
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

INTRODUCERE. TEMA ȘI OBIECTIVELE LUCRĂRII.....	6
---	----------

Rezumatul Capitolului I – CIMENTUL.....	9
--	----------

Cuprins teză Capitol I:

I.1. Ciment Portland

I.1.1. Istoria cimentului Portland și a betonului

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

I.1.3. Modulii caracteristici ai cimentului

I.1.4. Factori caracteristici pentru comportarea cimenturilor

I.1.4.1. Hidratarea cimentului Portland

I.1.4.2. Priza cimentului

I.1.4.3. Finețea de măcinare a cimentului

I.1.4.4. Căldura de hidratare a cimentului

I.1.4.5. Rezistența mecanică

I.1.4.6. Influența alcaliilor (Na_2O și K_2O)

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

I.2.1. Clasificarea materialelor cimentoide suplimentare

I.2.2. Cenușa zburătoare (volantă)

I.2.2.1. Descriere generală

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

I.2.2.3. Caracteristicile unor cenuși zburătoare clasa F și clasa C - (prevederi ASTM C 618 [92])

I.2.2.4. Caracteristicile cenușilor zburătoare conform SR 405-1[62]

I.2.3. Zgura granulată de furnal măcinată

I.2.3.1. Descriere generală

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

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

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

I.2.4. Calcar

I.2.4.1. Descriere generală

I.2.4.2. Caracteristicile fizico-chimice ale calcarului

I.2.4.3. Efectele prezenței calcarului în ciment

Rezumatul Capitolului II - CARACTERISTICI ALE CIMENTURILOR SI BETOANELOR, FACTORI DE INFLUENTA, METODE SI PROCEDEE DE INCERCARE, NIVELURI DE PERFORMANTA.....16

Cuprins teză Capitol II:

II.1. Încercări pe paste de ciment

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

II.2.1. Lucrabilitate

II.2.2. Grad de compactare

II.2.3. Densitate aparentă

II.2.4. Conținutul de aer

II.2.5. Timp de priză

II.3. Încercări pe beton întărit

II.3.1. Densitatea aparentă

II.3.2. Compactitatea (porozitatea

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

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

II.3.5. Modulul de elasticitate la compresiune

II.3.6. Rezistența la compresiune a betonului

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

II.3.8. Aderența dintre beton și armătură. Metoda prin smulgere

II.4. Încercări pentru aprecierea durabilității betoanelor

II.4.1. Carbonatarea betonului

II.4.2. Penetrarea clorurilor în beton

II.4.3. Rezistența la îngheț-dezgheț

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

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

II.4.5.1. Atacul acizilor

II.4.5.2. Atacul sulfatic

II.4.5.3. Reacția alcalii-agregate

II.4.5.4. Atacul biologic

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

Rezumatul Capitolului III - INFLUENTA ADAOSURILOR DIN CIMENT ASUPRA PROPRIETATILOR BETOANELOR.....20

Cuprins teză Capitol III:

III.1. Influența prezentei adaosului de cenușă zburătoare asupra principalelor proprietăți ale pastelor de ciment, respectiv ale betoanelor preparate cu cimenturi cu cenușă zburătoare

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

III.1.2. Efectele adaosului de cenușă zburătoare asupra proprietăților betonului proaspăt

III.1.3. Efectele adaosului de cenușă zburătoare asupra proprietăților betonului întărit

III.1.4. Efectele adaosului de cenușă zburătoare asupra durabilității betonului

III.1.5. Optimizarea conținutului de cenușă zburătoare din beton în funcție de proprietatea selectată

III.2. Influența prezentei adaosului de zgură granulată de furnal măcinată asupra principalelor proprietăți ale pastelor de ciment, respectiv ale betoanelor preparate cu cimenturi cu zgură

III.2.1. Efectele adaosului de zgură granulată de furnal măcinată asupra proprietăților betonului proaspăt

III.2.2. Efectele adaosului de zgură granulată de furnal măcinată asupra proprietăților betonului întărit

III.2.3. Efectele adaosului de zgură granulată de furnal măcinată asupra durabilității betonului

III.2.4. Optimizarea conținutului de zgură granulată de furnal măcinată din beton în funcție de proprietatea selectată

III.3. Influența prezentei adaosului de calcar asupra principalelor proprietăți ale pastelor de ciment, respectiv ale betoanelor preparate cu cimenturi cu calcar

III.3.1. Efectele adaosului de calcar asupra proprietăților betonului proaspăt

III.3.2. Efectele adaosului de calcar asupra proprietăților betonului întărit

III.3.3. Efectele adaosului de calcar asupra durabilității betonului

III.3.4. Optimizarea conținutului de adaos de calcar din beton în funcție de proprietatea selectată

III.4. Efectele adaosurilor minerale din ciment/beton asupra proprietăților betonului proaspăt

III.5. Efectele adaosurilor minerale din ciment/beton asupra proprietăților betonului întărit

Rezumatul Capitolului IV - METODE DE PERFORMANTA PENTRU EVALUAREA DURABILITATII SI A EVOLUTIEI REZISTENTEI BETOANELOR PREPARATE CU ADAOSURI.....28

Cuprins teză Capitol IV:

IV.1. Aspecte generale ale durabilității betonului

IV.1.1. Durabilitatea și factorii care influențează durabilitatea betonului

IV.2. Metode de dozare pentru adaosuri minerale

IV.2.1. Determinarea experimentală a valorii coeficientului k

IV.3. Conceptul de performanță echivalentă a betonului în normativul european CEN/TC104/SC1

IV.3.1. Aspecte generale legate de conceptul de performanță echivalentă a betonului

IV.3.2. Principiile metodei

IV.3.3. Metode de testare asociate performanței care au fost sau sunt standardizate la nivel european

IV.3.4. Determinarea performanțelor de încercare asociate cu durabilitatea echivalentă

IV.4. Conceptul de performanță echivalentă a betonului în codul olandez CEN / TR 16563: 2013 (VC12 WG4)

IV.5. Conceptul de performanță echivalentă a betonului în metoda belgiana

IV.6. Evoluția în timp a rezistenței la compresiune a betoanelor preparate cu cimenturi compozite

Rezumatul Capitolului V - CERCETARI EXPERIMENTALE PENTRU STABILIREA PARTICULARITATILOR LEGATE DE COMPORTAREA BETOANELOR CU CIMENTURI COMPOZITE.....35

Cuprins teză Capitol V:

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

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

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

Rezumatul Capitolului VI - PROPUNERI DE REVIZUIRE A PROCEDEELOR EXPERIMENTALE PENTRU STABILIREA DOMENIILOR DE UTILIZARE A CIMENTURILOR FABRICATE IN ROMANIA.....63

Cuprins teză Capitol VI:

VI.1. Analiza actualelor reglementari naționale privind asigurarea durabilității

VI.1.1. Identificarea claselor de expunere relevante

VI.1.2. Masuri necesare în vederea asigurării durabilității

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

VI.2.1. Particularități ale betoanelor preparate cu cimenturi compozite

VI.2.2. Sinteza asupra rezultatelor experimentale obținute

VI.3. Propuneri de revizuire a reglementarilor naționale

Capitolul VII - CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE STUDIU.....65

Bibliografie selectiva.....72

Teza de doctorat „*CERCETĂRI ASUPRA PROPRIETĂȚILOR MECANICE ALE BETOANELOR CU CIMENTURI COMPOZITE*” realizează o sinteză documentară a unui vast material bibliografic și normativ, la nivel național și european, a materialelor cimentoide suplimentare și prezintă unui program

amplu de cercetări experimentale reprezentativ pentru domeniul betoanelor cu cimenturi compozite ale cărui rezultate sunt interpretate prin prisma specificațiilor prescriptive și ale abordărilor bazate pe performanță.

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.

Cuvinte cheie: ciment Portland, sursa clincher, cenușa zburătoare, zgură, calcar, beton, rezistența la compresiune, timp de referință, carbonatare, rezistența la îngheț-dezgheț și atac sulfatic, permeabilitate, durabilitate, prevederi prescriptive, metode de performanță.

Teza de doctorat se încadrează în domeniul științific Inginerie Civilă și este structurată în șapte capitole cuprinzând 339 pagini, 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 compoziții 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 întemeiate 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 cimentoide suplimentare conținând caracteristicile cenușilor zburătoare, zgurilor granulate de furnal măcinate și calcarelor utilizate în industria construcțiilor.

Capitolul 2 „CARACTERISTICI ALE CIMENTURILOR ȘI BETOANELOR, FACTORI DE INFLUENȚĂ, METODE ȘI PROCEDEE DE INCERCARE, NIVELURI DE PERFORMANȚĂ” 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 problematicei, numărul foarte mare de parametri 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 „INFLUENȚA ADAOSURILOR DIN CIMENT ȘI BETON ASUPRA PROPRIETĂȚILOR BETOANELOR”** este studiat efectul materialelor cimentoide 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 PERFORMANTA PENTRU EVALUAREA DURABILITATII SI A EVOLUTIEI REZISTENTEI 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 simplu de aplicat de tip prescriptiv.

Capitolul 5 „CERCETARI EXPERIMENTALE PENTRU STABILIREA PARTICULARITATILOR 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 IN ROMANIA” tratează problema generală a durabilității betoanelor preparate cu materiale cimentoide suplimentare care este influențată în principal de: tipul și procente de 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 reglementari (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.

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

Rezumatul capitolului I.

În primul capitol denumit „*Cimentul*” se face, la început, o sumară trecere în revistă a unor aspecte istorice legate de utilizarea cimentului Portland și a betonului în Europa și România, făcând referire la compoziția chimică (oxidică) și mineralogică a clincherului de ciment Portland și la tipurile de cimenturi uzuale specifice României (Tabelul I.1).

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

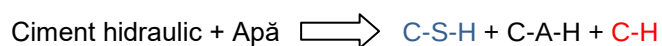
Tipuri principale	Tipuri de cimenturi uzuale		Compoziție (procente de masă)									
			Componente principale									Compo-nente auxiliare minore
			Clincher (K)	Zgură de furnal (S)	Silice ultrafină (D)	Puzzolană naturală (P)	Puzzolană calcinată (Q)	Cenușă zburătoare		Șist calcinat (T)	Calcar (L/LL)	
			Silicioasă (V)	Calică (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
		CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
	Ciment portland cu puzzolană	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

Capitolul I tratează, în mod extins, domeniul general al adaosurilor minerale funcție de modul în care acestea reacționează cu apa și cu cimentul Portland, pentru a înțelege mai bine comportarea acestor betoane cu cimente compozite.

În reacția hidraulică dintre un material cimentoid suplimentar și apă rezultă produși de hidrosilicat de calciu (C-S-H) și hidroxid de calciu (CH), de asemenea etringita și alți hidroaluminati (C-A-H) (de ex: cimentul Portland, cimentul cu zgura granulată de furnal măcinată, cimentul cu cenușă zburătoare clasa C).

Reacția hidraulică:

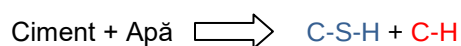


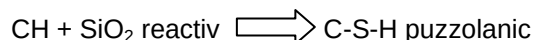
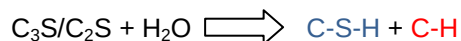
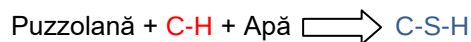
C-S-H asigură rezistența betonului - un produs favorabil

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

Reacția puzzolanică se produce între puzzolană, hidroxid de calciu și apă rezultând numai hidrosilicat de calciu, adică produsul favorabil care asigură rezistența betonului.

Reacția puzzolanică:





Hidrosilicatul de calciu puzzolanic este în general mai poros decât C-S-H normal și are un raport calciu/silice mai scăzut. Un adaos puzzolanic poate avea Al_2O_3 reactiv, caz în care reacția cu hidroxidul de calciu conduce la formarea hidroaluminatului de calciu, care nu se comportă satisfăcător la atacul sulfatic.

Clasificarea adaosurilor minerale de către RILEM (Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Materiaux, Systemes de Construction et Ouvrages) este următoarea:

- materiale cimentoide;
- materiale intens puzzolanice: silicea 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.1. - Efectele hidraulice/puzzolanice calitative ale adaosurilor minerale

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.

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

Cenușă zburătoare (volantă)

Cenușă 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. Cenușă 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% SiO_2 , 5-35% Al_2O_3 , 10-40% Fe_2O_3 , 1-12% CaO ;
- pentru cărbune sub-bituminos: 40-60% SiO_2 , 20-30% Al_2O_3 , 4-10% Fe_2O_3 , 5-30% CaO ;
- pentru lignit: 15-45% SiO_2 , 20-25% Al_2O_3 , 4-15% Fe_2O_3 , 15-40% CaO (Rotaru și Boboc, 2010).



Figura I.2. - Cement cu cenușă zburătoare, prezentare generală.

În funcție de raportul $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, de conținutul în CaO și 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.

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

$$I_{ap} = \frac{A-B}{B} \quad (I.1)$$

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 (Tabelul I.2), 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.

Tabel I.2. - Clasificarea cenușilor după indicii 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

Conform prevederilor ASTM C618 [92] există două tipuri principale de cenușă zburătoare:

- cenușă zburătoare clasa C – cenușă calcică cu proprietăți cimentoide și puzzolanice (V) și
- cenușă zburătoare clasa F – cenușă silicioasă cu proprietăți puzzolanice (W)

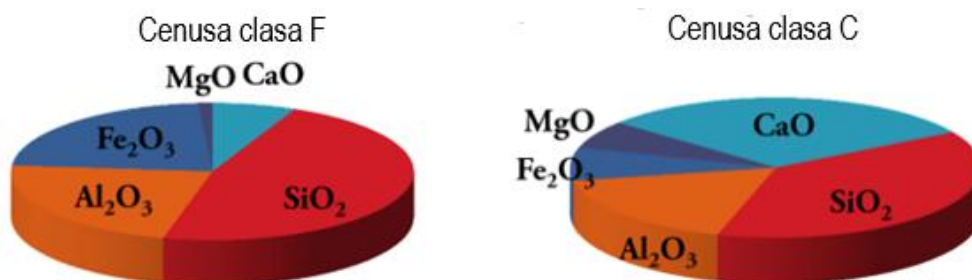


Figura I.3. - Compoziția mineralică a cenușilor clasa F și clasa C.

Zgura granulată de furnal măcinată

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 inferioară pentru cele mai multe cimenturi Portland.

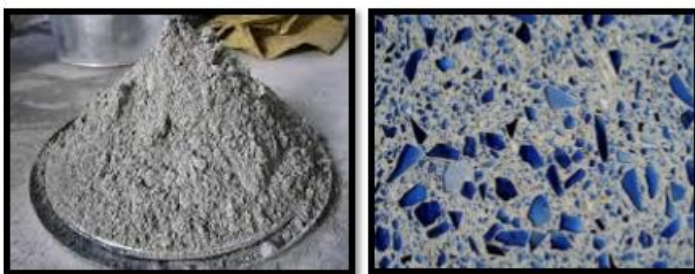


Figura I.4. - Ciment și beton cu zgura granulată de furnal măcinată, prezentare generală.

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 ciment, folosite ca adaos mineral în funcție de compoziția oxidică a lor prin:

- indici de bazicitate [38]:

$$I_{b1} = \frac{\%CaO}{\%SiO_2} \quad I_{b2} = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3} \quad (I.2 \text{ și } I.3)$$

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:

$$M_{Al} = \frac{\%Al_2O_3}{\%SiO_2} \quad (I.4)$$

Valorile lui M_{Al} 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 :

$$i_k = \frac{\%CaO + \%MgO + \%Al_2O_3}{\%SiO_2} \quad (I.5)$$

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:

$$F = \frac{\%CaO + 0.5\%MgO + \%Al_2O_3}{\%SiO_2 + \%MnO} \quad (I.6)$$

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]:

$$R = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2} \quad (I.7)$$

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

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

$$S = \%CaO + \%MgO + \%SiO_2 > 66.6\% \quad (I.8)$$

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].

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:

$$SAI = \frac{SP}{P} 100 (\%) \quad (I.9)$$

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.3.

Tabelul I.3. - 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.

