment, de la 260 la 330 kg/m<sup>3</sup> și cu creșterea clasei. Aceeași comportare și pentru betoanele cu ciment CEM II/A-S;
- valorile determinate pentru betoanele cu adaosuri de zgură de 10, respectiv 37% sunt destul de apropiate, dar mai mari pentru procente mai ridicate de zgură, comparativ cu betoanele preparate cu CEM II/A-S care au cele mai mici adâncimi de carbonatare de aproximativ 1 mm.

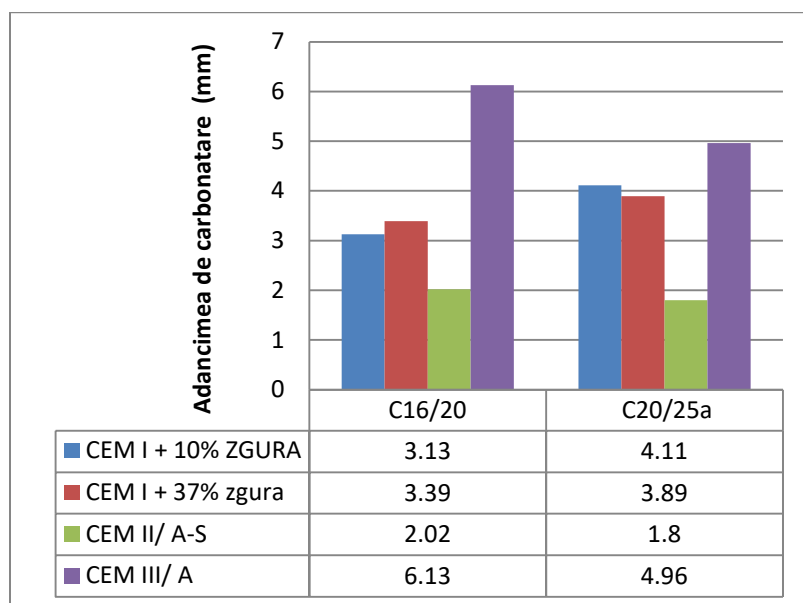


Figura V.81.- Adâncimea de carbonatare a betoanelor la vârsta de 180 de zile

Betoanele preparate cu cimenturi diferite, la 180 zile, au adâncimile de carbonatare cuprinse între 1.8 și 6.2 mm și odată cu creșterea dozajului de ciment, aceste valori se reduc pentru CEM II/A-S și CEM III/A. Din nou cele mai mari adâncimi de carbonatare sunt la betoanele cu ciment CEM III/A și s-au obținut valori sensibil egale la betoanele cu ciment CEM I + 10% zgură și CEM I + 37% zgură de clase C16/20 și C20/25a.

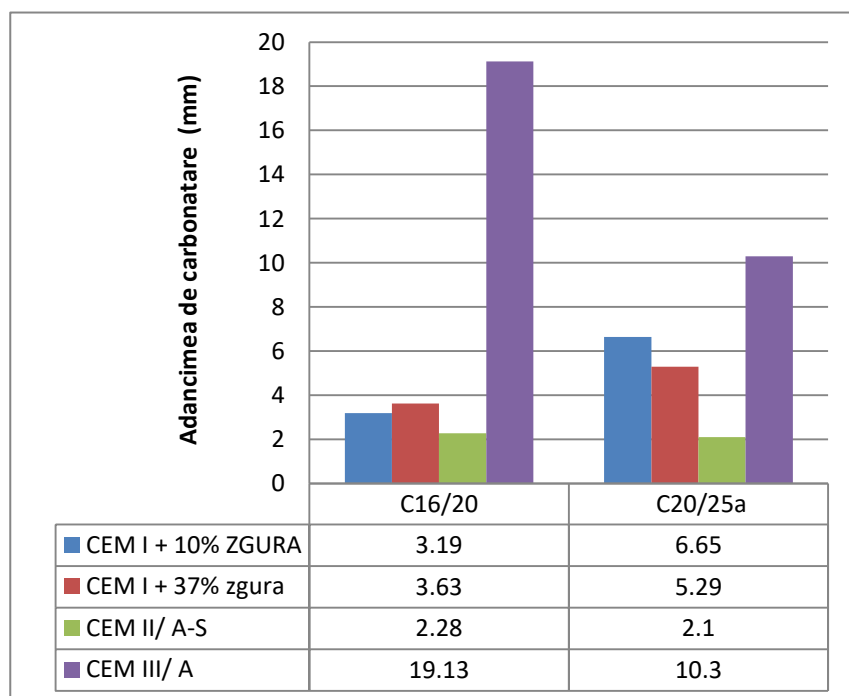


Figura V.82.- Adâncimea de carbonatare a betoanelor expuse la carbonatare accelerată

În condiții accelerate, cele mai mari valori sunt determinate tot pentru betoanele cu ciment CEM III/A, betoanele cu procente de 10 și 37% zgură având un comportament asemănător în clasele C16/20 și respectiv C20/25a.

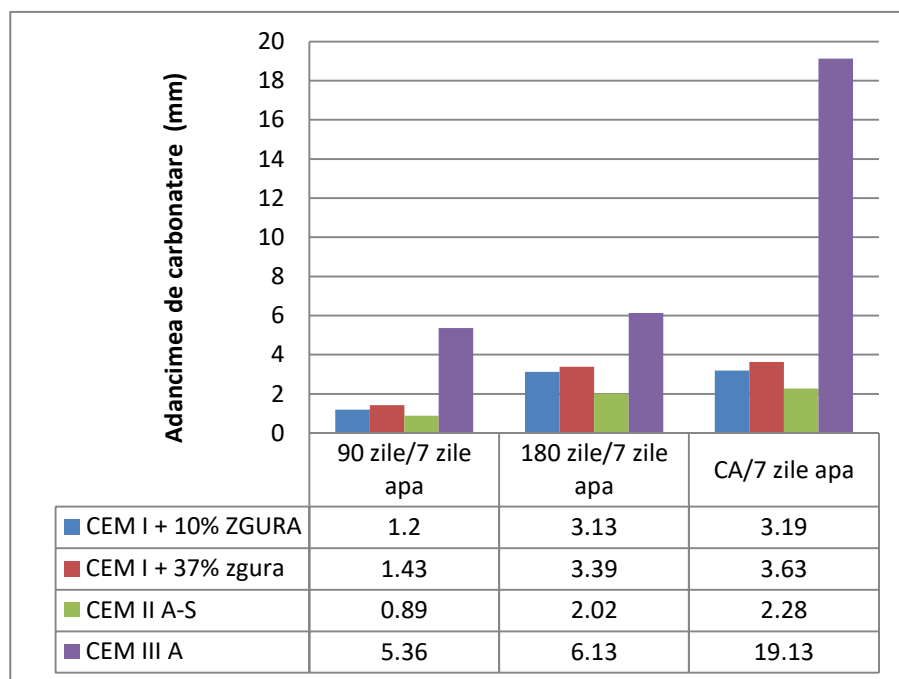


Figura V.83.- Variația în timp a adâncimii de carbonatare a betoanelor clasa C16/20 preparate cu toate tipurile de ciment

CA - carbonatare accelerată

Din figura V.83. se constată că trei din betoanele de clasa C16/20 se comportă aproape identic din punct de vedere al carbonatării, iar betoanele preparate cu CEM III/A au valori mai mari la 90 și 180 zile și de aproximativ 3.57 ori mai mari în condiții accelerate de expunere față de adâncimea de carbonatare de la 90 zile.

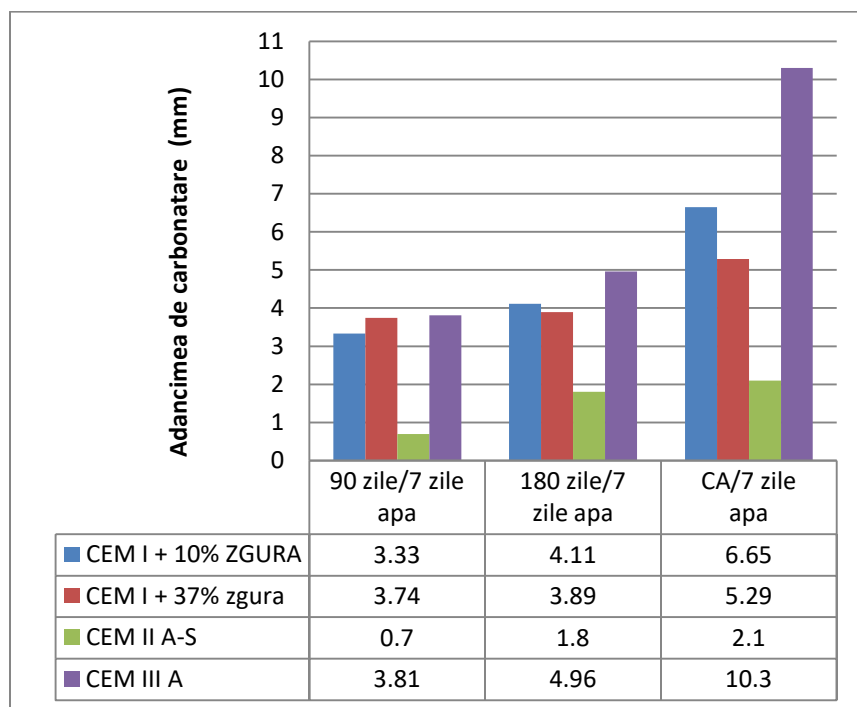


Figura V.84.- Variația în timp a adâncimii de carbonatare a betoanelor clasa C20/25a preparate cu toate tipurile de ciment

Betoanele de clasa C20/25a, preparate cu dozaje de ciment între 278-330 kg/m<sup>3</sup>, au valori comparabile ale adâncimilor de carbonatare, sub 4.2 mm, mai puțin betonul cu ciment CEM III/A la care adâncimile de carbonatare sunt duble în condiții accelerate față de cele de la 180 zile.

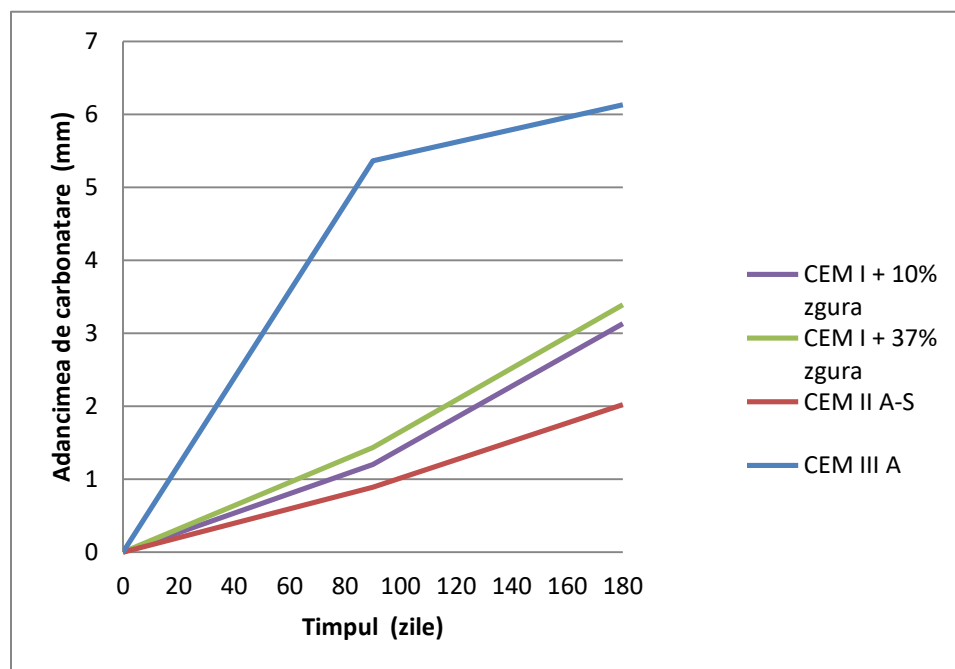


Figura V.85.- Variația în timp a adâncimii de carbonatare a betoanelor preparate cu toate tipurile de ciment cu raport  $a/c=0.65$

Pentru același raport  $a/c=0.65$  se observă o variație asemănătoare a carbonatării betoanelor cu ciment CEM I+10% zgură, CEM I+37% zgură și CEM II/A-S. Prin reducerea raportului  $a/c$  la 0.50 se constată o tendință ascendentă a carbonatării în timp, asemănătoare pentru betoanele cu ciment CEM I + 10% zgură, CEM I + 37% zgură și CEM III/A. Din reprezentarea evoluției adâncimilor de carbonatare în timp, obținute în cadrul cercetărilor efectuate, se observă că cea mai bună comportare o au betoanele cu cimenturi CEM II/A-S din ambele clase de rezistență, evoluția fiind mai lentă în timp decât în cazul betoanelor preparate cu celelalte tipuri de ciment.

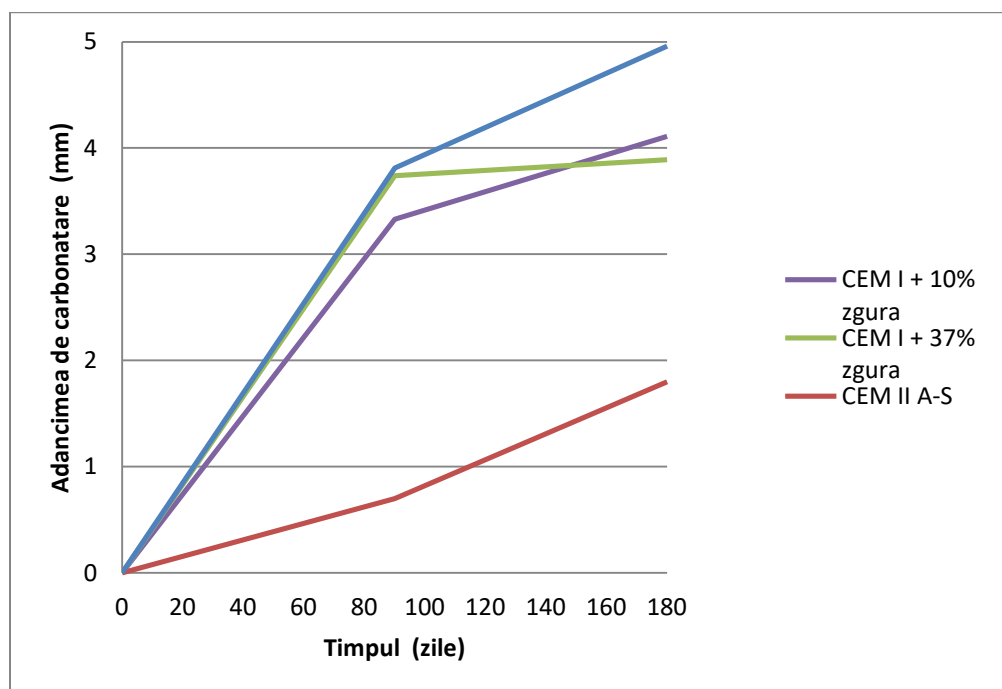


Figura V.86.- Variația în timp a adâncimii de carbonatare a betoanelor preparate cu toate tipurile de ciment cu raport  $a/c=0.50$

#### Concluzii:

- din rezultatele obținute în urma încercărilor efectuate se observă o dependență clară a adâncimilor de carbonatare de clasa betonului și de procente de adaosuri din ciment; betoanele cu raport  $a/c$  echivalent au adâncimi de carbonatare diferite;
- betoanele cu peste 30% adaos sau preparate cu cimenturi cu adaos în jur de 30 procente carbonatează mai mult decât cele cu procente mai mici. Cele mai mici adâncimi de carbonatare au fost înregistrate la betoanele cu cimenturi CEM II/A-S, în condiții de carbonatare naturală și accelerată;
- evoluția în timp cea mai lentă a adâncimilor de carbonatare se înregistrează tot pentru betoanele cu ciment CEM II/A-S și evoluția cea mai semnificativă a fost pentru betoanele cu ciment CEM III/A, evidențiată pentru raport  $a/c=0.65$  și raport  $a/c=0.50$ ;
- betoanele din clasa C16/20 preparate cu ciment CEM I + 10% zgură, CEM II/A-S, CEM I + 37% zgură și CEM III/A pot fi incluse în clasa de expunere XC1 deoarece au dozajul minim de ciment dat în NE 012-1 de  $260 \text{ kg/m}^3$  și raport  $a/c$  echivalent 0.65, dar conform standardului EN 206 nu îndeplinesc clasa minimă de rezistență C20/25 (conform tabelului V.55);
- betoanele din clasa C20/25a preparate cu ciment CEM I + 10% zgură, CEM II/A-S, CEM I + 37% zgură și CEM III/A pot fi considerate ca rezistente la carbonatare pe o durată de serviciu de 50 de ani pentru clasele de expunere XC1, XC2 și XC3 deoarece îndeplinesc valorile limită pentru compoziția și proprietățile betonului date în NE 012-1, dar conform standardului EN 206 au dozajul de ciment mai mare decât cel minim de  $280 \text{ kg/m}^3$  și raport  $a/c$  echivalent 0.50, dar pentru clasele de expunere XC2 și XC3 nu satisfac criteriile prevăzute pentru respectarea clasei minime a betonului (C25/30 în XC2 și C30/37 în XC3). De asemenea aceste betoane nu pot fi utilizate pentru clasa de expunere XC4 nici conform normativului NE 012-1 și nici standardului EN 206 (conform tabelului V.57).

## Metoda “europeană”

Analizând aspectele rezistenței de carbonatare legate de conceptul de performanță echivalentă a betonului din *normativul european CEN/TC104/SC1-N 703* [59] s-a făcut o comparație între betonul cu ciment CEM I + 10% zgură considerat ca beton candidat și betonul cu ciment CEM II/A-S fiind beton de referință. Aceeași comparație s-a analizat și între betonul cu ciment CEM I + 37% zgură considerat drept beton candidat și betonul cu ciment CEM III/A fiind beton de referință.

Valoarea măsurată a adâncimii de carbonatare a betonului candidat trebuie să fie mai mică sau egală cu valoarea betonului de referință  $\pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33\sigma_R)^2 - (2.33\sigma_r)^2 \left(\frac{n-1}{n}\right))}$

luându-se în considerare valorile medii la 90 și 180 de zile pentru  $n \geq 3$ .

unde:  $\sigma_r$  s-a considerat abaterea medie standard pentru betonul candidat;

$\sigma_R$  – s-a considerat abaterea medie standard pentru betonul de referință.

Relatia de calcul și semnificația notațiilor sunt prezentate la punctul IV.3.

**Pentru betoane de clasa C16/20 cu raport echivalent a/c = 0.65.**

- în condiții de laborator:

**beton cu ciment CEM I+10% zgură și betonul cu ciment CEM II/A-S**

$$\sigma_r = \sqrt{((0.1)^2 + (0.4)^2 + (0.3)^2)/2} = 0.36$$

$$\sigma_R = \sqrt{((0.09)^2 + (0.21)^2 + (0.11)^2)/2} = 0.179$$

$$m_r = 1.20$$

$$m_R = 0.89$$

$$1.20 \leq 0.89 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 0.179)^2 - (2.33 \times 0.36)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))} \quad (\text{criteriu neîndeplinit})$$

**beton cu ciment CEM I + 37% zgură și betonul cu ciment CEM III/A**

$$\sigma_r = \sqrt{((0.47)^2 + (0.25)^2 + (0.22)^2)/2} = 0.407$$

$$\sigma_R = \sqrt{((0.26)^2 + (0.28)^2 + (0.01)^2)/2} = 0.27$$

$$m_r = 1.43$$

$$m_R = 5.36$$

$$1.43 \leq 5.36 - \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 0.27)^2 - (2.33 \times 0.407)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))} \quad (\text{criteriu neîndeplinit})$$

- în condiții de carbonatare accelerată:

**beton cu ciment CEM I + 10% zgură și betonul cu ciment CEM II/A-S**

$$\sigma_r = \sqrt{((0.03)^2 + (0.04)^2 + (0.08)^2)/2} = 0.067$$

$$\sigma_R = \sqrt{((0.45)^2 + (0.17)^2 + (0.27)^2)/2} = 0.39$$

$$m_r = 3.19$$

$$m_R = 2.28$$

$$3.19 \leq 2.28 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 0.39)^2 - (2.33 \times 0.067)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))}$$
$$3.19 \leq 2.28 + 0.636 = 2.92 \quad (\text{criteriu neîndeplinit})$$

**beton cu ciment CEM I + 37% zgură și betonul cu ciment CEM III/A**

$$\sigma_r = \sqrt{((0.63)^2 + (1.04)^2 + (0.42)^2)/2} = 0.909$$

$$\sigma_R = \sqrt{((1.35)^2 + (0.21)^2 + (1.57)^2)/2} = 1.472$$

$$m_r = 3.63$$

$$m_R = 19.13$$

$$3.63 \leq 19.13 - \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 1.472)^2 - (2.33 \times 0.909)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))}$$

$$3.63 \leq 19.13 - 2.093 = 17.04$$

(criteriu îndeplinit)

**Pentru betoane de clasa C20/25a cu raport echivalent a/c = 0.50**

- în condiții de laborator:

**beton cu ciment CEM I + 10% zgură și betonul cu ciment CEM II/A-S**

$$\sigma_r = \sqrt{((0.1)^2 + (0.58)^2 + (0.47)^2)/2} = 0.532$$

$$\sigma_R = \sqrt{((0.1)^2 + (0.03)^2 + (0.14)^2)/2} = 0.101$$

$$m_r = 3.33$$

$$m_R = 0.70$$

$$3.33 \leq 0.70 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 0.101)^2 - (2.33 \times 0.532)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))}$$

(criteriu neîndeplinit)

**beton cu ciment CEM I + 37% zgură și betonul cu ciment CEM III/A**

$$\sigma_r = \sqrt{((0.49)^2 + (0.53)^2 + (0.04)^2)/2} = 0.511$$

$$\sigma_R = \sqrt{((0.57)^2 + (0.39)^2 + (0.17)^2)/2} = 0.503$$

$$m_r = 3.74$$

$$m_R = 3.81$$

$$3.74 \leq 3.81 - \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 0.503)^2 - (2.33 \times 0.511)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))}$$

$$3.74 \leq 3.81 + 0.462 = 4.27$$

(criteriu îndeplinit)

- în condiții de carbonatare accelerată:

**beton cu ciment CEM I + 10% zgură și betonul cu ciment CEM II/A-S**

$$\sigma_r = \sqrt{((0.56)^2 + (0.37)^2 + (0.2)^2)/2} = 0.495$$

$$\sigma_R = \sqrt{((0.67)^2 + (0.81)^2 + (0.13)^2)/2} = 0.749$$

$$m_r = 6.65$$

$$m_R = 2.10$$

$$6.65 \leq 2.10 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 0.749)^2 - (2.33 \times 0.495)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))}$$

$$6.65 \leq 2.10 + 1.039 = 3.14$$

(criteriu neîndeplinit)

**beton cu ciment CEM I + 37% zgură și betonul cu ciment CEM III/A**

$$\sigma_r = \sqrt{((0.09)^2 + (0.08)^2 + (0)^2)/2} = 0.085$$

$$\sigma_R = \sqrt{((1.66)^2 + (0.57)^2 + (1.09)^2)/2} = 1.46$$

$$m_r = 5.29$$

$$m_R = 10.30$$

$$5.29 \leq 10.30 - \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 1.46)^2 - (2.33 \times 0.085)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))}$$

$$5.29 \leq 10.30 - 2.404 = 7.89$$

(criteriu îndeplinit)

### Metoda olandeză

Analizând aspectele rezistenței de carbonatare legate de conceptul de performanță echivalentă a betonului din *normativul olandez VC12 WG4* [61] s-a făcut o comparație între betonul cu ciment CEM I + 10% zgură considerat ca beton candidat și betonul cu ciment CEM II/A-S fiind beton de referință. Aceeași comparație s-a analizat și între betonul cu ciment CEM I +

37% zgură considerat drept beton candidat și betonul cu ciment CEM III/A fiind beton de referință.

Pentru fiecare aspect al durabilității, evaluarea se bazează pe parametrul de evaluare  $T_j$ :

$$T_j = \frac{\left[ m_r - \frac{m_t}{1+0.01d_j} \right]}{s/\sqrt{n}}$$

$$\text{și } s = \sqrt{\left\{ s_r^2 + \frac{s_t^2}{(1+0.01d_j)^2} \right\}}$$

Relatiile de calcul și semnificația notațiilor sunt prezentate la punctul IV.4.

Pentru validare trebuie ca  $T_j > 1.533$  când  $n = 3$  și  $d_j = 30$ .

**Pentru betoane de clasa C16/20 cu raport echivalent a/c = 0.65.**

- în condiții de laborator:

**beton cu ciment CEM I+10% zgură și betonul cu ciment CEM II/A-S**

$$s_t = \sqrt{((0.1)^2 + (0.4)^2 + (0.3)^2)/2} = 0.36$$

$$s_r = \sqrt{((0.09)^2 + (0.21)^2 + (0.11)^2)/2} = 0.179$$

$$d_j = 30$$

$$s = \sqrt{s_r^2 + \frac{s_t^2}{(1+0.01d_j)^2}} = \sqrt{0.179^2 + \frac{0.36^2}{(1+0.01 \times 30)^2}} = 0.33$$

$$m_r = 0.89$$

$$m_t = 1.20$$

$$T_j = \frac{\left[ m_r - \frac{m_t}{1+0.01xd_j} \right]}{s/\sqrt{n}} = \frac{\left[ 0.89 - \frac{1.20}{1+0.01 \times 30} \right]}{0.33/\sqrt{3}} < 0 \quad (\text{criteriu neîndeplinit})$$

**beton cu ciment CEM I+37% zgură și betonul cu ciment CEM III/A**

$$s_t = \sqrt{((0.47)^2 + (0.25)^2 + (0.22)^2)/2} = 0.407$$

$$s_r = \sqrt{((0.26)^2 + (0.28)^2 + (0.01)^2)/2} = 0.27$$

$$d_j = 30$$

$$s = \sqrt{s_r^2 + \frac{s_t^2}{(1+0.01d_j)^2}} = \sqrt{0.27^2 + \frac{0.407^2}{(1+0.01 \times 30)^2}} = 0.414$$

$$m_r = 5.36$$

$$m_t = 1.43$$

$$T_j = \frac{\left[ m_r - \frac{m_t}{1+0.01xd_j} \right]}{s/\sqrt{n}} = \frac{\left[ 5.36 - \frac{1.43}{1+0.01 \times 30} \right]}{0.414/\sqrt{3}} = 17.83 > 1.533 \quad (\text{criteriu îndeplinit})$$

- în condiții de carbonatare accelerată:

**beton cu ciment CEM I+10% zgură și betonul cu ciment CEM II/A-S**

$$s_t = \sqrt{((0.03)^2 + (0.04)^2 + (0.08)^2)/2} = 0.067$$

$$s_r = \sqrt{((0.45)^2 + (0.17)^2 + (0.27)^2)/2} = 0.39$$

$$d_j = 30$$

$$s = \sqrt{s_r^2 + \frac{s_t^2}{(1+0.01d_j)^2}} = \sqrt{0.39^2 + \frac{0.067^2}{(1+0.01 \times 30)^2}} = 0.393$$

$$m_r = 2.28$$

$$m_t = 3.19$$

$$T_j = \frac{\left[ m_r - \frac{m_t}{1+0.01xd_j} \right]}{s/\sqrt{n}} = \frac{\left[ 2.28 - \frac{3.19}{1+0.01 \times 30} \right]}{0.393/\sqrt{3}} < 0 \quad (\text{criteriu neîndeplinit})$$

**beton cu ciment CEM I+37% zgură și betonul cu ciment CEM III/A**

$$s_t = \sqrt{((0.63)^2 + (1.04)^2 + (0.42)^2)/2} = 0.909$$

$$s_r = \sqrt{((1.35)^2 + (0.21)^2 + (1.57)^2)/2} = 1.472$$

$$d_j = 30$$

$$s = \sqrt{sr^2 + \frac{st^2}{(1+0.01d_j)^2}} = \sqrt{0.472^2 + \frac{0.909^2}{(1+0.01 \times 30)^2}} = 1.629$$

$$m_r = 19.13$$

$$m_t = 3.63$$

$$T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xd_j}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[19.13 - \frac{3.63}{1+0.01 \times 30}]}{1.629/\sqrt{3}} = 17.36 > 1.533 \quad (\text{criteriu îndeplinit})$$

**Pentru betoane de clasa C20/25a cu raport echivalent a/c = 0.50**

- în condiții de laborator:

**beton cu ciment CEM I+10% zgură și betonul cu ciment CEM II/A-S**

$$s_t = \sqrt{((0.1)^2 + (0.58)^2 + (0.47)^2)/2} = 0.532$$

$$s_r = \sqrt{((0.1)^2 + (0.03)^2 + (0.14)^2)/2} = 0.101$$

$$d_j = 30$$

$$s = \sqrt{sr^2 + \frac{st^2}{(1+0.01d_j)^2}} = \sqrt{0.101^2 + \frac{0.532^2}{(1+0.01 \times 30)^2}} = 0.422$$

$$m_r = 0.70$$

$$m_t = 3.33$$

$$T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xd_j}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[0.70 - \frac{3.33}{1+0.01 \times 30}]}{0.422/\sqrt{3}} < 0 \quad (\text{criteriu neîndeplinit})$$

**beton cu ciment CEM I+37% zgură și betonul cu ciment CEM III/A**

$$s_t = \sqrt{((0.49 + (0.53)^2 + (0.04)^2)/2} = 0.511$$

$$s_r = \sqrt{((0.57)^2 + (0.39)^2 + (0.17)^2)/2} = 0.503$$

$$d_j = 30$$

$$s = \sqrt{sr^2 + \frac{st^2}{(1+0.01d_j)^2}} = \sqrt{0.503^2 + \frac{0.511^2}{(1+0.01 \times 30)^2}} = 0.638$$

$$m_r = 3.81$$

$$m_t = 3.74$$

$$T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xd_j}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[3.81 - \frac{3.74}{1+0.01 \times 30}]}{0.638/\sqrt{3}} = 2.53 > 1.533 \quad (\text{criteriu îndeplinit})$$

- în condiții de carbonatare accelerată:

**beton cu ciment CEM I+10% zgură și betonul cu ciment CEM II/A-S**

$$s_t = \sqrt{((0.56)^2 + (0.37)^2 + (0.2)^2)/2} = 0.495$$

$$s_r = \sqrt{((0.67)^2 + (0.81)^2 + (0.13)^2)/2} = 0.749$$

$$d_j = 30$$

$$s = \sqrt{sr^2 + \frac{st^2}{(1+0.01d_j)^2}} = \sqrt{0.749^2 + \frac{0.495^2}{(1+0.01 \times 30)^2}} = 0.84$$

$$m_r = 2.10$$

$$m_t = 6.65$$

$$T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[2.10 - \frac{6.65}{1+0.01x30}]}{0.84/\sqrt{3}} < 0 \quad (\text{criteriu neîndeplinit})$$

**beton cu ciment CEM I + 37% zgură și betonul cu ciment CEM III/A**

$$s_t = \sqrt{((0.09)^2 + (0.08)^2 + (0)^2)/2} = 0.085$$

$$s_r = \sqrt{((1.66)^2 + (0.57)^2 + (1.09)^2)/2} = 1.461$$

$$d_j = 30$$

$$s = \sqrt{sr^2 + \frac{st^2}{(1+0.01dj)^2}} = \sqrt{1.461^2 + \frac{0.085^2}{(1+0.01x30)^2}} = 1.462$$

$$m_r = 10.30$$

$$m_t = 5.29$$

$$T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[10.30 - \frac{5.29}{1+0.01x30}]}{1.462/\sqrt{3}} = 7.38 > 1.533 \quad (\text{criteriu îndeplinit})$$

### Metoda belgiană

Analizând aspectele rezistenței de carbonatare legate de conceptul de performanță echivalentă a betonului din *reglementarea națională belgiană NBN B 15-100* [64] s-a făcut o comparație între betonul cu ciment CEM I + 10% zgură considerat ca beton candidat și betonul cu ciment CEM II/A-S fiind beton de referință și între betonul cu ciment CEM I + 37% zgură considerat drept beton candidat și betonul cu ciment CEM III/A fiind beton de referință.

Adâncimea medie de carbonatare a betonului candidat (sau cea determinată în testul de carbonatare accelerată la 28 zile) trebuie să fie mai mică sau maxim egală cu 1.20 ori adâncimea medie de carbonatare a betonului de referință, incluzând și precizia de măsurare, conform punctului IV.5.:

$$d_c, \text{ candidat} \leq 1.20 \times d_c, \text{ referință}$$

**Pentru betoane de clasa C16/20 cu raport echivalent a/c = 0.65.**

- în condiții de laborator:

**beton cu ciment CEM I+10% zgură și betonul cu ciment CEM II/A-S**

$$m_r = 1.20$$

$$m_R = 0.89$$

$$1.20 \leq 1.20 \times 0.89 = 1.068 \quad (\text{criteriu neîndeplinit})$$

**beton cu ciment CEM I+37% zgură și betonul cu ciment CEM III/A**

$$m_r = 1.43$$

$$m_R = 5.36$$

$$1.43 \leq 1.20 \times 5.36 = 6.432 \quad (\text{criteriu îndeplinit})$$

- în condiții de carbonatare accelerată:

**beton cu ciment CEM I+10% zgură și betonul cu ciment CEM II/A-S**

$$m_r = 3.19$$

$$m_R = 2.28$$

$$3.19 \leq 1.20 \times 2.28 = 2.736 \quad (\text{criteriu neîndeplinit})$$

**beton cu ciment CEM I+37% zgură și betonul cu ciment CEM III/A**

$$m_r = 3.63$$

$$m_R = 19.13$$

$$3.63 \leq 1.20 \times 19.13 = 22.956 \quad (\text{criteriu îndeplinit})$$

**Pentru betoane de clasa C20/25a cu raport echivalent a/c = 0.50**

- în condiții de laborator:

**beton cu ciment CEM I+10% zgură și betonul cu ciment CEM II/A-S**

$$m_f = 3.33$$

$$m_R = 0.70$$

$$3.33 \leq 1.20 \times 0.70 = 0.84$$

(criteriu neîndeplinit)

**beton cu ciment CEM I+37% zgură și betonul cu ciment CEM III/A**

$$m_f = 3.74$$

$$m_R = 3.81$$

$$3.74 \leq 1.20 \times 3.81 = 4.57$$

(criteriu îndeplinit)

- în condiții de carbonatare accelerată:

**beton cu ciment CEM I+10% zgură și betonul cu ciment CEM II/A-S**

$$m_f = 6.65$$

$$m_R = 2.10$$

$$6.65 \leq 1.20 \times 2.10 = 2.52$$

(criteriu neîndeplinit)

**beton cu ciment CEM I+37% zgură și betonul cu ciment CEM III/A**

$$m_f = 5.29$$

$$m_R = 10.30$$

$$5.29 \leq 1.20 \times 10.30 = 12.36$$

(criteriu îndeplinit)

**Sinteza rezultatelor obtinute**

Tabelul V.55. - Criterii prescriptive pentru betoane de clasa C16/20 preparate cu CEM I 42.5R + 10% zgură sau CEM I 42.5R + 37% zgură

| Clasa de expunere / Normativ | XC1                                                                                             | XC2                                                                                                | XC3                                                                                                   | XC4                                                                                                   |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Standard<br>EN 206-1 [17]    | Criteriu                                                                                        | Criteriu                                                                                           | Criteriu                                                                                              | Criteriu                                                                                              |
|                              | a/c maxim<br>0,65<br>clasa rezist minimă<br>C20/25<br>dozaj cim. minim<br>260 kg/m <sup>3</sup> | a/c maxim<br>0,60<br>clasa rezist<br>minimă<br>C25/30<br>dozaj cim. minim<br>280 kg/m <sup>3</sup> | a/c maxim<br>0,55<br>clasa rezist<br>minimă<br>C30/37<br>dozaj cim.<br>minim<br>280 kg/m <sup>3</sup> | a/c maxim<br>0,50<br>clasa rezist<br>minimă<br>C30/37<br>dozaj cim.<br>minim<br>300 kg/m <sup>3</sup> |
|                              | 0                                                                                               | 0                                                                                                  | 0                                                                                                     | 0                                                                                                     |
| Normativ<br>NE 012-1 [3]     | Criteriu                                                                                        | Criteriu                                                                                           | Criteriu                                                                                              | Criteriu                                                                                              |
|                              | a/c maxim<br>0,65<br>clasa rezist minimă<br>C16/20<br>dozaj cim. minim<br>260 kg/m <sup>3</sup> | a/c maxim<br>0,60<br>clasa rezist<br>minimă<br>C16/20<br>dozaj cim. minim<br>260 kg/m <sup>3</sup> | a/c maxim<br>0,60<br>clasa rezist<br>minimă<br>C20/25<br>dozaj cim.<br>minim<br>280 kg/m <sup>3</sup> | a/c maxim<br>0,50<br>clasa rezist<br>minimă<br>C25/30<br>dozaj cim.<br>minim<br>300 kg/m <sup>3</sup> |
|                              | X                                                                                               | 0                                                                                                  | 0                                                                                                     | 0                                                                                                     |

Legendă: X = criteriu îndeplinit

0 = criteriu neîndeplinit

În aprecierea conformitatii cu standardul EN 206 [17] s-a considerat și cerința legată de clasa minimă de rezistență chiar dacă în standard se precizează că nu este obligatorie specificarea acesteia.

În normativul NE 012-1 [3], cimentul CEM II/A-S și CEM III/A sunt recomandate pentru utilizare în clasele de expunere la carbonatare XC1, XC2 și XC3.

În tabelele V.56. și V.58.-V.60 se prezintă rezultatele obținute prin aplicarea celor trei metode de performanță.

Tabelul V.56. - Analiza performanțelor la carbonatare, pentru betonul de clasa C16/20 preparat cu CEM I+10% zgură luând ca referință betonul preparat cu CEM II/A-S

| Normativ                                      | Carbonatarea betonului                                                                                                                                                         |                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Document european<br>CEN/TC104/SC1-N 703 [59] | Valoarea beton candidat $\leq$ valoarea beton de referință<br>$\pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33\sigma_R)^2 - (2.33\sigma_r)^2 \left(\frac{n-1}{n}\right))}$ unde $n \geq 3$ |                                                                                                                                   |
|                                               | condiții de laborator 90 zile                                                                                                                                                  | $m_r = 1.20$ (beton candidat); $m_R = 0.89$ (beton de referință); $\sigma_r = 0.36$ ; $\sigma_R = 0.18$                           |
|                                               | criteriu                                                                                                                                                                       | 0<br>$1.20 \leq 0.89 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 0.18)^2 - (2.33 \times 0.36)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))}$        |
|                                               | condiții de laborator 180 zile                                                                                                                                                 | $m_r = 3.13$ (beton candidat); $m_R = 2.02$ (beton de referință); $\sigma_r = 0.30$ ; $\sigma_R = 0.69$                           |
|                                               | criteriu                                                                                                                                                                       | 0<br>$3.13 \leq 2.02 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 0.69)^2 - (2.33 \times 0.30)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))} = 3.08$ |
|                                               | condiții accelerate                                                                                                                                                            | $m_r = 3.19$ (beton candidat); $m_R = 2.28$ (beton de referință); $\sigma_r = 0.07$ ; $\sigma_R = 0.39$                           |
|                                               | criteriu                                                                                                                                                                       | 0<br>$3.19 \leq 2.28 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 0.39)^2 - (2.33 \times 0.07)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))} = 2.92$ |
| Normativ olandez VC12 WG4 [61]                | $T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}}$ , unde $s = \sqrt{sr^2 + \frac{st^2}{(1+0.01dj)^2}}$                                                                    |                                                                                                                                   |
|                                               | condiții de laborator 90 zile                                                                                                                                                  | $m_r = 1.20$ (beton candidat); $m_R = 0.89$ (beton de referință); $s_t = 0.36$ ; $s_r = 0.18$ ; $s=0.33$ ; $T_j < 0$              |
|                                               | criteriu                                                                                                                                                                       | 0<br>$T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[0.89 - \frac{1.20}{1+0.01 \times 30}]}{0.33/\sqrt{3}} < 0$    |
|                                               | condiții de laborator 180 zile                                                                                                                                                 | $m_r = 3.13$ (beton candidat); $m_R = 2.02$ (beton de referință); $s_t = 0.30$ ; $s_r = 0.69$ ; $s=0.73$ ; $T_j < 0$              |
|                                               | criteriu                                                                                                                                                                       | 0<br>$T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[2.02 - \frac{3.13}{1+0.01 \times 30}]}{0.73/\sqrt{3}} < 0$    |
|                                               | condiții accelerate                                                                                                                                                            | $m_r = 3.19$ (beton candidat); $m_R = 2.28$ (beton de referință); $s_t = 0.07$ ; $s_r = 0.39$ ; $s=0.39$ ; $T_j < 0$              |
|                                               | criteriu                                                                                                                                                                       | 0<br>$T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[2.28 - \frac{3.19}{1+0.01 \times 30}]}{0.39/\sqrt{3}} < 0$    |
| Normativ belgian                              | d c, candidat $\leq 1.20 \times d$ c, referința                                                                                                                                |                                                                                                                                   |

| Normativ             | Carbonatarea betonului            |                                                                  |
|----------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| NBN B 15-100<br>[64] | condiții de laborator<br>90 zile  | $m_r = 1.20$ (beton candidat); $m_R = 0.89$ (beton de referință) |
|                      | criteriu                          | 0<br>$1.20 \leq 1.20 \times 0.89 = 1.07$                         |
|                      | condiții de laborator<br>180 zile | $m_r = 3.13$ (beton candidat); $m_R = 2.02$ (beton de referință) |
|                      | criteriu                          | 0<br>$3.13 \leq 1.20 \times 2.02 = 2.42$                         |
|                      | condiții accelerate               | $m_r = 3.19$ (beton candidat); $m_R = 2.28$ (beton de referință) |
|                      | criteriu                          | 0<br>$3.19 \leq 1.20 \times 2.28 = 2.74$                         |

Tabelul V.57. - Criterii prescriptive pentru betoane de clasa C20/25a preparate cu CEM I 42.5R + 10% zgură sau CEM I 42.5R + 37% zgură

| Clasa de expunere / Normativ | XC1                                                                                    | XC2                                                                                    | XC3                                                                                    | XC4                                                                                    |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Standard<br>EN 206-1 [17]    | Criteriu                                                                               | Criteriu                                                                               | Criteriu                                                                               | Criteriu                                                                               |
|                              | a/c maxim 0,65<br>clasa rezist minimă C20/25<br>dozaj cim. minim 260 kg/m <sup>3</sup> | a/c maxim 0,60<br>clasa rezist minimă C25/30<br>dozaj cim. minim 280 kg/m <sup>3</sup> | a/c maxim 0,55<br>clasa rezist minimă C30/37<br>dozaj cim. minim 280 kg/m <sup>3</sup> | a/c maxim 0,50<br>clasa rezist minimă C30/37<br>dozaj cim. minim 300 kg/m <sup>3</sup> |
|                              | X                                                                                      | 0                                                                                      | 0                                                                                      | 0                                                                                      |
| Normativ<br>NE 012-1 [3]     | Criteriu                                                                               | Criteriu                                                                               | Criteriu                                                                               | Criteriu                                                                               |
|                              | a/c maxim 0,65<br>clasa rezist minimă C16/20<br>dozaj cim. minim 260 kg/m <sup>3</sup> | a/c maxim 0,60<br>clasa rezist minimă C16/20<br>dozaj cim. minim 260 kg/m <sup>3</sup> | a/c maxim 0,60<br>clasa rezist minimă C20/25<br>dozaj cim. minim 280 kg/m <sup>3</sup> | a/c maxim 0,50<br>clasa rezist minimă C25/30<br>dozaj cim. minim 300 kg/m <sup>3</sup> |
|                              | X                                                                                      | X                                                                                      | X                                                                                      | 0                                                                                      |

Tabelul V.58. - Analiza performanțelor la carbonatare, pentru betonul de clasa C20/25a preparat cu CEM I+10% zgură luând ca referință betonul preparat cu CEM II/A-S

| Normativ                                      | Carbonatarea betonului                                                                                                                                                         |                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Document european<br>CEN/TC104/SC1-N 703 [59] | Valoarea beton candidat $\leq$ valoarea beton de referință<br>$\pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33\sigma_R)^2 - (2.33\sigma_r)^2 \left(\frac{n-1}{n}\right))}$ unde $n \geq 3$ |                                                                                                                                   |
|                                               | condiții de laborator<br>90 zile                                                                                                                                               | $m_r = 3.33$ (beton candidat); $m_R = 0.70$ (beton de referință); $\sigma_r = 0.53$ ; $\sigma_R = 0.10$                           |
|                                               | criteriu                                                                                                                                                                       | 0<br>$3.33 \leq 0.70 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 0.10)^2 - (2.33 \times 0.53)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))}$        |
|                                               | condiții de laborator<br>180 zile                                                                                                                                              | $m_r = 4.11$ (beton candidat); $m_R = 1.80$ (beton de referință); $\sigma_r = 0.09$ ; $\sigma_R = 0.16$                           |
|                                               | criteriu                                                                                                                                                                       | 0<br>$4.11 \leq 1.80 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 0.16)^2 - (2.33 \times 0.09)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))} = 2.03$ |
|                                               | condiții accelerate                                                                                                                                                            | $m_r = 6.65$ (beton candidat); $m_R = 2.10$ (beton de referință); $\sigma_r = 0.49$ ; $\sigma_R = 0.75$                           |
|                                               | criteriu                                                                                                                                                                       | 0<br>$6.65 \leq 2.10 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 0.75)^2 - (2.33 \times 0.49)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))} = 3.14$ |
| Normativ olandez VC12<br>WG4 [61]             | $T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}}$ , unde $s = \sqrt{sr^2 + \frac{st^2}{(1+0.01dj)^2}}$                                                                    |                                                                                                                                   |
|                                               | condiții de laborator<br>90 zile                                                                                                                                               | $m_r = 3.33$ (beton candidat); $m_R = 0.70$ (beton de referință); $s_t = 0.53$ ; $s_r = 0.10$ ; $s = 0.42$ ; $T_j < 0$            |
|                                               | criteriu                                                                                                                                                                       | 0<br>$T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[0.70 - \frac{3.33}{1+0.01 \times 30}]}{0.42/\sqrt{3}} < 0$    |
|                                               | condiții de laborator<br>180 zile                                                                                                                                              | $m_r = 4.11$ (beton candidat); $m_R = 1.80$ (beton de referință);<br>$s_t = 0.09$ ; $s_r = 0.16$ ; $s = 0.17$ ; $T_j < 0$         |
|                                               | criteriu                                                                                                                                                                       | 0<br>$T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[1.80 - \frac{4.11}{1+0.01 \times 30}]}{0.17/\sqrt{3}} < 0$    |
|                                               | condiții accelerate                                                                                                                                                            | $m_r = 6.65$ (beton candidat); $m_R = 2.10$ (beton de referință);<br>$s_t = 0.49$ ; $s_r = 0.75$ ; $s = 0.84$ ; $T_j < 0$         |
|                                               | criteriu                                                                                                                                                                       | 0<br>$T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[2.10 - \frac{6.65}{1+0.01 \times 30}]}{0.84/\sqrt{3}} < 0$    |
| Normativ belgian<br>NBN B 15-100 [64]         | $d_{c, \text{candidat}} \leq 1.20 \times d_{c, \text{referința}}$                                                                                                              |                                                                                                                                   |
|                                               | condiții de laborator                                                                                                                                                          | $m_r = 3.33$ (beton candidat); $m_R = 0.70$ (beton de referință)                                                                  |

| Normativ | Carbonatarea betonului         |                                                                  |
|----------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------|
|          | 90 zile                        |                                                                  |
|          | criteriu                       | 0<br>$3.33 \leq 1.20 \times 0.70 = 0.84$                         |
|          | condiții de laborator 180 zile | $m_r = 4.11$ (beton candidat); $m_R = 1.80$ (beton de referință) |
|          | criteriu                       | 0<br>$4.11 \leq 1.20 \times 1.80 = 2.16$                         |
|          | condiții accelerate            | $m_r = 6.65$ (beton candidat); $m_R = 2.10$ (beton de referință) |
|          | criteriu                       | 0<br>$6.65 \leq 1.20 \times 2.10 = 2.52$                         |

Tabelul V.59. - Analiza performanțelor la carbonatare, pentru betonul de clasa C16/20 preparat cu CEM I 42.5R + 37% zgură luând ca referință betonul preparat cu CEM III/A

| Normativ                                      | Carbonatarea betonului                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Document european<br>CEN/TC104/SC1-N 703 [59] | Valoarea beton candidat $\leq$ valoarea beton de referință<br>$\pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33\sigma_R)^2 - (2.33\sigma_r)^2 \left(\frac{n-1}{n}\right))}$ unde $n \geq 3$ |                                                                                                                                                                      |
|                                               | condiții de laborator 90 zile                                                                                                                                                  | $m_r = 1.43$ (beton candidat); $m_R = 5.36$ (beton de referință); $\sigma_r = 0.41$ ; $\sigma_R = 0.27$                                                              |
|                                               | criteriu                                                                                                                                                                       | 0<br>$1.43 \leq 5.36 - \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 0.27)^2 - (2.33 \times 0.41)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))}$                                           |
|                                               | condiții de laborator 180 zile                                                                                                                                                 | $m_r = 3.39$ (beton candidat); $m_R = 6.13$ (beton de referință); $\sigma_r = 0.19$ ; $\sigma_R = 0.20$                                                              |
|                                               | criteriu                                                                                                                                                                       | X<br>$3.39 \leq 6.13 - \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 0.20)^2 - (2.33 \times 0.19)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))} = 5.91$                                    |
|                                               | condiții accelerate                                                                                                                                                            | $m_r = 3.63$ (beton candidat); $m_R = 19.13$ (beton de referință); $\sigma_r = 0.91$ ; $\sigma_R = 1.47$                                                             |
|                                               | criteriu                                                                                                                                                                       | X<br>$3.63 \leq 19.13 - \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 1.47)^2 - (2.33 \times 0.91)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))} = 17.04$                                  |
| Normativ olandez VC12 WG4 [61]                | $T_j = \frac{\left[ mr - \frac{mt}{1+0.01xdj} \right]}{s/\sqrt{n}}$ , unde $s = \sqrt{sr^2 + \frac{st^2}{(1+0.01dj)^2}}$                                                       |                                                                                                                                                                      |
|                                               | condiții de laborator 90 zile                                                                                                                                                  | $m_r = 1.43$ (beton candidat); $m_R = 5.36$ (beton de referință); $s_t = 0.41$ ; $s_r = 0.27$ ; $s = 0.41$ ;                                                         |
|                                               | criteriu                                                                                                                                                                       | X<br>$T_j = \frac{\left[ mr - \frac{mt}{1+0.01xdj} \right]}{s/\sqrt{n}} = \frac{\left[ 5.36 - \frac{1.43}{1+0.01 \times 30} \right]}{0.41/\sqrt{3}} = 17.83 > 1.533$ |
|                                               | condiții de laborator 180 zile                                                                                                                                                 | $m_r = 3.39$ (beton candidat); $m_R = 6.13$ (beton de referință); $s_t = 0.19$ ; $s_r = 0.20$ ; $s = 0.25$ ;                                                         |

| Normativ                                 | Carbonatarea betonului                                            |                                                                                                                                                           |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                          | criteriu                                                          | $T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{X}{0.25/\sqrt{3}} = \frac{[6.13 - \frac{3.39}{1+0.01x30}]}{0.25/\sqrt{3}} = 24.58 > 1.533$  |
|                                          | condiții accelerate                                               | $m_r = 3.63$ (beton candidat); $m_R = 19.13$ (beton de referință);<br>$s_t = 0.91$ ; $s_r = 1.47$ ; $s = 1.63$ ;                                          |
|                                          | criteriu                                                          | $T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{X}{1.63/\sqrt{3}} = \frac{[19.13 - \frac{3.63}{1+0.01x30}]}{1.63/\sqrt{3}} = 17.36 > 1.533$ |
| Normativ belgian<br>NBN B 15-100<br>[64] | $d_{c, \text{candidat}} \leq 1.20 \times d_{c, \text{referința}}$ |                                                                                                                                                           |
|                                          | condiții de laborator 90 zile                                     | $m_r = 1.43$ (beton candidat); $m_R = 5.36$ (beton de referință)                                                                                          |
|                                          | criteriu                                                          | $X$ $1.43 \leq 1.20 \times 5.36 = 6.43$                                                                                                                   |
|                                          | condiții de laborator 180 zile                                    | $m_r = 3.39$ (beton candidat); $m_R = 6.13$ (beton de referință)                                                                                          |
|                                          | criteriu                                                          | $X$ $3.39 \leq 1.20 \times 6.13 = 7.36$                                                                                                                   |
|                                          | condiții accelerate                                               | $m_r = 3.63$ (beton candidat); $m_R = 19.13$ (beton de referință)                                                                                         |
|                                          | criteriu                                                          | $X$ $3.63 \leq 1.20 \times 19.13 = 22.96$                                                                                                                 |

Tabelul V.60. - Analiza performanțelor la carbonatare, pentru betonul de clasa C20/25a preparat cu CEM I 42.5R + 37% zgură luând ca referință betonul preparat cu CEM III/A

| Normativ                                          | Carbonatarea betonului                                                                                                                                                         |                                                                                                                                  |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Document european<br>CEN/TC104/SC1-<br>N 703 [59] | Valoarea beton candidat $\leq$ valoarea beton de referință<br>$\pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33\sigma_R)^2 - (2.33\sigma_r)^2 \left(\frac{n-1}{n}\right))}$ unde $n \geq 3$ |                                                                                                                                  |
|                                                   | condiții de laborator 90 zile                                                                                                                                                  | $m_r = 3.74$ (beton candidat); $m_R = 3.81$ (beton de referință); $\sigma_r = 0.51$ ; $\sigma_R = 0.50$                          |
|                                                   | criteriu                                                                                                                                                                       | $X$ $3.74 \leq 3.81 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 0.50)^2 - (2.33 \times 0.51)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))} = 4.27$ |
|                                                   | condiții de laborator 180 zile                                                                                                                                                 | $m_r = 3.89$ (beton candidat); $m_R = 4.96$ (beton de referință); $\sigma_r = 0.17$ ; $\sigma_R = 0.83$                          |
|                                                   | criteriu                                                                                                                                                                       | $X$ $3.89 \leq 4.96 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 0.20)^2 - (2.33 \times 0.19)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))} = 6.31$ |
|                                                   | condiții accelerate                                                                                                                                                            | $m_r = 5.29$ (beton candidat); $m_R = 10.3$ (beton de referință); $\sigma_r = 0.08$ ; $\sigma_R = 1.46$                          |

| Normativ                           | Carbonatarea betonului         |                                                                                                                                           |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                    | criteriu                       | $X$ $5.29 \leq 10.30 - \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 1.46)^2 - (2.33 \times 0.08)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))} = 7.89$         |
| Normativ olandez VC12 WG4 [61]     |                                | $T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xd_j}]}{s/\sqrt{n}}, \text{ unde } s = \sqrt{sr^2 + \frac{st^2}{(1+0.01dj)^2}}$                        |
|                                    | condiții de laborator 90 zile  | $m_r = 3.74$ (beton candidat); $m_R = 3.81$ (beton de referință); $s_t = 0.51$ ; $s_r = 0.50$ ; $s = 0.64$ ;                              |
|                                    | criteriu                       | $X$ $T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xd_j}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[3.81 - \frac{3.74}{1+0.01 \times 30}]}{0.64/\sqrt{3}} = 2.53 > 1.533$ |
|                                    | condiții de laborator 180 zile | $m_r = 3.89$ (beton candidat); $m_R = 4.96$ (beton de referință); $s_t = 0.16$ ; $s_r = 0.83$ ; $s = 0.84$ ;                              |
|                                    | criteriu                       | $X$ $T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xd_j}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[4.96 - \frac{3.89}{1+0.01 \times 30}]}{0.84/\sqrt{3}} = 4.05 > 1.533$ |
|                                    | condiții accelerate            | $m_r = 5.29$ (beton candidat); $m_R = 10.3$ (beton de referință); $s_t = 0.08$ ; $s_r = 1.46$ ; $s = 1.46$ ;                              |
|                                    | criteriu                       | $X$ $T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xd_j}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[10.3 - \frac{5.29}{1+0.01 \times 30}]}{1.46/\sqrt{3}} = 7.38 > 1.533$ |
| Normativ belgian NBN B 15-100 [64] |                                | $d_{c, \text{candidat}} \leq 1.20 \times d_{c, \text{referință}}$                                                                         |
|                                    | condiții de laborator 90 zile  | $m_r = 3.74$ (beton candidat); $m_R = 3.81$ (beton de referință)                                                                          |
|                                    | criteriu                       | $X$ $3.74 \leq 1.20 \times 3.81 = 4.57$                                                                                                   |
|                                    | condiții de laborator 180 zile | $m_r = 3.89$ (beton candidat); $m_R = 4.96$ (beton de referință)                                                                          |
|                                    | criteriu                       | $X$ $3.89 \leq 1.20 \times 4.96 = 5.95$                                                                                                   |
|                                    | condiții accelerate            | $m_r = 5.29$ (beton candidat); $m_R = 10.3$ (beton de referință)                                                                          |
|                                    | criteriu                       | $X$ $5.29 \leq 1.20 \times 10.3 = 12.36$                                                                                                  |

Comparând rezultatele experimentale cu ajutorul metodelor prescriptive și al metodelor de performanță pentru betoanele candidat se constată că criteriile aplicate au condus la rezultate diferite. Betoanele candidat din clasa C16/20 preparate cu CEM I 42.5R + 10% zgură au îndeplinit doar criteriul prescriptiv privind carbonatarea pentru clasa XC1.

Betoanele candidat din clasa C16/20 preparate CEM I 42.5R + 37% zgură au îndeplinit doar criteriul prescriptiv privind utilizarea în clasa de expunere XC1, dar pot fi validate în conformitate cu metodele de performanță aplicate, cu respectarea criteriului pentru carbonatarea

în condiții de laborator la 180 zile și carbonatarea accelerată din standardul european și olandez și toate cele trei criterii din normativul belgian.

Betoanele candidat din clasa C20/25a preparate CEM I 42.5R + 10% zgură au îndeplinit numai criteriul prescriptiv privind utilizarea în clasa de expunere XC1 în conformitate cu EN 206 [17] și utilizarea în clasele de expunere XC1, XC2, XC3 în conformitate cu normativul NE 012-1 [3], dar nu au îndeplinit nici un criteriu de performanță.

Betoanele candidat din clasa C20/25a preparate CEM I 42.5R + 37% zgură au îndeplinit numai criteriul prescriptiv privind utilizarea în clasa de expunere XC1 în conformitate cu EN 206 [17] și utilizarea în clasele de expunere XC1, XC2, XC3 în conformitate cu normativul NE 012-1 [3], dar pot fi validate în conformitate cu metodele de performanță aplicate.

### Rezistența la îngheț-dezghet repetat

Comportarea betonului la îngheț-dezghet repetat a fost studiată prin metoda nedistructivă "cube test" în conformitate cu CEN/TS 12390-9 [45]. S-a determinat cantitatea de material exfoliat după un anumit număr de cicluri de îngheț-dezghet, cu sau fără agenți de dezghețare, pe cuburi cu latura de 100 mm realizate cu aditiv superplastifiant și antrenor de aer, pentru cele patru compoziții de beton.

După  $(24 \pm 2)$  ore cuburile sunt decofrate și introduse în apă având o temperatură de  $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ . Probele de beton au fost scoase din apă la vârsta de 7 zile și introduse într-o cameră climatică unde sunt depozitate 20 de zile la temperatura  $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ . În ziua 27, cu o zi înainte de începerea experimentului se determină masa celor patru cuburi cu o precizie de 1g. Apoi se introduc cuburile în containerele cu apă. Lichidul din container trebuie să acopere cubul cu  $25 \pm 5$  mm.

După 24 de ore se determină masa fiecărui cub, cu o precizie de 1 g și se calculează cantitatea de apă absorbită în 24 de ore. La vârsta de 28 de zile se introduc containerele în camera frigorifică, imersate într-o soluție de 3% NaCl. Containerele se rotesc la  $180^{\circ}$  în fiecare săptămână. Se controlează temperatura betonului din centrul cubului. Temperatura nu trebuie să coboare sub  $-25^{\circ}\text{C}$ .

Se prezintă pentru fiecare clasă de beton cantitatea de beton exfoliat după 7, 14, 28, 56 și respectiv 100 cicluri, cu/fără agenți de dezghețare.

### Betoanele de clasa C20/25a cu raport a/c echivalent = 0.50 preparate cu ciment CEM III/A-S, CEM I + 10% zgură, CEM III/A și CEM I + 37% zgură.

Tabelul V.61. – Valorile obținute pentru absorbția betoanelor de clasa C20/25a, cuburi cu latura de 100 mm

| Tip ciment  | Dozaj ciment, $\text{kg/m}^3$ | Dozaj zgură, $\text{kg/m}^3$ | Masa înainte de introd în apă, g | Masa după introd în apă 24h, g | Absorbție apă, g | Medie | Absorbția de apă, % | Absorbția de apă medie, % |
|-------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------|-------|---------------------|---------------------------|
| III/A-S     | 330                           | 0                            | 2187                             | 2215                           | 28               | 27.00 | 1.28                | 1.23                      |
|             |                               |                              | 2192                             | 2219                           | 27               |       | 1.23                |                           |
|             |                               |                              | 2183                             | 2209                           | 26               |       | 1.19                |                           |
| I+10% zgură | 314                           | 31.4                         | 2235                             | 2261                           | 26               | 23.00 | 1.16                | 1.03                      |
|             |                               |                              | 2241                             | 2263                           | 22               |       | 0.98                |                           |
|             |                               |                              | 2237                             | 2258                           | 21               |       | 0.94                |                           |
| I+37% zgură | 278                           | 103                          | 2209                             | 2256                           | 47               | 42.67 | 2.13                | 1.95                      |
|             |                               |                              | 2189                             | 2232                           | 43               |       | 1.96                |                           |
|             |                               |                              | 2175                             | 2213                           | 38               |       | 1.75                |                           |
| III/A       | 330                           | 0                            | 2192                             | 2240                           | 48               | 47.33 | 2.19                | 2.18                      |
|             |                               |                              | 2175                             | 2221                           | 46               |       | 2.11                |                           |
|             |                               |                              | 2150                             | 2198                           | 48               |       | 2.23                |                           |

Tabelul V.62. – Cantitatea de beton exfoliat după 56 cicluri de îngheț-dezgheț, fără agenți de dezghețare, cuburi cu latura de 100 mm

| Nr. cicluri    | 7 cicluri                         | 14 cicluri                        | 28 cicluri                        | 56 cicluri                        | Total<br>cantitate<br>beton<br>exfoliat<br>după 56<br>cicluri,g | Reducerea masei<br>probei de beton<br>după 56 cicluri |                   |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------|
| Tip<br>ciment  | cantitate<br>beton<br>exfoliat, g | cantitate<br>beton<br>exfoliat, g | cantitate<br>beton<br>exfoliat, g | cantitate<br>beton<br>exfoliat, g |                                                                 | P, %                                                  | P,<br>medie,<br>% |
| II/A-S         | 0.10                              | 0.16                              | 0.26                              | 2.32                              | 2.84                                                            | 0.13                                                  | <b>0.15</b>       |
|                | 0.13                              | 0.16                              | 0.27                              | 3.36                              | 3.92                                                            | 0.18                                                  |                   |
|                | 0.12                              | 0.14                              | 0.22                              | 3.26                              | 3.74                                                            | 0.17                                                  |                   |
| sediment       | 0.21                              | 0.33                              | 0.57                              | 6.78                              | 7.89                                                            | 0.12                                                  |                   |
| <b>total</b>   | <b>0.56</b>                       | <b>0.79</b>                       | <b>1.32</b>                       | <b>15.72</b>                      | <b>18.39</b>                                                    | <b>0.60</b>                                           |                   |
| I+10%<br>zgură | 0.16                              | 0.14                              | 0.20                              | 2.44                              | 2.94                                                            | 0.13                                                  | <b>0.21</b>       |
|                | 0.17                              | 0.16                              | 0.23                              | 5.47                              | 6.03                                                            | 0.27                                                  |                   |
|                | 0.12                              | 0.18                              | 0.22                              | 4.32                              | 4.84                                                            | 0.22                                                  |                   |
| sediment       | 0.30                              | 0.30                              | 0.39                              | 14.40                             | 15.39                                                           | 0.23                                                  |                   |
| <b>total</b>   | <b>0.75</b>                       | <b>0.78</b>                       | <b>1.04</b>                       | <b>26.63</b>                      | <b>29.20</b>                                                    | <b>0.85</b>                                           |                   |
| I+37%<br>zgură | 0.10                              | 1.16                              | 21.32                             | 23.18                             | 45.76                                                           | 2.07                                                  | <b>3.54</b>       |
|                | 0.13                              | 2.19                              | 49.11                             | 50.38                             | 101.81                                                          | 4.65                                                  |                   |
|                | 0.14                              | 1.18                              | 41.44                             | 22.24                             | 65.00                                                           | 2.99                                                  |                   |
| sediment       | 0.27                              | 6.33                              | 125.40                            | 159.45                            | 291.45                                                          | 4.43                                                  |                   |
| <b>total</b>   | <b>0.64</b>                       | <b>10.86</b>                      | <b>237.27</b>                     | <b>255.25</b>                     | <b>504.02</b>                                                   | <b>14.15</b>                                          |                   |
| III/A          | 0.02                              | 0.19                              | 39.58                             | 16.90                             | 56.69                                                           | 2.59                                                  | <b>3.24</b>       |
|                | 0.05                              | 0.15                              | 29.21                             | 66.02                             | 95.43                                                           | 4.39                                                  |                   |
|                | 0.04                              | 0.08                              | 19.60                             | 9.94                              | 29.66                                                           | 1.38                                                  |                   |
| sediment       | 0.15                              | 0.32                              | 42.24                             | 257.88                            | 300.59                                                          | 4.61                                                  |                   |
| <b>total</b>   | <b>0.26</b>                       | <b>0.74</b>                       | <b>130.63</b>                     | <b>350.74</b>                     | <b>482.37</b>                                                   | <b>12.97</b>                                          |                   |