Conform SR 15167-1 [63] se determină puterea de hidraulicitate a zgurilor prin coeficientul de activitate (α) cu următoarea relație: $\alpha = S \times P \times 10^{-3}$ (I.22)

în care: S este suprafața specifică Blaine a părților fine din zgură ($< 0,08$ mm), în cm^2/g ;

P – procentul de părți fine după măcinarea în mori cu bile, în %.

În funcție de valoarea coeficientului α , zgura se clasifică în clasele prezentate în tabelul I.4.

Tabelul I.4. - 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

Calcarul



Figura I.5. - 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 (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 zăcământ sau straturi.

Din punct de vedere al rezistenței betonului calcarul poate fi considerat un material aproape inert, dar îmbunătățește alte proprietăți ale betonului.

Conținutul de carbonat de calciu (CaCO_3) calculat din conținutul de oxid de calciu (CAO) trebuie să fie minimum 75% din masă.

Conținutul de carbon organic total (TOC):

- 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.

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 (de umplere a golurilor cu particule fine)
- efectul de generare de centre de nucleație (particulele fine înconjoară granulele de clincher și producii de hidratare precipita pe ele)

- efectul de accelerare a hidratării cimentului (reacția dintre calcarul LL și aluminatul tricalcic C_3A mărește căldura de hidr și hidratarea cimentului poate fi totală).

Rezumatul capitolului II

Capitolul II denumit „*Caracteristici ale cimenturilor și betoanelor, factori de influență, metode și procedee de încercare, niveluri de performanță*” prezintă nivelul actual al metodelor și procedeele de încercare ale cimenturilor și betoanelor, din reglementările naționale în vigoare, atât în ceea ce privește factorii de influență ai proprietății respective cât și despre nivelurile de performanță ale caracteristicii analizate.

În tabelul II.1. sunt cuprinse caracteristicile betoanelor proaspete și întărite la diverse acțiuni din perioada de exploatare care se cuantifică în calculul și alcătuirea elementelor structurale ale construcțiilor din beton armat, în alegerea tipului de ciment și stabilirea compoziției optime a betonului, în alegerea tehnologiei de turnare și tratare ulterioară precum și în progresul cercetării.

Tabel II.1. - Sinteza cerințelor de proiectare/producere/execuție/cercetare ale betonului [115]

	Caracteristica	Proiectare	Producere	Execuție	Cercetare
	1	2	3	4	5
BETON PROASPAT	Consistența (lucrabilitatea) (II.2.1.) - metoda răspândirii - metoda tasării trunchiului de con, SR EN 12350-5 [10] ; - metoda vâscozimetruului tip Powers, SR EN 12350-2 [13]; - metoda vâscozimetruului tip Vebe, SR EN 12350-3 [14]	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
	Gradul de compactare (II.2.2.) SR EN 12350-4 [9]	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
	Densitatea aparentă (II.2.3.) SR EN 12350-6 [11]	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)

	Caracteristica	Proiectare	Producere	Execuție	Cercetare
	1	2	3	4	5
BETON INTARIT	Conținutul de aer (II.2.4.) SR EN 12350-7 [12]	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
	Timpul de priză (II.2.5.)	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 betonului Factori de mediu (temperatură, umiditate, acțiuni mecanice)	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
	Densitatea aparentă - metoda prin cântărire (II.3.1.) SR EN 12390-7 [23]	Principal: Calculul acțiunilor permanente (greutăți proprii) SR EN 1991-1-1	Direct: Compararea caracteristicii obținute cu cea prescrisă		Principal: Studii pentru stabilirea unor compoziții cu cerințe speciale
BETON INTARIT	Compactitatea (porozitatea aparentă) (II.3.2.)	Indirect: Asigurarea rezistențelor mecanice, permeabilitatea, gelivitatea, rezistența la acțiuni chimice agresive, aderența	Direct: Adoptarea de compoziții ale betonului care să conducă la un volum minim de goluri	Direct: Mijloace de compactare eficiente în funcție de consistența betonului și tipul elementului astfel încât să nu rămână goluri între armături și/sau între acestea și cofraj, precum și o compactare corectă prin vibrare (astfel încât să rezulte o cantitate minimă de aer occlus)	Principal: Influența asupra comportării betoanelor în funcție de tehnologia de execuție și mediul de exploatare
	Permeabilitatea (adâncimea de pătrundere a apei sub presiune) (II.3.3.)	Principal: În cazul structurilor supuse la presiune Indirect:	Direct: Stabilirea compoziției corespunzătoare	Indirect: Respectarea tehnologiilor de punere în	Direct: Influența materialelor componente și a

	Caracteristica	Proiectare	Producere	Execuție	Cercetare
	1	2	3	4	5
	SR EN 12390-8 [22]	Asigurarea Cerințelor de durabilitate Pentru păstrarea caracteristicilor betonului la acțiunile fizico - chimice în timpul duratei de serviciu proiectate		operă/vibrare	compoziției betonului
	Contractia axială (metoda cu aparat tip Graf) (II.3.4.) SR 2833 [24]	Direct: Evaluarea (calculul) deformațiilor din contracție pentru elemente din beton armat și beton precomprimat SR EN 1992-1-1	Principal: Compoziție adecvata unei anumite utilizări	Direct: Măsurile de protecție și tratare ulterioară după turnare	Direct: Stabilirea influenței asupra contracției. Determinarea experimentală a valorilor deformației din contracție pentru compoziții/utilizări speciale
	Modulul de elasticitate secant la compresiune (II.3.5.) SR 5585 [25]	Direct: Stabilirea coeficientului de echivalență și evaluarea deformațiilor SR EN 1992-1-1			Direct: Studii privind obținerea unor compoziții care să conducă la deformații reduse la acțiuni de scurtă/lungă durată
	Rezistența la compresiune (II.3.6.) SR EN 12390-3 [21]	Principal: Determinarea rezistenței de calcul la compresiune SR EN 1992-1-1 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 - 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.) SR EN 12390-5 [26]	Principal: Determinarea rezistenței de calcul la întindere prin încovoiere SR EN 1992-1-1	Direct: Compararea caracteristicii obținute cu cea prescrisă	Direct: Criteriu de calitate impus betoanelor hidrotehnice - 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 - Armări disperse
	Rezistența la întindere prin despicare (II.3.7.) SR EN 12390-6 [27]	Principal: Determinarea rezistenței de calcul la întindere prin despicare SR EN 1992-1-1	Direct: Compararea caracteristicii obținute cu cea prescrisă	Direct: Criteriu de calitate impus betoanelor hidrotehnice - Masuri speciale de protecție pentru reducerea deformației din contracție	Direct: La evaluarea betonului din construcții existente

	Caracteristica	Proiectare	Producere	Execuție	Cercetare
	1	2	3	4	5
	Aderența beton - armătură. Metoda prin smulgere (II.3.8.) SR 5511 [28] și SR EN 12504-3 [29]	Principal: 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.) SR CR 12793 [105] și SR 13379 [104]	Principal: - Determinarea stratului minim de acoperire funcție de clasa de expunere XC - Asigurarea rezistenței mecanice corespunzătoare clasei de expunere XC 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 - 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.) pr CEN/TS 12390-11 [69]	Principal: - Determinarea stratului minim de acoperire în funcție de clasa de expunere XD sau XS - Limitarea conținutului total de ioni de clor SR EN 206 Betonul trebuie să fie durabil și să realizeze o bună protecție a armăturii.	Direct: Adoptarea de rețete ale betonului care să realizeze compactități mari și deformații din contracție reduse pentru un ciment potrivit	Direct: Măsuri de compactare și tratare ulterioară a betonului	Direct: Studii pentru determinarea rezistenței la cloruri în funcție de tipul cimentului și proporția de adaos
	Acțiuni din îngheț-dezghet (II.4.3.) CEN/TS 12390-9 [45] și SR 3518 [44]	Principal: - Determinarea stratului minim de acoperire funcție de clasa de expunere XF 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: - 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.) Pr ENV 196-X [57]	Principal: - Indicarea cimentului rezistent la sulfați	Direct: Stabilirea compoziției betonului cu ciment potrivit	Direct: Puneri în operă corespunzătoare	Direct: Cercetări asupra metodelor de încercare și de evaluare

Rezumatul capitolului III

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.

În tabelul III.1. sunt cuprinse efectele adaosului de cenușa zburătoare asupra proprietăților betonului proaspăt, întărit și cele asociate durabilității și recomandările indicate pentru atingerea performanțelor caracteristicii analizate. De exemplu, cenușa zburătoare reduce căldura de hidratare, reduce rezistența de compresiune la vârste timpurii și reduce permeabilitatea.

Tabelul III.1. - Efectele adaosului de cenușă zburătoare asupra proprietăților betonului [47]

Proprietate	Efectul cenușii zburătoare	Recomandări
Lucrabilitate	Îmbunătățirea lucrabilității și reducerea consumului de apă pentru cele mai multe cenuși zburătoare. Betonul este mai coeziv și segregă mai puțin - îmbunătățește pompabilitatea. Separarea apei este redusă în special la procente ridicate de înlocuire.	Reduce conținutul de apă cu aproximativ 3% pentru fiecare 10% cenușă zburătoare comparativ cu amestecul similar fără cenușă zburătoare. 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). Se va verifica dacă separarea apei a încetat înainte de a începe operațiile de finisare finală.
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 cimentoide și temperaturi scăzute de turnare a betonului (turnare pe timp friguros).	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 căldură moderată (tip II) sau scăderea temperaturii 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. Impact mai redus pentru rezistența in-situ	Se va lua în considerare reducerea conținutului de cenușă zburătoare în cazul în care rezistența la vârstă fragedă este critică. Se utilizează aditivi de accelerare, cimenturi cu rezistență timpurie mare

Proprietate	Efectul cenușii zburătoare	Recomandări
	dacă există o creștere semnificativă a temperaturii autogene (în cazul turnărilor masive).	(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 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. Expansiunea distructivă poate fi complet suprimată de procente suficiente de înlocuire. 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. Sunt necesare niveluri mai ridicate de cenușă de clasă C ($\geq 40\%$).	Dacă se utilizează un agregat reactiv, cenușa de clasă F ar trebui să fie utilizată, dacă este disponibilă. 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. Nivelul de cenușă zburătoare necesară pentru un anumit agregat trebuie determinat utilizând teste adecvate.
Rezistența la atacul sulfatic	Crescută pentru cenușile zburătoare din clasa F. 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. Se vor testa toate combinațiile de cenușă zburătoare-ciment. 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. Scăderi semnificative în cazul în care nivelurile ridicate de cenușă zburătoare sunt utilizate în betonul cu rezistență redusă (raport mare a/c echivalent). 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. 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. Performanța în exploatare a betonului cu procente ridicate de cenușă este variabilă. Finisarea manuală a suprafețelor extinse este cea mai sensibilă. Cenușa zburătoare din clasa C prezintă o rezistență ușor îmbunătățită. Membranele de protecție pot crește	Se va limita nivelul cenușii zburătoare în lucrările de finisare (nivelare) realizate manual (trotoare și căi de acces) expuse la săruri de dezghețare - în special la turnarea pe timp friguros. Dacă este posibil, se asigură o perioadă de întărire adecvată înainte de prima aplicare a sării de dezghețare. Se va acorda o atenție deosebită

Proprietate	Efectul cenușii zburătoare	Recomandări
	rezistența.	proporțiilor de 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.

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 betoane cu zgură realizate cu un procent diferit de înlocuire a cimentului se pot trage următoarele concluzii (Tabelul III.2) [48]:

Tabelul III.2. - Efectul adaosului de zgură granulată de furnal măcinată asupra proprietăților betonului

Proprietate	Efectul zgurii granulate de furnal măcinate	Recomandări
Lucrabilitatea	Îmbunătățirea lucrabilității și reducerea consumului de apă pentru cele mai multe tipuri de zguri. Betonul este mai coeziv și segregă mai puțin - îmbunătățește pompabilitatea. Separarea apei este redusă în special la procente ridicate de înlocuire și pentru finețe de măcinare mare.	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. 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). Se va verifica dacă separarea apei s-a oprit înainte de a începe operațiile de finisare finală.
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).	Se va tine seama de reducerea conținutului de zgura granulată de furnal măcinată în cazul în care rezistența la vârstă fragedă este critică. Se vor utiliza aditivi de accelerare sau

Proprietate	Efectul zgurii granulate de furnal măcinate	Recomandări
	Viteza creșterii rezistenței este în general invers proporțională cu cantitatea de zgură granulată de furnal măcinată utilizată în amestec. Crescută - în condiții de întărire (tratare) la temperaturi ridicate.	cimenturi cu rezistență timpurie mare (tip III) pentru a compensa rezistența redusă la vârste timpurii.
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. 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 sulfați 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 rezistență redusă (raport a/c echivalent >0.5) în comparație cu betonul de ciment Portland de aceeași calitate. 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.	Asigurarea unei întăriri adecvate pentru betonul care conține zgură granulată de furnal măcinată. 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	Dacă este posibil, se va asigura o perioadă de întărire adecvată înainte de prima aplicare a sării de dezghețare. Se va acorda o atenție deosebită proporțiilor de amestec (raportului a/c echivalent), sistemului de pori și

Proprietate	Efectul zgurii granulate de furnal măcinate	Recomandări
	exfoliere. Pentru structurile marine procentul recomandat de zgură din beton este de 60- 80%.	practicilor de finisare și de tratare când betonul cu zgură este folosit la trotuare și căi de acces expuse la sărurile de dezghețare.

Prin realizarea unor amestecuri bine studiate și prin respectarea etapelor de tratare ulterioară, betoanele preparate cu cimenturi cu calcar pot realiza performante similare cu betoanele cu cimenturi fără calcar. Deși relativ inert în comparație cu clincherul sau materialele suplimentare cimentoide (SCM-uri), calcarul pare să contribuie direct la proprietățile și comportarea în timp a betonului.

Tabelul III.3. - Efectul adaosului de calcar asupra proprietăților betonului

Proprietate	Efectul calcarului	Recomandări
Lucrabilitate	Îmbunătățirea lucrabilitatii și reducerea necesarului de apă, specifică prezenței adaosurilor. Betonul este mai coeziv și segregă mai puțin - îmbunătățește pompabilitatea. 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 adaos de calcar crește.	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 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 la 15% din cantitatea de ciment Portland. 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	Se recomandă determinarea rezistenței la compresiune la 28 zile a betoanelor întărite în apă timp de 7 zile și apoi

Proprietate	Efectul calcarului	Recomandări
	creșterea conținutului de pulbere calcaroasă.	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. Datele arată că nu există o diferență consistentă între expansiunile produse la ciment Portland în comparație cu ciment Portland cu calcar la un procent de 5%.	Datele disponibile sugerează că utilizarea a până la 5% calcar în ciment nu crește susceptibilitatea mortarului și betonului la reacția 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-dezghet	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-dezghet.

Cu toate acestea, adaosurile de fabricație din ciment sau beton 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.

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.4 și III.5.

Tabelul III.4. - 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	↑ 10-40%	↑ 10-40%	↑ 30-85%	↑ 5-35%
Mustirea și segregarea	↓ 10-40%	↓ 10-40%	↑ 40-70%	↓
Conținutul de aer	↓↓	↓	↓	↔
Timp de priză	↑	↕	↑ 10-70%	↔
Căldura de hidratare	↓	↑ ↓ (≥50%)	↓ 50-80%	↑ (până la 48 ore) ↓
Finisarea suprafeței	↑	↑	↑	↑
Pompabilitate	↑	↑	↑	↑
Fisurarea din contracția plastică	↔	↔	↔	↔

III.5. Efectele adaosurilor minerale din ciment/beton asupra proprietăților betonului întărit

Tabelul III.5. - 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 F		
Rezistența la vârste timpurii	↓	↔	↓ 1-3 zile zgură cu un indice de activitate ridicat 1-20 zile zgură cu un indice de activitate mediu 1-28 zile zgură cu un indice de activitate scăzut	↑ 5-15% ↓ 15-25%

Adaosul din ciment	Cenușă zburătoare		Zgură granulată de furnal	Filer de calcar
			Întărire la temperaturi ridicate	
Rezistența la compresiune pe termen lung	↑ 10-50% (înlocuire nisip)	↑ 10-50%	↑ 30-50% la 28 zile	↓ 15-35% la 28 zile
Rezistența la întindere	↑ 10-50%	↑ 10-50%	↑ 30%	↔
Rezistența la încovoiere	↑ 40-75%	↑ 40-75%	↑ 30-60%	↔
Permeabilitatea, absorbția și rezistența la penetrarea clorurilor	↓ ≥10%	↓ ≥10%	↓ 33-50% ↓ 50-80%	↔
Expansiunea datorată reacției alcalii-silice	↓ ↓ 20-40%	↓ 20-40%	↓ 30-60%	↔
Rezistența la atacul sulfatic	↑ ↑ (<50%)	↔	↑ ↑ 10-50%	↓ 5-10%
Rezistența la carbonatare	↔ ↓ (>30%)	↔ ↓ (>30%)	↔ ↓ (≥50%)	↔
Rezistența la atacul din îngheț-dezgheț	↓ ↑ 40-60%	↓ ↑ 40-60%	↓ 10-60% ↑ 60-80%	↔
Rezistența la abraziune	↔	↔	↔	↔
Contrația de uscare și curgerea lentă	↔	↔	↔	↔

Legendă:

 reducere semnificativă
 reducere
 creștere
 creștere semnificativă
 efect neutru
 efect variabil

Rezumatul capitolului IV

Durabilitatea unei structuri reprezintă capacitatea de a rezista împotriva acțiunilor mecanice, dinamice și de mediu fără ca performanța ei să scadă sub o limită minimă acceptabilă. 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.

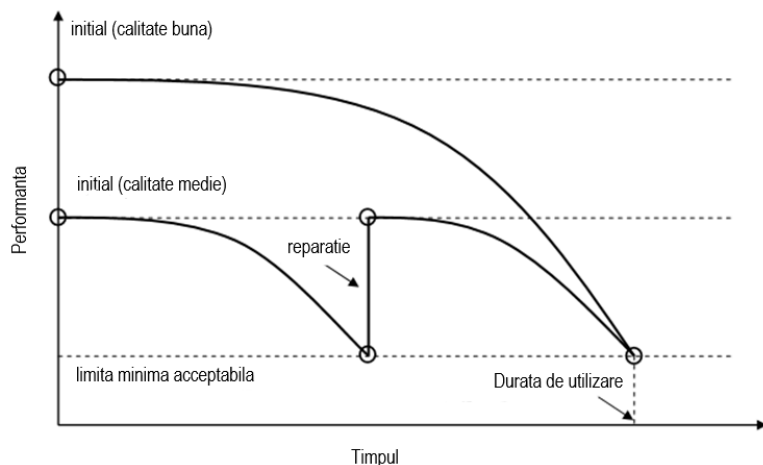


Figura IV.1. - Performanța betonului în funcție de durata de viață [39]

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 adaosului 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).

Deteriorările și defectele care pot apărea în betonul din structuri pe durata de viață la acțiuni mecanice și de mediu sunt date relativ la vârsta de apariție.

Tabelul IV.1. - 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	•	•		•	•
Contrație	•			•	•
Curgere lentă	•	•			•
Evaporarea rapidă a apei	•			•	
Segregare plastică	•			•	
Avarii fizice	•	•	•	•	•

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.

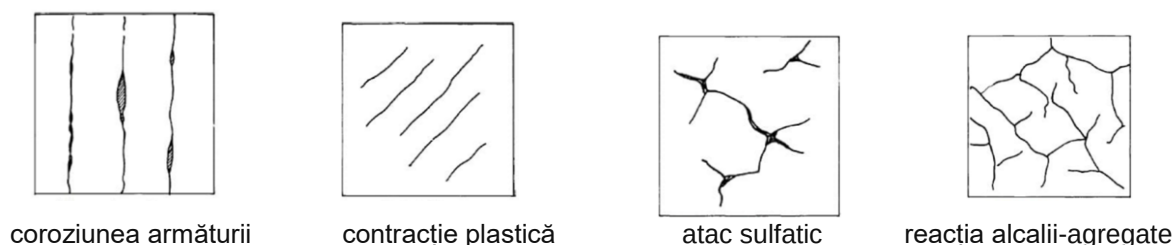


Figura IV.2. - Tipuri specifice de fisuri la suprafața betonului [85].

Factorul k indica contribuția adaosurilor din betoane pentru obținerea unei rezistențe echivalente cu cea a unui beton fără adaosuri. Experimental se determina valorile coeficienților A_0 , A_a , B_0 , B_a pentru diferite rapoarte a/c .

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.

Metode de dozare pentru adaosuri minerale sunt:

- 1. Metoda de înlocuire simplă a adaosului mineral (înlocuirea cimentului se poate face fie pe bază de volum, fie pe bază de masă).
- 2. Metoda de adăugare a adaosului mineral (adăugarea directă a adaosului mineral la beton fără a diminua cantitatea de ciment)
- 3. Metoda de înlocuire modificată a adaosului mineral (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)
- 4. Metoda rațională de dozare a adaosului mineral (se cuantifică influența adaosului mineral folosind un factor de eficiență k care reprezintă cantitatea de adaos mineral ce poate înlocui o parte de ciment Portland pentru obținerea unor proprietăți similare).

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.

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.

Dacă relația dintre rezistența la compresiune și raportul a/c este:

$$f_0 = A_0 - B_0 \omega_0 \quad \text{pentru betonul de referință} \quad (IV.1.)$$

$$f_a = A_a - B_a (w/c + a) \quad \text{pentru betonul cu adaosuri cu raportul a/c} \quad (IV.2.)$$

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:

$$f_0 \text{ (referința)} = f_a \text{ (adaos)} \quad (IV.3.)$$

$$f_0 = f_a \Rightarrow A_0 - B_0 \omega_0 = A_a - B_a \cdot w / (c + a)$$

$$\omega_0 = w / (c + k \cdot a) \Rightarrow w = \omega_0 (c + k \cdot a)$$

$$\left. \begin{array}{l} A_0 - B_0 \omega_0 = A_a - B_a \cdot w / (c + a) \\ \text{sau} \\ A_0 - B_0 \omega_0 = A_a - B_a \omega_0 (c + k \cdot a) / (c + a) \end{array} \right\} \Rightarrow A_0 - B_0 \omega_0 = A_a - B_a \omega_0 (1 + k \cdot a/c) / (1 + a/c)$$

Valoarea coeficientului k (Tabelul IV.2) va fi în funcție de raportul apă/ciment al betonului de referință. Se va utiliza relația:

$$k = \frac{(A_a - A_0)(1 + a/c)}{B_a \cdot a/c} \times \frac{1}{\omega_0} + \left[\frac{B_0(1 + a/c)}{B_a} - 1 \right] \times \frac{1}{a/c} \quad (IV.4.)$$

unde: ω_0 este raportul apă/ciment al betonului de referință fără adaosuri;

ω_a - raportul apă/ciment al betonului cu adaosuri, $\omega_a = w_a/c_a$;

w_a - cantitatea de apă a betonului cu adaosuri (kg/m^3);

c_a - cantitatea de ciment în betoanele cu adaosuri (kg/m^3);

a - cantitatea de adaosuri (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.

Tabelul IV.2. - 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 $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$)

Metodele de performanță pentru evaluarea durabilității echivalente sunt proceduri bazate 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.

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.

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.

Conceptul de performanță echivalentă (sau conceptul de durabilitate echivalentă) a betonului preparat cu cimenturi compozite reprezintă o metoda de abordare moderna a durabilității betoanelor în funcție de un anumit nivel de performanță specific unui domeniu de utilizare.

- **In standardul european CEN/TC104/SC1-N703:**

Valoarea măsurată a betonului candidat trebuie să fie:

≤ performanța de referință

$$\leq \text{valoarea betonului de referință} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33\sigma_R)^2 - (2.33\sigma_r)^2 \left(\frac{n-1}{n}\right))} \text{ unde } n \geq 3.$$

unde: σ_R este abaterea medie standard a betonului de referință

σ_r este abaterea standard a betonului candidat

- **In normativul național olandez VC12 WG4:**

Pentru fiecare aspect al durabilității, evaluarea se bazează pe parametrul de evaluare T_j :

$$T_j = \sqrt{\frac{[m_r - \frac{m_t}{1+0.01d_j}]^2}{s/\sqrt{n}}} \quad (IV.5.)$$

$$\text{și } s = \sqrt{\{s_r^2 + \frac{s_t^2}{(1+0.01d_j)^2}\}} \quad (IV.6.)$$

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

Pentru validare, d trebuie să fie în conformitate cu tabelul IV.3.

Tabelul IV.3. - Valori limită pentru " d " [61]

Aspectul durabilității j	Diferența " d " (%) care determină respingerea cu o probabilitate de 90%
Carbonatare	+30
Penetrare cloruri	+30
Îngheț-dezghet cu agenți de dezghetare	+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.4.

Tabelul IV.4. - 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

Unul sau mai multe cimenturi de referință pot fi utilizate pentru testarea aspectelor de durabilitate diferite.

Tabelul IV.5. - 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	$x^{(1)}$	x
XS					x	$x^{(1)}$	x
XF	x	x	x	x	x	$x^{(2)}$	$x^{(3)}$
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.

- In normativul național belgian:**

- 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:

$$d_{c, \text{candidat}} \leq 1.20 \times d_{c, \text{referință}}$$

- pentru rezistența la îngheț-dezgheț cu săruri de dezghețare:

Valoarea pierderii de masă medii 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:

$$P_{\text{candidat}} \leq 1.20 \times P_{\text{referință}}$$

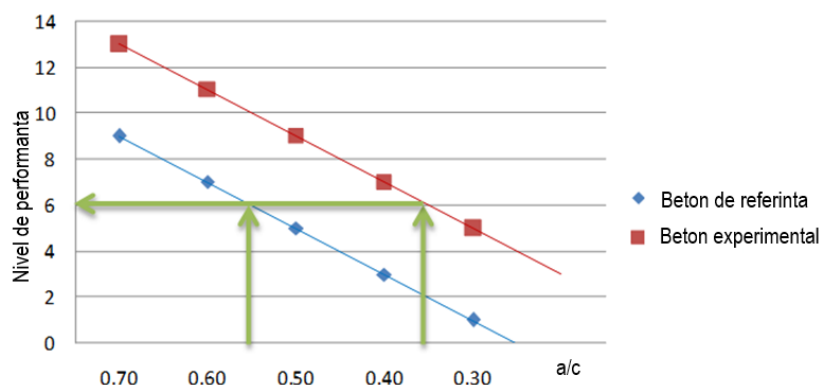


Figura IV.3. - Aplicarea conceptului de performanță echivalentă

Performanța de referință este o valoare pe care betonul candidat trebuie să o atingă sau să o depășească. Se determină din teste pe betonul de referință sau o valoare selectată din rezultatele betoanelor care sunt conforme cu dispozițiile valabile la locul de utilizare și valoarea respectiva a luat în considerare și incertitudinea de măsurare a procedurii.

Determinarea clasei betonului cu ciment compozit

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. 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.

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.

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.

$$\text{SR EN} \quad f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \times f_{cm} \quad (\text{IV.7.})$$

$$\text{1992-1-1} \quad \beta_{cc}(t) = \exp\{s[1-(28/t)^{1/2}]\} \quad (\text{IV.8.})$$

$$\text{prEN} \quad f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \times f_{cm} \quad (\text{IV.9.})$$

$$\text{1992-1-1} \quad \beta_{cc}(t) = \exp\{s[1-(t_{ref}/t)^{1/2}](28/t_{ref})^{1/2}\} \quad (\text{IV.10.})$$

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:

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.

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 această vârstă.

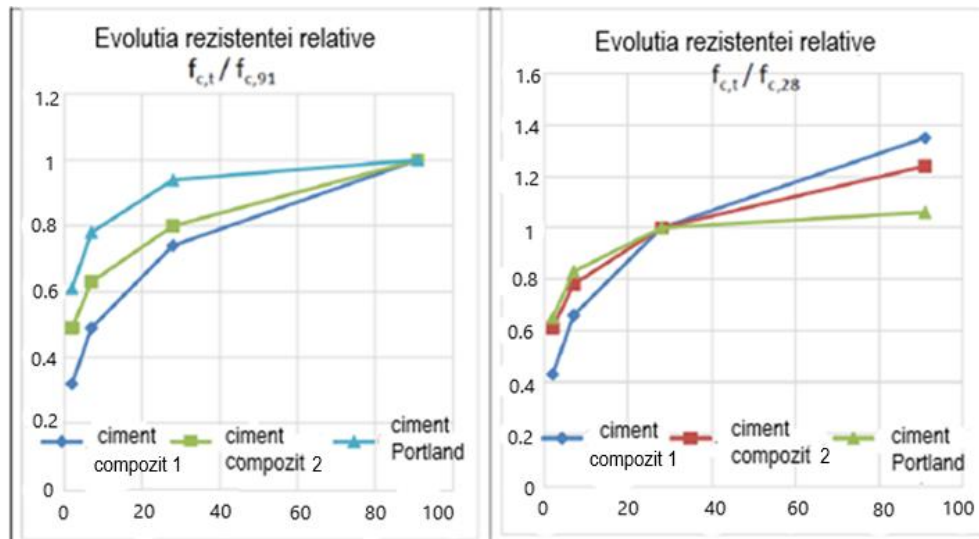


Figura VI.4. - Evoluția rezistenței relative la compresiune a betoanelor considerând valori diferite ale timpului de referință [113]

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 α_{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/producer.

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.

Rezumatul capitolului V

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.

- **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 constituentilor, condițiile de punere în operă 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 ca 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.

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 cenușa zburătoare) la diferite perioade de timp. Programul experimental a constatat în determinarea rezistenței medii la compresiune a betoanelor preparate cu patru tipuri de cimenturi, unul cu întărire normală și trei cu întărire rapidă, având raport a/c asemănător. Compozițiile betoanelor sunt prezentate în tabelul V.1.

Tabelul V.1. - Caracteristicile compoziționale și proprietățile betonului proaspăt preparat 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

Tip ciment	Raport a/c	Dozaj ciment (kg/m ³)	Diametru maxim agregat (mm)	Aditiv	Tasare (mm)
CEM II/B-S 32.5R	0.44	360	32	super plastifiant	110
CEM II/B-S 32.5N	0.42	420	16	super plastifiant si antrenor de aer	150
CEM II/B-M (S-V) 32.5R	0.43	370	32	super plastifiant	115
CEM III/A 32.5R	0.41	370	32	super plastifiant	110

În figurile V.1 și V.1'. se prezintă valorile rezultatelor experimentale pentru rezistența medie la compresiune determinată la diferite vârste pentru cele patru compoziții de betoane cu diferite tipuri de ciment. 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 [33] și după cele ale proiectului de revizuire

pentru prEN 1992-1-1 [60] luând în considerare, în acest caz, timpi de referință diferiți (28, 56 și respectiv 90 zile).

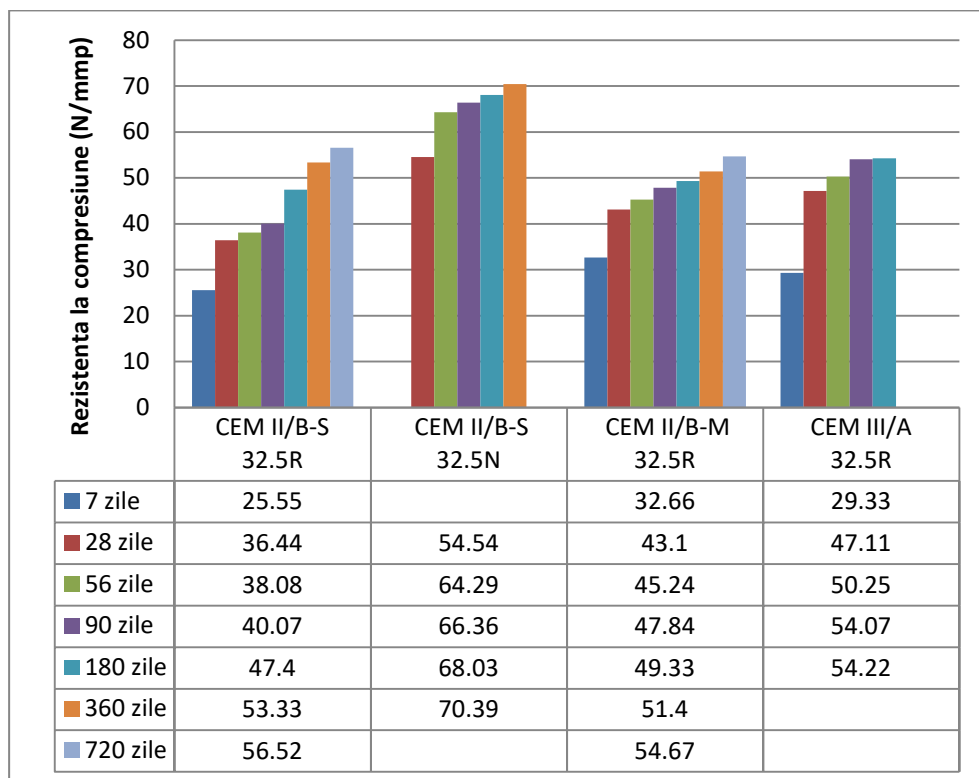


Figura V.1. - Variația rezistenței la compresiune a betoanelor cu diferite tipuri de ciment (CEM II/B-S 32.5 R, CEM II/B-S 32.5N, CEM II/B-M (S-V) 32.5R și CEM III/A 32.5R) cu raport $a/c \sim 0.42$ în funcție de vârstă

În Tabelele V.2.-V.5. se prezintă valori ale rezistențelor la diferite termene determinate experimental și respectiv calculate pentru cele patru tipuri de cimenturi.