Tabelul V.63. – Cantitatea de beton exfoliat după 100 cicluri de îngheț-dezgheț, fără agenți de dezghețare, cuburi cu latura de 100 mm

| Nr. cicluri    | 100 cicluri                    | Total cantitate<br>beton exfoliat<br>după 100 cicluri,<br>g | Reducerea masei probei de beton |                |
|----------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------|
| Tip ciment     | cantitate beton<br>exfoliat, g |                                                             | P, %                            | P, medie,<br>% |
| II/A-S         | 3.44                           | 6.28                                                        | 0.29                            | <b>0.39</b>    |
|                | 6.41                           | 10.33                                                       | 0.47                            |                |
|                | 7.36                           | 11.10                                                       | 0.51                            |                |
| sediment       | 12.20                          | 20.09                                                       | 0.31                            |                |
| <b>total</b>   | <b>29.41</b>                   | <b>47.80</b>                                                | <b>1.57</b>                     |                |
| I+10%<br>zgură | 5.04                           | 7.98                                                        | 0.36                            | <b>0.49</b>    |
|                | 7.79                           | 13.82                                                       | 0.62                            |                |
|                | 6.40                           | 11.24                                                       | 0.50                            |                |
| sediment       | 17.07                          | 32.46                                                       | 0.48                            |                |
| <b>total</b>   | <b>36.30</b>                   | <b>65.50</b>                                                | <b>1.96</b>                     |                |
| I+37%<br>zgură | 4.30                           | 50.06                                                       | 2.27                            | <b>3.82</b>    |
|                | 7.75                           | 109.56                                                      | 5.01                            |                |
|                | 7.32                           | 72.32                                                       | 3.33                            |                |
| sediment       | 17.55                          | 309.00                                                      | 4.70                            |                |
| <b>total</b>   | <b>36.92</b>                   | <b>540.94</b>                                               | <b>15.30</b>                    |                |

| Nr. cicluri  | 100 cicluri                 | Total cantitate beton exfoliat după 100 cicluri, g | Reducerea masei probei de beton |             |
|--------------|-----------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------|-------------|
| Tip ciment   | cantitate beton exfoliat, g |                                                    | P, %                            | P, medie, % |
| III/A        | 1.08                        | 57.77                                              | 2.64                            | 3.28        |
|              | 1.13                        | 96.56                                              | 4.44                            |             |
|              | 0.72                        | 30.38                                              | 1.41                            |             |
| sediment     | 2.25                        | 302.84                                             | 4.65                            |             |
| <b>total</b> | <b>5.18</b>                 | <b>487.55</b>                                      | <b>13.13</b>                    |             |

**Betoanele de clasa C20/25a cu raport a/c echivalent = 0.50 preparate cu ciment CEM II/A-S, CEM I + 10% zgură și CEM I + 37% zgură.**

Tabelul V.64. – Valorile obținute pentru absorbția betoanelor de clasa C20/25a, cuburi cu latura de 100 mm

| Tip ciment  | Dozaj ciment, kg/m <sup>3</sup> | Dozaj zgură, kg/m <sup>3</sup> | Masa înainte de introd în apă, g | Masa după introd în apă 24h, g | Absorbție apă, g | Medie | Absorbția de apă, % | Absorbția de apă medie, % |
|-------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------|-------|---------------------|---------------------------|
| II/A-S      | 330                             | 0                              | 2196                             | 2221                           | 25               | 24.33 | 1.14                | 1.11                      |
|             |                                 |                                | 2189                             | 2213                           | 24               |       | 1.10                |                           |
|             |                                 |                                | 2170                             | 2194                           | 24               |       | 1.11                |                           |
| I+10% zgură | 314                             | 31.41                          | 2207                             | 2233                           | 26               | 25.33 | 1.18                | 1.15                      |
|             |                                 |                                | 2202                             | 2227                           | 25               |       | 1.14                |                           |
|             |                                 |                                | 2199                             | 2224                           | 25               |       | 1.14                |                           |
| I+37% zgură | 278                             | 103                            | 2195                             | 2249                           | 54               | 48.67 | 2.46                | 2.21                      |
|             |                                 |                                | 2199                             | 2247                           | 48               |       | 2.18                |                           |
|             |                                 |                                | 2200                             | 2244                           | 44               |       | 2.00                |                           |
| III/A       | 330                             | 0                              | 2156                             | 2202                           | 46               | 45.67 | 2.13                | 2.12                      |
|             |                                 |                                | 2162                             | 2207                           | 45               |       | 2.08                |                           |
|             |                                 |                                | 2152                             | 2198                           | 46               |       | 2.14                |                           |

Tabelul V.65.– Cantitatea de beton exfoliat după 56 cicluri de îngheț-dezgheț cu agenți de dezghețare

| Nr. cicluri  | 7 cicluri                   | 14 cicluri                  | 28 cicluri                  | 56 cicluri                  | Total cantitate beton exfoliat după 56 cicluri, g | Reducerea masei probei de beton după 56 cicluri |             |
|--------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------|
| Tip CEM      | cantitate beton exfoliat, g | cantitate beton exfoliat, g | cantitate beton exfoliat, g | cantitate beton exfoliat, g |                                                   | P, %                                            | P, medie, % |
| II/A-S       | 0.12                        | 0.22                        | 0.42                        | 1.34                        | 2.10                                              | 0.10                                            | 0.12        |
|              | 0.14                        | 0.18                        | 0.74                        | 2.36                        | 3.42                                              | 0.16                                            |             |
|              | 0.10                        | 0.19                        | 0.80                        | 1.23                        | 2.32                                              | 0.11                                            |             |
| sediment     | 0.27                        | 0.24                        | 1.47                        | 6.84                        | 8.82                                              | 0.13                                            |             |
| <b>total</b> | <b>0.63</b>                 | <b>0.83</b>                 | <b>3.43</b>                 | <b>11.77</b>                | <b>16.66</b>                                      | <b>0.49</b>                                     |             |
| I+10% zgură  | 0.18                        | 0.22                        | 0.38                        | 2.12                        | 2.90                                              | 0.13                                            | 0.17        |
|              | 0.17                        | 0.27                        | 0.57                        | 3.47                        | 4.48                                              | 0.20                                            |             |
|              | 0.14                        | 0.32                        | 0.50                        | 3.08                        | 4.04                                              | 0.18                                            |             |
| sediment     | 0.30                        | 0.39                        | 1.32                        | 7.71                        | 9.72                                              | 0.15                                            |             |
| <b>total</b> | <b>0.79</b>                 | <b>1.20</b>                 | <b>2.77</b>                 | <b>16.38</b>                | <b>21.14</b>                                      | <b>0.67</b>                                     |             |

| Nr. cicluri    | 7 cicluri                         | 14 cicluri                        | 28 cicluri                        | 56 cicluri                        | Total<br>cantitate<br>beton<br>exfoliat<br>după 56<br>cicluri, g | Reducerea masei<br>probei de beton<br>după 56 cicluri |                   |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------|
| Tip CEM        | cantitate<br>beton<br>exfoliat, g | cantitate<br>beton<br>exfoliat, g | cantitate<br>beton<br>exfoliat, g | cantitate<br>beton<br>exfoliat, g |                                                                  | P, %                                                  | P,<br>medie,<br>% |
| I+37%<br>zgură | 0.14                              | 1.10                              | 7.24                              | 65.10                             | 73.58                                                            | 3.35                                                  | <b>4.30</b>       |
|                | 0.17                              | 2.45                              | 17.12                             | 103.36                            | 123.10                                                           | 5.60                                                  |                   |
|                | 0.16                              | 2.14                              | 8.20                              | 56.12                             | 66.62                                                            | 3.03                                                  |                   |
| sediment       | 0.33                              | 6.24                              | 53.04                             | 283.74                            | 343.35                                                           | 5.21                                                  |                   |
| <b>total</b>   | <b>0.80</b>                       | <b>11.93</b>                      | <b>85.60</b>                      | <b>508.32</b>                     | <b>606.65</b>                                                    | <b>17.19</b>                                          |                   |
| III/A          | 0.10                              | 1.21                              | 5.10                              | 46.44                             | <b>52.85</b>                                                     | 2.45                                                  | <b>3.36</b>       |
|                | 0.17                              | 2.21                              | 10.79                             | 80.68                             | <b>93.85</b>                                                     | 4.34                                                  |                   |
|                | 0.15                              | 1.18                              | 4.14                              | 51.90                             | <b>57.37</b>                                                     | 2.67                                                  |                   |
| sediment       | 0.47                              | 6.27                              | 34.77                             | 215.46                            | <b>256.97</b>                                                    | 3.97                                                  |                   |
| <b>total</b>   | <b>0.89</b>                       | <b>10.87</b>                      | <b>54.80</b>                      | <b>394.48</b>                     | <b>461.04</b>                                                    | <b>13.43</b>                                          |                   |

Tabelul V.66. – Cantitatea de beton exfoliat după 100 cicluri de îngheț-dezgheț, cu agenți de dezghețare, cuburi cu latura de 100 mm

| Nr. cicluri    | 100 cicluri                    | Total cantitate<br>beton exfoliat după<br>100 cicluri, g | Reducerea masei probei<br>de beton |                |
|----------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------|
| Tip ciment     | cantitate beton<br>exfoliat, g |                                                          | P, %                               | P, medie,<br>% |
| II/A-S         | 3.56                           | 5.66                                                     | 0.26                               | <b>0.41</b>    |
|                | 8.89                           | 12.31                                                    | 0.56                               |                |
|                | 2.67                           | 4.99                                                     | 0.23                               |                |
| sediment       | 30.72                          | 39.54                                                    | 0.60                               |                |
| <b>total</b>   | <b>45.84</b>                   | 62.50                                                    | <b>1.65</b>                        |                |
| I+10%<br>zgură | 2.42                           | 5.32                                                     | 0.24                               | <b>0.54</b>    |
|                | 11.92                          | 16.40                                                    | 0.74                               |                |
|                | 4.36                           | 8.40                                                     | 0.38                               |                |
| sediment       | 43.23                          | 52.95                                                    | 0.80                               |                |
| <b>total</b>   | <b>61.93</b>                   | 83.07                                                    | <b>2.17</b>                        |                |
| I+37%<br>zgură | 12.28                          | 85.86                                                    | 3.91                               | <b>4.87</b>    |
|                | 15.79                          | 138.89                                                   | 6.32                               |                |
|                | 9.36                           | 75.98                                                    | 3.45                               |                |
| sediment       | 38.58                          | 381.93                                                   | 5.79                               |                |
| <b>total</b>   | <b>76.01</b>                   | 682.66                                                   | <b>19.47</b>                       |                |
| III/A          | 10.30                          | 63.15                                                    | 2.93                               | <b>3.65</b>    |
|                | 7.06                           | 100.91                                                   | 4.67                               |                |
|                | 4.50                           | 61.87                                                    | 2.88                               |                |
| sediment       | 9.66                           | 266.63                                                   | 4.12                               |                |
| <b>total</b>   | <b>31.52</b>                   | 492.56                                                   | <b>14.59</b>                       |                |

În general, betoanele conținând ciment cu zgură au un volum mai redus de pori de aer, iar utilizarea de aditivi antrenori de aer este mai puțin eficientă decât la betoanele cu ciment Portland unitar, un efect pozitiv constatându-se doar pentru cimenturi conținând până la 55% zgură. În general, se consideră că rezistența la săruri de dezghețare a betoanelor de ciment cu zgură este mai slabă decât a celor cu ciment Portland. De asemenea, nu s-a constatat o dependență liniară a rezistenței la îngheț-dezgheț în prezența sărurilor de dezgheț și gradul de hidratare a cimenturilor cu zgură, ceea ce este explicabil prin faptul că deteriorările determinate de acțiunea sărurilor de dezghețare au loc mai ales în straturile superficiale ale betonului, părțile interioare nefiind afectate.

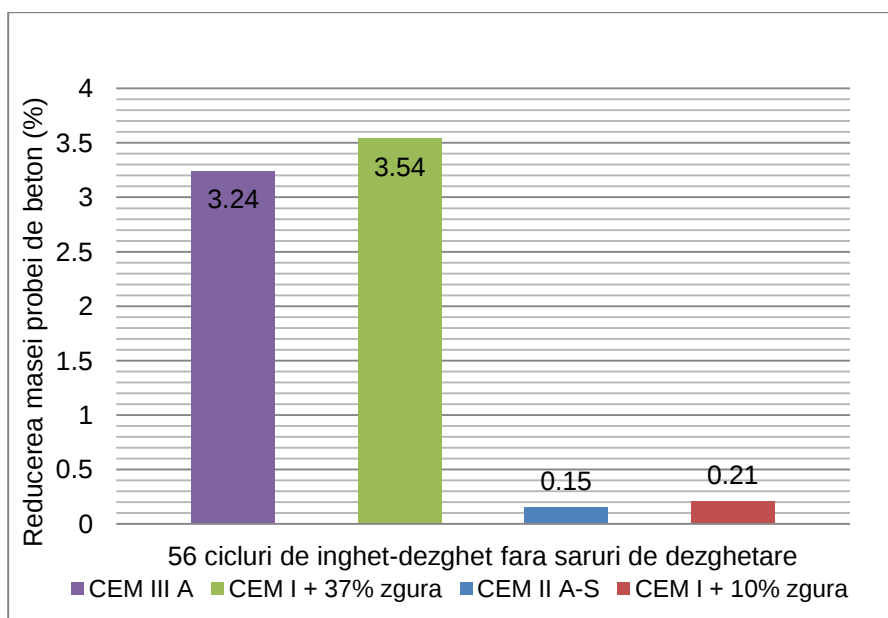


Figura V.87.- Reducerea masei cuburilor de beton clasa C20/25a în funcție de tipul cimentului după 56 cicluri de îngheț-dezghet fără săruri de dezghețare

Cantitatea mai mică de beton exfoliat s-a înregistrat pentru betoanele cu ciment CEM II/A-S după 56 cicluri de îngheț-dezghet fără săruri de dezghețare, mai mare cu 40% pentru cele cu ciment CEM I + 10% zgură, mai mare de 21.6 ori pentru cele cu ciment CEM III/A și de 23.6 ori pentru cele cu ciment CEM I + 37% zgură.

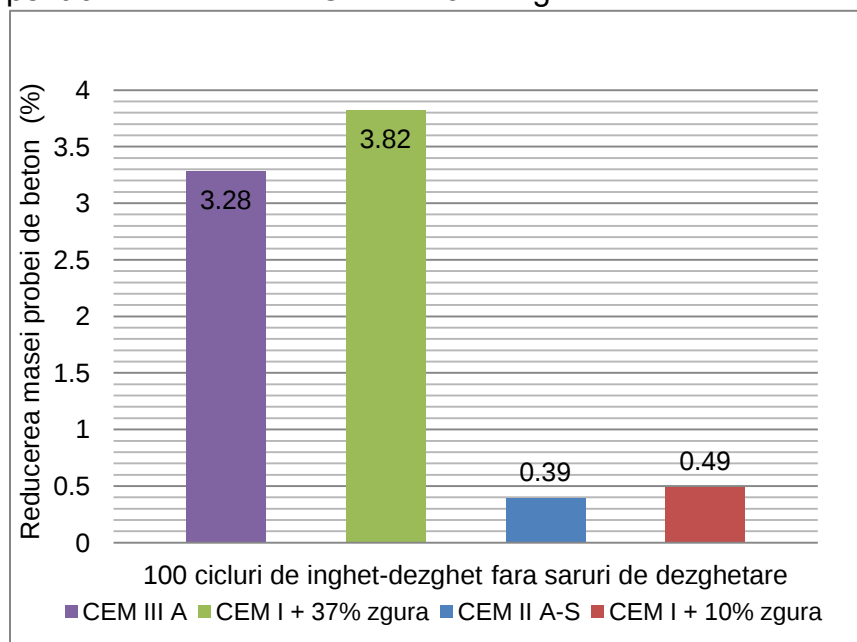


Figura V.88.- Reducerea masei probelor de beton clasa C20/25a în funcție de tipul cimentului după 100 cicluri de îngheț-dezghet fără săruri de dezghețare

După 100 cicluri de îngheț-dezghet fără săruri de dezghețare, cantitatea de beton exfoliat cea mai mică s-a înregistrat tot pentru betoanele cu ciment CEM II/A-S, mai mare cu 25% pentru cele cu ciment CEM I + 10% zgură, mai mare de 8.4 ori pentru cele cu ciment CEM III/A și de 9.8

ori pentru cele cu ciment CEM I + 37% zgură. La fel ca în cazul porozității și permeabilității, după 56 de cicluri de îngheț-dezghet se observă rolul adaosurilor din cimenturi asupra cantității de beton exfoliat. Astfel, betoanele preparate cu ciment CEM II/A-S și CEM I + 10% zgură au pierderi de masă mai mici decât celelalte două tipuri de betoane, la același raport a/c.

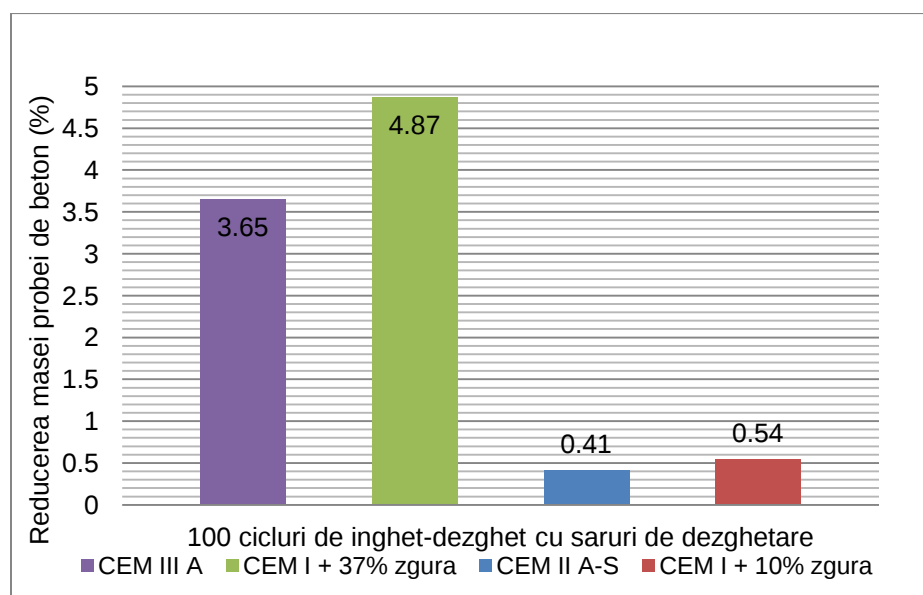


Figura V.89.- Reducerea masei probelor de beton clasa C20/25a în funcție de tipul cimentului după 100 cicluri de îngheț-dezghet cu săruri de dezghețare

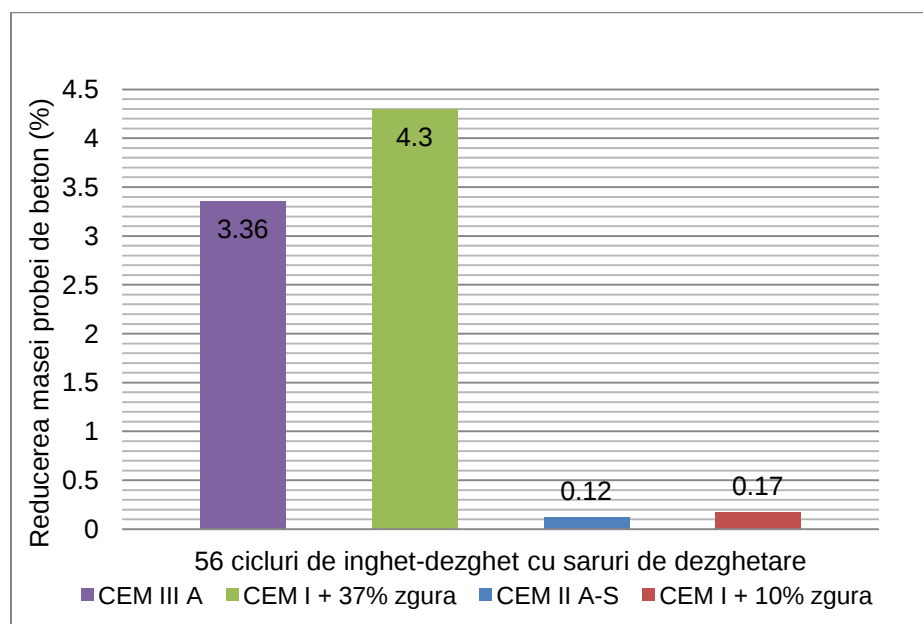


Figura V.90.- Reducerea masei probelor de beton clasa C20/25a în funcție de tipul cimentului după 56 cicluri de îngheț-dezghet cu săruri de dezghețare

Aceeași tendință de comportare se păstrează și în cazul mediului de îngheț-dezghet cu agenți de dezghețare, performanțele betoanelor cu CEM II/A-S supuse la 56 și respectiv 100 de cicluri, cu/fără agenți de dezghețare fiind net superioare tuturor celor patru tipuri de betoane.

Betoanele preparate cu ciment CEM I +10% zgură au avut o comportare asemănătoare celor cu ciment CEM II/A-S, iar diferențele înregistrate sunt nesemnificative. Mărirea numărului de cicluri și/sau utilizarea agenților de dezghețare conduce la o creștere a cantității de beton exfoliat, valoare care s-a situat sub valoarea admisibilă conform criteriilor din clasele de expunere XF1 și XF3.

Criterii de evaluare pentru exfoliere la metoda "cube test" sunt:

- în clasa de expunere XF1 (dozaj de ciment 300 kg/m<sup>3</sup> și raport a/c = 0.6)

Cantitatea de material exfoliat trebuie să determine o reducere mai mică de 5% a masei probei de beton după aplicarea a 56 de cicluri și respectiv mai mică de 10% după 100 de cicluri.

- în clasa de expunere XF3 (dozaj de ciment 300 kg/m<sup>3</sup> și raport a/c = 0.6)

Cantitatea de material exfoliat trebuie să determine o reducere mai mică de 3% a masei probei de beton după aplicarea a 56 de cicluri și respectiv mai mică de 5% după 100 de cicluri.

Betoane de clasa C20/25a preparate cu CEM I 42.5R + 10% zgură îndeplinesc ambele criterii din clasele de expunere XF1 și XF3 și betoanele cu CEM I 42.5R + 37% zgură corespund utilizării numai în clasa XF1. Analizând aspectele rezistenței la îngheț-dezgheț cu săruri de dezghețare în legătura cu conceptul de performanță echivalentă a betonului din *normativul olandez VC12 WG4* [59] s-a făcut o comparație între betonul cu ciment CEM I + 10% zgură considerat ca beton candidat și betonul cu ciment CEM II/A-S fiind beton de referință. Aceeași comparație s-a analizat și între betonul cu ciment CEM I + 37% zgură considerat drept beton candidat și betonul cu ciment CEM III/A fiind beton de referință.

Pentru fiecare aspect al durabilității asociate cu rezistența la îngheț-dezgheț, evaluarea se bazează pe parametrul  $T_j$  și pentru validare trebuie ca  $T_j > 1.533$  când  $n = 3$  și  $d_j = 30$ .

Relatia de calcul și semnificația notatiilor sunt prezentate la punctul IV.4.

#### **Pentru beton cu CEM I + 10% zgură și betonul cu ciment CEM II/A-S**

##### **- pentru beton cu CEM I + 10% zgură**

Cantitatea de beton exfoliat după 56 cicluri de îngheț-dezgheț cu agenți de dezghețare

proba 1: 2.90+3.24 sediment =6.14 g

proba 2: 4.48+3.24 sediment =7.72 g

proba 3: 4.04+3.24 sediment =7.28 g

$$m_t(\text{medie}) = 7.05 \text{ g}$$

##### **- pentru beton cu CEM II/A-S**

Cantitatea de beton exfoliat după 56 cicluri de îngheț-dezgheț cu agenți de dezghețare

proba 1: 2.10+2.94 sediment =5.04 g

proba 2: 3.42+2.94 sediment =6.36 g

proba 3: 2.32+2.94 sediment =5.26 g

$$m_r(\text{medie}) = 5.55 \text{ g}$$

$$s_t = \sqrt{((0.91)^2 + (0.67)^2 + (0.23)^2)/2} = 0.815$$

$$s_r = \sqrt{((0.51)^2 + (0.81)^2 + (0.29)^2)/2} = 0.707$$

$$d_j = 30$$

$$s = \sqrt{s_r^2 + \frac{s_t^2}{(1+0.01d_j)^2}} = \sqrt{0.707^2 + \frac{0.815^2}{(1+0.01 \times 30)^2}} = 0.945$$

$$T_j = \frac{\left[ m_r - \frac{m_t}{1+0.01 \times d_j} \right]}{s/\sqrt{n}} = \frac{\left[ 0.55 - \frac{7.05}{1+0.01 \times 30} \right]}{0.945/\sqrt{3}} = 0.232 < 1.533$$

(criteriu neîndeplinit)

##### **- pentru beton cu CEM I + 10% zgură**

Cantitatea de beton exfoliat după 100 cicluri de îngheț-dezgheț cu agenți de dezghețare

proba 1: 5.32+17.65 sediment =22.97 g

proba 2: 16.40+17.65 sediment =34.05 g

proba 3: 8.40+17.65 sediment =26.05 g

$$m_t(\text{medie}) = 27.69 \text{ g}$$

**- pentru beton cu CEM III/A-S**

Cantitatea de beton exfoliat după 100 cicluri de îngheț-dezgheț cu agenți de dezghețare

proba 1: 5.66+13.18 sediment =18.84 g

proba 2: 12.31+13.18 sediment =25.49 g

proba 3: 4.99+13.18 sediment =18.17 g

$$m_r(\text{ medie}) = 20.83 \text{ g}$$

$$s_t = \sqrt{((4.72)^2 + (6.36)^2 + (1.64)^2)/2} = 5.719$$

$$s_r = \sqrt{((1.99)^2 + (0.81)^2 + (0.29)^2)/2} = 4.047$$

$$d_j = 30$$

$$s = \sqrt{s_r^2 + \frac{s_t^2}{(1+0.01d_j)^2}} = \sqrt{4.047^2 + \frac{5.719^2}{(1+0.01 \times 30)^2}} = 5.977$$

$$T_j = \frac{[m_r - \frac{m_t}{1+0.01 \times d_j}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[20.83 - \frac{27.69}{1+0.01 \times 30}]}{5.977/\sqrt{3}} < 0.$$

(criteriu neîndeplinit)

**Pentru beton cu CEM I + 37% zgură și betonul cu ciment CEM III/A**

**- pentru beton cu CEM I + 37% zgură**

Cantitatea de beton exfoliat după 56 cicluri de îngheț-dezgheț cu agenți de dezghețare

proba 1: 73.58+114.45 sediment =188.03 g

proba 2: 123.10+114.45 sediment =237.55 g

proba 3: 66.62+114.45 sediment =181.07 g

$$m_t(\text{ medie}) = 202.22 \text{ g}$$

**- pentru beton cu CEM III/A**

Cantitatea de beton exfoliat după 56 cicluri de îngheț-dezgheț cu agenți de dezghețare

proba 1: 52.93+85.66 sediment =138.59 g

proba 2: 93.85+85.66 sediment =179.51 g

proba 3: 57.37+85.66 sediment =143.03 g

$$m_r(\text{ medie}) = 153.71 \text{ g}$$

$$s_t = \sqrt{((14.19)^2 + (35.33)^2 + (21.15)^2)/2} = 30.796$$

$$s_r = \sqrt{((15.12)^2 + (25.8)^2 + (10.68)^2)/2} = 22.453$$

$$d_j = 30$$

$$s = \sqrt{s_r^2 + \frac{s_t^2}{(1+0.01d_j)^2}} = \sqrt{22.453^2 + \frac{30.796^2}{(1+0.01 \times 30)^2}} = 32.639$$

$$T_j = \frac{[m_r - \frac{m_t}{1+0.01 \times d_j}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[153.71 - \frac{202.22}{1+0.01 \times 30}]}{32.639/\sqrt{3}} < 0$$

(criteriu neîndeplinit)

**- pentru beton cu CEM I + 37% zgură**

Cantitatea de beton exfoliat după 100 cicluri de îngheț-dezgheț cu agenți de dezghețare

proba 1: 85.86+127.31 sediment =213.17 g

proba 2: 138.89+127.31 sediment =266.20 g

proba 3: 75.98+127.31 sediment =203.29 g

$$m_t(\text{ medie}) = 227.55 \text{ g}$$

**- pentru beton cu CEM III/A**

Cantitatea de beton exfoliat după 100 cicluri de îngheț-dezgheț cu agenți de dezghețare

proba 1: 63.15+88.87 sediment =152.02 g

proba 2: 100.91+88.87 sediment =189.78 g

proba 3: 61.87+88.87 sediment =150.74 g

$$m_r(\text{ medie}) = 164.18 \text{ g}$$

$$s_t = \sqrt{((14.38)^2 + (38.65)^2 + (24.26)^2)/2} = 33.831$$

$$s_r = \sqrt{((12.16)^2 + (25.6)^2 + (13.44)^2)/2} = 22.179$$

$$d_j = 30$$

$$s = \sqrt{sr^2 + \frac{st^2}{(1+0.01dj)^2}} = \sqrt{22.179^2 + \frac{33.831^2}{(1+0.01 \times 30)^2}} = 34.193$$

$$T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[164.18 - \frac{227.55}{1+0.01 \times 30}]}{34.193/\sqrt{3}} < 0 \quad (\text{criteriu neîndeplinit})$$

Analizând aspectele rezistenței la îngheț-dezgheț cu săruri de dezghețare în legătură cu conceptul de performanță echivalentă a betonului din *normativul european CEN/TC104/SC1-N 703* [61] s-a făcut o comparație între betonul cu ciment CEM I + 10% zgură considerat ca beton candidat și betonul cu ciment CEM II/A-S fiind beton de referință. Aceeași comparație s-a analizat și între betonul cu ciment CEM I + 37% zgură considerat drept beton candidat și betonul cu ciment CEM III/A fiind beton de referință.

Cantitatea de material exfoliat măsurată la betonul candidat trebuie să fie mai mică sau egală cu cantitatea de material exfoliat măsurată la betonul de referință

$$\pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33\sigma_R)^2 - (2.33\sigma_r)^2 \left(\frac{n-1}{n}\right))}, \text{ unde } n \geq 3.$$

Relația de calcul și semnificația notațiilor sunt prezentate la punctul IV.3.

**- pentru beton cu CEM I + 10% zgură și betonul cu ciment CEM II/A-S la 56 cicluri**

$$\sigma_r = 0.815$$

$$\sigma_R = 0.707$$

$$m_r = 7.05$$

$$m_R = 5.55$$

$$7.05 \leq 5.55 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 0.707)^2 - (2.33 \times 0.815)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))} = 5.94 \quad (\text{criteriu neîndeplinit})$$

**- pentru beton cu CEM I + 37% zgură și betonul cu ciment CEM III/A la 56 cicluri**

$$\sigma_r = 30.796$$

$$\sigma_R = 22.453$$

$$m_r = 202.22$$

$$m_R = 153.71$$

$$202.22 \leq 153.71 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 22.453)^2 - (2.33 \times 30.796)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))} \quad (\text{criteriu neîndeplinit})$$

**- pentru beton cu CEM I + 10% zgură și betonul cu ciment CEM II/A-S la 100 cicluri**

$$\sigma_r = 5.719$$

$$\sigma_R = 4.046$$

$$m_r = 27.69$$

$$m_R = 20.83$$

$$27.69 \leq 20.83 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 4.046)^2 - (2.33 \times 5.719)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))} \quad (\text{criteriu neîndeplinit})$$

**- pentru beton cu CEM I + 37% zgură și betonul cu ciment CEM III/A la 100 cicluri**

$$\sigma_r = 33.831$$

$$\sigma_R = 22.179$$

$$m_r = 227.55$$

$$m_R = 164.18$$

$$227.55 \leq 164.18 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 22.179)^2 - (2.33 \times 33.831)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))} \quad (\text{criteriu neîndeplinit})$$

Aplicând conceptul de performanță echivalentă din *reglementarea națională belgiană NBN B 15-100* [64] s-a considerat ca beton candidat betonul cu ciment CEM I + 10% zgură și beton de

referință cel cu ciment CEM II/A-S sau beton candidat betonul cu ciment CEM I + 37% zgură și beton de referință cel cu ciment CEM III/A.