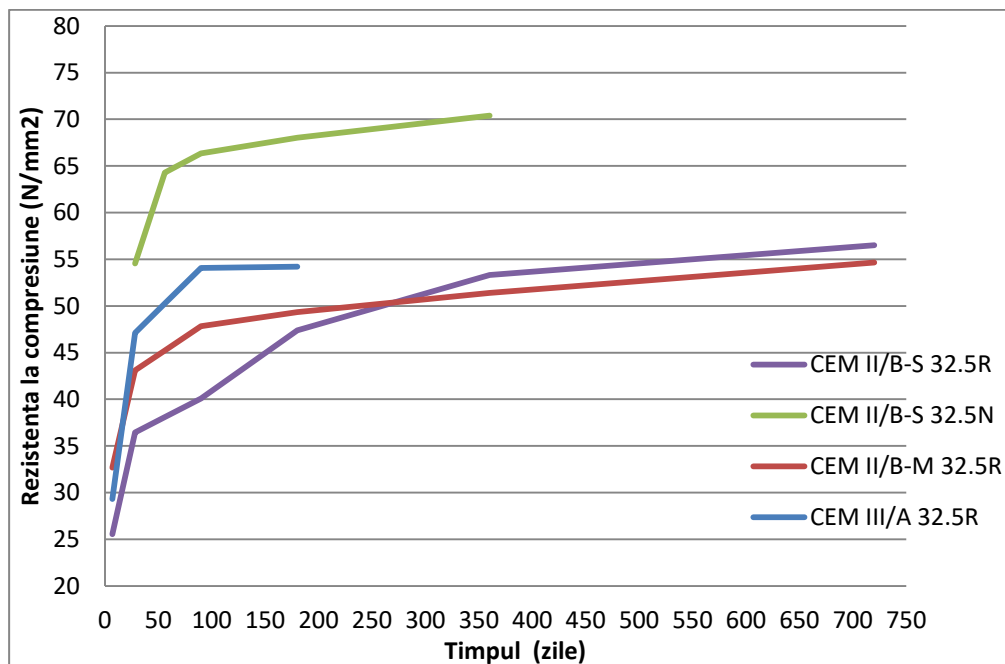


Figura V.1'. - Variația rezistenței la compresiune a betoanelor cu CEM II/B-S 32.5 R, CEM II/B-S 32.5N, CEM II/B-M (S-V) 32.5R și CEM III/A 32.5R cu raport $a/c \sim 0.42$ în funcție de vârstă

Tabelul V.2. - 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 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)
7 zile	25.75				
28 zile	36.44				
56 zile	38.08	$\beta = 1.076$ 39.21	$\beta = 1.108$ 40.37		
90 zile	40.07	$\beta = 1.117$ 40.70	$\beta = 1.167$ 42.54	$\beta = 1.054$ 40.12	
180 zile	47.40	$\beta = 1.163$ 42.40	$\beta = 1.236$ 45.04	$\beta = 1.116$ 42.48	$\beta = 1.059$ 42.43
360 zile	53.33	$\beta = 1.197$ 43.64	$\beta = 1.287$ 46.90	$\beta = 1.162$ 44.24	$\beta = 1.103$ 44.18
720 zile	56.52	$\beta = 1.222$ 44.54	$\beta = 1.324$ 48.26	$\beta = 1.195$ 45.52	$\beta = 1.135$ 45.46
		$\beta_{max}=1.284$ 46.79	$\beta_{max}=1.420$ 51.71	$\beta_{max}= 1.281$ 48.77	$\beta_{max}=1.216$ 48.71

S-a notat cu: f_{cm} (EC 2) - rezistența medie la compresiune la o vârstă mai mare de 28 zile determinată conform SR EN 1992-1-1:2004 [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.3. -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 f_{cm} la raport a/c = 0.42	Valori calculate f_{cm} (EC 2)	Valori calculate f_{cm} (prEC 2*ref 28)	Valori calculate f_{cm} (prEC 2*ref 56)	Valori calculate f_{cm} (prEC 2*ref 90)
2 zile	15.00				
28 zile	54.54				
56 zile	64.29	$\beta = 1.128$ 61.52	$\beta = 1.135$ 61.91		
90 zile	66.36	$\beta = 1.183$ 64.52	$\beta = 1.194$ 65.09	$\beta = 1.051$ 67.59	
180 zile	68.03	$\beta = 1.259$ 68.65	$\beta = 1.274$ 69.49	$\beta = 1.122$ 72.16	$\beta = 1.068$ 70.84
360 zile	70.39	$\beta = 1.315$ 71.73	$\beta = 1.334$ 72.77	$\beta = 1.176$ 75.57	$\beta = 1.118$ 74.19
		$\beta_{max}=1.462$ 79.75	$\beta_{max}=1.492$ 81.36	$\beta_{max}=1.314$ 84.49	$\beta_{max}=1.250$ 82.94

Tabelul V.4. - 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 f_{cm} la raport a/c = 0.43	Valori calculate f_{cm} (EC 2)	Valori calculate f_{cm} (prEC 2*ref 28)	Valori calculate f_{cm} (prEC 2*ref 56)	Valori calculate f_{cm} (prEC 2*ref 90)
7 zile	32.66				
28 zile	43.10				
56 zile	45.24	$\beta = 1.076$ 46.37	$\beta = 1.108$ 47.75		
90 zile	47.84	$\beta = 1.117$ 48.14	$\beta = 1.167$ 50.31	$\beta = 1.054$ 47.66	
180 zile	49.33	$\beta = 1.163$ 50.14	$\beta = 1.236$ 53.27	$\beta = 1.116$ 50.47	$\beta = 1.059$ 50.65
360 zile	51.40	$\beta = 1.198$ 51.61	$\beta = 1.287$ 55.47	$\beta = 1.162$ 52.55	$\beta = 1.103$ 52.74
720 zile	54.67	$\beta = 1.222$ 52.68	$\beta = 1.324$ 57.08	$\beta = 1.195$ 54.08	$\beta = 1.135$ 54.27
		$\beta_{max}=1.284$ 55.34	$\beta_{max}=1.419$ 61.16	$\beta_{max}=1.281$ 57.94	$\beta_{max}=1.216$ 58.15

Tabelul V.5. - Valorile rezistenței la compresiune determinate experimental și respectiv calculate pentru betonul cu CEM III/A 32.5 R 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} (prEC 2*ref 28)	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	$\beta = 1.076$ 50.69	$\beta = 1.108$ 52.19		
90 zile	54.07	$\beta = 1.117$ 52.62	$\beta = 1.167$ 54.99	$\beta = 1.054$ 52.94	
180 zile	54.22	$\beta = 1.163$ 54.81	$\beta = 1.236$ 58.23	$\beta = 1.1157$ 56.06	$\beta = 1.059$ 57.25
		$\beta_{max}=1.284$ 60.49	$\beta_{max}=1.419$ 66.85	$\beta_{max}=1.281$ 64.36	$\beta_{max}=1.216$ 65.72

Se poate observa din tabelele V.2.-V.5. ca valorile coeficientului β din SR EN 1992-1-1:2004 [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.2-V.5. se prezintă evoluția în timp, reală și estimată, a rezistenței la compresiune pentru cele patru tipuri de betoane.

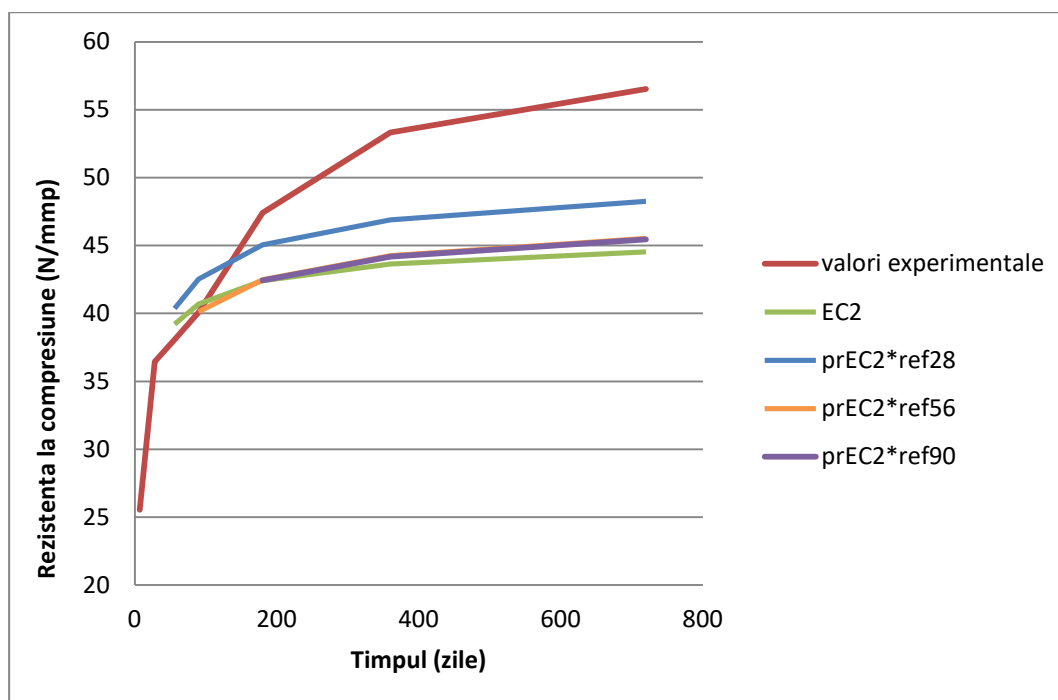


Figura V.2. - Variația rezistenței la compresiune a betonului cu CEM II/B-S 32.5 R cu raport $a/c=0.44$ în funcție de vârstă

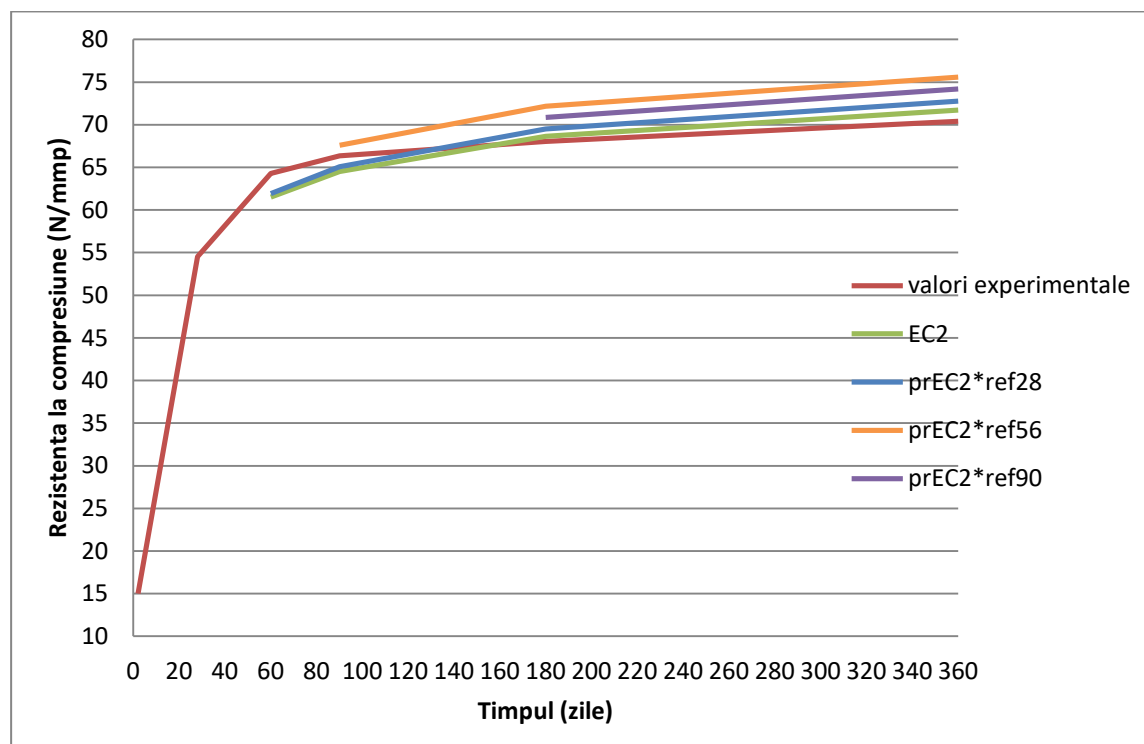


Figura V.3.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu CEM II/B-S 32.5 N cu raport $a/c=0.42$ în funcție de vârstă

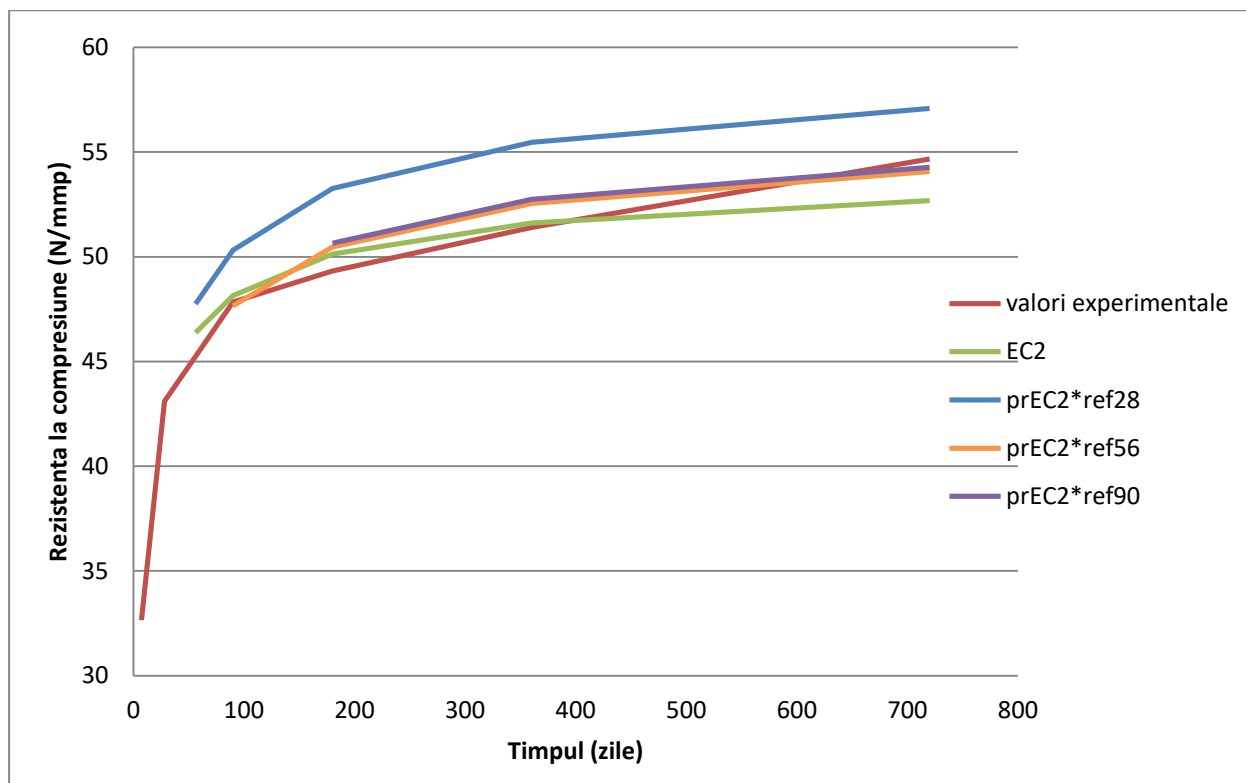


Figura V.4.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu CEM II/B-M (S-V) 32.5 R cu raport $a/c=0.43$ în funcție de vârstă

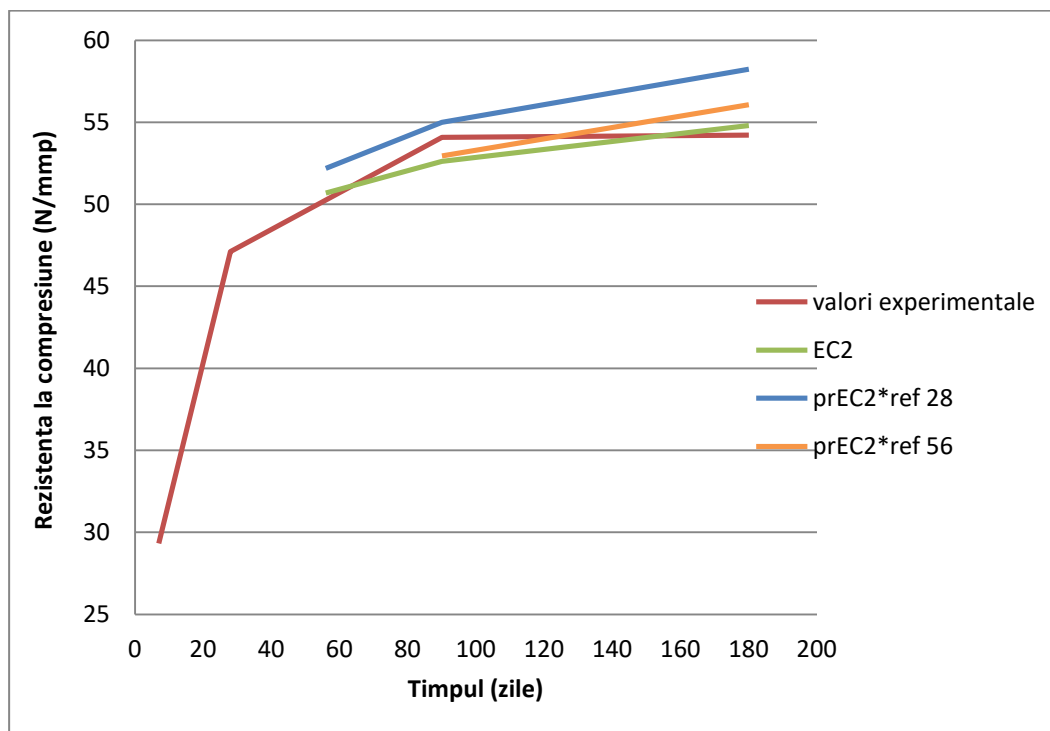


Figura V.5.- Variația rezistenței la compresiune a betonului cu CEM III/A 32.5 R cu raport $a/c=0.41$ în funcție de vârstă

În figurile V.6.-V.8. se prezintă raportul rezistențelor la compresiune ale betonului la diferiți timpi de referință propuși.

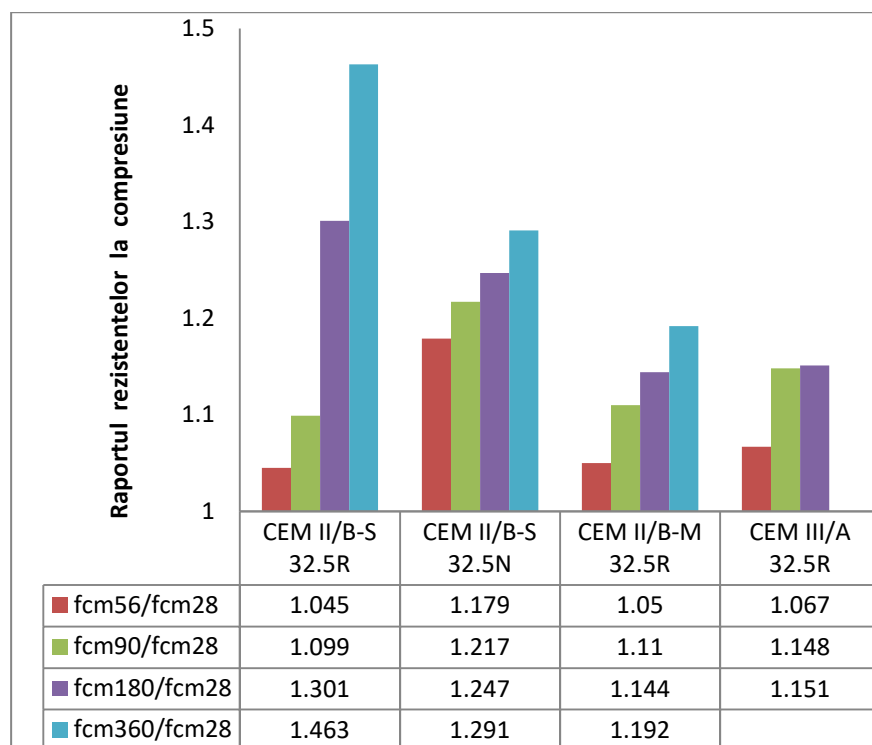


Figura V.6.- Variația rapoartelor dintre rezistențele la compresiune pentru betoane realizate cu CEM II/B-S 32.5 R, CEM II/B-S 32.5N, CEM II/B-M (S-V) 32.5R și CEM III/A 32.5R în funcție de tipul cimentului și timpul de referință propus la 28 zile

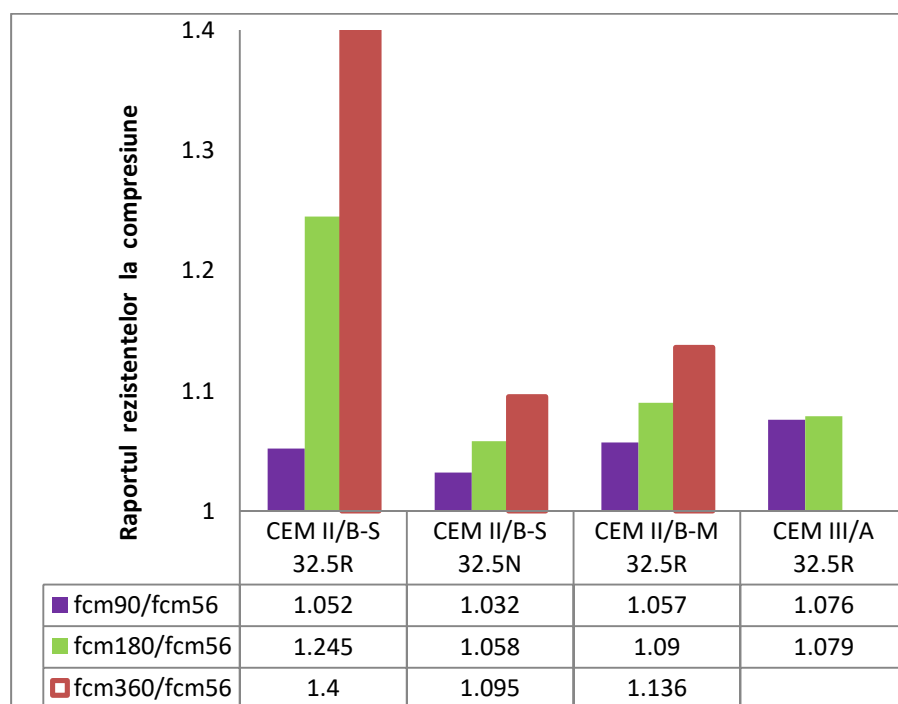


Figura V.7.- Variația rapoartelor dintre rezistențele la compresiune pentru betoane realizate cu CEM II/B-S 32.5 R, CEM II/B-S 32.5N, CEM II/B-M (S-V) 32.5R și CEM III/A 32.5R în funcție de tipul cimentului și timpul de referință propus la 56 zile

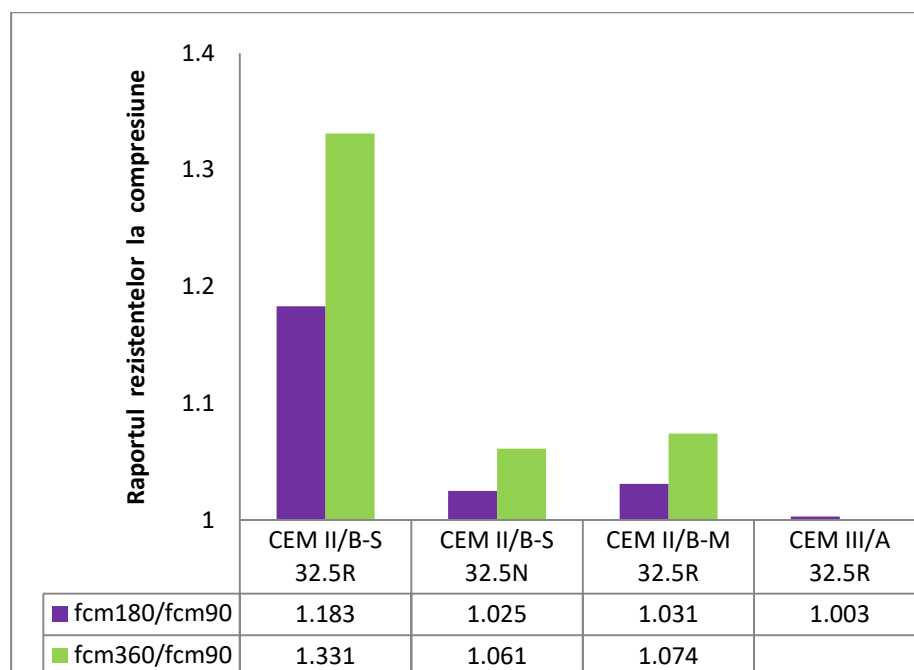


Figura V.8.- Variația rapoartelor dintre rezistențele medii la compresiune pentru betoane preparate cu CEM II/B-S 32.5 R, CEM II/B-S 32.5N, CEM II/B-M (S-V) 32.5R și CEM III/A 32.5R în funcție de tipul cimentului și timpul de referință propus la 90 zile

Din studiul figurilor și tabelor se remarcă faptul că:

- 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 termenul de referință ales, cu diferență relativ mică între valorile rezistenței la compresiune la 28 și 90 zile;
- 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;
- pentru betoanele preparate cu CEM II/B-M 32.5R, cea mai apropiată valoare de referință rezultă la 90 zile și indică diferențe reduse între rezultatele reale și cele calculate ale rezistenței la compresiune ale betonului, dar diferența între rezultatele obținute la 28 și 90 zile nu este mare;
- 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 aceasta perioada 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 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 studiu 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) Este necesară deci o analiza separată pentru determinarea experimentală a timpului de referință pentru stabilirea clasei betonului, în principal în funcție de rapoartele între rezistențele obținute la 56 și 90 de zile și respectiv la 28 de zile și studiul evoluției 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 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]. În aceste cazuri 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.

• Rezistențele la compresiune ale betoanelor preparate cu același tip de ciment compozit provenit din surse diferite

În mod firesc, cercetarea experimentală este necesară în cazurile în care trebuie să se stabilească performanțele betonului preparat cu diferite tipuri de cimenturi. 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.

Se prezintă o analiză comparativă între performanțele betonului realizat cu cimenturi compozite de același tip din trei surse diferite luând drept studiu de caz rezultatele unor cercetări experimentale efectuate pe beton preparat cu ciment cu adaosuri, de tip CEM II/A-S 42,5R. S-a urmărit să se analizeze dacă prepararea betonului cu același tip de ciment provenit din cele trei surse diferite determină atingerea unor performanțe echivalente.

Cercetările experimentale au constatat în determinarea unor performanțe ale betonului preparat cu ciment tip II/A-S 42,5R (clinker 80-94%, zgura de furnal 6-20%), 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.

Prima 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 II/A-S și cu dozaje de ciment cuprinse între 200 – 400 kg/m³ dar provenind din trei surse diferite.

În tabelele V.6.-V.9. 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.6. – Compozițiile betoanelor preparate cu CEM II/A-S 42.5R - Sursele a, b și c

Ciment (kg/m ³)	Aditiv super plastifiant 1% (l)	Agregate (kg)	sort 0-4 mm	sort 4-8 mm	sort 8-16 mm
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.7. – Caracteristicile betoanelor proaspete preparate cu CEM II/A-S 42.5R - Sursa a

Ciment (kg/m ³)	Apa (l)	a/c	Tasare mm	Densitate (kg/m ³)	Aer oclus (%)
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.8. – Caracteristicile betoanelor proaspete preparate cu CEM II/A-S 42.5R - Sursa b

Ciment (kg/m ³)	Apa (l)	a/c	Tasare mm	Densitate (kg/m ³)	Aer oclus (%)
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.9. – Caracteristicile betoanelor proaspete preparate cu CEM II/A-S 42.5R - Sursa c

Ciment (kg/m ³)	Apa (l)	a/c	Tasare mm	Densitate (kg/m ³)	Aer oclus (%)
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.9. și V.10. 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.

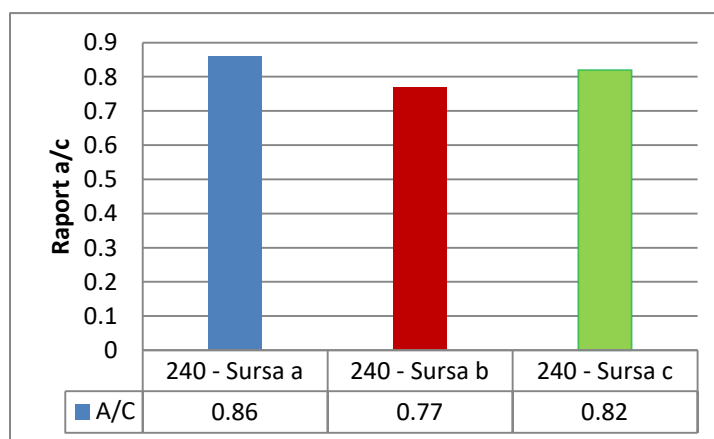


Figura V.9. - Variația raportului a/c pentru betoanele cu CEM II/A-S cu dozaj de ciment 240 kg/m³

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 și cu 11% față de cele preparate cu ciment din sursa a, pentru același dozaj de ciment și respectiv aceeași tasare.

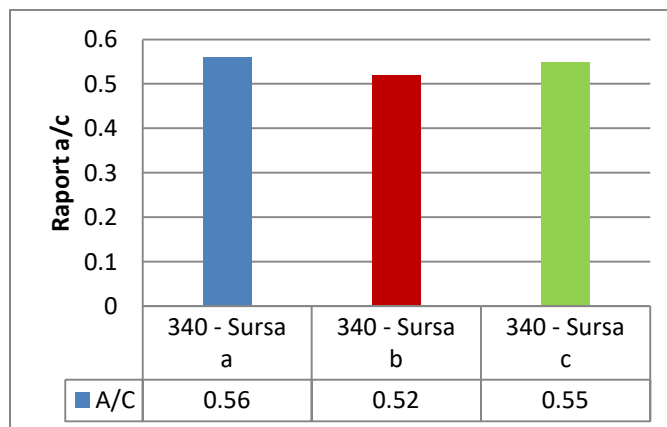


Figura V.10. - Variația raportului a/c pentru betoanele cu CEM II/A-S cu dozaj de ciment 340 kg/m³

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 si cu 7% față de cele preparate cu ciment din sursa a, pentru același dozaj de ciment și respectiv aceeași tasare.

În figurile V.11.-V.13. se prezintă variația în timp a rezistenței la compresiune a betonului cu CEM II/A-S 42.5 R în funcție de raportul a/c și sursă. Încercările betoanelor pentru determinarea rezistenței la compresiune 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].