Valoarea pierderii medii de masă a betonului candidat (după 56 sau 100 de cicluri de îngheț-dezgheț cu agenți de dezghețare) trebuie să fie mai redusă sau maxim egală cu 1.20 ori valoarea pierderii medii de masă a betonului de referință, incluzând și precizia de măsurare:

$$P_{\text{candidat}} \leq 1.20 \times P_{\text{referință}}$$

**- pentru beton cu CEM I + 10% zgură și betonul cu ciment CEM II/A-S la 56 cicluri**

$$0.17 \leq 1.2 \times 0.12 = 0.144 \quad (\text{criteriu neîndeplinit})$$

**- pentru beton cu CEM I + 37% zgură și betonul cu ciment CEM III/A la 56 cicluri**

$$4.30 \leq 1.2 \times 3.36 = 4.032 \quad (\text{criteriu neîndeplinit})$$

**- pentru beton cu CEM I + 10% zgură și betonul cu ciment CEM II/A-S la 100 cicluri**

$$0.54 \leq 1.2 \times 0.41 = 0.492 \quad (\text{criteriu neîndeplinit})$$

**- pentru beton cu CEM I + 37% zgură și betonul cu ciment CEM III/A 100 cicluri**

$$4.87 \leq 1.2 \times 3.65 = 4.38 \quad (\text{criteriu neîndeplinit})$$

### Sinteza rezultatelor obținute

Tabelul V.67. - Criterii prescriptive pentru betoane de clasa C20/25a preparate cu CEM I 42.5R + 10% zgură sau cu CEM I 42.5R + 37% zgură (după 56 și 100 cicluri de îngheț-dezgheț cu agenți de dezghețare)

| Clase de expunere / Normativ | XF1                                                                                             | XF2                                                                                                                                                                              | XF3                                                                                                                                                          | XF4                                                                                                                                         |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Standard<br>EN 206 [17]      | Criteriu                                                                                        | Criteriu                                                                                                                                                                         | Criteriu                                                                                                                                                     | Criteriu                                                                                                                                    |
|                              | a/c maxim<br>0,55<br>clasa rezist minimă<br>C30/37<br>dozaj cim. minim<br>300 kg/m <sup>3</sup> | a/c maxim<br>0,55<br>clasa rezist minimă<br>C30/37<br>dozaj cim. minim<br>300 kg/m <sup>3</sup><br>conținutul minim<br>de aer 4.0 %                                              | a/c maxim<br>0,50<br>clasa rezist minimă<br>C30/37<br>dozaj cim. minim<br>320 kg/m <sup>3</sup><br>conținutul minim de aer<br>4.0 %                          | a/c maxim<br>0,45<br>clasa rezist minimă<br>C30/37<br>dozaj cim. minim<br>340 kg/m <sup>3</sup><br>conținutul minim de aer<br>4.0 %         |
|                              | 0                                                                                               | 0                                                                                                                                                                                | 0                                                                                                                                                            | 0                                                                                                                                           |
| Normativ<br>NE 012-1 [3]     | Criteriu                                                                                        | Criteriu                                                                                                                                                                         | Criteriu                                                                                                                                                     | Criteriu                                                                                                                                    |
|                              | a/c maxim<br>0,50<br>clasa rezist minimă<br>C25/30<br>dozaj cim. minim<br>300 kg/m <sup>3</sup> | a/c maxim<br>0,50<br>clasa rezist minimă<br>C35/45<br>dozaj cim. minim<br>320 kg/m <sup>3</sup><br>sau<br>a/c maxim<br>0,55<br>clasa rezist minimă<br>C25/30<br>dozaj cim. minim | a/c maxim<br>0,50<br>clasa rezist minimă<br>C35/45<br>dozaj cim. minim<br>320 kg/m <sup>3</sup><br>sau<br>a/c maxim<br>0,55<br>clasa rezist minimă<br>C25/30 | a/c maxim<br>0,50<br>clasa rezist minimă<br>C30/37<br>dozaj cim. minim<br>340 kg/m <sup>3</sup><br>obligatoriu<br>aditiv antrenor<br>de aer |

| Clase de expunere / Normativ | XF1 | XF2                                                            | XF3                                                                                      | XF4 |
|------------------------------|-----|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Normativ<br>NE 012-1 [3]     |     | 300 kg/m <sup>3</sup><br>obligatoriu aditiv<br>antrenor de aer | dozaj cim.<br>minim<br>300 kg/m <sup>3</sup><br>obligatoriu<br>aditiv antrenor<br>de aer |     |
|                              | 0   | 0                                                              | 0                                                                                        | 0   |

Legenda: X = criteriu îndeplinit  
0 = criteriu neîndeplinit

În aprecierea conformitatii cu standardul EN 206 [17] s-a considerat și cerința legată de clasa minimă de rezistență chiar dacă în standard se precizează că nu este obligatorie specificarea acesteia.

În normativul NE 012-1 [3], cimenturile tip CEM II/A-S și CEM III/A sunt recomandate pentru utilizare în clasele de expunere la îngheț-dezghet XF1, XF2, XF3 și XF4.

În tabelele V.68. și V.69. se prezintă rezultatele obținute prin aplicarea celor două metode de performanță.

Tabelul V.68. - Analiza performanțelor betonului de clasa C20/25a preparate cu CEM I + 10% zgură luând ca referință betonul preparat cu CEM II/A-S, după 56 și 100 cicluri de îngheț-dezghet cu agenți de dezghetare

| Normativ                                      | Rezistența la îngheț-dezghet cu agenți de dezghetare a betonului                                                   |                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Document european<br>CEN/TC104/SC1-N 703 [59] | Valoarea beton candidat ≤ valoarea beton de referință                                                              |                                                                                                                                           |
|                                               | $\pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33\sigma_R)^2 - (2.33\sigma_r)^2 \left(\frac{n-1}{n}\right))}$ , unde $n \geq 3$ |                                                                                                                                           |
|                                               | 56<br>cicluri                                                                                                      | $m_r = 7.05$ (beton candidat); $m_R = 5.55$ (beton de referință);<br>$\sigma_r = 0.81$ ; $\sigma_R = 0.71$                                |
|                                               | criteriu                                                                                                           | 0<br>$7.05 \leq 5.55 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 0.71)^2 - (2.33 \times 0.81)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))} = 5.94$         |
|                                               | 100<br>cicluri                                                                                                     | $m_r = 27.69$ (beton candidat); $m_R = 20.83$ (beton de referință); $\sigma_r = 5.72$ ; $\sigma_R = 4.05$                                 |
| Normativ olandez VC12<br>WG4 [61]             | criteriu                                                                                                           | 0<br>$27.69 \leq 20.83 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 4.05)^2 - (2.33 \times 5.72)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))}$              |
|                                               | $T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}}$ , unde $s = \sqrt{sr^2 + \frac{st^2}{(1+0.01dj)^2}}$        |                                                                                                                                           |
|                                               | 56<br>cicluri                                                                                                      | $m_r = 7.05$ (beton candidat); $m_R = 5.55$ (beton de referință);<br>$s_t = 0.81$ ; $s_r = 0.71$ ; $s = 0.94$                             |
|                                               | criteriu                                                                                                           | 0<br>$T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[5.55 - \frac{7.05}{1+0.01 \times 30}]}{0.94/\sqrt{3}} = 0.23 < 1.533$ |
|                                               | 100<br>cicluri                                                                                                     | $m_r = 27.69$ (beton candidat); $m_R = 20.83$ (beton de referință); $s_t = 5.72$ ; $s_r = 4.05$ ; $s = 5.98$                              |
|                                               | criteriu                                                                                                           | 0                                                                                                                                         |

| Normativ                                 | Rezistența la îngheț-dezghet cu agenți de dezghetare a betonului |                                                                                                                              |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                          |                                                                  | $T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[20.83 - \frac{27.69}{1+0.01 \times 30}]}{5.98/\sqrt{3}} < 0.$ |
| Normativ belgian<br>NBN B 15-100<br>[64] | d c, candidat $\leq 1.20 \times d$ c, referința                  |                                                                                                                              |
|                                          | 56<br>cicluri                                                    | $m_r = 7.05$ (beton candidat); $m_R = 5.55$ (beton de referință)                                                             |
|                                          | criteriu                                                         | 0<br>$7.05 \leq 1.20 \times 5.55 = 6.66$                                                                                     |
|                                          | 100<br>cicluri                                                   | $m_r = 27.69$ (beton candidat); $m_R = 20.83$ (beton de referință)                                                           |
|                                          | criteriu                                                         | 0<br>$27.69 \leq 1.20 \times 20.83 = 25$                                                                                     |

Tabelul V.69. - Analiza performanțelor betonului de clasa C20/25a preparate cu CEM I + 37% zgură luând ca referință betonul preparat cu CEM III/A, după 56 și 100 cicluri de îngheț-dezghet cu agenți de dezghetare

| Normativ                                          | Rezistența la îngheț-dezghet cu agenți de dezghetare a betonului                                                                                                                 |                                                                                                                                      |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Document european<br>CEN/TC104/SC1-<br>N 703 [59] | Valoarea beton candidat $\leq$ valoarea beton de referință<br>$\pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33\sigma_R)^2 - (2.33\sigma_r)^2 \left(\frac{n-1}{n}\right))}$ , unde $n \geq 3$ |                                                                                                                                      |
|                                                   | 56<br>cicluri                                                                                                                                                                    | $m_r = 202.22$ (beton candidat); $m_R = 153.71$ (beton de referință); $\sigma_r = 30.80$ ; $\sigma_R = 22.45$                        |
|                                                   | criteriu                                                                                                                                                                         | 0<br>$202.22 \leq 153.71 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 22.45)^2 - (2.33 \times 30.8)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))}$      |
|                                                   | 100<br>cicluri                                                                                                                                                                   | $m_r = 227.55$ (beton candidat); $m_R = 164.18$ (beton de referință); $\sigma_r = 33.83$ ; $\sigma_R = 22.18$                        |
|                                                   | criteriu                                                                                                                                                                         | 0<br>$227.55 \leq 164.18 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 22.18)^2 - (2.33 \times 33.83)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))}$     |
| Normativ olandez VC12<br>WG4 [61]                 | $T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}}$ , unde $s = \sqrt{sr^2 + \frac{st^2}{(1+0.01dj)^2}}$                                                                      |                                                                                                                                      |
|                                                   | 56<br>cicluri                                                                                                                                                                    | $m_r = 202.22$ (beton candidat); $m_R = 153.71$ (beton de referință); $s_t = 30.80$ ; $s_r = 22.45$ ; $s = 32.64$                    |
|                                                   | criteriu                                                                                                                                                                         | 0<br>$T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[153.71 - \frac{202.22}{1+0.01 \times 30}]}{32.639/\sqrt{3}} < 0$ |
|                                                   | 100<br>cicluri                                                                                                                                                                   | $m_r = 227.55$ (beton candidat); $m_R = 164.18$ (beton de referință); $s_t = 33.83$ ; $s_r = 22.18$ ; $s = 34.19$                    |
|                                                   | criteriu                                                                                                                                                                         | 0<br>$T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[164.18 - \frac{227.55}{1+0.01 \times 30}]}{34.19/\sqrt{3}} < 0$  |
| Normativ belgian<br>NBN B 15-100<br>[64]          | d c, candidat $\leq 1.20 \times d$ c, referința                                                                                                                                  |                                                                                                                                      |
|                                                   | 56<br>cicluri                                                                                                                                                                    | $m_r = 202.22$ (beton candidat); $m_R = 153.71$ (beton de referință)                                                                 |
|                                                   | criteriu                                                                                                                                                                         | 0                                                                                                                                    |

| Normativ                                        | Rezistența la îngheț-dezghet cu agenți de dezghetare a betonului |                                                                      |
|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Normativ belgian<br><i>NBN B 15-100</i><br>[64] |                                                                  | $202.22 \leq 1.20 \times 153.71 = 184.45$                            |
|                                                 | 100<br>cicluri                                                   | $m_f = 227.55$ (beton candidat); $m_R = 164.18$ (beton de referință) |
|                                                 | criteriu                                                         | 0<br>$227.55 \leq 1.20 \times 164.18 = 197.02$                       |

Comparând rezultatele experimentale cu ajutorul metodelor prescriptive și al metodelor de performanță pentru betoanele candidat se constată că criteriile aplicate au condus la rezultate diferite.

Betoanele candidat din clasa C20/25a preparate CEM I 42.5R + 10% zgură au îndeplinit numai criteriul din metoda "cube test" privind utilizarea în clasa de expunere XF1 și XF3, dar nu au îndeplinit nici un criteriu prescriptiv sau de performanță.

Betoanele candidat din clasa C20/25a preparate CEM I 42.5R + 37% zgură pot fi utilizate în clasa XF1 conform condițiilor din metoda "cube test", dar nu au îndeplinit nici un criteriu prescriptiv privind utilizarea în clasa de expunere la îngheț-dezghet în conformitate cu EN 206 sau cu normativul NE 012-1 și nici criteriile asociate metodelor de performanță aplicate.

### Rezistența la atac sulfatic

Metoda propusă pentru evaluarea rezistenței la atacul soluțiilor sulfatice are ca referință normativul pr.ENV 196-X [57] care descrie o metodă de determinare a rezistenței mortarului de ciment prin măsurarea expansiunii cauzate de atacul soluției de sulfat sau de atacul apei de mare.

Metoda constă în determinarea expansiunii (variația lungimii) unor probe prismatice menținute în soluție sulfatică sau în apă de mare artificială. Materialele componente și mortarul respectă prevederile SR EN 196-1 [5]. Epruvetele au dimensiunile de 40 mm x 40 mm x 160 mm, iar mortarul este preparat cu 1 parte ciment (450±2) g, 3 părți nisip CEN (1350±5) g și 1/2 parte apă (225±1) g cu raport a/c=0.5. Nisipul de referință CEN este un nisip natural silicios, constând din granule rotunjite, al cărui conținut în silice este de cel puțin 98 %. Soluția sulfatică a avut o concentrație de  $(16,0 \pm 0,5)$  g SO<sub>4</sub> per litru și a fost preparată prin adăugarea de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sau Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O în apă. La capetele probelor se fixează ploturi pentru a face posibilă măsurarea lungimii acestora. Probele sunt menținute în tipare în atmosferă umedă timp de 24 ore, apoi sunt decofrate după 20 h ... 24 h de la turnare și menținute în apă. La vârsta de 28 de zile se măsoară lungimea fiecărei probe cu un comparator având o eroare de citire maximă de ± 0,005 mm.

La vârsta de 28 de zile probele sunt măsurate pentru determinarea lungimii inițiale și apoi introduse într-o soluție sulfatică standard cu concentrație 2.37% pentru testarea mortarului în clasa de expunere XA2 sau 4.44% pentru testarea mortarului în clasa de expunere XA3. Modificările de lungime au fost măsurate până la vârsta de 2 ani. La perioade predeterminate se măsoară lungimea probelor după ce acestea au fost menținute în mediul sulfatic. Variația de lungime (expansiunea) se compară fie cu valori obținute pentru cimenturi considerate rezistente la sulfați, fie se compară cu valori absolute propuse pentru o expansiune maximă după perioada de menținere predeterminată.

Mortarul testat a fost preparat cu CEM II/A-S 42.5R, CEM I 42.5R + 37% zgură și CEM III/A 42.5 N-LH.

Tabelul V.73. - Valorile expansiunilor la vârsta de 90 de zile, atac sulfatic moderat XA2

| Tip<br>ciment           | Mediu    | Citiri microcomparator |       |            |       |         |       | Diferența citiri  |       | Expansiune<br>90 zile<br>(mm/m) |
|-------------------------|----------|------------------------|-------|------------|-------|---------|-------|-------------------|-------|---------------------------------|
|                         |          | 28<br>zile             | medie | 60<br>zile | medie | 90 zile | medie | 90zile-<br>28zile | medie |                                 |
| CEM<br>III/A            | martor   | 5.61                   | 5.667 | 5.62       | 5.677 | 5.63    | 5.687 | 0.02              | 0.02  | 0.12                            |
|                         |          | 5.59                   |       | 5.60       |       | 5.61    |       | 0.02              |       |                                 |
|                         |          | 5.80                   |       | 5.81       |       | 5.82    |       | 0.02              |       |                                 |
|                         | sulfatic | 5.74                   | 5.693 | 5.75       | 5.710 | 5.76    | 5.723 | 0.02              | 0.03  | <b>0.18</b>                     |
|                         |          | 5.76                   |       | 5.78       |       | 5.79    |       | 0.03              |       |                                 |
|                         |          | 5.58                   |       | 5.60       |       | 5.62    |       | 0.04              |       |                                 |
| CEM I<br>42.5R<br>+ 37% | martor   | 5.31                   | 5.453 | 5.32       | 5.463 | 5.33    | 5.477 | 0.02              | 0.02  | 0.14                            |
|                         |          | 5.59                   |       | 5.60       |       | 5.61    |       | 0.02              |       |                                 |
|                         |          | 5.46                   |       | 5.47       |       | 5.49    |       | 0.03              |       |                                 |

| Tip ciment | Mediu    | Citiri microcomparator |       |         |       |         |       | Diferența citiri |       | Expansiune 90 zile (mm/m) |
|------------|----------|------------------------|-------|---------|-------|---------|-------|------------------|-------|---------------------------|
|            |          | 28 zile                | medie | 60 zile | medie | 90 zile | medie | 90zile-28zile    | medie |                           |
| zgură      | sulfatic | 5.90                   | 5.777 | 5.92    | 5.800 | 5.93    | 5.813 | 0.03             | 0.04  | <b>0.22</b>               |
|            |          | 5.78                   |       | 5.81    |       | 5.82    |       | 0.04             |       |                           |
|            |          | 5.65                   |       | 5.67    |       | 5.69    |       | 0.04             |       |                           |
| CEM II/A-S | martor   | 5.73                   | 5.680 | 5.75    | 5.697 | 5.76    | 5.707 | 0.03             | 0.03  | 0.16                      |
|            |          | 5.64                   |       | 5.66    |       | 5.67    |       | 0.03             |       |                           |
|            |          | 5.67                   |       | 5.68    |       | 5.69    |       | 0.02             |       |                           |
|            | sulfatic | 5.72                   | 5.507 | 5.74    | 5.527 | 5.75    | 5.540 | 0.03             | 0.03  | <b>0.20</b>               |
|            |          | 5.22                   |       | 5.24    |       | 5.25    |       | 0.03             |       |                           |
|            |          | 5.58                   |       | 5.60    |       | 5.62    |       | 0.04             |       |                           |

Tabelul V.74.- Valorile expansiunilor la vârsta de 180 de zile, atac sulfatic moderat XA2

| Tip ciment              | Mediu    | Citiri microcomparator |       | Diferența citiri   |       | Expansiune 180 zile (mm/m) |
|-------------------------|----------|------------------------|-------|--------------------|-------|----------------------------|
|                         |          | 180 zile               | medie | 180 zile - 28 zile | medie |                            |
| CEM III/A               | martor   | 5.64                   | 5.697 | 0.03               | 0.03  | 0.18                       |
|                         |          | 5.62                   |       | 0.03               |       |                            |
|                         |          | 5.83                   |       | 0.03               |       |                            |
|                         | sulfatic | 5.77                   | 5.733 | 0.03               | 0.04  | <b>0.24</b>                |
|                         |          | 5.80                   |       | 0.04               |       |                            |
|                         |          | 5.63                   |       | 0.05               |       |                            |
| CEM I 42.5R + 37% zgură | martor   | 5.34                   | 5.490 | 0.03               | 0.04  | 0.22                       |
|                         |          | 5.62                   |       | 0.03               |       |                            |
|                         |          | 5.51                   |       | 0.05               |       |                            |
|                         | sulfatic | 5.94                   | 5.827 | 0.04               | 0.05  | <b>0.30</b>                |
|                         |          | 5.83                   |       | 0.05               |       |                            |
|                         |          | 5.71                   |       | 0.06               |       |                            |
| CEM II/A-S              | martor   | 5.78                   | 5.730 | 0.05               | 0.05  | 0.30                       |
|                         |          | 5.70                   |       | 0.06               |       |                            |
|                         |          | 5.71                   |       | 0.04               |       |                            |
|                         | sulfatic | 5.76                   | 5.550 | 0.04               | 0.04  | 0.26                       |
|                         |          | 5.26                   |       | 0.04               |       |                            |
|                         |          | 5.63                   |       | 0.05               |       |                            |

Tabelul V.75.- Valorile expansiunilor la vârsta de 360 de zile, atac sulfatic moderat XA2

| Tip ciment              | Mediu    | Citiri microcomparator |       | Diferența citiri   |       | Expansiune 360 zile (mm/m) |
|-------------------------|----------|------------------------|-------|--------------------|-------|----------------------------|
|                         |          | 360 zile               | medie | 360 zile - 28 zile | medie |                            |
| CEM III/A               | martor   | 5.65                   | 5.707 | 0.04               | 0.04  | 0.24                       |
|                         |          | 5.63                   |       | 0.04               |       |                            |
|                         |          | 5.84                   |       | 0.04               |       |                            |
|                         | sulfatic | 5.78                   | 5.740 | 0.04               | 0.05  | <b>0.28</b>                |
|                         |          | 5.81                   |       | 0.05               |       |                            |
|                         |          | 5.63                   |       | 0.05               |       |                            |
| CEM I 42.5R + 37% zgură | martor   | 5.34                   | 5.493 | 0.03               | 0.04  | 0.24                       |
|                         |          | 5.63                   |       | 0.04               |       |                            |
|                         |          | 5.51                   |       | 0.05               |       |                            |
|                         | sulfatic | 5.94                   | 5.830 | 0.04               | 0.05  | <b>0.32</b>                |

| Tip ciment                 | Mediu    | Citiri microcomparator |       | Diferența citiri      |       | Expansiune<br>360 zile<br>(mm/m) |
|----------------------------|----------|------------------------|-------|-----------------------|-------|----------------------------------|
|                            |          | 360<br>zile            | medie | 360 zile -<br>28 zile | medie |                                  |
| CEM I 42.5R<br>+ 37% zgură |          | 5.84                   |       | 0.06                  |       |                                  |
|                            |          | 5.71                   |       | 0.06                  |       |                                  |
|                            |          | 5.79                   |       | 0.06                  |       |                                  |
| CEM II/A-S                 | martor   | 5.71                   | 5.737 | 0.07                  | 0.06  | 0.34                             |
|                            |          | 5.71                   |       | 0.04                  |       |                                  |
|                            |          | 5.71                   |       | 0.04                  |       |                                  |
|                            | sulfatic | 5.77                   | 5.557 | 0.05                  | 0.05  | <b>0.30</b>                      |
|                            |          | 5.27                   |       | 0.05                  |       |                                  |
|                            |          | 5.63                   |       | 0.05                  |       |                                  |

Tabelul V.76.- Valorile expansiunilor la vârsta de 720 de zile, atac sulfatic moderat XA2

| Tip ciment                 | Mediu    | Citiri microcomparator |       | Diferența citiri      |       | Expansiune<br>720 zile<br>(mm/m) |
|----------------------------|----------|------------------------|-------|-----------------------|-------|----------------------------------|
|                            |          | 720<br>zile            | medie | 720 zile -<br>28 zile | medie |                                  |
| CEM III/A                  | martor   | 5.66                   | 5.713 | 0.03                  | 0.03  | 0.28                             |
|                            |          | 5.64                   |       | 0.03                  |       |                                  |
|                            |          | 5.84                   |       | 0.03                  |       |                                  |
|                            | sulfatic | 5.79                   | 5.753 | 0.03                  | 0.04  | <b>0.36</b>                      |
|                            |          | 5.81                   |       | 0.04                  |       |                                  |
|                            |          | 5.66                   |       | 0.05                  |       |                                  |
| CEM I 42.5R<br>+ 37% zgură | martor   | 5.35                   | 5.503 | 0.03                  | 0.04  | 0.30                             |
|                            |          | 5.64                   |       | 0.03                  |       |                                  |
|                            |          | 5.52                   |       | 0.05                  |       |                                  |
|                            | sulfatic | 5.95                   | 5.840 | 0.04                  | 0.05  | <b>0.38</b>                      |
|                            |          | 5.85                   |       | 0.05                  |       |                                  |
|                            |          | 5.72                   |       | 0.06                  |       |                                  |
| CEM II/A-S                 | martor   | 5.81                   | 5.753 | 0.05                  | 0.05  | 0.44                             |
|                            |          | 5.72                   |       | 0.06                  |       |                                  |
|                            |          | 5.73                   |       | 0.04                  |       |                                  |
|                            | sulfatic | 5.79                   | 5.573 | 0.04                  | 0.04  | <b>0.40</b>                      |
|                            |          | 5.28                   |       | 0.04                  |       |                                  |
|                            |          | 5.65                   |       | 0.05                  |       |                                  |

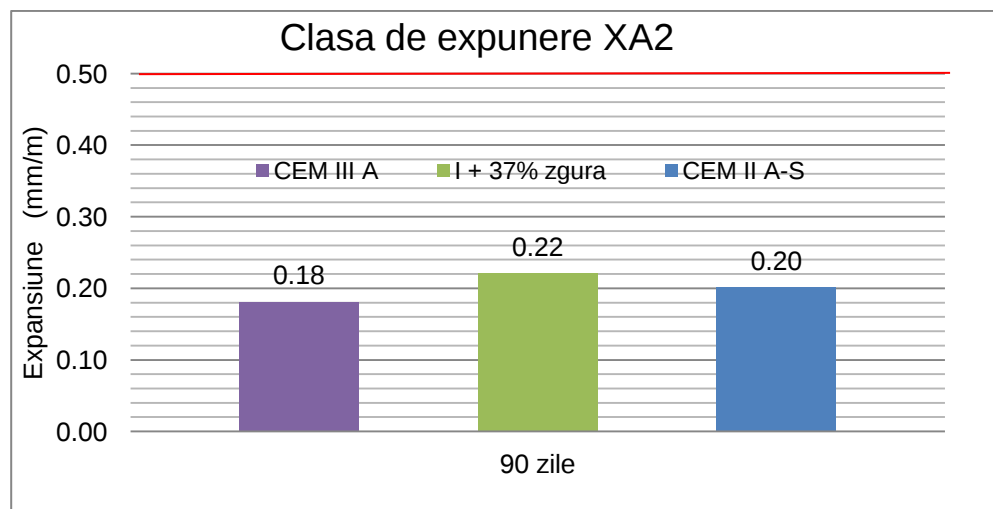


Figura V.91.- Expansiunea în clasa de expunere XA2

Expansiunea cea mai mică la 90 zile corespunzătoare clasei de expunere XA2 a probelor de mortar s-a înregistrat pentru mortarele cu ciment CEM III/A, mai mare cu 11% pentru mortarele cu ciment CEM II/A-S și mai mare cu 22% pentru cele cu ciment CEM I + 37% zgură.

Tabelul V.77. - Valorile expansiunilor la vârsta de 90 de zile, atac sulfatic agresiv XA3

| Tip ciment              | Mediu    | Citiri microcomparator |       |         |       |        |       | Diferența citiri |       | Expansiune 90 zile (mm/m) |
|-------------------------|----------|------------------------|-------|---------|-------|--------|-------|------------------|-------|---------------------------|
|                         |          | 28 zile                | medie | 60 zile | medie | 90zile | medie | 90zile-28zile    | medie |                           |
| CEM III/A               | martor   | 5.61                   | 5.667 | 5.62    | 5.677 | 5.63   | 5.687 | 0.02             | 0.02  | 0.12                      |
|                         |          | 5.59                   |       | 5.60    |       | 5.61   |       | 0.02             |       |                           |
|                         |          | 5.80                   |       | 5.81    |       | 5.82   |       | 0.02             |       |                           |
|                         | sulfatic | 5.61                   | 5.643 | 5.63    | 5.663 | 5.65   | 5.687 | 0.04             | 0.04  | <b>0.26</b>               |
|                         |          | 5.70                   |       | 5.72    |       | 5.74   |       | 0.04             |       |                           |
|                         |          | 5.62                   |       | 5.64    |       | 5.67   |       | 0.05             |       |                           |
| CEM I 42.5R + 37% zgură | martor   | 5.31                   | 5.453 | 5.32    | 5.463 | 5.33   | 5.477 | 0.02             | 0.02  | 0.14                      |
|                         |          | 5.59                   |       | 5.60    |       | 5.61   |       | 0.02             |       |                           |
|                         |          | 5.46                   |       | 5.47    |       | 5.49   |       | 0.03             |       |                           |
|                         | sulfatic | 5.65                   | 5.720 | 5.70    | 5.757 | 5.73   | 5.783 | 0.08             | 0.06  | <b>0.38</b>               |
|                         |          | 5.61                   |       | 5.64    |       | 5.67   |       | 0.06             |       |                           |
|                         |          | 5.90                   |       | 5.93    |       | 5.95   |       | 0.05             |       |                           |
| CEM II/A-S              | martor   | 5.73                   | 5.680 | 5.75    | 5.697 | 5.76   | 5.707 | 0.03             | 0.03  | 0.16                      |
|                         |          | 5.64                   |       | 5.66    |       | 5.67   |       | 0.03             |       |                           |
|                         |          | 5.67                   |       | 5.68    |       | 5.69   |       | 0.02             |       |                           |
|                         | sulfatic | 5.42                   | 5.593 | 5.42    | 5.613 | 5.45   | 5.643 | 0.03             | 0.05  | <b>0.30</b>               |
|                         |          | 5.87                   |       | 5.90    |       | 5.93   |       | 0.06             |       |                           |
|                         |          | 5.49                   |       | 5.52    |       | 5.55   |       | 0.06             |       |                           |
| SRI                     | martor   | 5.20                   | 5.797 | 5.21    | 5.807 | 5.22   | 5.817 | 0.02             | 0.020 | 0.12                      |
|                         |          | 5.55                   |       | 5.56    |       | 5.57   |       | 0.02             |       |                           |
|                         |          | 6.64                   |       | 6.65    |       | 6.66   |       | 0.02             |       |                           |
|                         | sulfatic | 6.87                   | 6.917 | 6.88    | 6.937 | 6.90   | 6.953 | 0.03             | 0.035 | <b>0.22</b>               |
|                         |          | 7.03                   |       | 7.06    |       | 7.07   |       | 0.04             |       |                           |
|                         |          | 6.85                   |       | 6.87    |       | 6.89   |       | 0.04             |       |                           |

Tabelul V.78.- Valorile expansiunilor la vârsta de 180 de zile, atac sulfatic agresiv XA3

| Tip ciment              | Mediu    | Citiri microcomparator |       | Diferența citiri   |       | Expansiune 180 zile (mm/m) |
|-------------------------|----------|------------------------|-------|--------------------|-------|----------------------------|
|                         |          | 180 zile               | medie | 180 zile - 28 zile | medie |                            |
| CEM III/A               | martor   | 5.64                   | 5.697 | 0.03               | 0.03  | 0.18                       |
|                         |          | 5.62                   |       | 0.03               |       |                            |
|                         |          | 5.83                   |       | 0.03               |       |                            |
|                         | sulfatic | 5.67                   | 5.703 | 0.06               | 0.06  | 0.36                       |
|                         |          | 5.75                   |       | 0.05               |       |                            |
|                         |          | 5.69                   |       | 0.07               |       |                            |
| CEM I 42.5R + 37% zgură | martor   | 5.34                   | 5.490 | 0.03               | 0.04  | 0.22                       |
|                         |          | 5.62                   |       | 0.03               |       |                            |
|                         |          | 5.51                   |       | 0.05               |       |                            |
|                         | sulfatic | 5.75                   | 5.803 | 0.10               | 0.08  | 0.50                       |
|                         |          | 5.69                   |       | 0.08               |       |                            |

| Tip ciment | Mediu    | Citiri microcomparator |       | Diferența citiri      |       | Expansiune<br>180 zile<br>(mm/m) |
|------------|----------|------------------------|-------|-----------------------|-------|----------------------------------|
|            |          | 180<br>zile            | medie | 180 zile -<br>28 zile | medie |                                  |
|            |          | 5.97                   |       | 0.07                  |       |                                  |
| CEM II/A-S | martor   | 5.78                   | 5.730 | 0.05                  | 0.05  | 0.30                             |
|            |          | 5.70                   |       | 0.06                  |       |                                  |
|            |          | 5.71                   |       | 0.04                  |       |                                  |
|            | sulfatic | 5.48                   | 5.667 | 0.06                  | 0.07  | <b>0.44</b>                      |
|            |          | 5.95                   |       | 0.08                  |       |                                  |
|            |          | 5.57                   |       | 0.08                  |       |                                  |

Tabelul V.79.- Valorile expansiunilor la vârsta de 360 de zile, atac sulfatic agresiv XA3

| Tip ciment                 | Mediu    | Citiri microcomparator |       | Diferența citiri      |       | Expansiune<br>360 zile<br>(mm/m) |
|----------------------------|----------|------------------------|-------|-----------------------|-------|----------------------------------|
|                            |          | 360<br>zile            | medie | 360 zile -<br>28 zile | medie |                                  |
|                            |          | 5.65                   | 5.707 | 0.04                  | 0.04  | <b>0.24</b>                      |
| CEM III/A                  | martor   | 5.63                   |       | 0.04                  |       |                                  |
|                            |          | 5.84                   |       | 0.04                  |       |                                  |
|                            | sulfatic | 5.69                   | 5.723 | 0.08                  | 0.08  | <b>0.48</b>                      |
|                            |          | 5.77                   |       | 0.07                  |       |                                  |
|                            |          | 5.71                   |       | 0.09                  |       |                                  |
| CEM I 42.5R<br>+ 37% zgură | martor   | 5.34                   | 5.493 | 0.03                  | 0.04  | <b>0.24</b>                      |
|                            |          | 5.63                   |       | 0.04                  |       |                                  |
|                            |          | 5.51                   |       | 0.05                  |       |                                  |
|                            | sulfatic | 5.76                   | 5.817 | 0.11                  | 0.10  | <b>0.58</b>                      |
|                            |          | 5.70                   |       | 0.09                  |       |                                  |
|                            |          | 5.99                   |       | 0.09                  |       |                                  |
| CEM II/A-S                 | martor   | 5.79                   | 5.737 | 0.06                  | 0.06  | <b>0.34</b>                      |
|                            |          | 5.71                   |       | 0.07                  |       |                                  |
|                            |          | 5.71                   |       | 0.04                  |       |                                  |
|                            | sulfatic | 5.49                   | 5.680 | 0.07                  | 0.09  | <b>0.52</b>                      |
|                            |          | 5.96                   |       | 0.09                  |       |                                  |
|                            |          | 5.59                   |       | 0.10                  |       |                                  |