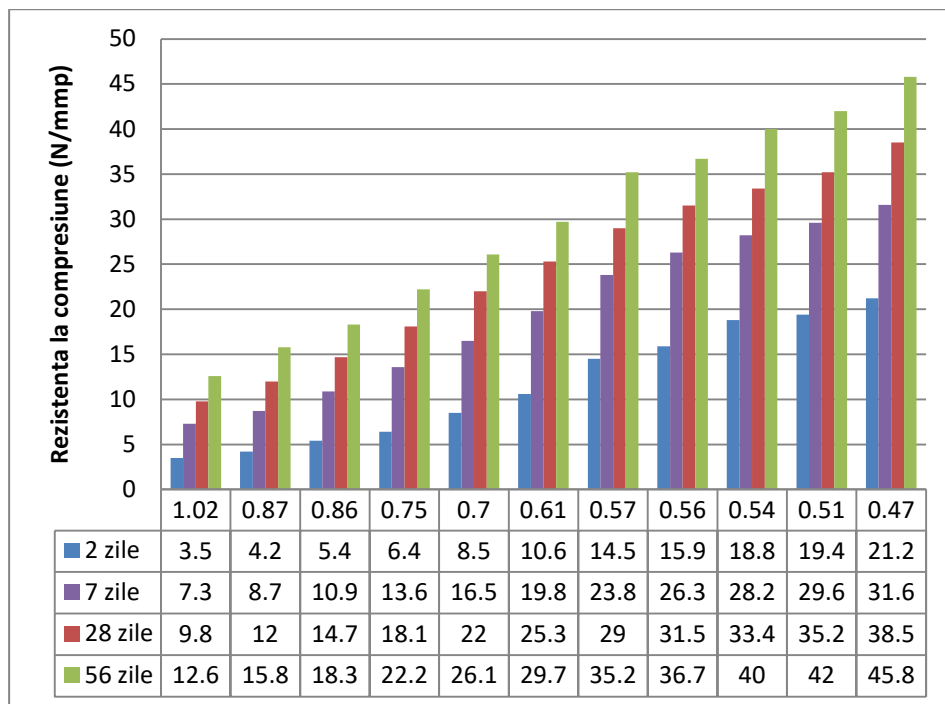


Figura V.11. - Variația în timp a rezistenței la compresiune a betonului cu CEM II/A-S 42.5 R în funcție de raportul a/c pentru sursa a

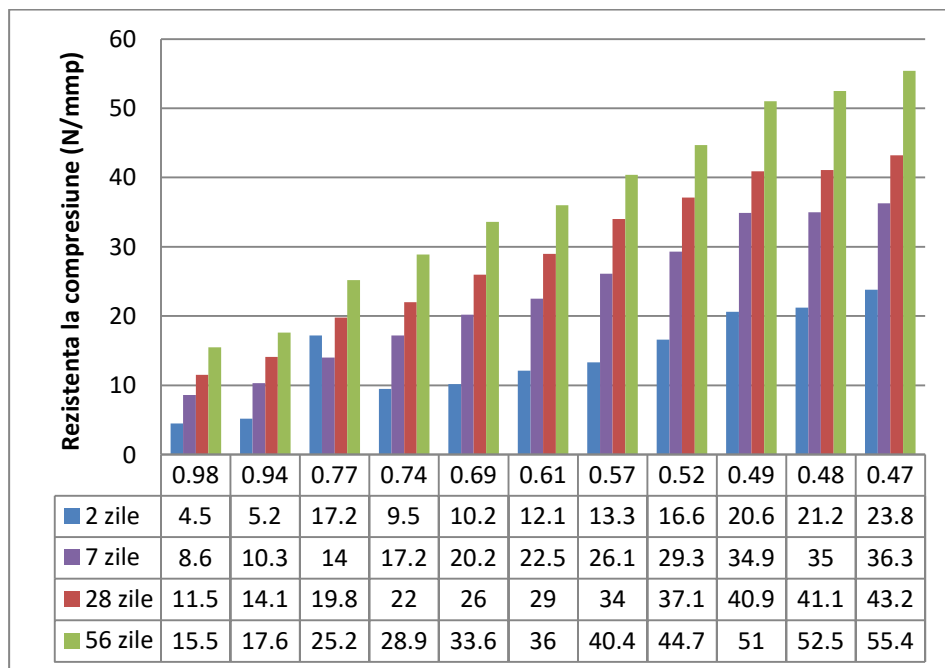


Figura V.12. - Variația în timp a rezistenței la compresiune a betonului cu CEM II/A-S 42.5 R în funcție de raportul a/c pentru sursa b

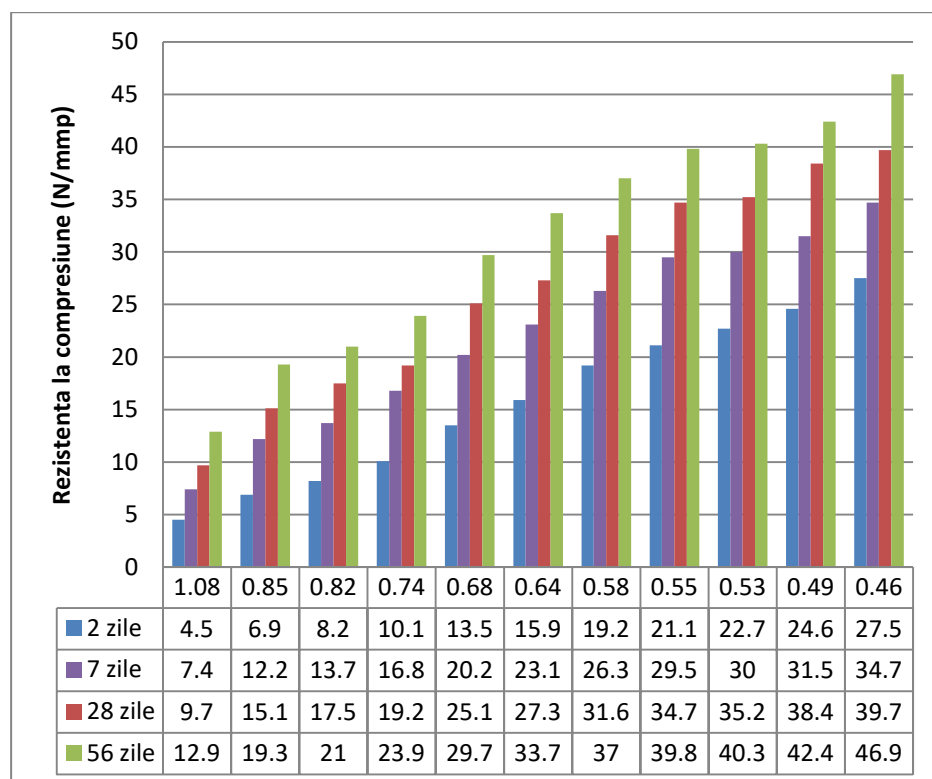


Figura V.13. - Variația în timp a rezistenței la compresiune a betonului cu CEM III/A-S 42.5 R în funcție de raportul a/c pentru sursa c

Graficele din figurile V.14.-V.16. indică variația rezistențelor la compresiune în timp a betonului la dozajele de 200, 300 și respectiv 400 kg/m³ pentru cele trei surse.

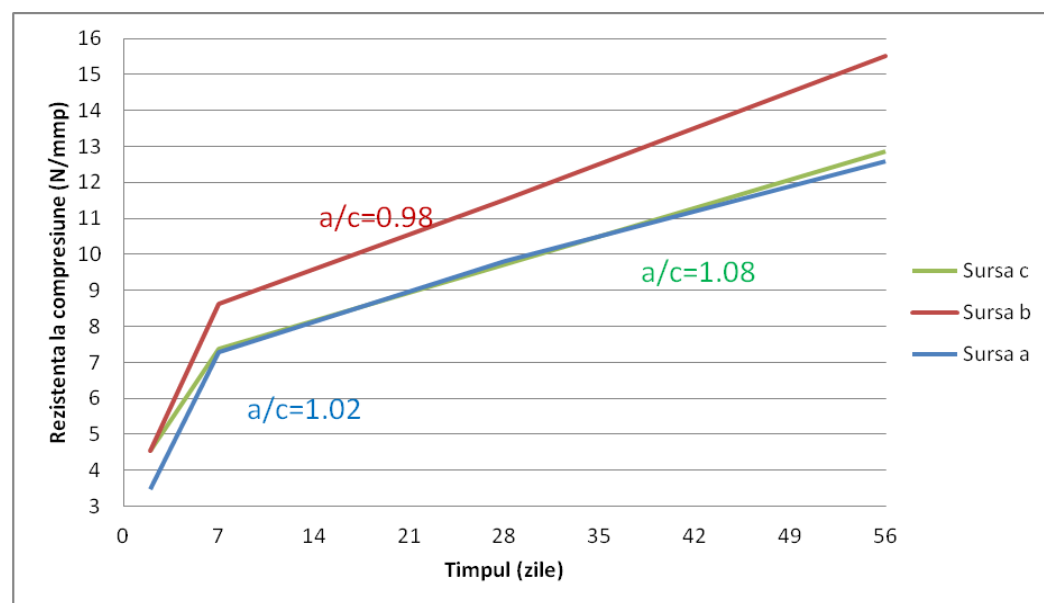


Figura V.14. - Variația în timp a rezistenței la compresiune a betonului cu 200 kg/m³ CEM III/ A-S 42.5 R în funcție sursă

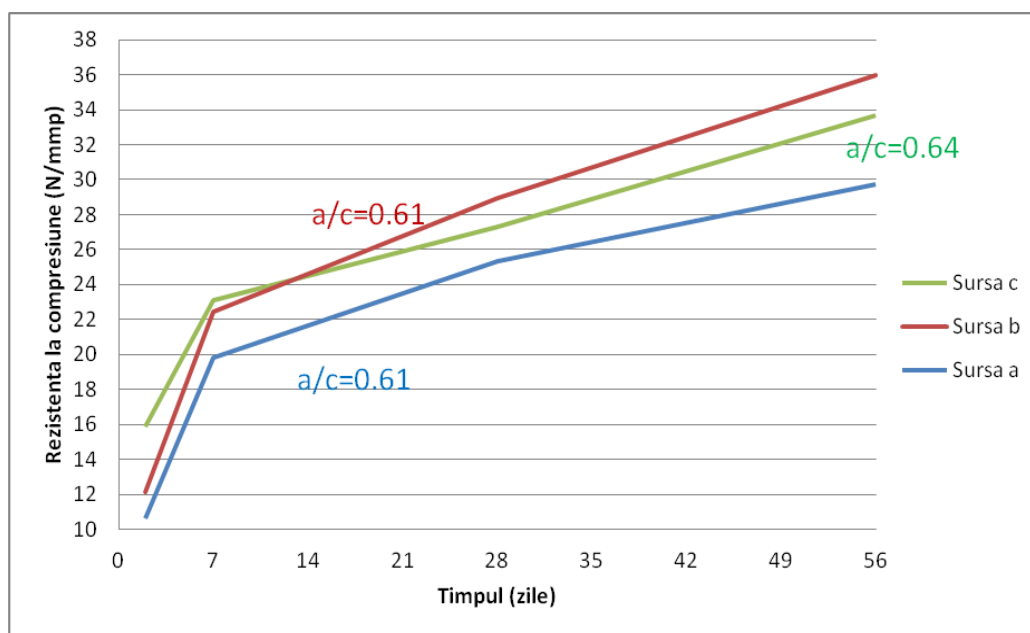


Figura V.15. - Variația în timp a rezistenței la compresiune a betonului cu 300 kg/m³ CEM II/A-S 42.5 R în funcție sursă

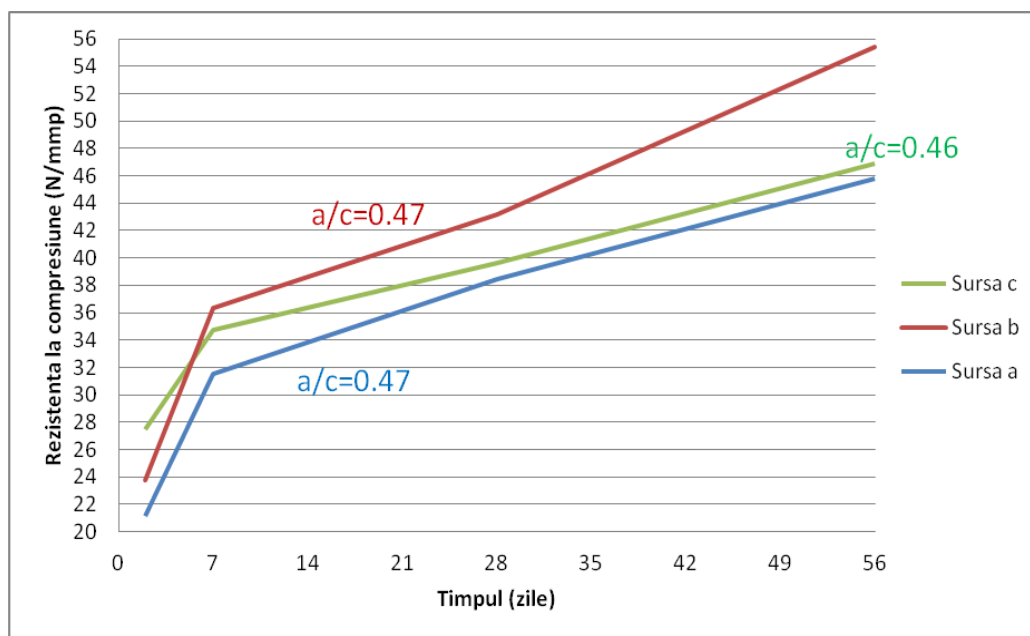


Figura V.16. - Variația în timp a rezistenței la compresiune a betonului cu 400 kg/m³ CEM III/ A-S 42.5 R în funcție sursă

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.17.-V.20.