Tabelul V.80.- Valorile expansiunilor la vârsta de 720 de zile, atac sulfatic agresiv XA3

| Tip ciment                 | Mediu    | Citiri microcomparator |       | Diferența citiri      |       | Expansiune<br>720 zile<br>(mm/m) |
|----------------------------|----------|------------------------|-------|-----------------------|-------|----------------------------------|
|                            |          | 720<br>zile            | medie | 720 zile -<br>28 zile | medie |                                  |
|                            |          | 5.66                   | 5.713 | 0.05                  | 0.05  | <b>0.28</b>                      |
| CEM III/A                  | martor   | 5.64                   |       | 0.05                  |       |                                  |
|                            |          | 5.84                   |       | 0.04                  |       |                                  |
|                            | sulfatic | 5.71                   | 5.737 | 0.10                  | 0.09  | <b>0.56</b>                      |
|                            |          | 5.78                   |       | 0.08                  |       |                                  |
|                            |          | 5.72                   |       | 0.10                  |       |                                  |
| CEM I 42.5R<br>+ 37% zgură | martor   | 5.35                   | 5.503 | 0.04                  | 0.05  | <b>0.30</b>                      |
|                            |          | 5.64                   |       | 0.05                  |       |                                  |
|                            |          | 5.52                   |       | 0.06                  |       |                                  |
|                            | sulfatic | 5.78                   | 5.833 | 0.13                  | 0.11  | <b>0.68</b>                      |
|                            |          | 5.72                   |       | 0.11                  |       |                                  |
|                            |          |                        |       |                       |       |                                  |

| Tip ciment | Mediu    | Citiri microcomparator |       | Diferența citiri      |       | Expansiune<br>720 zile<br>(mm/m) |
|------------|----------|------------------------|-------|-----------------------|-------|----------------------------------|
|            |          | 720<br>zile            | medie | 720 zile -<br>28 zile | medie |                                  |
|            |          | 6.00                   |       | 0.10                  |       |                                  |
| CEM II/A-S | mortar   | 5.81                   | 5.753 | 0.08                  | 0.07  | <b>0.44</b>                      |
|            |          | 5.72                   |       | 0.08                  |       |                                  |
|            |          | 5.73                   |       | 0.06                  |       |                                  |
|            | sulfatic | 5.51                   | 5.703 | 0.09                  | 0.11  | <b>0.66</b>                      |
|            |          | 5.98                   |       | 0.11                  |       |                                  |
|            |          | 5.62                   |       | 0.13                  |       |                                  |

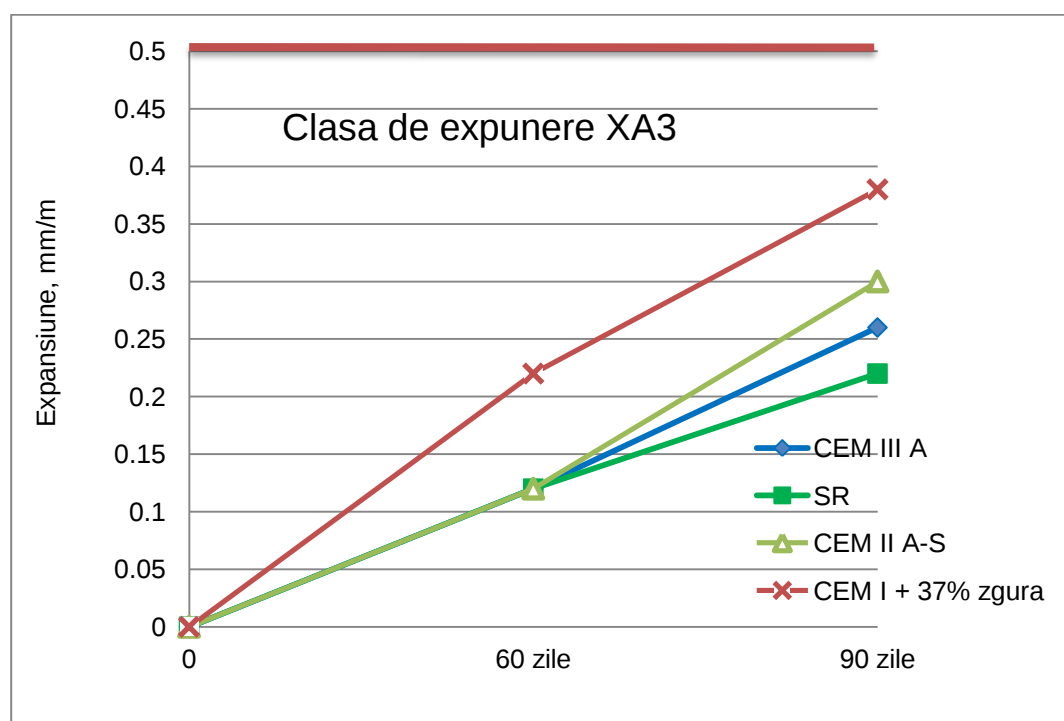


Figura V.92.- Variația expansiunii în clasa de expunere XA3 pentru tipurile de ciment testate

Pentru clasa de expunere XA3 expansiunea cea mai mică la 90 zile a probelor de mortar s-a înregistrat pentru mortarele cu ciment SRI, mai mare cu 18% pentru mortarele cu ciment CEM III/A, depășită cu 36% pentru mortarele cu ciment CEM II/A-S și mai mare cu 72% pentru cele cu ciment CEM I + 37% zgură. Până la 60 zile toate cele trei mortare cu tipuri de cimente diferite au avut aproape aceeași expansiune, cu excepția mortarului cu ciment CEM I + 37% zgură care avut valori semnificativ mai mari.

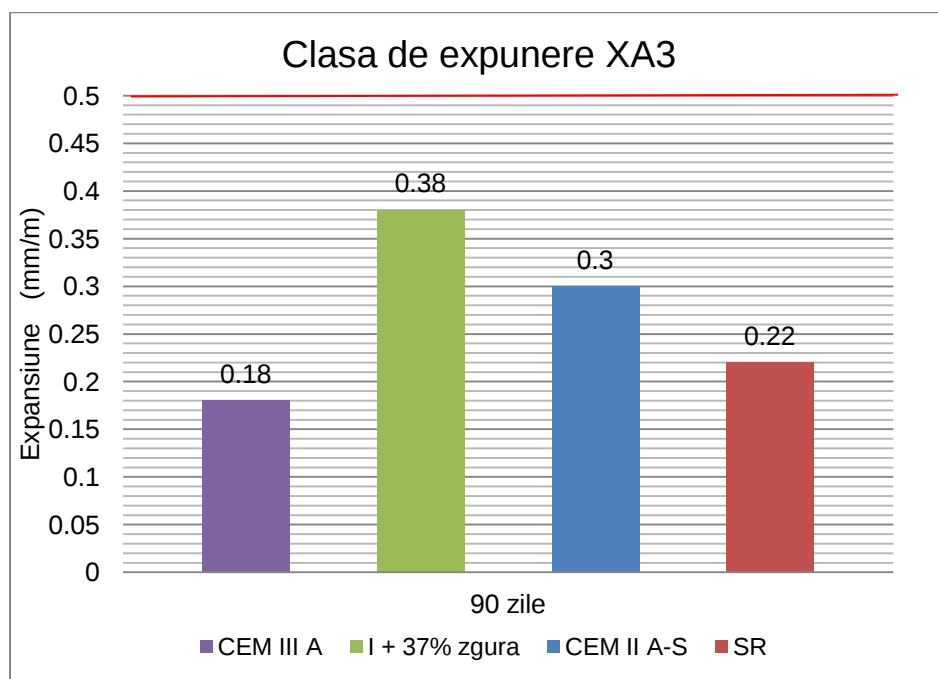


Figura V.93.- Expansiunea în clasa de expunere XA3

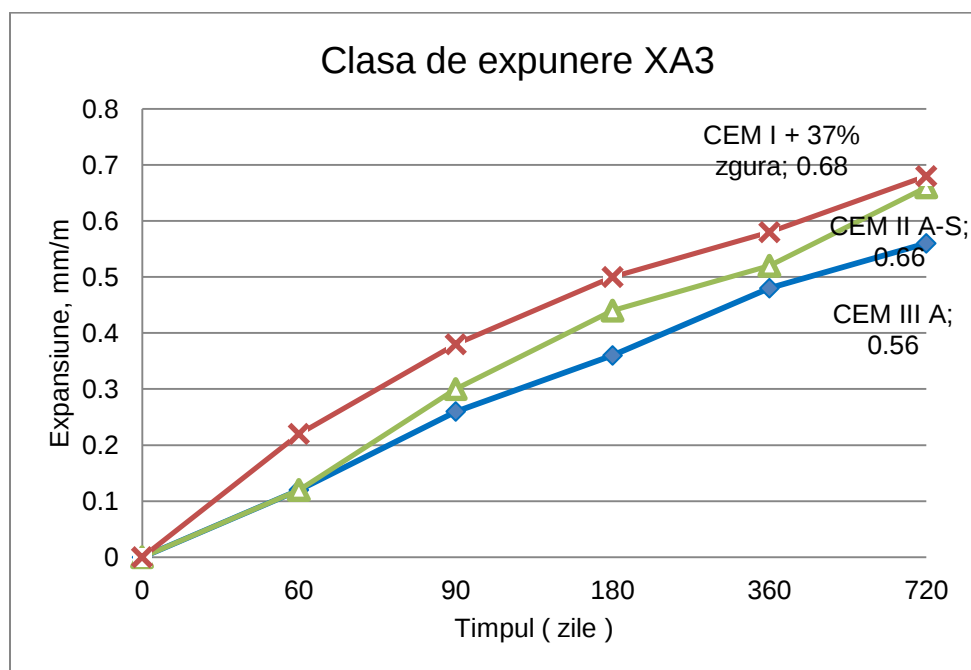


Figura V.94.- Variația în timp a expansiunii mortarelor în clasa de expunere XA3 pentru tipurile de ciment testate

Evoluția de la 28 la 720 zile pentru mortarele studiate cu cele trei tipuri de cimenturi folosite indică cea mai bună comportare pentru mortarele cu CEM III/A, valori cu 18% mai mari pentru cele cu ciment CEM II/A-S și valori cu 21.5% mai mari pentru cele cu ciment CEM I + 37% zgură. Pentru nici unul dintre mortarele studiate nu s-a atins expansiunea admisă de 0.5 mm/m nici în clasa de expunere XA2, nici în clasa de expunere XA3.

În ceea ce privește atacul sulfatic, nu există o reglementare specifică pentru evaluarea acestui risc. Și în acest caz NE 012-1[3] și EN 206 [17] prezintă cerințele compoziționale și de clasă minimă de beton pentru diferite niveluri de agresivități sulfatice. În România, și în acest caz, s-au utilizat, în asemenea medii, cimenturi specifice rezistenței la sulfați, testele care s-au efectuat au fost de lungă durată și vizau mai mult urmărirea evoluției rezistențelor betonului aflat în medii sulfatice. Aplicarea unei metode rapide de evaluare a rezistenței unui ciment la acțiunea sulfatică este necesară în cazul testării unor noi tipuri de cimenturi.

Propuneri de criterii de evaluare pentru rezistența la atacul sulfatic a mortarelor:

- în clasa de expunere XA3:

Valoarea expansiunii probelor de mortar preparate cu cimentul “experimental” trebuie să fie mai mică de 0.5 mm/m, după 90 de zile de menținere într-o soluție 4,4% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

- în clasa de expunere XA2:

Valoarea expansiunii probelor de mortar nu trebuie să depășească 0.5 mm/m după 90 de zile de menținere într-o soluție de 2.37% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

În ambele cazuri trebuie comparate rezultatele obținute cu cele obținute pentru cimenturi rezistente la sulfați, iar diferențele de valori nu trebuie să fie mai mari de 10%.

#### - pentru beton cu CEM I + 37% zgură

Diferențele citirilor dintre 90 zile și 28 zile sunt:

proba 1: 0.08 mm

proba 2: 0.06 mm

proba 3: 0.05 mm

$$m_t (\text{medie}) = 0.06333$$

#### - pentru beton cu SR I

Diferențele citirilor dintre 90 zile și 28 zile sunt:

proba 1: 0.03 mm

proba 2: 0.04 mm

proba 3: 0.04 mm

$$m_r (\text{medie}) = 0.03667$$

$$0.06333 \leq 1.1 \times 0.03667 = 0.040334$$

(criteriu neîndeplinit)

Tabelul V.81. - Criterii prescriptive pentru betoane rezistente la atac sulfatic, chimic

| Clase de expunere / Normativ | XA1                                                                                    | XA2                                                                                                                   | XA3                                                                                                                   |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Standard EN 206 [17]         | Criteriu                                                                               | Criteriu                                                                                                              | Criteriu                                                                                                              |
|                              | a/c maxim 0,55<br>clasa rezist minimă C30/37<br>dozaj cim. minim 300 kg/m <sup>3</sup> | a/c maxim 0,50<br>clasa rezist minimă C30/37<br>dozaj cim. minim 320 kg/m <sup>3</sup><br>Ciment rezistent la sulfați | a/c maxim 0,45<br>clasa rezist minimă C35/45<br>dozaj cim. minim 360 kg/m <sup>3</sup><br>Ciment rezistent la sulfați |
|                              | 0                                                                                      | 0                                                                                                                     | 0                                                                                                                     |
| Normativ NE 012-1 [3]        | Criteriu                                                                               | Criteriu                                                                                                              | Criteriu                                                                                                              |
|                              | a/c maxim 0,55<br>clasa rezist minima C25/30<br>dozaj cim. minim 300 kg/m <sup>3</sup> | a/c maxim 0,50<br>clasa rezist minima C35/45<br>dozaj cim. minim 320 kg/m <sup>3</sup>                                | a/c maxim 0,45<br>clasa rezist minima C35/45<br>dozaj cim. minim 360 kg/m <sup>3</sup>                                |
|                              | 0                                                                                      | 0                                                                                                                     | 0                                                                                                                     |

Legenda: X = criteriu îndeplinit  
0 = criteriu neîndeplinit

---

## Concluzii:

În acest studiu au fost aplicate diferite metode de evaluare a durabilității betonului, metode descriptive și de performanță. S-au aplicat metodele pentru cazul unor betoane având același conținut de zgură, dar în componența cimentului și respectiv a betonului.

Metoda de determinare a indicelui de activitate permite calcularea unui raport  $a/c$  echivalent în cazul utilizării adaosurilor în betoane.

Prin aplicarea metodei s-a putut stabili valoarea coeficientului de activitate  $k$  și pe baza acestuia s-au întocmit rețetele de beton cu adaosuri.

În ceea ce privește rezistența la compresiune, aceasta a fost asemănătoare pentru cele două compoziții, acestea încadrându-se în aceeași clasă de rezistență.

Aplicarea metodelor de performanță pentru determinarea rezistenței la carbonatare utilizând compoziția cu ciment II/A-S, respectiv cu ciment III/A ca ciment de referință, a scos în evidență că betonul cu aceeași cantitate de zgură, dar în beton, nu atinge performanțe similare.

Aceleași concluzii au rezultat și prin aplicarea rezistenței la îngheț-dezgheț a betonului.

În concluzie, se poate afirma că pentru asigurarea aceleași durate de viață a construcțiilor din beton, metodele prescriptive de tip "deem to satisfy", în general, dar și particularizate la conceptul raport  $a/c$  echivalent în cazul utilizării adaosurilor, trebuie completate cu aplicarea unor metode de performanță.

Rezultatele acestui studiu experimental au evidențiat următoarele concluzii:

- ✓ există diferențe evidente privind caracteristicile betonului proaspăt și întărit în funcție de tipul cimentului utilizat, pentru același tip și procent de adaos, când este introdus separat în beton sau în ciment;
- ✓ chiar dacă s-a determinat un raport echivalent  $a/(c+k \cdot \text{adaos})$  pentru betoanele candidat egal cu raportul  $a/c$  al betoanelor de referință încercările experimentale și aplicarea metodelor de performanță au evidențiat comportări diferite pentru care nu au fost îndeplinite aceleași criterii;
- ✓ se impune întotdeauna pentru validarea unui beton "experimental" obligativitatea efectuării testelor standardizate concomitent cu aplicarea metodelor de performanță;
- ✓ utilizând dozaje de ciment diferite, cantități diferite de adaosuri, clase de beton diferite și rapoarte  $a/c$  diferite, cea mai bună comportare au avut-o, așa cum era și previzibil, betoanele cu raport  $a/c$  mic, chiar cu procent mai mare de adaos. Raportul  $a/c$  reprezintă un parametru definitoriu al comportării betonului în funcție de care trebuie să se caracterizeze fiecare proprietate a betonului proaspăt și întărit și de durabilitate;
- ✓ extinderea domeniilor de utilizare a cimenturilor compozite presupune extinderea cercetărilor experimentale și aprecierea (interpretarea) rezultatelor obținute pe baza unor criterii unitare naționale și europene (internaționale).



---

## CAPITOLUL VI.

### PROPUNERI DE REVIZUIRE A PROCEDEELOR EXPERIMENTALE PENTRU STABILIREA DOMENIILOR DE UTILIZARE A CIMENTURILOR FABRICATE IN ROMANIA

Din punct de vedere istoric, betonul armat a fost considerat multă vreme durabil pe o perioadă neprestabilă inițial în care materialul trebuia să se găsească într-o stare de funcționare acceptabilă. Deși există multe adevăruri în acest sens, mediul înconjurător poate scurta în mod inevitabil durata de viață a betonului armat, ducând la reparații costisitoare și la întreruperea funcționalității construcțiilor. Când ne gândim la un beton durabil, ne amintim de Panteonul din Roma și de faptul că această structură rezistă de peste 2000 de ani. Materialele de construcție moderne ar trebui să fie adecvate pentru a acoperi o durată de serviciu de 50 sau 100 de ani. Explicația longevității acestui vestigiu al trecutului se datorează trăinicieii betonului folosit, condițiilor blânde ale mediului din acea zona geografică care nu au intervenit în deteriorarea acestei structuri, precum și faptului că este realizat din beton simplu, în cele mai multe cazuri problemele de durabilitate apar în cazul betonului armat.

Problema destul de complexă a aprecierii durabilității betonului apare datorită diferențelor relativ mari care apar între rezultatele cercetării din laborator ale proprietăților betonului, elementelor și structurilor (în condiții standard de temperatură, umiditate și presiune) și comportarea reală în structură, unde tehnologia de execuție, mediul de expunere și condițiile de exploatare au un rol esențial. Durabilitatea betoanelor preparate cu materiale de tip cimentoid este influențată de caracteristicile clincherului și tipul adaosului, chiar de sursa din care provin, dozajul de ciment, raportul a/c, finețea de măcinare a cimentului și domeniul granulometric, ponderea adaosului mineral și de durata și eficiența tratării ulterioare punerii în operă.

Durabilitatea betonului sau, mai corect, lipsa de durabilitate în unele dintre condițiile de expunere mai severe, este încă o problemă la nivel mondial. Multe structuri prezintă un grad de deteriorare avansat într-un timp prea scurt, ceea ce duce la cheltuieli neplanificate pentru reabilitarea lor. În ciuda multor ani de cercetare, aceste probleme continuă să apară. Acest lucru ridică semne de întrebare asupra metodelor actuale de a proiecta structuri cu o durată de viață acceptabilă și previzibilă. Cauza dominantă a deteriorării premature a structurilor din beton este coroziunea armăturii datorită carbonatării betonului sau a penetrării clorurilor în beton, așa cum se prezintă figura VI.1.

Cercetările din acest domeniu au fost extinse pentru a nu continua, să folosim o abordare prescriptivă relativ empirică, considerată a fi satisfăcătoare pentru proiectarea durabilității atunci când ar trebui să fie evident, din observarea structurilor existente, că este necesară o abordare mai riguroasă. Acest lucru este deosebit de important pentru structurile care necesită o durată lungă de viață. Mehta a considerat că betonul armat cu micro-fisuri discontinue expus în condiții severe este afectat de factorii de mediu care determină propagarea micro-fisurilor până devin continue. Ulterior, progresarea fisurării (care depinde de rezistența la fisurare) accelerează

pătrunderea substanțelor agresive în beton, care la rândul său activează unul sau mai multe alte mecanisme de deteriorare.

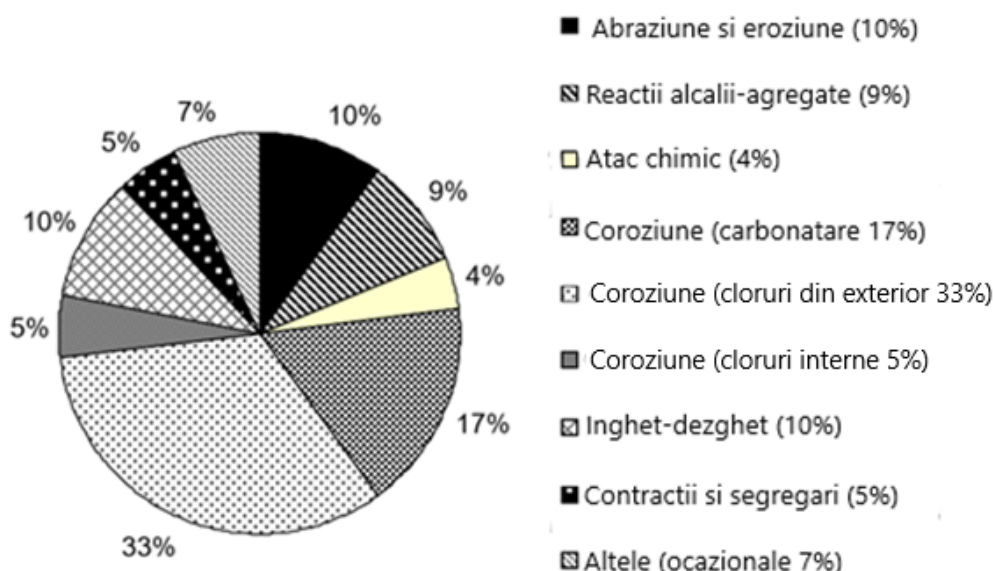


Figura VI.1.- Cele mai frecvente mecanisme de deteriorare ale structurilor din beton armat

Prin urmare, evaluarea proprietăților de permeabilitate in situ ale stratului de acoperire cu beton a armăturilor permite o bună estimare a durabilității structurilor din beton armat. Determinarea absorbției de apă, a permeabilității aerului și a difuziunii clorurilor în betonul de suprafață și rezistențele mecanice ale acestui beton în timp reprezintă metode de încredere pentru cuantificarea performanței de durabilitate, descrise în figura VI.2.

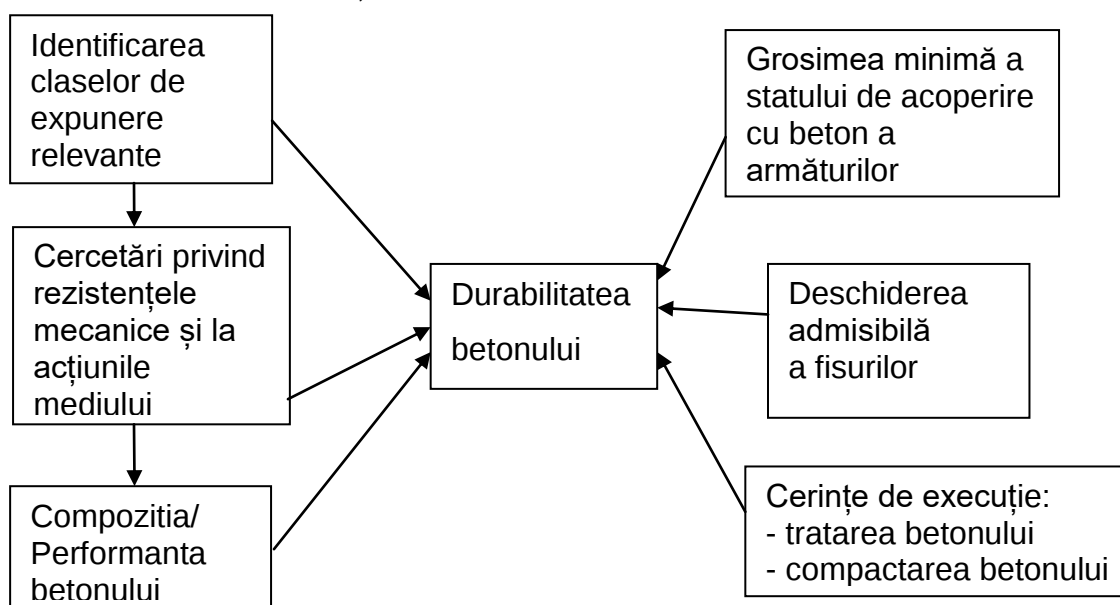


Figura VI.2. - Elemente care asigură durabilitatea betoanelor cu cimenturi compozite

Abordările bazate pe performanță pentru durabilitatea betonului oferă avantajul de a stabili parametri de testare relevanți pentru cantitatea și calitatea stratului de acoperire cu beton al armăturilor, care sunt principalele aspecte pe care le vom lua în considerare la proiectarea structurilor de beton pentru prevenirea coroziunii armăturilor.

---

Utilizarea extinsă a betonului din ultimul secol în tipuri foarte variate de structuri, în condiții de exploatare din cele mai diferite și modul de comportare al acestora în timp a condus la constatarea unor degradări numeroase ale elementelor din beton armat datorită unor factori de exploatare (solicitările exterioare, eforturile interne și abraziunea) și factori de mediu (coroziunea armăturilor, atacul clorurilor sau sulfatilor, umezirea alternativă, cicluri de îngheț-dezghet, acțiunea de levigare a apei, acțiunea acizilor, cristalizarea sărurilor și reacția agregatelor cu cimentul). Procesele care conduc la deteriorarea betonului pot fi eliminate sau reduse prin alegerea corectă a constituenților, o compoziție adecvată, o dozare corectă și prin turnare, protejare și tratare corespunzătoare.

## **VI. 1. Analiza actualelor reglementări naționale privind asigurarea durabilității**

### **VI.1.1. Identificarea claselor de expunere relevante**

Betonul este materialul de construcție utilizat pentru o varietate de aplicații cum ar fi clădirile de locuințe, poduri, autostrăzi, tuneluri, structuri industriale, baraje, platforme marine etc. Această gamă largă de utilizări își are explicația în avantajele bine cunoscute ale betonului, cum ar fi disponibilitatea ușoară a componentelor, proprietăți adecvate pentru o varietate de aplicații structurale, adaptabilitate, versatilitate, cost relativ scăzut etc. Mai mult, betonul are un avantaj ecologic excelent în comparație cu alte materiale de construcție. Odată cu extinderea continuă a infrastructurii și a construcțiilor de locuințe, în special în țările în curs de dezvoltare din Asia, Africa și America de Sud, viteza de consum a cimentului și a betonului crește și va continua să crească.

În timp ce această creștere spectaculoasă a avut loc în producția de beton, problema deteriorării timpurii a unora dintre structurile din beton armat și beton precomprimat a intrat în prim plan în ultimii ani. S-a constatat că unele structuri recent construite - chiar și cele construite conform celor mai recente specificații - au arătat semne timpurii de avariere, uneori în câțiva ani de la punerea în funcțiune, în timp ce câteva structuri construite cu mai mult de o jumătate de secol în urmă sunt încă într-o stare bună de funcționare.

Fenomenul deteriorării timpurii a structurilor de beton tinde să atingă proporții îngrijorătoare în unele țări, în special cele care se confruntă cu condiții meteorologice ostile. În majoritatea țărilor avansate, aproape 40% din bugetul industriei construcțiilor este cheltuit pentru remedierea deficiențelor structurale și/sau funcționale, repararea, restaurarea și consolidarea structurilor de beton deteriorate. Toate acestea au afectat imaginea betonului de material "durabil fără întreținere". Astfel, durabilitatea betonului a devenit astăzi o problemă importantă.

Din fericire, betonul, care este materialul cel mai utilizat pe scară largă, posedă potențialul de a fi utilizat într-un mod ecologic benefic. A devenit evident că utilizarea materialelor suplimentare pe bază de ciment, cum ar fi cenușa zburătoare, zgura granulată de furnal măcinată, metakaolinul, praful de silice etc., nu numai că ajută la reducerea utilizării cimentului Portland - reducând astfel emisiile de gaze cu efect de seră - dar îmbunătățesc de asemenea o serie de proprietăți ale betonului, inclusiv durabilitatea acestuia. Utilizarea materialelor cementoide

suplimentare, fie sub formă de cimenturi compozite, fie ca adaosuri separate în beton, este în continuă creștere.

Având în vedere tendința deteriorării premature a structurilor din beton armat și luarea în considerare a necesității de a asigura durabilitatea, reglementările privind durabilitatea betonului au devenit stricte. Pentru cuantificarea acestor degradări ale structurii betonului și coroziunii armăturilor din elementele de beton armat a fost necesară încadrarea elementelor în clase de expunere la acțiunea mediului înconjurător. În normativul EN 206 [17] sunt definite cele 6 categorii de expunere reprezentative cu 18 clase corespunzătoare care țin seama de intensitatea agresiunii mediului înconjurător.

Tabelul VI.1. – Valorile limită recomandate pentru compoziția și proprietățile betonului (tabelul F1 din EN 206 [17])

|                                           | Clasele de expunere                |                                 |        |        |        |                               |        |        |                                          |        |        |
|-------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|-------------------------------|--------|--------|------------------------------------------|--------|--------|
|                                           | Nici un risc de coroziune sau atac | Coroziune datorată carbonatării |        |        |        | Coroziune datorată clorurilor |        |        |                                          |        |        |
|                                           |                                    |                                 |        |        |        | Apa de mare                   |        |        | Cloruri din alte surse decât apa de mare |        |        |
|                                           |                                    | X0                              | XC1    | XC2    | XC3    | XC4                           | XS1    | XS2    | XS3                                      | XD1    | XD2    |
| Raportul apă/ciment maxim <sup>c</sup>    | -                                  | 0,65                            | 0,60   | 0,55   | 0,50   | 0,50                          | 0,45   | 0,45   | 0,55                                     | 0,55   | 0,45   |
| Clasa de rezistență minimă                | C12/15                             | C20/25                          | C25/30 | C30/37 | C30/37 | C35/45                        | C35/45 | C35/45 | C30/37                                   | C30/37 | C35/45 |
| Dozajul minim de ciment kg/m <sup>3</sup> | -                                  | 260                             | 280    | 280    | 300    | 300                           | 320    | 340    | 300                                      | 300    | 320    |
| Conținutul minim de aer %                 | -                                  | -                               | -      | -      | -      | -                             | -      | -      | -                                        | -      | -      |

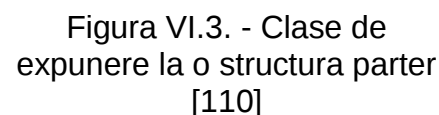
|                                           | Clasele de expunere                                                               |                  |                  |                  |                                              |                                          |        |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------|--------|
|                                           | Atac îngheț-dezgheț                                                               |                  |                  |                  | Agresivitate chimică a mediului înconjurător |                                          |        |
|                                           | XF1                                                                               | XF2              | XF3              | XF4              | XA1                                          | XA2                                      | XA3    |
| Raportul apă/ciment maxim <sup>c</sup>    | 0,55                                                                              | 0,55             | 0,50             | 0,45             | 0,55                                         | 0,50                                     | 0,45   |
| Clasa de rezistență minimă                | C30/37                                                                            | C30/37           | C30/37           | C30/37           | C30/37                                       | C30/37                                   | C35/45 |
| Dozajul minim de ciment kg/m <sup>3</sup> | 300                                                                               | 300              | 320              | 340              | 300                                          | 320                                      | 360    |
| Conținutul minim de aer %                 | -                                                                                 | 4,0 <sup>a</sup> | 4,0 <sup>a</sup> | 4,0 <sup>a</sup> | -                                            | -                                        | -      |
| Alte cerințe                              | Agregate în conformitate cu EN 12620 cu o rezistență suficientă la îngheț-dezgheț |                  |                  |                  |                                              | Ciment rezistent la sulfați <sup>b</sup> |        |

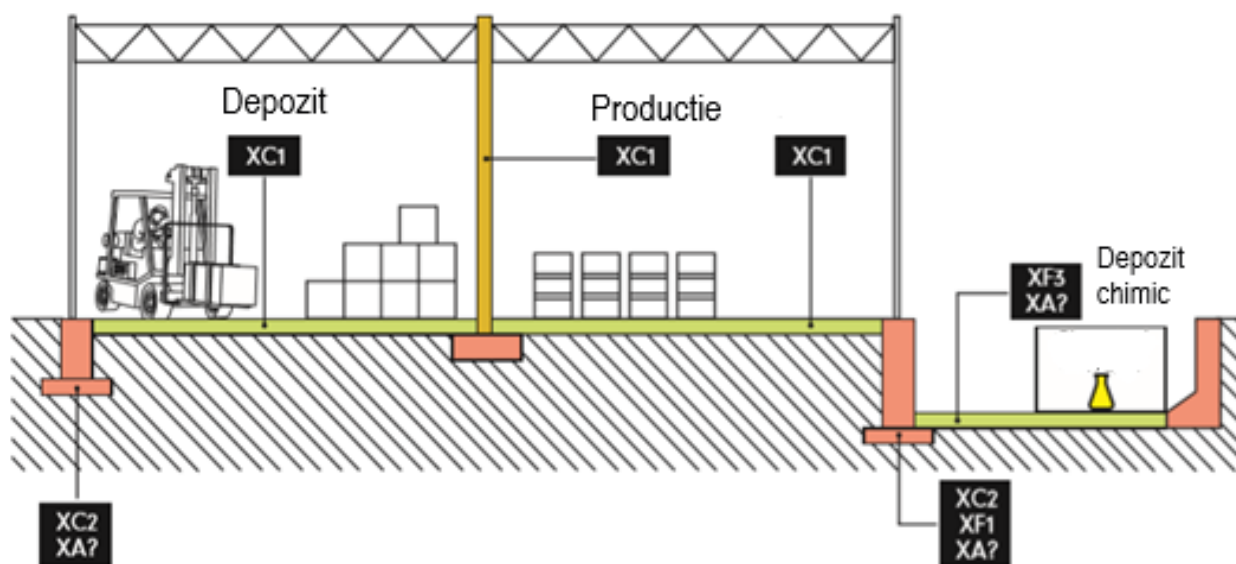
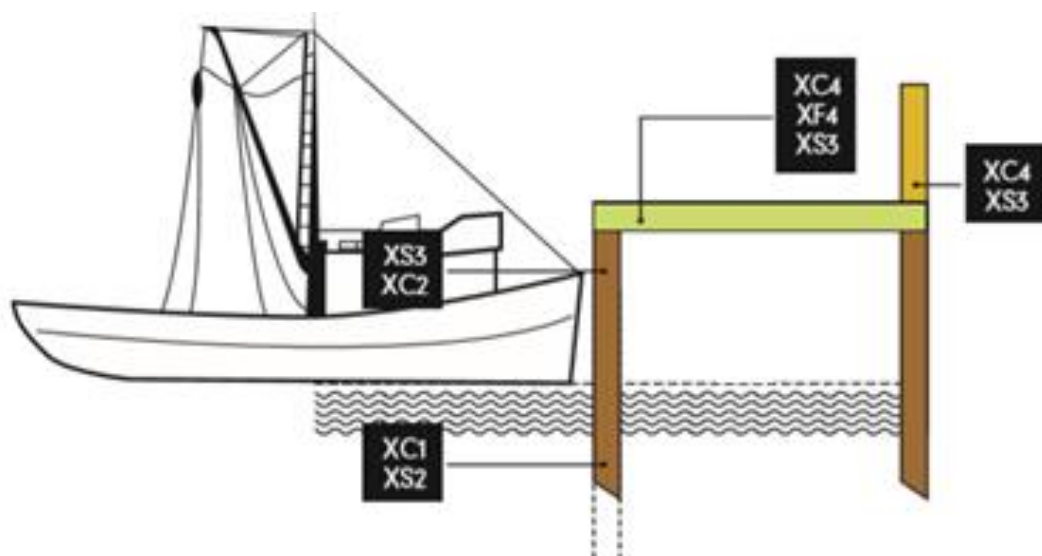
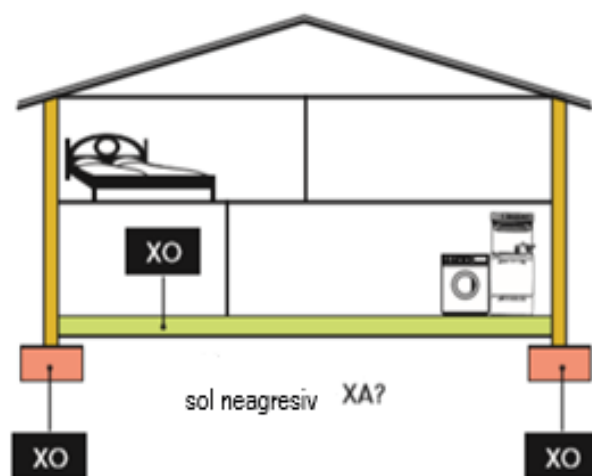
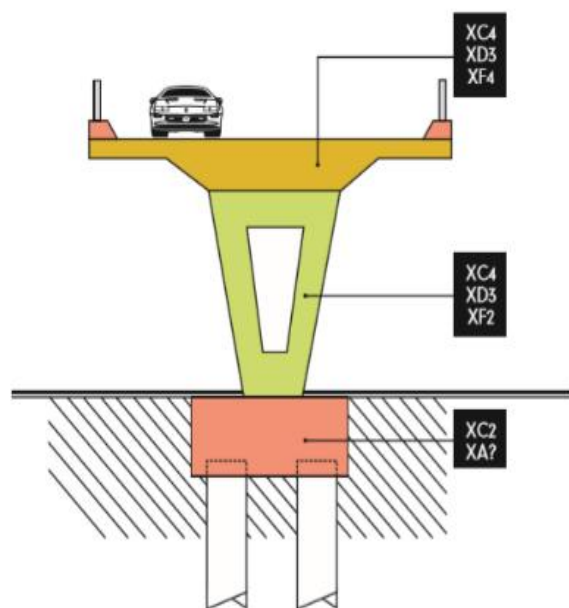
<sup>a</sup> Dacă betonul nu conține aer antrenat, atunci performanța betonului trebuie să fie măsurată utilizând o metodă de încercări adecvată, prin comparație cu un beton, pentru care rezistența la îngheț-dezgheț, pentru clasa de expunere corespunzătoare a fost stabilită.

<sup>b</sup> Când prezența de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> conduce la o clasă de expunere XA2 și XA3 este esențial să fie utilizat un ciment rezistent la sulfați. În conformitate cu EN 197-1 sau standarde naționale complementare

<sup>c</sup> Când este aplicat conceptul valorii k, raportul maxim apă/ciment și dozajul minim de ciment se modifică în conformitate cu 5.2.5.2.

În aplicarea practică a riscurilor asupra durabilității betonului există dificultăți în respectarea prescripțiilor prevăzute în standardul EN 206 [17] pentru o structură simplă de beton, cum ar fi o locuință normală unde ar trebui utilizate teoretic cinci amestecuri de beton diferite. Trebuie avut în vedere că alegerea clasei de rezistență se face și pe criterii structurale selectându-se clasa de rezistență maximă dintre clasele de rezistență corespunzătoare criteriului structural și respectiv celui de durabilitate.





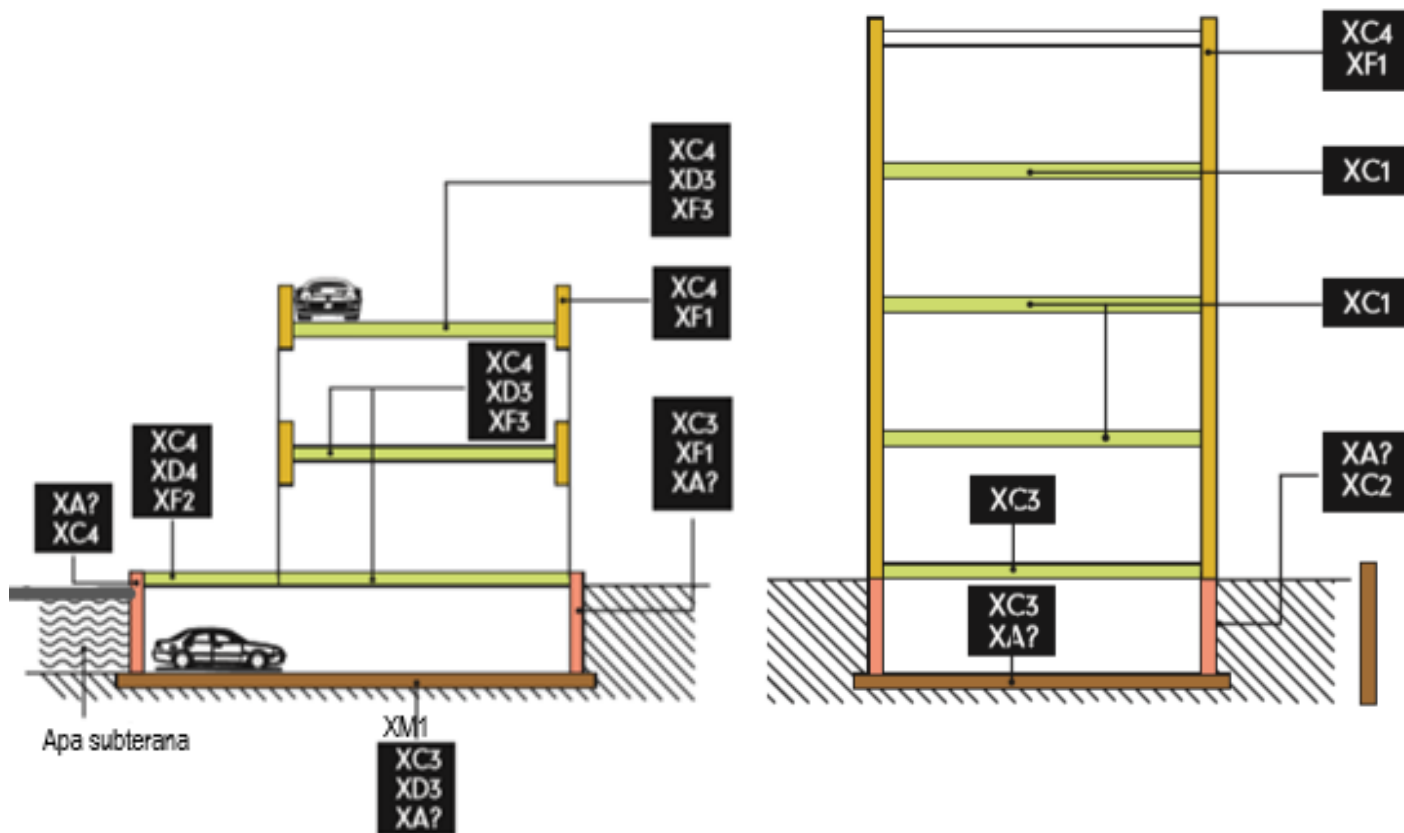


Figura VI.4. Exemple de structuri cu clase de expuneri specifice [108], [109]

Clasele de expuneri, care sunt o necesitate atât pentru specificațiile prescriptive, cât și pentru cele de performanță, ar trebui să fie suficient de clare și de lipsite de ambiguități încât, în mod rezonabil, doi specialiști diferiți (arhitecți, ingineri) să poată atribui aceeași clasă de expunere la elementele unei anumite structuri proiectate.

### VI.1.2. Măsurile necesare în vederea asigurării durabilității

Încă din cele mai vechi timpuri ale faimosului arhitect roman Marco Vitruvio Pollione, care a practicat în ultimii 50 de ani ai secolului I î.Hr., majoritatea codurilor de construcții din beton au aplicat cerințe prescriptive pentru a asigura durabilitatea structurilor. În tratatul său de arhitectură, în scopul de a realiza construcții din beton roman durabil în special în contact cu apa, Vitruvio a specificat tipul de liant (var-inclusiv procesul corect pentru a-l produce, precum și proporția puzzolană/var), calitatea nisipului, proporția de var/nisip, precum și indicații cu privire la modul în care elementele au trebuit să fie construite. Aproximativ 100 de ani mai târziu, Plinio cel bătrân a recomandat să folosească cât mai puțină apă pentru a produce betonul roman și să fie compactat bine.

Cerințele pentru fiecare clasă de expunere sunt specificate în ceea ce privește tipurile și categoriile materialelor constitutive, raportul maxim apă/ciment, conținutul minim de ciment, clasa minimă de rezistență la compresiune a betonului și, dacă este cazul, conținutul minim de aer în beton și în normativul NE 012-1 [3]. Aceste valori se bazează pe ipoteza unei durate de viață preconizate a structurii de 50 ani. « Valorile din tabelul F1 corespund utilizării cimenturilor curente

---

în conformitate cu SR EN 197-1 [8] pentru care aptitudinea de utilizare într-o clasă de expunere dată a fost stabilită prin dispoziții în vigoare la locul de utilizare a betonului și a unor agregate de densitate normală pentru care  $D_{max}$  este cuprins în intervalul 20 mm și 32 mm ». Clasele de rezistență minime au fost derivate din relația dintre raportul apă/ciment și clasa de rezistență a betonului realizat cu ciment de clasă de rezistență 32.5R.

Dispozițiile valabile la locul de utilizare a betonului ar trebui să includă cerințele presupunând o durată de serviciu de cel puțin 50 de ani în condiții de întreținere anticipate. Pentru o durată de serviciu mai scurtă sau mai lungă, pot fi necesare cerințe mai puțin exigente respectiv mai severe. În aceste cazuri sau pentru compoziții specifice ale betonului sau cerințe specifice de protecție împotriva coroziunii pentru grosimea stratului de acoperire cu beton al armăturii, se vor lua în considerare recomandări deosebite pentru un anumit amplasament sau se va ține cont de dispozițiile naționale în vigoare.

Influențele mediului considerate pentru evaluarea durabilității structurilor de beton în EN 1992-1-1 [33] se referă în principal la:

- a) o durată de serviciu de 50 de ani,
- b) o supraveghere "normală" în timpul execuției,
- c) inspecția și întreținerea "normală" în timpul utilizării.

În ceea ce privește deteriorarea betonului și coroziunea armăturii din oțel din cauza unui mediu potențial agresiv, proiectantul trebuie să identifice condițiile anticipate ale mediului în care va fi exploatată structura "... pentru a lua măsuri corespunzătoare de protecție a materialelor utilizate în structură ...".

Regulile referitoare la diferite clase de expunere ale elementelor structurale sunt prezentate în: EN 206-1 Anexa F [17] pentru: a) clasa minimă de rezistență a betonului; b) compoziția betonului; c) raportul maxim apă/ciment; d) conținutul minim de ciment pe  $m^3$  de beton și în EN 1992-1-1 [33] pentru e) acoperirea minimă a betonului pentru armături și, pentru clasele de expunere mai critice, f) deschiderea admisibilă a fisurilor. În ambele standarde EN 1992-1-1 [33] și EN 206 [17], rezistența betonului este folosită ca o măsură indirectă a durabilității betonului, pe baza ipotezei conform căreia, o rezistență mai mare implică un beton mai compact și determină o durabilitate mai mare.

Normativul NE 012-1 [3] și standardul european pentru beton EN 206 [17], includ cerințe de durabilitate încadrate în principal în ceea ce privește limitele compoziționale recomandate pentru valorile maxime ale raportului a/c pentru diferite clase de expunere și conținuturile minime de ciment, dar nu se face nici o distincție între cimenturile de diferite clase de rezistență sau cu diferite tipuri de adaosuri. Varietatea tipurilor de ciment specificate în standardul european pentru ciment, SR EN 197-1 [8], va produce o gamă largă de rezistențe ale betonului atunci când se îndeplinesc cerințele limită specificate pentru o anumită categorie de expunere.

Deși raportul apă-ciment poate fi cel mai indicat parametru pentru caracterizarea unui singur tip de ciment, ar trebui să se specifice și rezistența (mai ușor de verificat) în cazul unei

durabilități comparabile a betonului cu o gamă largă de tipuri de ciment. În plus, se ține seama în mod limitat de calitatea execuției și de metodele de construcție și riscul de deteriorarea prematură există chiar și atunci când se respectă specificațiile "prescriptive". Acest lucru evidențiază necesitatea adoptării unor specificații bazate pe performanță și o abordare bazată pe costurile estimate pe durata de serviciu.

Marea majoritate a reglementărilor naționale actuale privind betonul structural sunt, în esență, "prescriptive", prin faptul că precizează valorile limită ale următorilor patru parametri pentru condițiile de expunere definite în normative:

- dozajul minim de ciment;
- raportul maxim apă/ciment;
- clasa minimă de beton;
- acoperirea armăturilor cu beton.

Abordările tradiționale de proiectare a durabilității se bazează pe valorile limită prescrise pentru parametrii prescriptivi ai compoziției selectate (cum ar fi raportul apă/liant, rezistența la compresiune și conținutul de ciment) nu reușesc să caracterizeze în mod adecvat rezistența betonului la carbonatare sau la penetrarea clorurilor, deoarece ignoră în mare măsură performanța diferită a diferitelor tipuri de adaosuri minerale adăugate în ciment sau în beton, precum și tipul de agregat, și nu permit să se ia în considerare influențele execuției in situ în timpul procesului de construcție. Abordările prescriptive nu pot, în mod explicit, să țină cont de o durată de viață rațională.

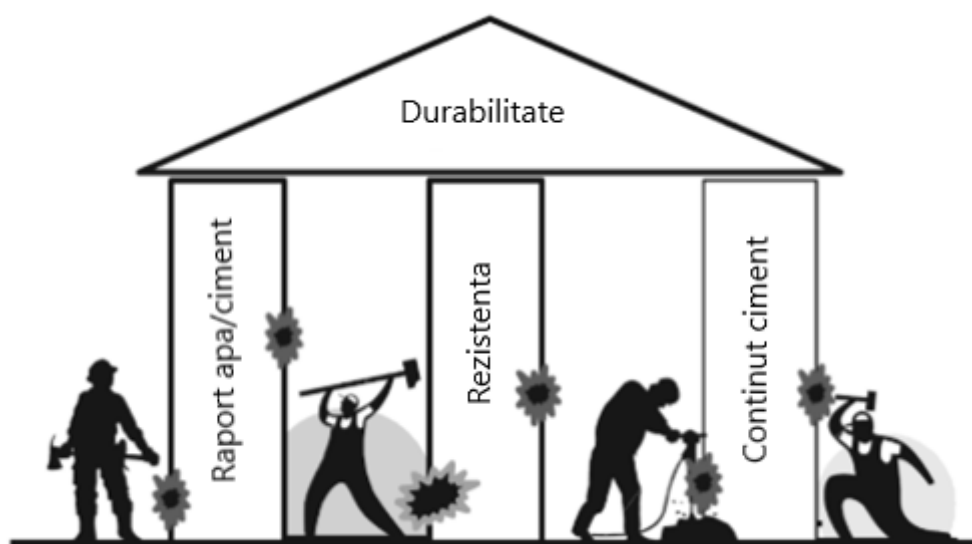


Figura VI.5. - Trei parametri importanți în codul european EN 206 [17] pentru a garanta structuri de beton durabile: raportul apă/ciment, conținutul de ciment și rezistența la compresiune

Indicatorii de durabilitate considerați în majoritatea codurilor, adică rezistența la compresiune, raportul maxim de apă/ciment și conținutul minim de ciment pot fi inadecvate pentru a asigura o protecție suficientă a structurilor de beton împotriva mediilor celor mai

---

agresive. Prin urmare, codurile și standardele prescriptive pot greși în realizarea unor compoziții de beton potențial durabile. În special, acești indicatori de durabilitate sunt legați de viteza cu care substanțele agresive pătrund în beton și își dezvoltă acțiunile.

În cele mai multe coduri de execuție nu sunt prevăzute verificări in situ ale permeabilității și grosimii stratului de acoperire cu beton a armăturii chiar dacă acestea condiționează în mare măsură durata de viață a construcțiilor din beton armat.

Abordările de performanță, prin contrast, se bazează pe măsurarea proprietăților materialului care pot fi legate de mecanismele de deteriorare în condițiile de expunere predominante. Măsurarea proprietăților reale ale betonului din structurile existente permite contabilizarea influențelor combinate ale compoziției, a procedurilor de construcție și a influențelor mediului și, prin urmare, formează o bază rațională pentru predicția durabilității și estimarea duratei de viață.

Abordările de performanță pentru evaluarea rezistenței structurii împotriva coroziunii armăturii pot fi aplicate în diferite etape și în scopuri diferite (inclusiv la proiectarea și evaluarea conformității structurii construite) presupunând aspecte importante luate în considerare: criterii ale stărilor limită, modele de predicție a duratei de viață, mecanisme de deteriorare, metode de testare a performanței și aplicarea lor, interpretări și limitări, o strategie pentru întreținere și reparații și acțiuni adecvate în caz de neconformitate (metode de control a calității).

Proprietățile materialelor cimentoide sunt parametri-cheie pentru estimarea calității și grosimii stratului de acoperire cu beton al armăturilor, deoarece mecanismele de deteriorare (pătrunderea clorurii sau carbonatarea) se referă la ușurința cu care se poate deplasa un fluid sau ioni prin microstructura betonului. În practica inginerescă, abordările de performanță sunt adesea utilizate în combinație cu cerințele prescriptive. Standardul european EN 206 [17] tratează durabilitatea betonului în întregime pe baza specificațiilor prescriptive, deși se referă la metodele de proiectare bazate pe performanța betonului ca metode alternative, fiind explicate în standard numai principiile.

Principalele motive sunt, pe de o parte, că experiențele cu aceste concepte sunt disponibile numai în câteva state europene și, pe de altă parte, cerințele de bază pentru parametrii de durabilitate sunt atât de diferite, că și definiția unui beton de referință general este imposibilă. Betonul de referință trebuie să respecte dispozițiile valabile în locul de utilizare pentru clasa de expunere selectată, iar proporțiile betonului candidat pot varia față de cele ale betonului de referință.

În prezent, având în vedere utilizarea diferitelor tipuri de materiale cimentoide suplimentare în beton, definirea raportului apă/ciment nu este simplă. Codul european EN 206 [17] consideră acesta problemă prin adoptarea coeficientului de eficiență  $k$ , conceptul care pare să funcționeze în multe cazuri, deși se discută despre validitatea generală a valorii lui  $k$ , determinat în principal pe baza rezistenței betonului, și legătura cu comportamentul de durabilitate nu este întotdeauna simplă.

---

Deși s-au făcut numeroase încercări de introducere a specificațiilor bazate pe performanță în codurile de proiectare, acest lucru a fost împiedicat de lipsa unor proceduri de testare adecvate și standardizate care să poată evalua caracteristicile de performanță necesare împreună cu limitele de conformitate ale performanței betonului. Această performanță trebuie evaluată în condiții de laborator (performanță potențială), precum și pe structura finală și deși în principiu este simplu, căutarea criteriilor de performanță a durabilității absolute este complicată, cu obstacole fundamentale.

Validarea ar trebui să fie relativ simplă, dar durabilitatea diferă într-un mod esențial față de performanța structurală prin factorul - timp. Modelele și ecuațiile pentru predicția comportamentului structural pot fi testate imediat într-un laborator. Modelele de durabilitate necesită testarea pe perioade lungi de timp sau pe perioade mai scurte, utilizând metode accelerate. Cimentul poate continua să hidrateze timp de mai mulți ani, iar proprietățile betonului vor fi influențate de starea de expunere.

Este evident că sunt necesare proceduri de testare, astfel încât acele proprietăți ale betonului care asigură durabilitatea pe termen lung să poată fi determinate foarte devreme în viața unei structuri și să îndeplinească cerințele specifice. Lipsa unor metode adecvate, acceptate la nivel european sau internațional, de testare a performanțelor betonului este unul dintre principalii factori care inhibă trecerea de la abordările prescriptive, considerate satisfăcătoare, la specificațiile bazate pe performanță.

## **VI.2. Necesitatea revizuirii actualelor prevederi ale reglementărilor naționale privind asigurarea durabilității**

### **VI.2.1. Particularități ale betoanelor preparate cu cimenturi compozite**

Utilizarea materialelor reciclate sau SCM-urilor, au promovat proiectarea unor betoane mai sofisticate care nu sunt un amestec simplu de ciment, apă și agregate, și includ, de asemenea, amestecuri diferite de materiale cimentoide suplimentare, mai multe tipuri diferite de aditivi și filere. Specificațiile de performanță deschid o nouă perspectivă pentru dezvoltarea unor astfel de betoane. Există un consens cu privire la această realitate care ar trebui să se schimbe pentru a realiza structuri de beton mai durabile. Cu toate acestea, specificațiile de performanță trebuie să se bazeze pe dovezi științifice că performanța dorită poate fi și atinsă.

#### *Porozitatea, distribuția porilor și densitatea*

Porozitatea și distribuția dimensiunii porilor sunt de o importanță fundamentală pentru practic toate proprietățile materialelor de construcție preparate cu ciment și sunt relevante pentru durabilitate. Aceasta se datorează faptului că, de regulă, agenții dăunători pătrund în materialul de construcție prin pori. Rezistența betonului la penetrarea substanțelor agresive, adică impermeabilitatea betonului, joacă, prin urmare, un rol determinant în durabilitatea lui. Porozitatea și structura porilor constituie factorul de bază care influențează permeabilitatea betonului definită prin conținutul porilor capilari interconectați, formând căi continue în acest material compozit.

Efectul important asupra formării capilarelor este exercitat de raportul a/c și cu cât este

mai mare față de minimul necesar pentru hidratarea completă a cimentului (definit de Powers ca fiind 0,36 [39]), cu atât crește conținutul de pori capilari. Este suficient să se precizeze că pentru raport  $a/c = 0,5$  porii capilari ocupă aproximativ 20% din volum, în cazul hidratării complete a cimentului.

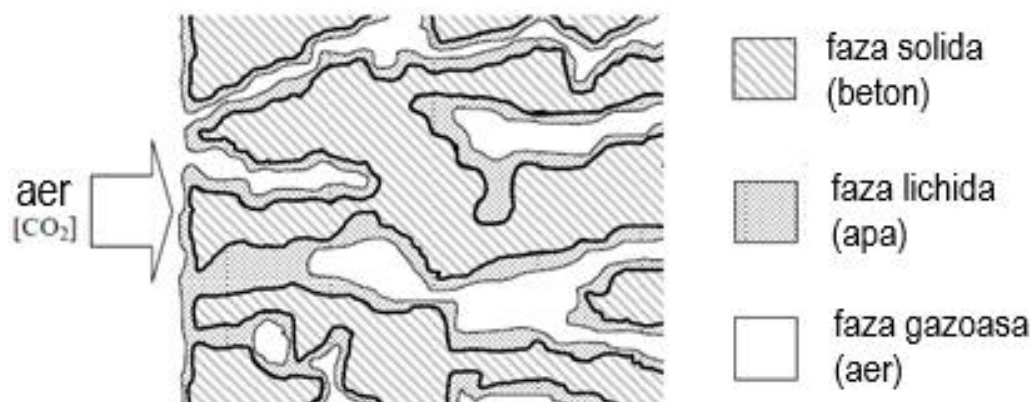


Figura VI.6. - Reprezentarea schematică a structurii betonului [39]

Durabilitatea structurilor din beton depinde în primul rând de influențele mediului și anume penetrarea substanțelor agresive în elementul structural din beton. Acesta este motivul pentru care pătrunderea fluidelor și a substanțelor agresive prin structura poroasă a pastei de ciment întărite este parametrul principal și ar trebui să fie asociat cu prezicerea durabilității potențiale a unei structuri de beton armat.

Pătrunderea substanțelor potențial agresive (ioni sau molecule sub formă de lichide și gaze) este definită în linii mari ca gradul în care betonul permite gazelor, lichidelor sau ionilor să se deplaseze prin structura sa de pori.

Transportul substanțelor din beton depinde direct de cauza migrației care poate avea loc din cauza gradientului hidraulic, a gradientului de concentrație sau a modificării umidității. În funcție de forța motrice a procesului și de natura materiei transportate, se disting diferite procese de transport pentru substanțele dăunătoare prin beton. Acestea pot fi clasificate după urmează:

1. absorbție – circulația fluidului datorită forțelor capilare create în interiorul porilor capilari;
2. permeabilitate – circulația fluidului datorită acțiunii presiunii;
3. difuzie – circulația fluidului din cauza unui gradient de concentrație.

Permeabilitatea este un indicator de durabilitate important de beton și prin specificarea claselor diferite de permeabilitate ale betonului ar trebui să fie posibilă proiectarea unei structuri cu rezistența necesară la agresiunile mediului. În prezent, multe proceduri de testare pentru testarea proprietăților permeabilității betonului sunt standardizate sau au fost deja utilizate pe perioade lungi de timp și s-au dovedit a avea o precizie satisfăcătoare. Dar, pentru că o anumită proprietate să fie utilizată ca indicator de durabilitate în procedura de proiectare bazată pe performanță, aceasta trebuie să fie cuantificabilă prin teste de laborator și în amplasament într-un mod reproductibil și cu proceduri de testare clar definite. În plus, trebuie stabilite valori limită pentru o anumită clasă de expunere și o durată de viață necesară a unei structuri.

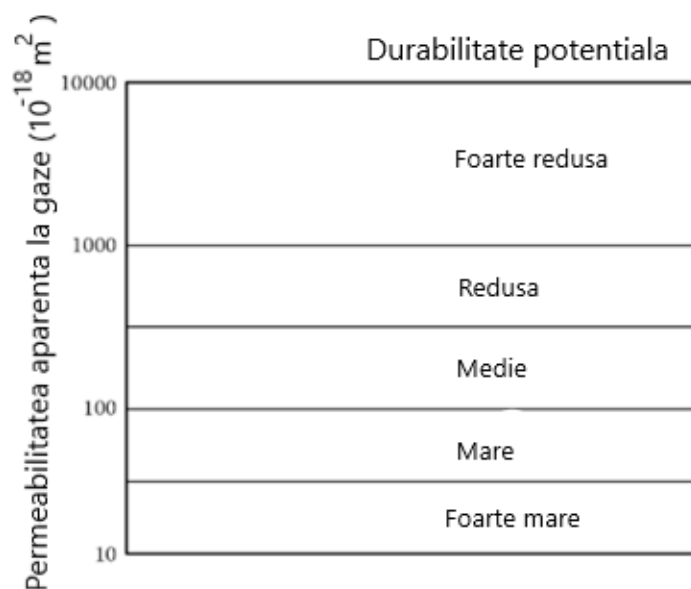


Figura VI.7.- Exemplu de clasificare a durabilității pe baza unui indicator de durabilitate.

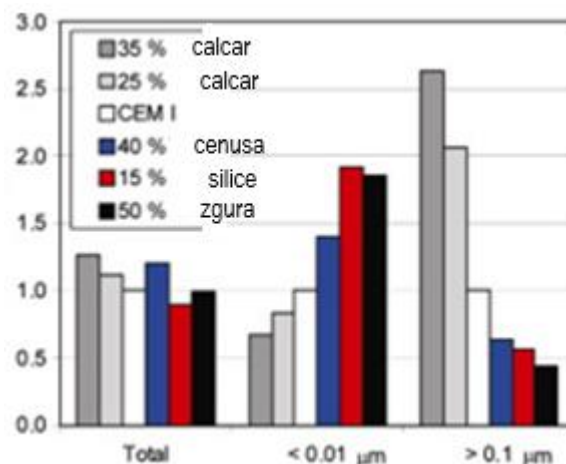


Figura VI.8. - Porozitatea cimenturilor composite comparativ cu cimentul Portland [114].

Figura IV.5. prezintă influența cimenturilor care conțin calcar (LL), cenușă zburătoare (V), praf de silice (D) și zgură granulată de furnal măcinată (S) asupra porozității totale și distribuția dimensiunii porilor în pasta de ciment comparativ cu pasta de ciment cu ciment Portland. În timp ce cantitățile mai mari de filer de calcar pot conduce la o porozitate mai mare și în special la o cantitate mai mare de porii capilari > 0,1  $\mu\text{m}$ , utilizarea cimenturilor composite care conțin praf de silice sau cantități mai mari de cenușă zburătoare sau zgură granulată de furnal măcinată produce o creștere a porilor fini și o scădere a macroporilor capilari, rezultând o densitate mai mare a betonului care conține aceste cimenturi composite. Combinația de filer de calcar și cenușă zburătoare și/sau calcar și zgură granulată de furnal măcinată are ca rezultat obținerea unor betoane cu o durabilitate ridicată.

Chiar și finețea crescută a clincherului în cimentul care conține adaos de calcar poate influența pozitiv distribuția mărimii porilor, comparativ cu amestecurile de CEM I și filer.

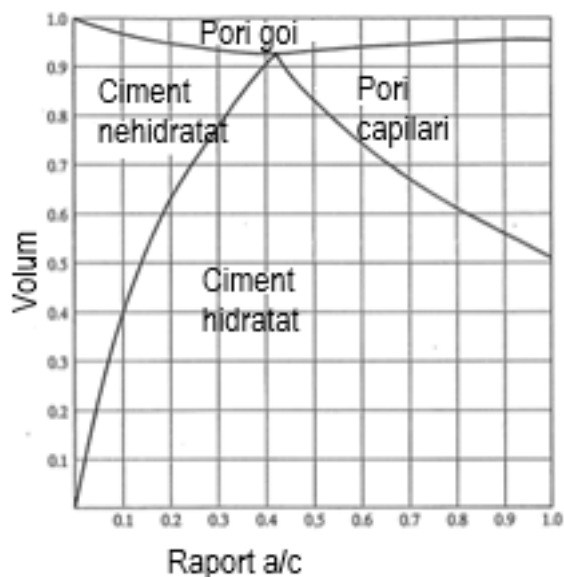


Figura VI.9.- Influenta raportului a/c asupra volumului porilor capilari [111]

Creșterea permeabilității betonului cu raport a/c mai mare de 0,42 se datorează volumului crescut de pori capilari (Mindess et al., 2003) (fig. VI.9.).

Microstructura betonului în acest caz este mai omogenă decât cea a betonului obișnuit, datorită contribuției fizice și chimice a adaosurilor și aditivilor, precum și a faptului că este mai compactă. Includerea adaosurilor și aditivilor (individual sau în combinație) a contribuit la îmbunătățirea rezistenței și durabilității amestecurilor de beton datorită reducerii suplimentare a porozității pietrei de ciment și a unei zone de tranziție îmbunătățite între aceasta și agregate.