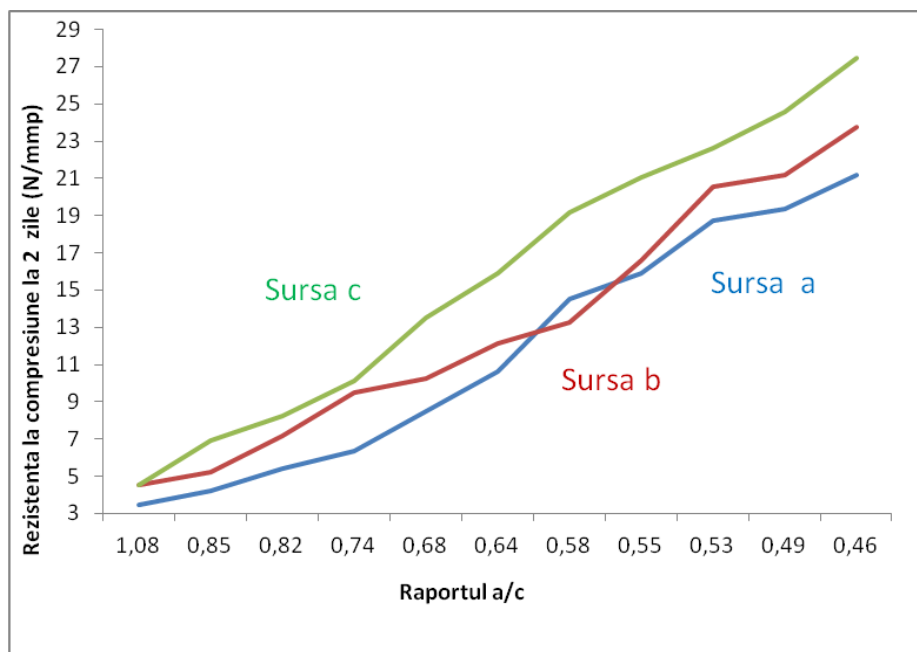


Figura V.17. - Variația rezistenței la compresiune la 2 zile a betonului cu ciment CEM II/A-S 42.5 R în funcție sursă și raport a/c

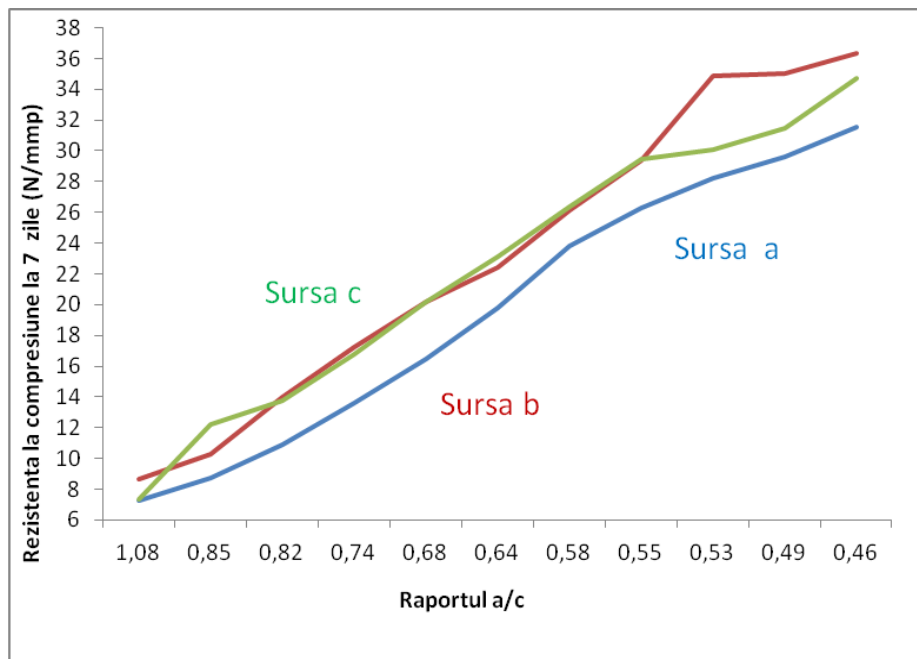


Figura V.18. - Variația rezistenței la compresiune la 7 zile a betonului cu ciment CEM II/A-S 42.5 R în funcție sursă și raport a/c

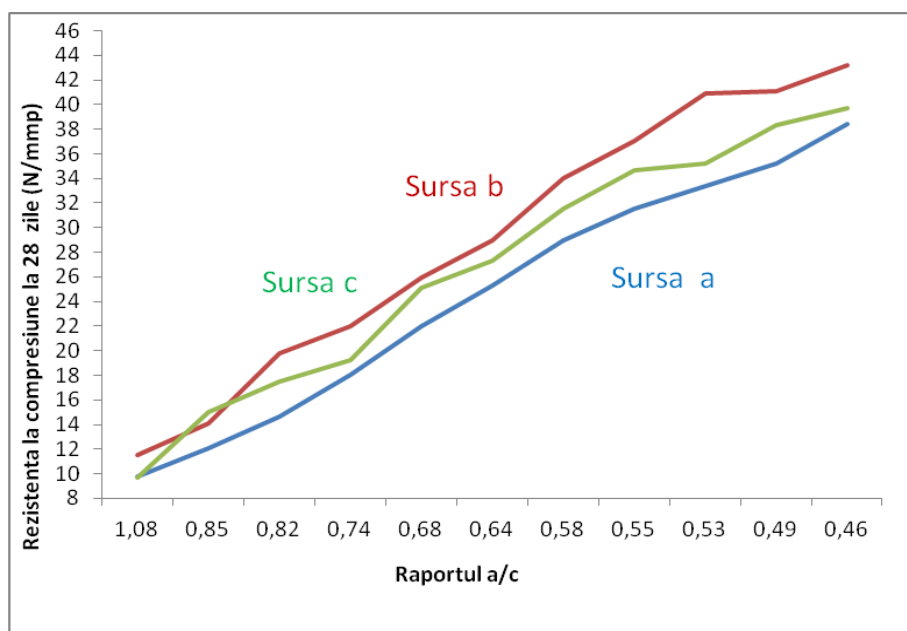


Figura V.19. - Variația rezistenței la compresiune la 28 zile a betonului cu ciment CEM II/A-S 42.5 R în funcție sursă și raport a/c

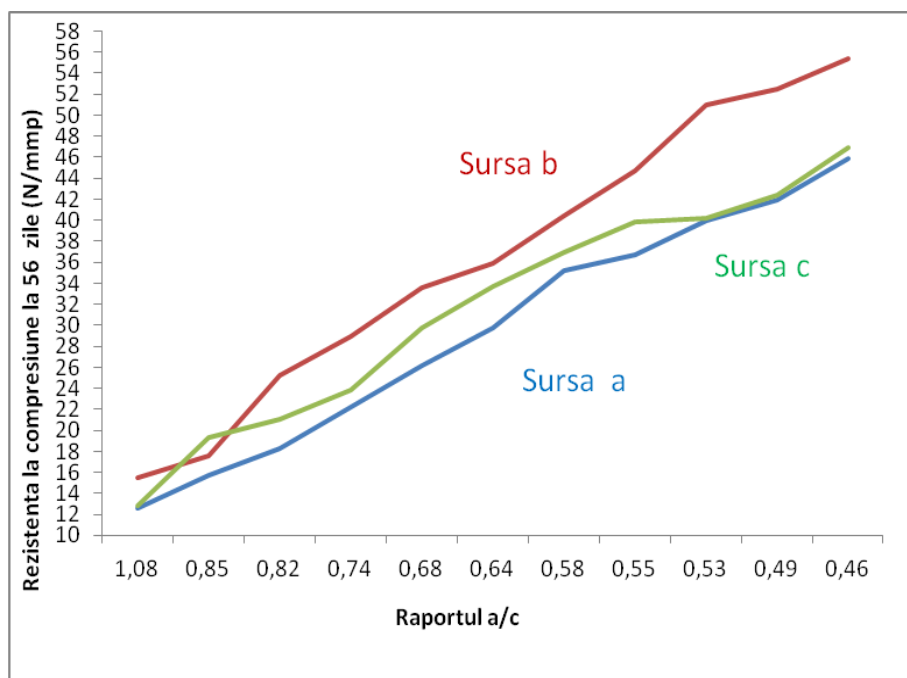


Figura V.20. - Variația rezistenței la compresiune la 56 zile a betonului cu ciment CEM II/A-S 42.5 R în funcție sursă și raport a/c

Din figurile prezentate se observă faptul că betoanele preparate cu cimenturi din sursa b au performanțele cele mai bune la 28 și 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.21. și V.22. în care s-a reprezentat evoluția în timp a rezistențelor betonului pentru cele trei surse la raport a/c constant.

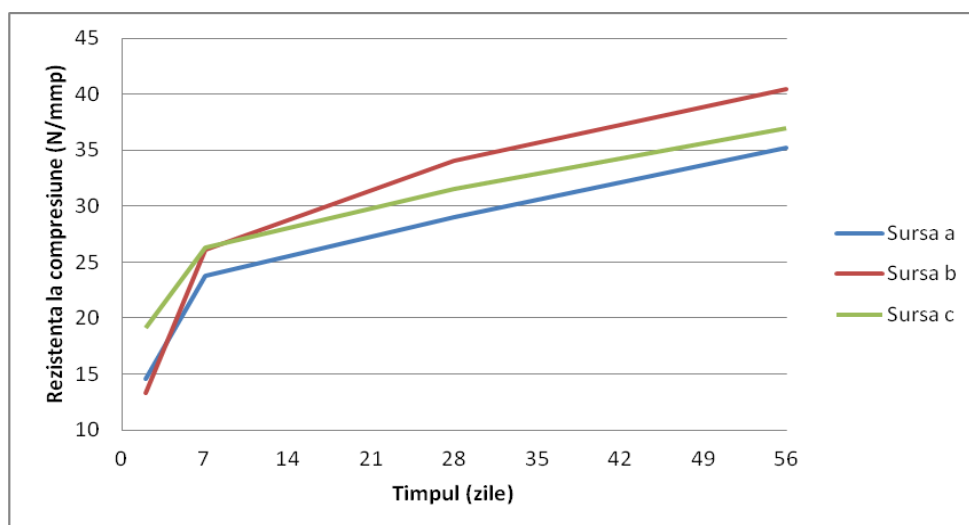


Figura V.21. - Variația rezistenței la compresiune a betonului cu ciment CEM II/A-S 42.5 R în funcție de sursă la raport $a/c=0.58$

Graficul din figura V.21. 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 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%.

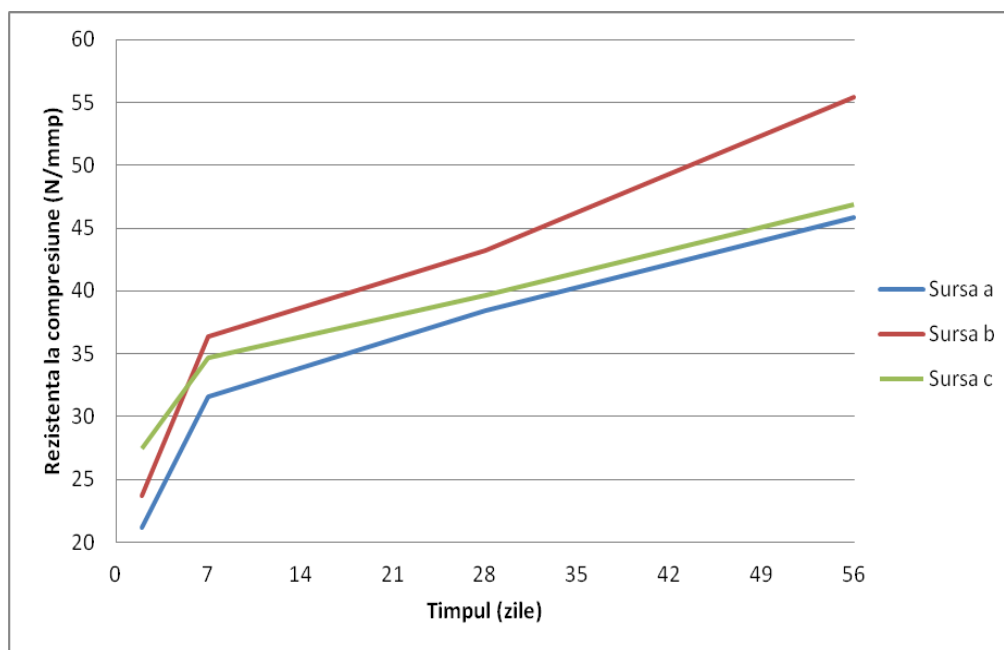


Figura V.22. - Variația rezistenței la compresiune a betonului cu ciment CEM II/ A-S 42.5 R în funcție de sursă la raport $a/c=0.47$

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^2 , iar la 56 zile diferența maximă este de 9

N/mm^2 corespunzătoare dozajului de ciment de 240 kg/m^3 . Pentru dozajul de 340 kg/m^3 , rezistențele la compresiune au un interval de variație de 5.5 N/mm^2 la 28 zile și respectiv 8 N/mm^2 la 56 zile.

În Tabelul V.10. se prezintă clasificarea evoluției rezistenței betonului în funcție de sursă și raportul a/c.

Tabelul V.10. – 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^3)	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
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[8] și SR EN 13670[9]

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.10. 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^3 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.

Sinteza rezultatelor obținute

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 $f_{ck}+6...12$ ($f_{cm} \geq f_{ck} + 6...12$ 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 date în Tabelul V.11.

Tabelul V.11. – Clasele de beton obținute conform valorilor rezistențelor la compresiune ale betoanelor preparate cu un dozaj de ciment echivalent în funcție de sursă

Tip ciment	Dozaj ciment (kg/m ³)	Rezistența la compresiune f_{cm28} (N/mm ²)			Clasa de beton obținută					
					Încercări inițiale			Verificări curente		
		Sursa a	Sursa b	Sursa c	Sursa a	Sursa b	Sursa c	Sursa a	Sursa b	Sursa c
CEM II/A-S 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
	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 minima de beton pentru structuri conform SR EN 206 [17] este C8/10.

** Clase de rezistența la compresiune care nu se regăsesc în SR EN 206 [17]

Aceleași teste au fost efectuate și pentru betoanele preparate cu ciment CEM III/A 42,5 N-LH provenit din trei surse diferite iar rezultatele sunt prezentate în teza.

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 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.

Încercările experimentale sunt esențiale și în aceste cazuri pentru stabilirea caracteristicilor betonului în general și a rezistentelor la compresiune în special.

- **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**

Se pune deseori problema promovării 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 apa/ciment echivalent, presupus a asigura comportări în timp similare cu ale unei compoziții de referință. 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 ale betonului preparat cu ciment tip II/A-S 42,5R și respectiv a unui beton realizat din CEM I 42,5R cu adaos de 10% zgura (și ale betonului preparat cu ciment tip III/A 42,5N-LH și respectiv a unui beton realizat din CEM I 42,5R cu adaos de 37% zgura).

Prima etapă a cercetărilor experimentale a constat în determinarea coeficientului k [82], [83]. În Tabelul V.12. sunt prezentate compozițiile betoanelor preparate cu CEM I 42,5R, iar în Tabelul V.13. se prezintă caracteristicile compoziționale ale betonului preparat cu CEM I 42,5R și 10% zgură.

Tabelul V.12. – Compozițiile betoanelor preparate cu CEM I 42.5R

Dozaj ciment (kg/m^3)	Apa (l)	Aditiv (l)	Agregate (kg)	sort 0-4 mm	sort 4-8 mm	sort 8-16 mm
270	171	2.55	1893	757	379	757
300	159	2.83	1855	742	371	742
340	154	3.21	1801	720	360	721
370	158	3.49	1780	712	356	712
430	167	4.06	1705	682	341	682

Tabelul V.13. – Compozițiile betoanelor preparate cu CEM I 42.5R și 10% zgură

Dozaj ciment (kg/m^3)	Dozaj zgura (kg/m^3)	Apa (l)	Aditiv (l)	Agregate (kg)	sort 0-4 mm	sort 4-8 mm	sort 8-16 mm
243	27	160	2.55	1893	757	379	757
270	30	156	2.83	1855	742	371	742
306	34	143	3.21	1801	720	360	721
333	37	153	3.49	1780	712	356	712
387	43	153	4.06	1705	682	341	682

Caracteristicile betonului proaspăt sunt prezentate în Tabelele V.14. și V.15., iar ale betonului întărit în figurile V.23. și V.24.

Tabelul V.14. – Caracteristicile betoanelor proaspete preparate cu CEM I 42.5R

Dozaj ciment (kg/m^3)	A/C	Tasare (mm)	Densitate (kg/m^3)
270	0.64	150	2379
300	0.54	150	2405
340	0.46	150	2439
370	0.44	150	2400
430	0.40	150	2433

Tabelul V.15. – Caracteristicile betoanelor proaspete preparate cu CEM I 42.5R și 10% zgură

Dozaj ciment (kg/m^3)	Dozaj zgura (kg/m^3)	A/C	Tasare (mm)	Densitate (kg/m^3)	Observații
243	27	0.60	110	2398	Beton necoeziv
270	30	0.53	135	2424	Beton necoeziv
306	34	0.43	125	2446	-
333	37	0.42	145	2414	-
387	43	0.37	105	2418	-

În figurile V.23. și V.24. se prezintă variația rezistenței la compresiune în funcție de raportul A/C.