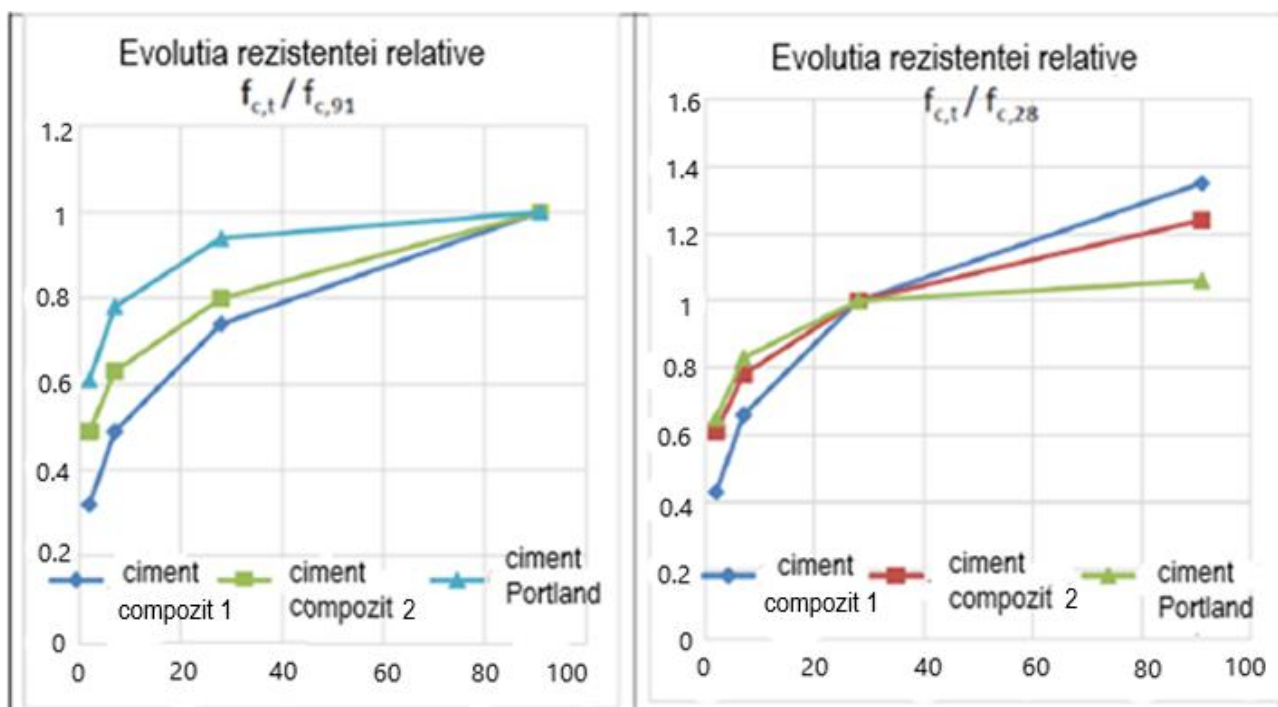


Figura VI.10. - Evoluția rezistenței relative la compresiune a betoanelor considerând valori diferite ale timpului de referință [113]

Viteza inițială a sporului de rezistență al betonului cu ciment compozit este mai scăzută, datorată în principal reacției puzzolanice lente, dar dezvoltarea rezistenței mecanice persistă pe

---

perioade mai lungi de 28 de zile. Din rezultatele încercărilor este evident că sporul de rezistență la compresiune al betonului preparat cu ciment compozit este mai mare decât cel al betoanelor convenționale la vârstele ulterioare, adică la 60, 90, 120, 150 și 180 zile. Cu toate acestea, sunt necesare investigații suplimentare după 28 de zile pentru a ajunge la o concluzie clară în ceea ce privește această creștere a rezistenței.

Noile combinații de cimenturi cu adaosuri și cimenturile compozite prezintă o dezvoltare mai lentă a rezistenței până la vârsta de 28 zile și o mare parte din rezistența finală apare după aceasta vârstă (fig. VI.10.).

Avantajele determinării clasei betonului exprimată prin rezistența la compresiune la vârste mai mari de 28 de zile sunt:

- să utilizeze potențialul complet de rezistență al betonului, nu să adoptăm estimativ o creștere a rezistenței de 35-50%;
- să folosească rezistența corectă la calcularea armăturii minime, nu una care este mai mică cu 20-30%;
- să folosească rezistența corectă atunci când se evaluează capacitatea portantă a elementului structural și riscul cedării casante;
- să utilizeze rezistența și rigiditatea corectă în analizele neliniare, unde și supra-rezistența reprezintă o preocupare;
- să definească mai simplu rezistența de calcul in situ care rezolvă problema lui  $\alpha_{cc}$ ;
- un punct de referință mai bun pentru observațiile științifice în cercetare;
- să utilizeze un sistem comun, luarea în considerare în mod individual a unui spor suplimentar de rezistență producând neînțelegeri în comunicarea dintre proiectant/utilizator/producător.

Dezavantajele (stabilirii/atingerii) rezistenței la compresiune la vârste avansate sunt:

- dezvoltarea lentă a rezistenței la compresiune poate reduce viteza de execuție în amplasament;
- probleme legate de "raportul" între timpul de verificare a îndeplinirii clasei betonului și punerea în operă al acestuia;

Puzzolanele, cum ar fi cenușa zburătoare, zgura granulată de furnal măcinată și praful de silice, sunt cele mai frecvente adaosuri minerale utilizate în betonul de înaltă rezistență. Aceste materiale conferă rezistență suplimentară betonului prin reacția cu produsele de hidratare a cimentului Portland pentru a crea gel suplimentar C-S-H, partea din pasta de ciment hidratată responsabilă de rezistența betonului.

Pentru a crește rezistența, este mai eficient să se reducă conținutul de apă decât să se utilizeze o cantitate mai mare de ciment.

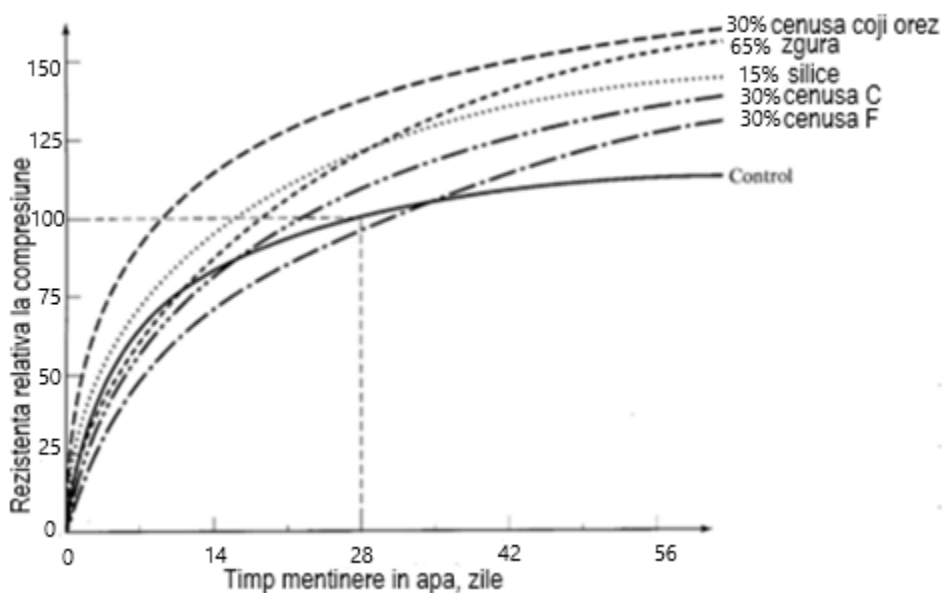


Figura VI.11. - Evoluția rezistenței relative la compresiune a betoanelor cu materiale cimentoide suplimentare [111]

Adăugarea de materiale cimentoide suplimentare, cum ar fi praful de silice, zgura, metakaolinul și cenușa zburătoare, reduc porozitatea, crescând astfel rezistența betonului preparat cu cimenturi compozite. Cu toate acestea, compoziția mineralică, finețea și dozajul materialelor cimentoide suplimentare afectează dezvoltarea timpurie a rezistenței betonului, așa cum este prezentat în figura VI.11. De exemplu, praful de silice este foarte reactiv și, prin urmare, mărește rezistența la vârstă timpurie și mai târziu, afectând imediat hidratarea cimentului. Pe de altă parte, cenușa zburătoare de clasa F și zgura granulată de furnal măcinată măresc rezistența finală, dar diminuează rezistența timpurie.

#### *Viteza de carbonatare*

Majoritatea cazurilor de deteriorare a betonului sunt legate de coroziunea armăturii datorită depasivării barelor de oțel indusă de carbonatare sau penetrarea clorurilor. În beton, barele de armătură sunt protejate de coroziune printr-un strat de oxid subțire care este format și menținut la suprafața lor datorită mediului foarte alcalin al betonului înconjurător (valori ale pH-ului în jurul valorii de 12,6). Alcalinitatea masei de beton se datorează formării  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  produsă în timpul hidratării cimentului. Depasivarea armăturilor apare fie atunci când ionii de clor difuzează în apa porilor și ajung la bare sau când valoarea pH-ului betonului care înconjoară barele scade sub 9, datorită difuziei  $\text{CO}_2$  atmosferic și reacția acestuia cu  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  din masa de beton sau printr-o combinație dintre aceste două mecanisme, în care cel de-al doilea mecanism îl accelerează pe primul.

Penetrarea clorurilor predomină în mediul marin, în zonele de coastă sau atunci când sărurile de dezgheț intră în contact cu suprafața de beton (pavaje și tabliere de pod, pardoselilor de garaj, etc.). În zonele urbane și industriale, unde poluarea mediului duce la o concentrație semnificativă de dioxid de carbon, predomină coroziunea armăturii inițiată de carbonatare.

Coroziunea reduce aria transversală disponibilă a armăturii și, prin urmare, capacitatea ei portantă și introduce o presiune internă care produce expulzarea betonului care înconjoară bara, deoarece volumul produselor de coroziune depășește cu mult nivelul inițial. Acest lucru provoacă apariția de fisuri paralele cu bara în beton, distrugând aproape complet aderența dintre armătură și beton și reducând drastic contribuția barelor la rezistența elementelor structurale.

Grosimea stratului de acoperire cu beton, trebuie să fie mai mare decât adâncimea de carbonatare așteptată în timpul duratei de serviciu a unei structuri și se impune o estimarea corectă a acestei valori. Dacă stratul de acoperire nu poate fi realizat din diverse motive tehnice sau economice, se va opta fie pentru o compoziție de beton diferită (de exemplu, cu un raport a/c mai mic, dozaj de ciment mai mare etc.) fie pentru o protecție suplimentară (de exemplu protecție cu straturi impermeabile).

Foarte des problemele de siguranță și aspect cauzate de coroziunea armăturii înainte de sfârșitul duratei de viață estimată a structurii sunt atât de grave încât trebuie ca structura să fie demolată sau necesită reparații și consolidări generale foarte costisitoare. Ca răspuns la aceasta problemă serioasă, comunitatea inginerilor a organizat în ultimii ani o cercetare semnificativă cu scopul de a dezvolta o înțelegere mai profundă a mecanismelor care conduc la coroziunea armăturii, precum și măsuri eficiente de control al acesteia.

Timpul de fisurare al stratului de acoperire este egal cu perioada necesară pentru ca frontul de carbonatare să ajungă la bară (perioada până la inițierea coroziunii la timpul  $t_{cr, carb}$ ) plus timpul necesar pentru ca stratul de oxid să se acumuleze în jurul barei până la grosimea necesară pentru a provoca despicarea longitudinală a stratului de acoperire datorită eforturilor radiale în beton (perioada de propagare a coroziunii).

În condițiile obișnuite de mediu, se presupune ca viteza de coroziune a betonului carbonatat este atât de ridicată, încât atingerea frontului de carbonatare la nivelul barei este urmată în scurt timp de despicarea stratului de acoperire cu beton. Prin urmare, timpul  $t_{cr, carb}$  necesar pentru ca frontul de carbonatare să străbată stratul de acoperire cu beton poate fi considerat o bună aproximare și o limitare inferioară destul de precisă a duratei de viață a betonului armat.

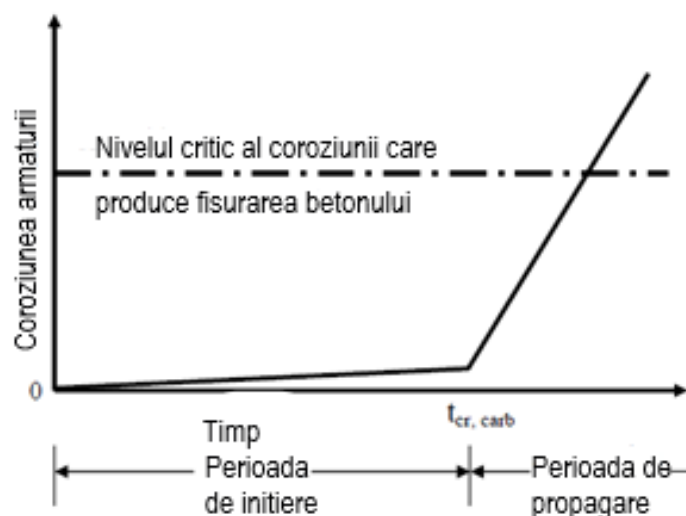


Figura VI.12. - Stadii ale coroziunii armăturii din beton [39].

O abordare cu un grad mai mare de siguranță este presupunerea perioadei de propagare nule asigurând cel puțin limita inferioară pentru durata de viață. Cu toate acestea, această ipoteză este neadecvată, în special pentru umiditate relativă scăzută atunci când perioada de propagare este mult mai mare decât perioada de inițiere datorită lipsei de umiditate. Concluzia generală din cercetările efectuate este ca timpul de propagare depinde foarte mult de umiditatea relativă. Pentru umiditate de aproximativ 70% perioada de propagare este aproape dublă față de perioada de inițiere, pentru umiditate de 80% perioada de propagare este de aproximativ jumătate din perioada de inițiere, iar pentru umiditate de 90% perioada de propagare este de aproximativ 1/5 din perioada de inițiere.

În literatura de specialitate se recomandă ca viteza de carbonatare a betonului să se determine cu relația:

$$X_{\text{carb}} = k \times t^m$$

în care:  $X_{\text{carb}}$  este adâncimea de carbonatare la timpul  $t$  exprimat în ani;

$m$  - constantă specifică între 0.4-0.6, în mod uzual  $m = 0.5$ ;

$k$  - viteza de carbonatare.

Viteza de carbonatare " $k$ " depinde de: concentrația de  $\text{CO}_2$  din mediu ambiant (0.030-0.035 %), raportul  $a/c$ , conținutul de adaos mineral (crește cu creșterea conținutului de cenușă zburătoare, zgură și calcar), durata de întărire umedă și condițiile de expunere ale betonului.

Vitezele de carbonatare sunt reduse la betoanele întărite în condiții corespunzătoare și de o calitate superioară.

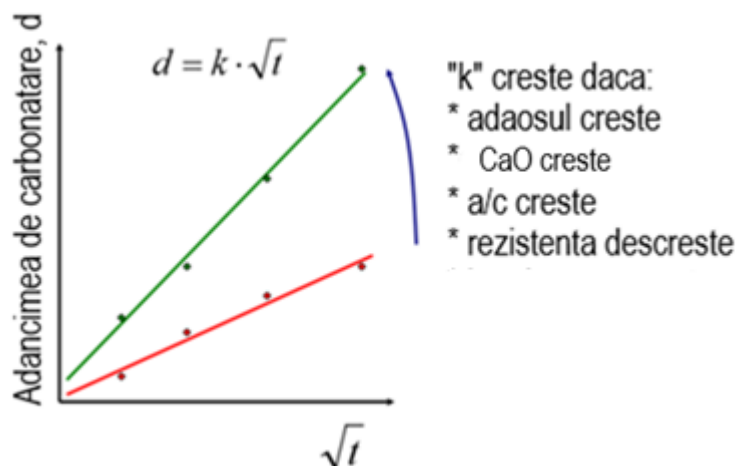
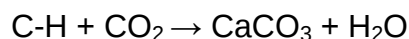


Figura VI.13. - Viteza de carbonatare  $k$  [112]

Toate componentele care au  $\text{CaO}$  pot reacționa cu  $\text{CO}_2$ , nu doar cu portlanditul ( $\text{C-H}$ ), alte produse de hidratare de asemenea carbonatează. Reducerea conținutului de carbon reduce mecanismul de carbonatare.



Hidroalumiinați +  $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$  + alumină hidratată

Hidroferiți +  $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$  + alumină hidratată + oxizi de fier

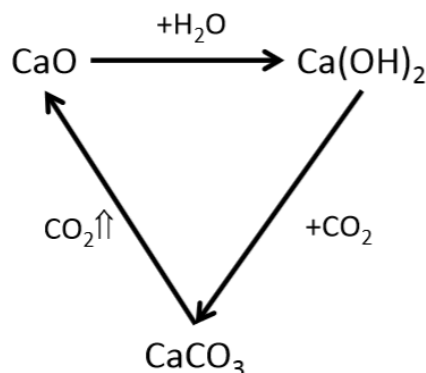


Figura VI.14.- Reacții de carbonatare a betonului [112]

Carbonatarea scade cu creșterea umidității datorită scăderii difuziei de  $\text{CO}_2$ , dar în mediile cu o umiditate suficientă este favorizată coroziunea armăturilor.

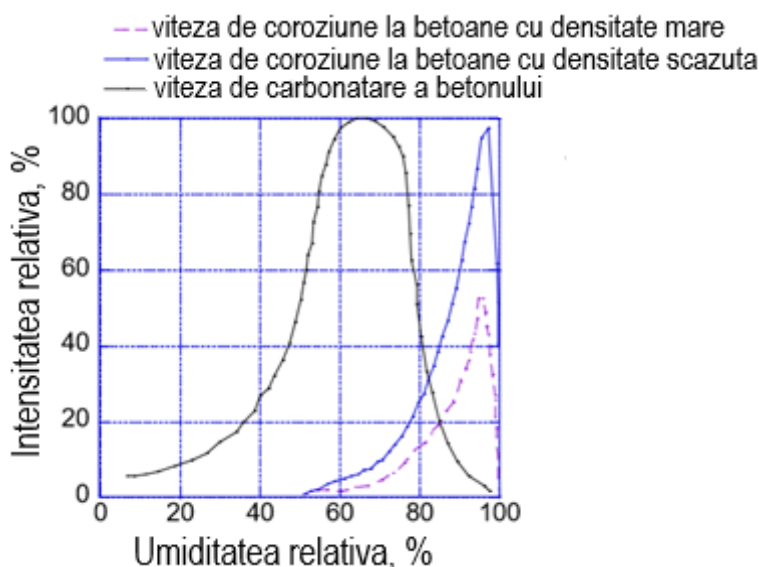


Figura VI.15. - Variația vitezei de carbonatare a betonului și a vitezei de coroziune a armăturii funcție de umiditatea mediului [112].

Efectele carbonatării betonului sunt :

- rezistența la compresiune a betoanelor carbonatate crește foarte puțin față de cea a betoanelor necarbonatate;
- adâncimea de carbonatare crește în timp și cu concentrație de  $\text{CO}_2$ ;
- rezistența la despicare a betoanelor carbonatate crește foarte puțin față de cea a betoanelor necarbonatate;
- rezistivitatea electrică crește cu creșterea timpului de carbonatare;
- carbonatarea conduce la reducerea semnificativă a permeabilității și porozității betonului;
- adâncimea de carbonatare descrește cu creșterea rezistenței.

---

## VI.2.2. Sinteza rezultatelor experimentale obținute

Adaosurile minerale, utilizate ca înlocuitori parțiali pentru cimentul Portland, au, de obicei, un efect de întârziere asupra rezistenței la vârste timpurii. Totuși, capacitatea unui adaos mineral de a reacționa la temperaturi normale cu hidroxidul de calciu care este un constituent al pastei de ciment hidratate și a forma hidrosilicat de calciu suplimentar poate duce la o reducere semnificativă a porozității atât a matricei, cât și a zonei de tranziție. Se pot obține îmbunătățiri semnificative în ceea ce privește rezistența și permeabilitatea la apă a betonului atunci când sunt incorporate adaosuri minerale.

În urma studiului experimental efectuat pe betoane cu diverse cimenturi compozite testate la vârste avansate de până la 720 zile s-a constatat o creștere lentă în timp a rezistenței la compresiune datorită hidratării mai lente a adaosurilor minerale care impun ca determinarea rezistenței la compresiune să se efectueze după o perioadă mai mare de 28 zile. Acest fapt este recomandat și în propunerea de revizuire a standardului european pr EN 1992-1-1 [60] care indică intervale de testare ale betoanelor între 28 și 90 de zile. Rezultă în acest fel necesitatea efectuării unui program experimental vast care să evidențieze pentru fiecare tip de ciment compozit timpul de referință indicat, ținând seama de raportul  $a/c$  și de cantitatea de adaos mineral, dacă acesta este introdus în ciment sau separat la prepararea betonului. Corelat cu timpul de referință indicat pentru determinarea clasei betonului cu ciment compozit este necesară analiza posibilității și a schimbării perioadei de testare a betoanelor pentru stabilirea altor proprietăți.

O parte din programul experimental realizat conține o analiză paralelă a rezultatelor obținute pentru betoanele preparate cu adaos de zgură și betoanele cu cimenturi cu zgură din perspectiva metodelor de proiectare prescriptive și a metodelor de testare asociate performanței. Betoanele realizate pentru care s-a propus comparația au avut același raport  $a/c$  echivalent și același dozaj de adaos de zgură granulată de furnal măcinată dar au fost confecționate cu tipuri de ciment diferite.

Specificațiile de prescripție bazate pe respectarea unei anumite compoziții a betonului prezintă avantajul simplității de aplicare practică dar în normele naționale nu există o diferențiere a lor funcție de tipul cimentului folosit. Este evident că prin aplicarea metodelor prescriptive betoanelor cu același raport  $a/c$  și preparate cu tipuri diferite de ciment nu li se poate asigura aceeași durată de viață.

Aplicarea criteriilor specifice metodelor de proiectare asociate performanței au condus la rezultate diferite față de criteriile metodelor descriptive aplicate pentru aprecierea rezistenței la carbonatare a betonului și a rezistenței la îngheț-dezgheț cu agenți de dezghețare. În cazul rezistenței la carbonatare s-a avut în vedere aplicarea criteriilor relative ale metodei de testare asociată performanței, prin estimarea adâncimilor de carbonatare ale betonului candidat raportate la cele ale betonului de referință indicat ca fiind rezistent la carbonatare.

În cazul rezistenței la îngheț-dezgheț cu agenți de dezghețare s-au aplicat criteriile absolute ale metodei de testare asociată performanței, prin aprecierea reducerii masei betonului

---

candidat și a betonului de referință indicat ca fiind rezistent la îngheț-dezgheț față de nivelul de performanță corespunzător la 56 și 100 de cicluri.

Specificațiile de performanță sunt un set de instrucțiuni care descriu cerințele funcționale pentru betonul întărit în funcție de aplicație și conțin instrucțiuni care trebuie să fie clare, realizabile, măsurabile și aplicabile. Specificațiile de performanță menționează în mod clar metodele de testare și criteriile de acceptare absolute sau relative care vor fi utilizate pentru verificarea și respectarea cerințelor.

Metodele de testare asociate performanței iau în considerare fiecare mecanism relevant de deteriorare, durata de viață a elementului sau a structurii într-un mod cantitativ. Metodele de proiectare asociate performanței sunt mai relevante pentru rezistența la coroziune și pentru rezistența la îngheț-dezgheț a betonului. Această abordare poate fi indicată atunci când:

- este necesară o durată de viață semnificativ diferită de 50 de ani;
- structura este "specială" și necesită o probabilitate mai scăzută de cedare;
- acțiunile de protecție a mediului sunt deosebit de agresive sau sunt bine definite;
- se așteaptă ca standardele de manoperă (execuție) să fie respectate;
- trebuie introdusă o strategie de gestionare și întreținere planificată;
- se vor construi pentru o populație semnificativă sau se vor realiza structuri/ elemente similare;
- se utilizează materiale constitutive noi sau diferite;
- a fost utilizată în proiectare o metodă bazată pe valori limită pentru compoziția betonului, dar a fost constatată o neconformitate.

Evoluția spre specificațiile bazate pe performanță este esențială pentru succesul industriei de construcții din beton în competiția cu materialele de construcție alternative și în inițiativele de construcție durabile.

Toate părțile interesate, arhitecții, inginerii, constructorii și producătorii, trebuie să-și asume să fie parteneri pentru a asigura un proiect de succes. Deși provocările sunt multe și implică eforturi extinse și vaste studii de cercetare, schimbarea este necesară pentru a asigura creșterea și îmbunătățirea continuă a calității/durabilității structurilor din beton armat.

### **VI.3. Propuneri de revizuire a reglementarilor naționale**

Având în vedere particularitățile betoanelor preparate cu cimenturi compozite și creșterea rezistenței la compresiune pe o durată de timp extinsă se propune o metodologie de determinare a timpului de referință pentru obținerea clasei betonului. Din cercetările experimentale asociate cu revizia standardului european pr. EN 1992-1-1 rezultă că timpul de referință ar putea fi extins

---

între 28 și 90 zile, pentru compoziții de beton nuanțate după tipul și procentul de adaos din ciment și raportul a/c. De asemenea este necesară corectarea timpului de referință și pentru determinarea altor proprietăți ale betonului.

În Europa, se află în stadiul de elaborare conceptul "clase de rezistență la expunere" pentru mecanismele de deteriorare, cum ar fi carbonatarea, în funcție de mediul în care este amplasat betonul. O varietate mare de tipuri de ciment sunt acum disponibile pentru utilizare, însă performanța pe termen lung a betonului care conține aceste cimenturi compozite este relativ puțin cunoscută. Pentru a permite o construcție durabilă și economică, o determinare sigură a vitezei de carbonatare a betonului întărit este esențială în luarea deciziilor de proiectare.

În prezent, se aplică reglementări prescriptive privind compoziția betonului pentru a asigura o durabilitate suficientă a elementelor din beton armat în condiții de expunere cu grade diferite de severitate. Având în vedere cunoștințele actuale privind mecanismele de deteriorare și modelarea acestora, se planifică schimbarea de la aceste specificații considerate satisfăcătoare la o abordare a proiectării asociată performanței în standardele viitoare. În astfel de specificații, proiectarea durabilității betonului se bazează pe performanța caracterizată statistic a betonului, determinată în teste standardizate cu privire la clasele definite de betoane cu performanțe similare. Compozițiile cu performanțe similare sunt grupate în clase de rezistență la carbonatare și cerințele de compoziție sunt introduse pentru a determina performanțele betonului în funcție de compoziția amestecului, respectiv pentru a asigura aceeași durată de viață a elementelor structurale. Este necesară diferențierea stratului de acoperire cu beton al armaturilor în funcție de compoziția betonului și tipul cimentului determinat de perioada de inițiere a carbonatării betonului. Sunt propuse trei clase de rezistență la carbonatare cu rezistența mare, medie și scăzută notate cu literele "RC" urmate de un număr care reprezintă adâncimea maximă de carbonatare cu o probabilitate 10%, după 50 de ani de expunere la umiditate 65%, determinată prin testul standard.

De exemplu, pentru a estima adâncimea maximă de carbonatare a unui beton compozit pe perioada și în condițiile expunerii elementului, se vor efectua teste standardizate pentru determinarea adâncimii de carbonatare la vârste prestabilite, în general până la un an, apoi se va calcula viteza de carbonatare și apoi prin extrapolare se va stabili mărimea calculată la vârsta corespunzătoare duratei de viață. În cazul studiului s-a obținut la 180 de zile pentru betonul de clasa C20/25 realizat cu ciment CEM II/A-S 42.5R la un raport a/c de 0.50 o adâncime de carbonatare de 1.80 mm. Viteza de carbonatare calculată a fost de  $k = 2.55 \text{ mm}/\sqrt{t}$ , cu  $t$  exprimat în ani, iar adâncimea maximă de carbonatare estimată pentru o durată de viață de 50 ani a rezultat de 18 mm corespunzătoare încadrării betonului în clasa de rezistență la carbonatare RC20.

Încadrarea în clase de rezistență la carbonatare a unei compoziții specifice de beton cu ciment compozit presupune efectuarea testelor standardizate; în urma rezultatelor obținute se va estima adâncimea de carbonatare maximă a betonului și în funcție de aceste valori se va stabili grosimea stratului de acoperire cu beton având în vedere și aspectele referitoare la conlucrarea armăturii cu betonul și rezistența la foc.

---

Sensibilitatea betonului la acțiuni ale mediului de tipul carbonatării, penetrării clorurilor, îngheț-dezgheț și atacul acizilor sau al sulfatilor, respectiv oportunitatea utilizării betoanelor în anumite clase de expunere este dificil de realizat aplicând criteriile indicate în actualele prescripții românești. Literatura de specialitate și normele europene și naționale recomandă metode de performanță asociate durabilității betonului care conțin niveluri de performanță absolute sau relative pentru stabilirea domeniilor de utilizare a betoanelor cu cimenturi compozite. Se impune necesitatea adoptării metodelor de performanță prin care să fie testate betoanele cu cimenturi compozite în vederea stabilirii unei compoziții specifice tipului de adaos mineral utilizat și apoi aceste compoziții optimizate și particularizate vor fi regăsite în viitoarele norme naționale tot sub forma de specificații prescriptive, prevederile noi ale anexei F din normativul NE 012-1 și ale standardului EN 206 conținând compoziții de beton nuanțate în funcție de tipul cimentului compozit.

Cimenturile viitoare se vor baza pe clincherul de ciment Portland cu cantități tot mai mari de adaosuri cimentoide suplimentare, necesitând să poată fi utilizată o gamă variată de cimenturi compozite. Durabilitatea betonului nu este o proprietate intrinsecă a materialelor, ci rezultatul interacțiunii betonului cu mediul înconjurător și utilizarea sustenabilă a lui ar trebui să adapteze compoziția la aplicație.

## **DE reținut că ...**

- \* Nu există ciment sau adaos mineral care să compenseze un beton de calitate scăzută.
- \* Betonul durabil depinde de:
  - Proporțiile optime ale compoziției
  - Raportul scăzut a/c
  - Existența aerului antrenat în condiții de îngheț-dezgheț
  - Turnarea și compactarea corectă
  - Tratarea ulterioară
  - Întreținerea
- \* Atunci când se aplică toată experiența acumulată, betonul va atinge cu siguranță durata de viață preconizată.



---

## CAPITOLUL VII.

### CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. DIRECȚII DE CERCETARE VIITOARE

#### ***VII.1. Concluzii***

1). Alegerea temei studiate și dezvoltate în teza de doctorat a fost determinată de mai mulți factori:

- asocierea insuficientă/incompletă a celor mai frecvente mecanisme de deteriorare a structurilor din beton armat cu utilizarea unor anumite materiale componente ale betonului;

- necesitatea identificării și cuantificării degradărilor existente ale elementele componente ale construcțiilor din beton armat prin utilizarea unor metode și tehnici de încercare specifice în laborator și in-situ;

- evoluția rapidă și spectaculoasă a utilizării adaosurilor minerale în cimenturi, care apare ca o necesitate firească în scopul de a micșora costul energiei necesare producției cimentului, de a reduce emisiile de carbon, de a conserva resursele naturale, și de a elimina/utiliza deșeurile și produsele secundare provenite din activități industriale;

- istoria relativ scurtă de utilizare a cimenturilor compozite în betoane și necesitatea asigurării durabilității betonului indiferent de materialele utilizate determină cercetări de mare amploare pe plan internațional care includ numeroase teste în laborator și încercări “in situ” care trebuie să pună în evidență proprietăți specifice asociate acestor tipuri de cimenturi;

- obținerea unor rezultate neconcludente, incomplete, subiective, provenite din investigarea construcțiilor datorită lipsei unei metodologii comune, aplicabile in situ;

- lipsa unei legături clare între rezultatele cercetărilor experimentale accelerate în laborator, specificațiile bazate pe performanță a betonului și performanțele betonului obținute prin urmărirea comportării în timp a structurilor;

- lipsa unei proceduri unitare cu caracter larg de aplicabilitate la nivel european în proiectarea bazată pe performanță a betonului a cărei aplicare poate conduce la soluții care să ofere performanțe superioare soluției de abordare prescriptive;

---

- tendința europeană de clasificare a durabilității betonului la diferite acțiuni ale mediului pe baza unor indici în care se definesc valori limită pentru o anumită clasă de expunere (clase de rezistență la diferite acțiuni ale mediului);

- literatura tehnică din țara noastră conține puține date și informații referitoare la concepția și proiectarea betoanelor cu cimenturi compozite, în schimb utilizarea acestora se face din ce în ce mai intens.

2). Producerea betonului cu materiale cimentoide suplimentare reduce în mod evident impactul acestuia asupra mediului înconjurător. În domeniul specific al dezvoltării betonului cu cimenturi compozite au fost prezentate în lucrare o serie de aspecte teoretice și informații specifice în legătură cu factorii care influențează eficiența utilizării materialelor cimentoide suplimentare în scopul reducerii impactului betonului asupra mediului (Introducere).

3). Parcurgerea literaturii de specialitate și efectuarea unei sinteze generale referitoare la compoziția chimică (oxidică) și mineralogică a clincherului de ciment Portland, caracteristicile generale și tipurile de cimenturi uzuale conform normelor românești și americane, au scos în evidență factorii caracteristici pentru proprietățile cimenturilor și clasificarea materialelor cimentoide suplimentare de tipul cenușilor, zgurilor și calcarelor (Capitolul 1).

4). Identificarea și cunoașterea metodelor și procedeele de încercare ale cimenturilor și betoanelor, reunind atât abordări simplificate cât și metode complexe, reprezintă elemente fundamentale în identificarea factorilor de influență și a stabilirii nivelurilor de performanță ale acestor materiale.

Metodele de încercare uzuale pentru betonul proaspăt, întărit și asociate durabilității trebuie să conducă la verificarea îndeplinirii tuturor cerințelor fundamentale de interes pentru proiectarea, producerea și execuția elementelor din beton armat și la luarea unor măsuri de îmbunătățire a comportării betoanelor ca rezultat al cercetărilor efectuate.

Modul în care o anumită caracteristică a betonului se reflectă în practica de proiectare/ producere/ execuție/ cercetare a betonului proaspăt sau întărit și cum este cuantificat impactul pe care îl are aceasta asupra activităților esențiale în domeniul construcțiilor din beton armat reprezintă o componentă esențială în studiul betonului, în mod special al betonului preparat cu cimenturi compozite și a fost dezvoltat într-o manieră originală în prezenta lucrare (Capitolul 2).

---

5). Influențele adaosurilor minerale de tipul cenușilor zburătoare, zgurii granulate de furnal măcinate și al calcarului asupra proprietăților betoanelor proaspete și întărite preparate cu cimenturi compozite au ca finalitate și elaborarea de recomandări privind execuția elementelor structurale din beton cu cimenturi compozite.

În lucrare se face sintetiza influențelor/efectelor adaosurilor minerale utilizate în ciment/beton în diferite proporții asupra proprietăților betonului proaspăt sau întărit (Capitolul 3).

6). O componentă esențială în asigurarea unei durabilități echivalente a betoanelor preparate cu cimenturi compozite este aplicarea conceptului coeficientului  $k$ . Acest concept este parte a metodelor de performanță a durabilității betonului și anume a conceptului de performanță echivalentă a betonului (Equivalent Concrete Performance Concept - ECPC) și a conceptului de performanță echivalentă a combinațiilor (Equivalent performance of combinations concept - EPCC).

În lucrare se prezintă principiile de bază ale aplicării metodei de calcul a factorului de eficiență  $k$  al materialului cimentoid suplimentar ce reprezintă cantitatea de adaos mineral care poate înlocui o parte de ciment Portland din amestecul de beton pentru obținerea unor proprietăți similare, metodă capabilă să țină seama și de dezvoltarea lentă a rezistenței la vârstă timpurie a betonului cu anumite adaosuri.

Detalierea conceptului de performanță echivalentă a betonului asociat durabilității în normativul european și a unor norme naționale este reprezentativ pentru domeniul analizei cimenturilor compozite în clase de expunere specifice.

O latură specifică a comportării betoanelor preparate cu adaosuri, în special în cantități mari o reprezintă evoluția mai lentă a rezistenței și a formării structurii betonului în general. A apărut astfel necesitatea unei comparații între prevederile actuale din standardul european SR EN 1992-1-1 privind caracterizarea evoluției în timp a rezistenței la compresiune a betonului și propunerile din proiectul elaborat în octombrie 2017, care aduce ca element de noutate față de prevederile anterioare posibilitatea considerării unor timpi de referință cuprinși între 28 și 90 de zile privind determinarea clasei de rezistență la compresiune a betonului ( Capitolul 4 ).

7). În acest scop în lucrare s-au efectuat patru studii de caz ce au constatat în evaluarea rezistenței la compresiune calculate pentru betoane (preparate cu cimenturi de tip CEM II/B-S 32.5R, CEM II/B-S 32.5N, CEM II/B-M (S-V) 32.5R și CEM III/A 32.5R) cu vârste mai mari de 28

---

zile, având rolul de exemplificare și aplicare a prevederilor din noua propunere pentru actualizarea standardului european prEN 1992-1-1.

Determinarea experimentală a timpului de referință pentru stabilirea clasei betonului se va face, în principal în funcție de rapoartele între rezistențele obținute la 56 și 90 de zile și respectiv la 28 de zile ținându-se seama și de evoluția în timp a rezistenței betonului. În lucrare se propune următoarea abordare, în cazul obținerii unui spor mai mare de 15% al rezistenței față de cea la 28 de zile și al încadrării în altă clasă la 56 sau 90 zile față de 28 de zile (criteriul  $f_{ck}+4$ ) se propune alegerea unui timp de referință mai mare de 28 de zile.

Cercetările experimentale efectuate pe baza unui program experimental amplu, ce a avut ca obiect principal betoane preparate cu aceleași tipuri de ciment în conformitate cu EN 197, provenite din diverse surse dar la aceleași dozaje, au indicat o variație importantă a rezistenței la compresiune a betonului preparat cu același tip de ciment la toate vârstele la care s-au făcut încercări, din cauze legate în principal de proveniența, compoziția clincherului și caracteristicilor adaosului de zgură granulată de furnal măcinată asupra caracteristicilor betonului.

Betoanele realizate cu compoziții și rapoarte a/c identice, preparate cu cimenturi de același tip, dar din surse diferite se pot încadra în clase de rezistență la compresiune diferite și au evoluții în timp ale rezistențelor diferite, fapt ce scoate în evidență obligativitatea efectuării cercetărilor/încercărilor experimentale.

Utilizarea unor metodologii legate de performanță au evidențiat deosebiri potențiale între adăugarea adaosului mineral în ciment sau în beton în ceea ce privește nivelele de performanță ale betonului dar și aspecte de principiu privind aplicarea unor metode prescriptive și de performanță.

Astfel în cadrul unui amplu program experimental s-au studiat performanțele betonului preparat cu cimenturi cu zgură de tip CEM II/A-S și CEM III/A și respectiv cu cimenturi de tip CEM I și aceleași cantități de adaos de zgură direct în beton, ca în cazul cimenturilor. În prima etapă s-a determinat raportul a/c echivalent al betoanelor cu adaosuri și apoi s-au efectuat încercări specifice pentru determinarea performanțelor de durabilitate ale betoanelor (carbonatare, îngheț-dezghet).

Aplicarea ulterioară a unor metode de performanță specifice utilizate în țări din Europa (Olanda, Belgia sau unificate la nivel European) a scos în evidență că aplicarea metodei

---

raportului a/c echivalent, dedus pentru rezistență, nu este acoperitoare în multe cazuri pentru caracteristicile de durabilitate, astfel încât se poate spune că noțiunea de „echivalent” își pierde din semnificație.

Aplicarea metodelor de performanță pentru determinarea rezistenței la carbonatare și la îngheț-dezghet a betonului utilizând compoziția cu ciment II/A-S, respectiv cu ciment III/A ca ciment de referință, a scos în evidență că betonul cu aceeași cantitate de zgură, dar în beton, nu atinge aceleași performanțe.

Asigurarea aceleași durate de viață a construcțiilor din beton, presupune ca metodele prescriptive de tip “deem to satisfy”, în general, dar și particularizate la conceptul raport a/c echivalent în cazul utilizării adaosurilor, trebuie completate cu aplicarea unor metode de performanță ( Capitolul 5 ).

8). Propunerile de revizuire a reglementărilor tehnice pentru stabilirea domeniilor de utilizare a cimenturilor fabricate în România sunt necesare ținând seama de particularitățile de comportare ale betoanelor cu cimenturi compozite.

Abordările tradiționale de proiectare a durabilității se bazează pe valorile limită prescrise pentru parametrii prescriptivi ai compoziției selectate (cum ar fi raportul apă/liant maxim, rezistența la compresiune minimă și conținutul de ciment minim) nu reușesc să caracterizeze în mod adecvat rezistența betonului la carbonatare sau la penetrarea clorurilor, ignoră în mare măsură performanța diferită a diferitelor tipuri de adaosuri minerale adăugate în ciment sau în beton, precum și tipul de agregat, nu permit să se ia în considerare influențele execuției și ceea ce este esențial, nu pot, în mod explicit, să asigure aceeași durată de viață.

Lipsa unor metode adecvate, acceptate la nivel european sau internațional, de testare a performanțelor betonului este unul dintre principalii factori care încetinesc trecerea de la abordările prescriptive, considerate încă satisfăcătoare, la specificațiile bazate pe performanță (Capitolul 6).

9). Extinderea domeniilor de utilizare a cimenturilor compozite presupune amplificarea cercetărilor experimentale și interpretarea rezultatelor obținute pe baza unor criterii unitare. Lucrarea prezintă și dezvoltă tendințe recente în domeniu și scoate în evidență prin contribuții personale faptul că asigurarea durabilității betonului poate fi un deziderat perfect realizabil și în

---

cazul utilizării unor materiale cimentoide suplimentare contribuind per ansamblu la creșterea sustenabilității domeniului construcțiilor din beton armat.

## ***VII.2. Contribuții personale***

Teza de doctorat cuprinde mai multe elemente cu caracter original dintre care amintesc :

- ✓ Elaborarea unor studii de sinteză privind principalele compoziții chimice (oxidice) și mineralogice ale clincherului de ciment Portland și ale materialelor cimentoide suplimentare de tipul cenușilor zburătoare, zgurii granulate de furnal măcinate și al calcarului, punând în evidență diversitatea influențelor acestora în ciment. Aceste studii sunt conectate la problematica principală a tezei și au calitatea de a reuni într-o formă concisă și personală subiectul tratat prin prisma normelor naționale și internaționale;
- ✓ Realizarea unui amplu studiu comparativ între prevederile principalelor reglementări în vigoare privind metodele de testare ale betoanelor și necesitatea acestor încercări atât prin prisma cerințelor de proiectare, producere, execuție cât și în scop de cercetare a betonului armat;
- ✓ Realizarea unei sinteze cuprinzătoare privind efectele adaosurilor minerale de tipul cenușilor zburătoare, zgurii granulate de furnal măcinate și al calcarului asupra caracteristicilor betonului și optimizarea procentelor de adaos în scopul obținerii avantajelor maxime de utilizare a betoanelor cu cimenturi compozite în funcție de acțiunea mediului înconjurător;
- ✓ Propunerea unei metodologii de determinare a timpului de referință, alta decât cea la 28 de zile, în definirea clasei de rezistență a betonului cu cimenturi compozite;
- ✓ Analiza, dezvoltarea și aplicarea conceptului de performanță echivalentă între betoanele cu raport  $a/c$  și  $a/(c+k \times \text{adaos})$  echivalente;
- ✓ Prezentarea teoretică a conceptului de performanță echivalentă a betonului asociat durabilității în normativele europene sau naționale și aplicarea experimentală pentru implementarea în practică a acestor metodologii;
- ✓ Analiza critică a capitolelor referitoare la durabilitatea betonului din reglementările naționale;

- 
- ✓ Propuneri de revizuire a normelor naționale pe bază de cercetări experimentale efectuate și în acord cu proiectele de revizuire ale normelor europene;
  - ✓ Propunere de prezentare diferențiată a parametrilor compoziționali ai betonului pentru aceeași clasă de expunere în funcție de tipul de ciment în scopul asigurării aceleași durate de viață;
  - ✓ Propuneri de programe naționale în vederea creării cadrului necesar aplicării proiectului de revizuire ale standardului de proiectare, producere și execuție a lucrărilor de beton armat pentru asigurarea durabilității betoanelor;
  - ✓ Propuneri de metodologii de revizuire a întocmirii și aplicării metodelor prescriptive asociate metodelor de performanță în reglementările naționale pentru asigurarea durabilității.

### **Valorificarea rezultatelor**

Pe parcursul programului doctoral, activitatea de cercetare desfășurată a fost valorificată prin publicarea, în calitate de coautor, unui număr de 3 articole științifice, astfel:

- Lucrări publicate în reviste cotate ISI:
  1. Revista Română de Materiale / Romanian Journal of Materials 2019, 49 (1), 148 -156 - Aplicarea unor metode de evaluare asociate performanțelor materialelor pentru stabilirea domeniilor de utilizare a betonului (Application of some evaluation methods associated with the performance of materials to determine the areas of use of concrete)  
Dan Georgescu, Laurențiu Rece, **Anca Ionescu**, Adelina Apostu  
(<http://solacolu.chim.upb.ro/p148-156.pdf>)
- Lucrări publicate în reviste BDI (B+) incluse în baze de date internaționale:
  2. Scientific Journal - Mathematical Modeling - No. 1 / 2019 - Identifying the reference time for determining the compressive strength of concrete containing different types of cements (Identificarea timpului de referință pentru determinarea valorii rezistenței la compresiune a betonului cu diferite tipuri de cimenturi).  
**Anca Ionescu**, Adelina Apostu, Dan Paul Georgescu  
(Mathematical Modelling in Civil Engineering Vol. 15-No. 1: 26-35-2019  
Doi: 10.2478/mmce-2019-0003)  
(<http://mmce.rs.utcb.ro/images/doc/2019/mmce-volume15-0003.pdf>)
- Lucrări publicate în reviste naționale:
  3. Buletinul Științific U.T.C.B. NR. 1/2019 pag. 13-24.

---

Rezistentele la compresiune ale betoanelor preparate cu același tip de ciment compozit provenit din surse diferite

**Anca Ionescu**, Adelina Apostu, Dan Georgescu  
([bs.rs.utcb.ro/arh/arhiva2019/doctoral\\_nr\\_1-2\\_2019.pdf](https://bs.rs.utcb.ro/arh/arhiva2019/doctoral_nr_1-2_2019.pdf))

### ***VII.3. Direcții de cercetare viitoare***

- Studiile realizate în cuprinsul lucrării reprezintă o introducere în domeniul comportării betoanelor cu cimenturi compozite și pot fi îmbunătățite continuu prin cercetarea experimentală a comportării lor printr-o multitudine de programe în care să fie proiectate compoziții care să contribuie la îmbunătățirea/optimizarea comportării betonului în funcție de mediul de expunere și astfel la completarea normelor și reglementărilor naționale;
- Extinderea cercetării prin diversificarea parametrilor studiați și/sau utilizării altor tipuri de adaosuri minerale;
- Introducerea în normele naționale a metodologiei de aplicare a conceptului de performanță echivalentă a betonului asociat durabilității;
- Efectuarea de studii experimentale pentru încadrarea betoanelor cu cimenturi compozite în clase de rezistență la carbonatare, la penetrarea clorurilor, la îngheț-dezgheț și atac chimic;
- Stabilirea timpului de referință indicat pentru determinarea clasei betonului cu cimenturi compozite și a betonului cu adaosuri minerale;
- Cercetări experimentale în vederea determinării timpului de referință pentru evidențierea unor alte caracteristici ale betonului decât rezistența la compresiune;
- Extinderea cercetărilor pentru alte tipuri de caracteristici ale betonului care sunt influențate de utilizarea cimenturilor cu adaosuri, de exemplu verificarea experimentală a valorii deformației de bază a contracției;
- Efectuarea unor cercetări experimentale pentru acțiuni simultane de mediu și mecanice.



## BIBLIOGRAFIE SELECTIVA

- [1] Dan Paul Georgescu - Îndrumător de proiectare a durabilității betonului în conformitate cu anexa națională de aplicare a SR EN 206-clase de durabilitate, Tipografia Everest 2001, București;
- [2] Dan Georgescu, Adelina Apostu, Constantin Cosma – Construcții din beton cu impact redus asupra mediului și sănătății, Editura MatrixRom 2009;
- [3] NE 012-1 "Normativ pentru producerea betonului și executarea lucrărilor din beton, beton armat și beton precomprimat. Partea 1: Producerea betonului";
- [4] NE 012-2 "Normativ pentru producerea și executarea lucrărilor din beton, beton armat și beton precomprimat. Partea 2: Executarea lucrărilor din beton";
- [5] SR EN 196-1- Metode de încercări ale cimenturilor. Partea 1: Determinarea rezistențelor mecanice
- [6] SR EN 196-2 - Metode de încercări ale cimenturilor. Partea 2: Analiza chimică a cimenturilor
- [7] SR EN 196-3 - Metode de încercări ale cimenturilor. Partea 3: Determinarea timpului de priză și a stabilității
- [8] SR EN 197-1- Ciment – Partea 1: Compoziție, specificații și criterii de conformitate ale cimenturilor uzuale
- [9] SR EN 12350-4 - Încercare pe beton proaspăt. Partea 4: Gradul de compactare
- [10] SR EN 12350-5- Încercare pe beton proaspăt. Partea 5: Încercare cu masa de răspândire.
- [11] SR EN 12350-6- Încercare pe beton proaspăt. Partea 6:Densitate
- [12] SR EN 12350-7- Încercare pe beton proaspăt. Partea 7: Conținut de aer. Metode prin presiune.
- [13] SR EN 12350-2- Încercare pe beton proaspăt. Partea 2: Încercarea de tasare
- [14] SR EN 12350-3- Încercare pe beton proaspăt. Partea 3: Încercarea Vebe
- [15] Alina Badanoiu, Maria Georgescu s.a. - Lianți ecologici complecși, Universitatea Politehnică București - Facultatea de Chimie Aplicată și Știința Materialelor;
- [16] A. M. NEVILLE – Proprietățile betonului, Editura Tehnică, 2003;
- [17] SR EN 206 - Beton. Partea 1: Specificație, performanță, producție și conformitate;
- [18] <https://www.scribd.com/presentation/229137665/Curs-Beton>
- [19] SR EN 12390-1- Încercare pe beton întărit. Partea1: Formă, dimensiuni și alte condiții pentru epruvete și tipare.

- 
- [20] SR EN 12390-2 - Încercare pe beton întărit. Partea 2: Pregătirea și păstrarea epruvetelor pentru încercări de rezistență.
- [21] SR EN 12390-3 - Încercare pe beton întărit. Partea 3: Rezistența la compresiune a epruvetelor.
- [22] SR EN 12390-8 - Încercare pe beton întărit. Partea 8: Adâncimea de pătrundere a apei sub presiune.
- [23] SR EN 12390-7 - Încercare pe beton întărit. Partea 7: Densitatea betonului întărit
- [24] STAS 2833 - Încercări pe betoane. Determinarea contracției axiale a betonului întărit
- [25] SR EN 12390-13 - Încercare pe beton întărit. Partea 13: Determinarea modulului secant de elasticitate în compresiune
- [26] SR EN 12390-5 - Încercare pe beton întărit. Partea 5: Rezistența la încovoiere
- [27] SR EN 12390-6 - Încercare pe beton întărit. Partea 5: Rezistența la întindere prin despicare a epruvetelor
- [28] STAS 5511 - Încercări pe betoane. Determinarea aderenței dintre beton și armătură. Metoda prin smulgere
- [29] SR EN 12504-3 - Încercări pe beton în structuri. Determinarea forței de smulgere
- [30] [https://www.researchgate.net/publication/277009433\\_PROBLEME\\_PRIVIND\\_DURABILITATEA\\_BETOANELOR\\_PROVOCATE\\_DE\\_PROCESELE\\_CHIMICE](https://www.researchgate.net/publication/277009433_PROBLEME_PRIVIND_DURABILITATEA_BETOANELOR_PROVOCATE_DE_PROCESELE_CHIMICE)
- [31] Maria Gheorghe - Materiale de construcție, Editura Conspress 2010
- [32] D. Georgescu, R. Pascu - Beton armat, curs, partea I și a II-a, Editura Conspress 2013
- [33] SR EN 1992-1-1 – Eurocod 2 – Proiectarea structurilor din beton. Partea 1-1: Reguli generale și reguli pentru clădiri.
- [34] I. Teoreanu, V. Moldovan, L. Nicolescu - Durabilitatea betonului, Editura Tehnica București, 1982;
- [35] <https://www.scribd.com/document/138060440/Portland-Cement-Concrete>
- [36] [http://www.navodayaengg.in/wp-content/uploads/2015/12/U5\\_L28\\_GEL-SPACE-RATIO-AND-MATURITY-CONCEPT-OF-CONCRETE..pdf](http://www.navodayaengg.in/wp-content/uploads/2015/12/U5_L28_GEL-SPACE-RATIO-AND-MATURITY-CONCEPT-OF-CONCRETE..pdf)
- [37] [http://www.sginstitute.in/Downloads/Civil\\_Downloads/LectureNo\\_15.pdf](http://www.sginstitute.in/Downloads/Civil_Downloads/LectureNo_15.pdf)
- [38] R. Gavrilescu - Utilizarea unor abordări moderne în vederea stabilirii domeniilor de utilizare ale cimenturilor Portland compozite cu adaos de calcar- Teza de doctorat, UTCB, 2013.
- [39] <http://users.csa.upatras.gr/~vgpapa/files/book2.pdf>
- [40] [http://www.ijera.com/papers/Vol3\\_issue4/AV34285289.pdf](http://www.ijera.com/papers/Vol3_issue4/AV34285289.pdf)
- [41] [http://www.ct.upt.ro/users/SorinDan/Beton\\_si\\_structuri\\_din\\_beton/4\\_Betonul%20armat.pdf](http://www.ct.upt.ro/users/SorinDan/Beton_si_structuri_din_beton/4_Betonul%20armat.pdf)
- [42] <http://www.concretescience.com/wp-content/uploads/2013/02/ph-of-Concrete.pdf>

- 
- [43] <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/hif16033.pdf>
- [44] SR 3518: Încercări pe betoane. Determinarea rezistenței la îngheț -dezgheț prin măsurarea rezistenței la îngheț-dezgheț prin măsurarea variației rezistenței la compresiune și/sau a modulului de elasticitate dinamic relativ
- [45] CEN/TS 12390-9 - Încercări pe beton întărit. Partea 9: Rezistența la îngheț dezgheț. Exfolierea
- [46] <http://article.sciencepublishinggroup.com/html/10.11648.j.nano.20160402.11.html>
- [47] [http://www.cement.org/docs/default-source/fc\\_concrete\\_technology/is548-optimizing-the-use-of-fly-ash-concrete.pdf](http://www.cement.org/docs/default-source/fc_concrete_technology/is548-optimizing-the-use-of-fly-ash-concrete.pdf)
- [48][https://www.researchgate.net/profile/Md\\_Aftabur\\_Rahman/publication/305501367\\_Strength\\_Behavior\\_of\\_Mortar\\_Using\\_Slag\\_As\\_Partial\\_Replacement\\_of\\_Cement/links/579237a908aed51475acb66e/Strength-Behavior-of-Mortar-Using-Slag-As-Partial-Replacement-of-Cement.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Md_Aftabur_Rahman/publication/305501367_Strength_Behavior_of_Mortar_Using_Slag_As_Partial_Replacement_of_Cement/links/579237a908aed51475acb66e/Strength-Behavior-of-Mortar-Using-Slag-As-Partial-Replacement-of-Cement.pdf)
- [49] [http://www.bpesol.com/bachphuong/media/images/book/233r\\_95.pdf](http://www.bpesol.com/bachphuong/media/images/book/233r_95.pdf)
- [50] [http://iaeme.com/MasterAdmin/uploadfolder/IJCIET\\_08\\_03\\_043/IJCIET\\_08\\_03\\_043.pdf](http://iaeme.com/MasterAdmin/uploadfolder/IJCIET_08_03_043/IJCIET_08_03_043.pdf)
- [51] <http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol12-issue4/Version-6/I012467682.pdf>
- [52][https://www.researchgate.net/publication/264733670\\_Effect\\_of\\_Limestone\\_Fillers\\_the\\_Physical-Mechanical\\_Properties\\_of\\_Limestone\\_Concrete](https://www.researchgate.net/publication/264733670_Effect_of_Limestone_Fillers_the_Physical-Mechanical_Properties_of_Limestone_Concrete)
- [53] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016816000375>
- [54] <http://pubs.sciepub.com/ajcea/4/4/4/index.html>
- [55] <http://cement.org/astmc01/EB227.pdf>
- [56] <http://esatjournals.net/ijret/2014v03/i04/IJRET20140304041.pdf>
- [57] pr.ENV 196-X - Determinarea rezistenței cimenturilor la atacul soluțiilor sulfatice și al apei de mare
- [58] Principles of the equivalent durability procedure - Grundsätze des gleichwertigen Dauerhaftigkeitsverfahrens
- [59] CEN TRxxxx: N 703 CEN/TC104/SC1/TG17 – N 71 DRAFT FOR CEN/TC104/SC1 COMMENT - Principles of the equivalent durability procedure DRAFT FOR CEN/TC104/SC1 COMMENT - CEN/TC104/SC1, 2011;
- [60] PT1 prEN1992-1-1 2017-10-30 D2
- [61] VC12 WG4 - Dutch guideline for the equivalent concrete performance concept Draft version, 2009;
- [62] SR EN 450-1- Cenușa zburătoare pentru beton. Partea 1. Definiție, condiții și criterii de conformitate.
- [63] SR EN 15167-1- Zgura granulată de furnal măcinată pentru utilizare în beton, mortar și pastă. Partea 1. Definiții, specificații și criterii de conformitate

- 
- [64] NBN B 15-100 - Norme belge - Methodologie pour l'evaluation et l'attestation a l'emploi de ciments et d'additions de type II destines du beton , 2008
- [65] Studii experimentale asupra durabilității cimenturilor cu adaos de calcar, Universitatea Tehnică de Construcții București
- [66] Norme française NFP 18-406, Béton : Essai de compression, AFNOR Paris
- [67] CEN/TS 12390-10 - Testing hardened concrete - Part 10: Determination of the relative carbonation resistance of concrete
- [68] CEN/TS 12390-12 - Testing hardened concrete Part 12: Determination of the potential carbonation resistance of concrete: Accelerated carbonation method
- [69] CEN/TS 12390-11 - Testing hardened concrete - Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion
- [70] - SR EN 14630 - Produse și sisteme pentru protecția și repararea structurilor de beton. Metode de încercări. Determinarea adâncimii de carbonare în betonul întărit prin metoda cu fenolftaleină
- [71] <http://www.scrigroup.com/casa-masina/constructii/DEFORMATIILE-BETONULUI84163.php>
- [72] <https://vdocuments.site/documents/tehnologie-proiectarea-compozitiei-betoanelor.html>
- [73] <http://www.scrigroup.com/casa-masina/constructii/BETONUL-ARMAT64659.php>
- [74] <http://www.rasfoiesc.com/inginerie/constructii/lcincercari-pe-betonul-intar78.php>
- [75] <http://www.creeaza.com/tehnologie/constructii/Proprietatile-betonului-intari669.php>
- [76] <https://www.scribd.com/document/135419683/Recarbonatarea-betonului>
- [77] <http://www.qreferat.com/referate/chimie/Compozitia-mineralogica-a-cime419.php>
- [78] SR ISO 10694 - Calitatea solului. Determinarea carbonului organic și total după combustie uscată (analiză elementară)
- [79] SR EN 13263-1+A1 - Silice ultrafină pentru beton. Partea 1: Definiții, condiții și criterii de conformitate
- [80] CEN/TR 15177 - Rezistența la îngheț dezgheț. Determinarea deteriorărilor interne.
- [81] CEN TECHNICAL REPORT CEN/TC104/SC1/TG5 "Use of additions" TG5-170 - USE OF K-VALUE CONCEPT, EQUIVALENT CONCRETE PERFORMANCE CONCEPT AND EQUIVALENT PERFORMANCE OF COMBINATIONS CONCEPT, 2011;
- [82] Dan Georgescu - Cercetări experimentale privind utilizarea adaosurilor de zgura granulata de furnal in beton. Determinarea experimentală a coeficientului k. Partea 1- Revista Romana de Inginerie Civila 1/2013, pag.7-19, MATRIX ROM, ISBN 2068-3987;
- [83] Dan Georgescu - Cercetări experimentale privind utilizarea adaosurilor de zgura granulata de furnal in beton. Cercetări experimentale pentru determinarea caracteristicilor de rezistenta si durabilitate a betoanelor preparate cu cimenturi tip II/A-S, III/A si respectiv cu ciment tip I si

---

adaosuri de 10% si 37% zgura. Partea 2- Revista Română de Inginerie Civilă, Volumul 4 (2013), Numărul 1

[84] SR EN 13670 - Execuția structurilor de beton.

[85] <https://theconstructor.org/concrete/in-situ-testing-of-concrete/15532/>

[86] <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/hif16033.pdf>

[87] SR EN 197-2 - Ciment – Partea 2 : Evaluarea conformității

[88] Imre Biczok - Coroziunea si protecția betonului, Editura Tehnica București, 1965;

[89] N. Panait (Saca) - Implicații ale  $\text{CaCO}_3$  în întărirea si proprietățile materialelor compozite pe baza de liant mineral-Teza de doctorat, UPB

[90] Igor Terteia, Traian Oneț - Verificarea calității construcțiilor de beton armat si beton precomprimat, Editura Dacia Cluj Napoca, 1979;

[91] SR 3832-10 - Materiale puzzolanice si artificiale. Caracteristici fizico-chimice.

[92] ASTM C618 - Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete

[93] ASTM D5239 - Standard Practice for Characterizing Fly Ash for Use in Soil Stabilization

[94] ASTM D7348-13 - Standard Test Methods for Loss on Ignition (LOI) of Solid Combustion Residues

[95] ASTM C989 – 06 - Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars

[96] AASHTO M 302 - Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars

[97] SR 648 - Zgura granulata de furnal pentru industria cimentului

[98] SR EN 196-6 - Metode de încercări ale cimenturilor. Partea 6: Determinarea fineții

[99] SR EN 13639 - Determinarea carbonului organic total din calcar

[100] Ion IONESCU, Traian ISPAS – Proprietățile și tehnologia betoanelor, Editura Tehnică, 1997;

[101] Zamfirescu Dan, Postelnicu Tudor – Durabilitatea betonului armat, Sinteza elementelor de baza, Editura MatrixRom, București, 2003;

[102] Ion IONESCU, Traian ISPAS, Augustin POPAE.SCU – Betoane de înaltă performanță, Editura Tehnică, 1999.

[103] Traian Oneț - Durabilitatea betonului armat, Editura Tehnica București, 1994;

- 
- [104] SR 13379- Betoane si mortare de ciment. Estimarea penetrării accelerate a dioxidului de carbon
- [105] SR CR 12793 - Determinarea adâncimii stratului de carbonatare a betonului întărit
- [106] <http://www.rasfoiesc.com/inginerie/constructii/Rezistentele-mecanice-ale-beto21.php>
- [107] ACI 301- Specifications for Structural Concrete for Buildings
- [108] [www.eurocodes.fi/1992/paasivu1992/sahkoinen1992/1110\\_WS\\_EC2.pdf](http://www.eurocodes.fi/1992/paasivu1992/sahkoinen1992/1110_WS_EC2.pdf)
- [109] [http://www.concrete.ie/downloads/concrete\\_standards.pdf](http://www.concrete.ie/downloads/concrete_standards.pdf)
- [110] [https://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/tecnologia\\_hormigon/europeNorm206.pdf](https://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/tecnologia_hormigon/europeNorm206.pdf)
- [111] [http://www.intrans.iastate.edu/reports/taylor\\_ocm\\_w\\_cvr2.pdf](http://www.intrans.iastate.edu/reports/taylor_ocm_w_cvr2.pdf)
- [112] [documents.epfl.ch/users/s/st/ston/www/8%20Durability.pdf](http://documents.epfl.ch/users/s/st/ston/www/8%20Durability.pdf)
- [113] [http://www.standard.no/Global/PDF/Bygg,%20anlegg%20og%20eiendom/2018\\_Eurokodese minar/3-07%20Steinar%20Leivestad,%20%20Durability,%20Concrete,%20Environment.pdf](http://www.standard.no/Global/PDF/Bygg,%20anlegg%20og%20eiendom/2018_Eurokodese%20minar/3-07%20Steinar%20Leivestad,%20%20Durability,%20Concrete,%20Environment.pdf)
- [114] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1687404812000028>
- [115] Anca Ionescu - Raport de cercetare nr. 1 din teza de doctorat – Metode si procedee de încercare in laborator ale betoanelor
- [116] Anca Ionescu - Raport de cercetare nr. 2 din teza de doctorat – Particularități privind evoluția in timp a caracteristicilor fizico - mecanice ale betoanelor preparate cu cimenturi compozite
- [117] Anca Ionescu - Raport de cercetare nr. 3 din teza de doctorat – Cercetări experimentale pentru stabilirea termenelor optime pentru determinarea unor caracteristici ale betoanelor realizate cu cimenturi cu adaosuri.
- [118] Dan Paul Georgescu, Laurențiu Rece, Anca Ionescu, Adelina Apostu - Application of some evaluation methods associated with the performance of materials to determine the areas of use of concrete 148-156 (Aplicarea unor metode de evaluare asociate performanțelor materialelor pentru stabilirea domeniilor de utilizare a betonului), Revista romana de materiale, vol.49, nr.1, 2019
- [119] Anca Ionescu, Adelina Apostu, Dan Paul Georgescu - Identifying the reference time for determining the compressive strength of concrete with different types of cements (Identificarea timpului de referinta pentru determinarea valorii rezistentei la compresiune a betonului cu diferite tipuri de cimenturi), Mathematical Modelling in Civil Engineering
- [120] Anca Ionescu, Adelina Apostu, Dan Paul Georgescu - Rezistentele la compresiune ale betoanelor preparate cu același tip de ciment compozit provenit din surse diferite, Buletinul Științific doctoral,nr.1/2019
- [121] <https://www.cement.org/cement-concrete-applications/concrete-materials/cement-types>

---

[122] [iti.northwestern.edu/cement/monograph/Monograph3\\_8.html](http://iti.northwestern.edu/cement/monograph/Monograph3_8.html)

[123] SR EN 12350-1 - Încercare pe beton proaspăt. Partea 1: Eșantionare

[124] ASTM C311 – 11 - Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete

[125] Cementitious Materials for Concrete, ACI Education Bulletin E3-01.2001, American Concrete Institute.