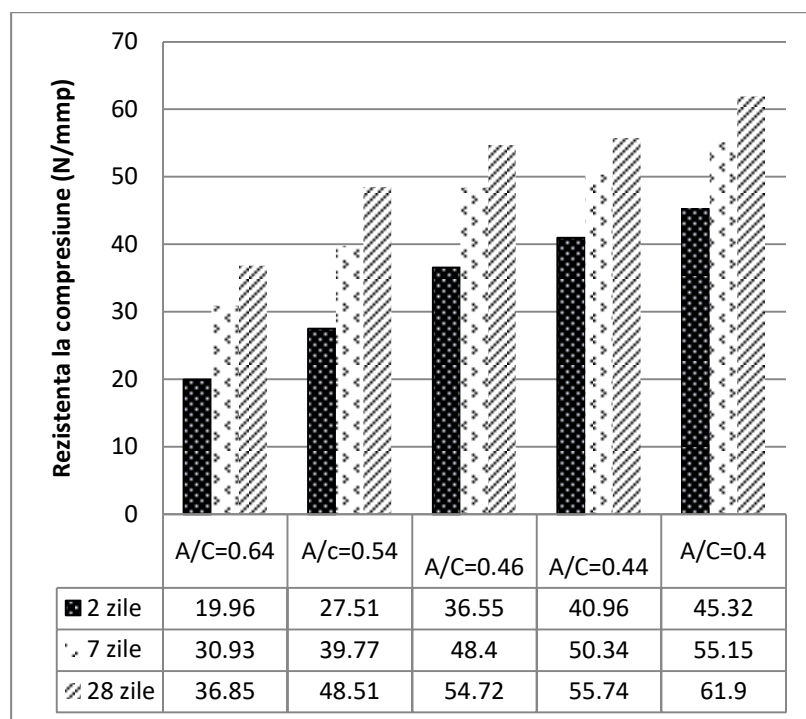


Fig. V.23. – Valorile rezistenței la compresiune a betoanelor preparate cu CEM I 42.5R

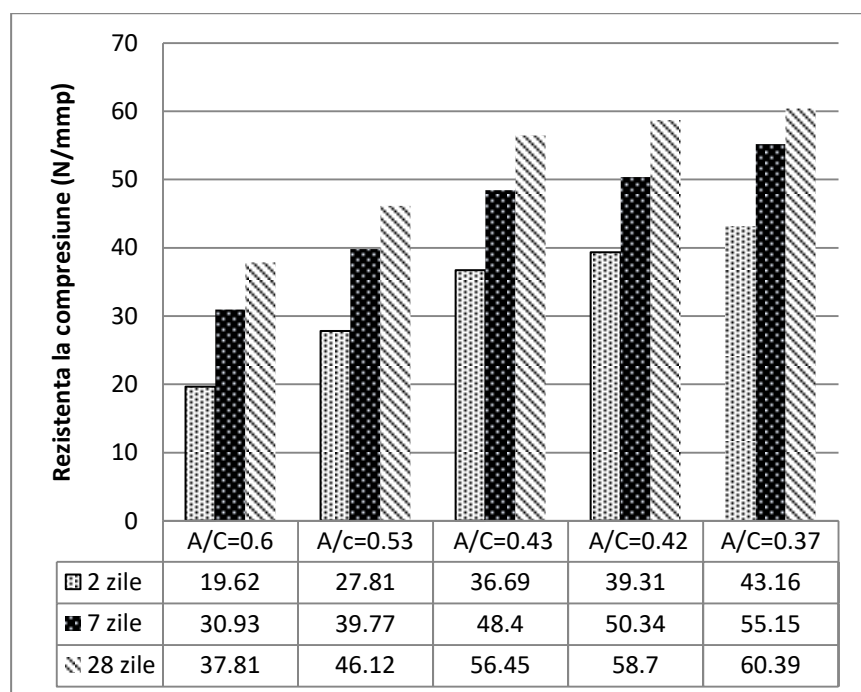


Fig. V.24. – Valorile rezistenței la compresiune a betoanelor preparate cu CEM I 42.5R și 10% zgură

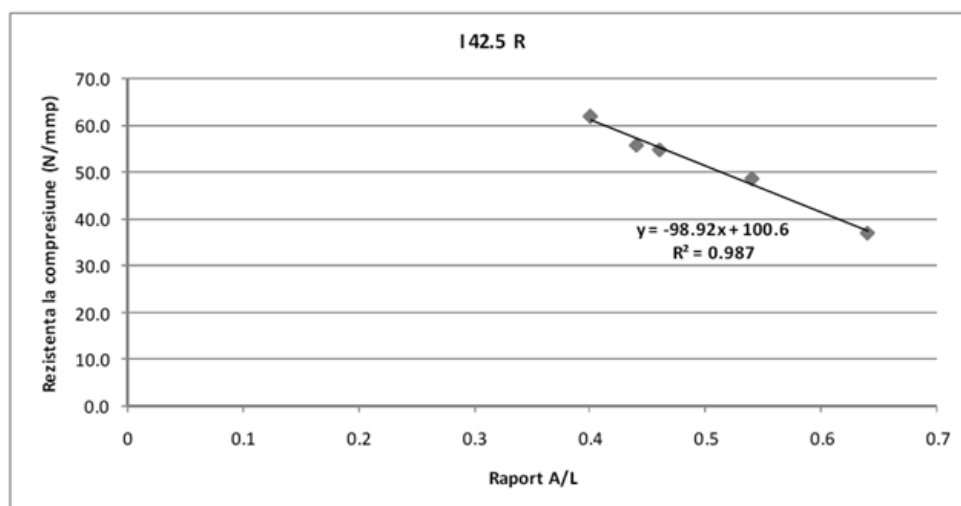


Fig. V.25. – Valorile rezistenței la compresiune la 28 de zile betoanelor preparate cu CEM I 42.5R [82]

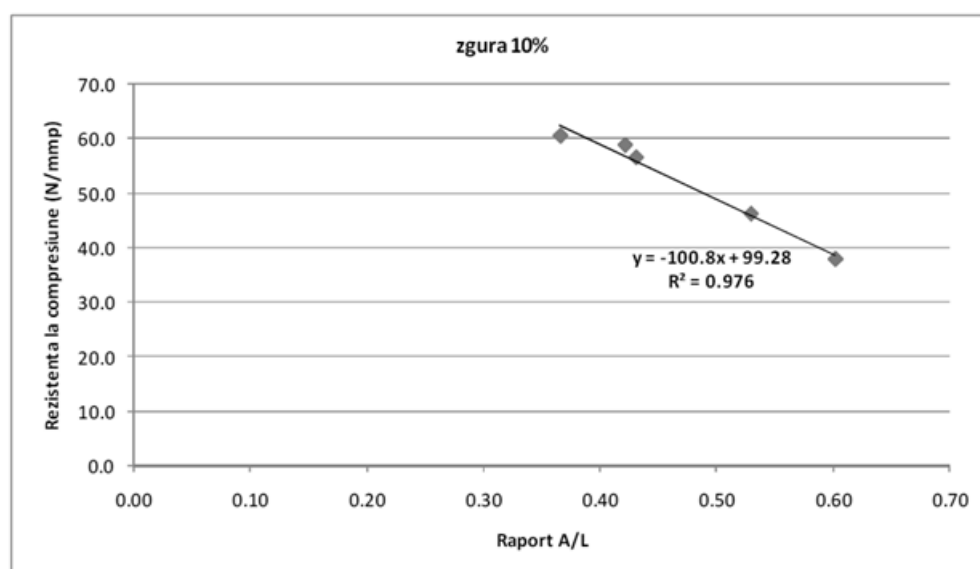


Fig. V.26. – Valorile rezistenței la compresiune la 28 de zile betoanelor preparate cu CEM I 42.5R și 10% zgură [82]

Diagramele prezentate în figurile V.25. și V.26. [82] au fost utilizate pentru determinarea coeficienților A_0 , B_0 pentru betonul de referință și respectiv A_a și B_a pentru betonul cu adaos.

S-au obținut următoarele rezultate:

$$f_0 = 100.6 - 98.92 \omega_0$$

$$f_a = 99.28 - 100.8 \omega_a \text{ (10\% zgură)}$$

Pentru betonul cu adaos de 10% zgură, aplicând relația (1):

$$k = \frac{(A_a - A_0)(1 + a/c)}{B_a \times a/c} \times \frac{1}{\omega_0} + \left[\frac{B_0(1 + a/c)}{B_a} - 1 \right] \times \frac{1}{a/c} \quad (V.1.)$$

în care notațiile sunt cele din rezumatul capitolului IV.

obținem:

$$k = -0.132 / \omega_0 + 0.812$$

(V.2.)

Aplicând relația (2) pentru diferite rapoarte apa/ciment $\omega_0 = 0.45; 0.5; 0.60, 0.65$ s-a obținut o valoare minimă a coeficientului k , de aprox. 0.5, valorile variind între 0.52 și 0.62 [82].

Compoziții de betoane realizate cu CEM II/A-S 42,5R și CEM I 42,5R și 10% zgură, coeficient $k=0.5$

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.15 și V.6. 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 kg/m^3 pentru clasa C16/20 și respectiv 330 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 II/ A-S 42,5R (10% zgura) cu dozaj de ciment de 260 kg/m^3 , raport $A/C = 0.65$

- S-au preparat betoane cu adaosuri de zgură de 10% ($k=0.5$)

$$c_1 + 0.5 \cdot 0.1 c_1 = 260 \text{ kg/m}^3; c_1 = 248 \text{ kg/m}^3, \text{zgura} = 25 \text{ kg/m}^3$$

Clasa de beton C20/25a

- S-au preparat betoane cu ciment tip II/A-S 42.5R (10% zgură) cu dozaj de ciment 330 kg/m^3 , raport $A/C = 0.5$

- S-au preparat betoane cu adaosuri de zgură 10% ($k=0.5$)

$$c_1 + 0.5 \cdot 0.1 c_1 = 330 \text{ kg/m}^3; c_1 = 314 \text{ kg/m}^3, \text{zgura} = 31 \text{ kg/m}^3$$

Beton proaspăt

Compozițiile și caracteristicile betonului proaspăt sunt prezentate în tabelele V.16 și V.17.

Tabelul V.16. – Compozițiile și caracteristicile betoanelor de clasă C16/20 preparate cu un raport A/C echivalent de 0.65

Tip ciment	Dozaj ciment (kg/m^3)	Dozaj zgura (kg/m^3)	Apa (l)	Aditiv super-plastifiant (l)	Agregate (kg)	sort 0-4 mm	sort 4-8 mm	sort 8-16 mm	Tasare (mm)	Densitate (kg/m^3)
CEM I+10% zgura	248	25	166	2.57	1908	763	382	763	195	2361
CEM II/A-S	260	0	166	2.45	1920	768	384	768	200	2338

Tabelul V.17. – Compozițiile și caracteristicile betoanelor de clasă C20/25a preparate cu un raport A/C echivalent de 0.5

Tip ciment	Dozaj ciment (kg/m^3)	Dozaj zgura (kg/m^3)	Apa (l)	Aditiv super-plastifiant (l)	Aditiv antrenor de aer (l)	Agregate (kg)	sort 0-4 mm	sort 4-8 mm	sort 8-16 mm	Tasare (mm)	Densitate (kg/m^3)	Aer (%)
CEM I+10%	314	31	161	3.26	0.691	1856	742	372	742	210	2192	10

zgura												
CEM II/A-S	330	0	161	3.11	0.66	1870	748	374	748	205	2180	9.2

Rezistența la compresiune

Rezultatele încercărilor la compresiune sunt prezentate în tabelele V.18. și V.19.

Tabelul V.18. – Valorile rezistențelor la compresiune ale betoanelor de clasă C16/20 preparate cu un raport A/C echivalent =0.65

Tip ciment	Dozaj ciment (kg/m ³)	Dozaj zgura (kg/m ³)	Rezistența la compresiune (N/mm ²)				f _{cm2} / f _{cm28}	Clasa de beton obținută	
			2 zile		28 zile			Verificări curente	Încercări inițiale
CEM I+10% zgura	248	25	18.07	18.50	26.16	26.16	0.71	C16/20	C16/20
			19.40		25.84				
			18.03		26.48				
CEM II/A-S	260	0	16.74	16.77	27.40	28.81	0.58	C16/20	C16/20
			16.39		29.44				
			17.18		29.60				

Se observă o ușoară diferență între rezistențele la compresiune în favoarea betonului preparat cu CEM II/A-S.

Tabelul V.19. – Valorile rezistenței la compresiune obținute pentru betoane de clasă C20/25a preparate cu A/C echivalent de 0.5

Tip ciment	Dozaj ciment (kg/m ³)	Dozaj zgura (kg/m ³)	Rezistența la compresiune (N/mm ²)				f _{cm2} / f _{cm28}	Clasa de beton obținuta	
			2 zile		28 zile			Verificări curente	Încercări inițiale
CEM I+10% zgura	314	31	19.07	18.45	31.92	31.49	0.58	C20/25a	C20/25a
			18.15		31.57				
			18.14		30.97				
CEM II/ A-S	330	0	18.32	17.95	29.88	30.07	0.60	C20/25a	C20/25a
			18.17		30.86				
			17.35		29.47				

Carbonatarea betonului

Probele utilizate pentru determinarea adâncimii de carbonatare au fost menținute 7 zile în apă 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 fenoltaleină de concentrație 1%. După aplicarea soluției de indicator, zona carbonată păstrează culoarea inițială a betonului, iar zona necarbonată capătă culoarea roșu-violet (fenoltaleina își modifica culoarea la un pH<9.2). Adâncimea stratului de carbonatare a betonului întărit s-a determinat conform SR CR 12793 [105].

În tabelul V.20. și figura V.27. sunt prezentate rezultatele înregistrate pentru valorile adâncimilor de carbonatare pentru clasa de beton C16/20.

Tabelul V.20. – Valorile obținute pentru adâncimea de carbonatare a betoanelor de clasa C16/20 în condiții de laborator

Tip ciment	Dozaj ciment (kg/m ³)	Dozaj zgura (kg/m ³)	Adâncimea de carbonatare (mm) 90 zile /7 zile apă				Adâncimea de carbonatare (mm) 180 zile/7 zile apă			
			val.indiv. medie	val. medie	val.indiv. max	val. medie	val.indiv. medie	val. medie	val.indiv. max	val. medie
CEM I+10% zgura	248	25	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	
CEM 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	

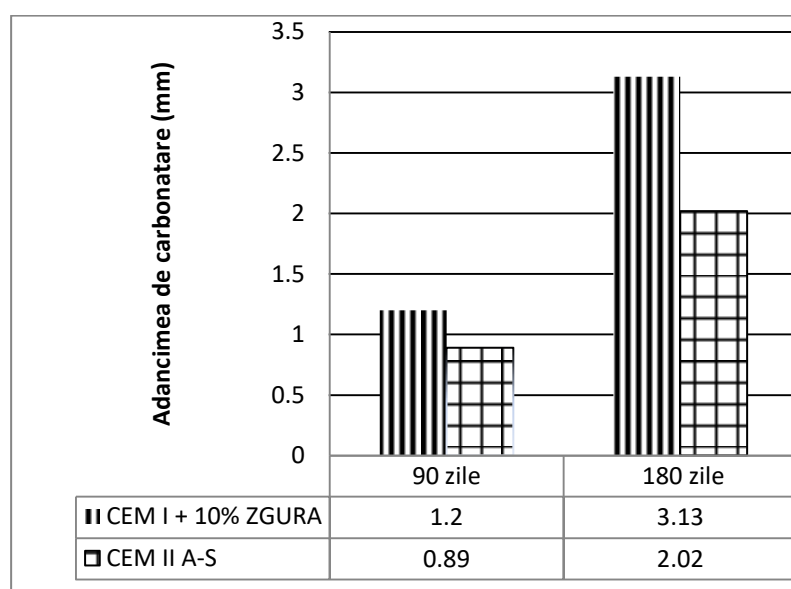


Fig. V.27. – Adâncimile de carbonatare ale betoanelor de clasa C16/20 preparate cu CEM I si 10% zgură și respectiv beton cu CEM II/A-S

Rezistența la îngheț-dezgheț

Comportarea betonului la îngheț-dezgheț repetat a fost studiată prin metoda nedistructivă “cube test” în conformitate cu CEN/TS 12390-9 [45]. În tabelele V.21.-V.22. și figura V.28 se prezintă cantitatea de beton exfoliat pentru betonul preparat la raportul A/C= 0.5.

Tabelul V.21. – Cantitatea de beton exfoliat după 56 cicluri de îngheț-dezgheț, cu agenți de dezghețare, cuburi cu latura de 100 mm

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, %
CEM 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	0.12
total	0.63	0.83	3.43	11.77	16.66	0.49	

CEM I+10% zgura	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	
total	0.79	1.20	2.77	16.38	21.14	0.67	

Tabelul V.22. – 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 beton exfoliat după 100 cicluri, g	Reducerea masei probei de beton după 100 cicluri	
Tip CEM	cantitate beton exfoliat, g		P, %	P, medie, %
CEM II/ A-S	3.56	5.66	0.26	0.41
	8.89	12.31	0.56	
	2.67	4.99	0.23	
sediment	30.72	39.54	0.60	
total	45.84	62.50	1.65	
CEM I+10% zgura	2.42	5.32	0.24	0.54
	11.92	16.40	0.74	
	4.36	8.40	0.38	
sediment	43.23	52.95	0.80	
total	61.93	83.07	2.17	

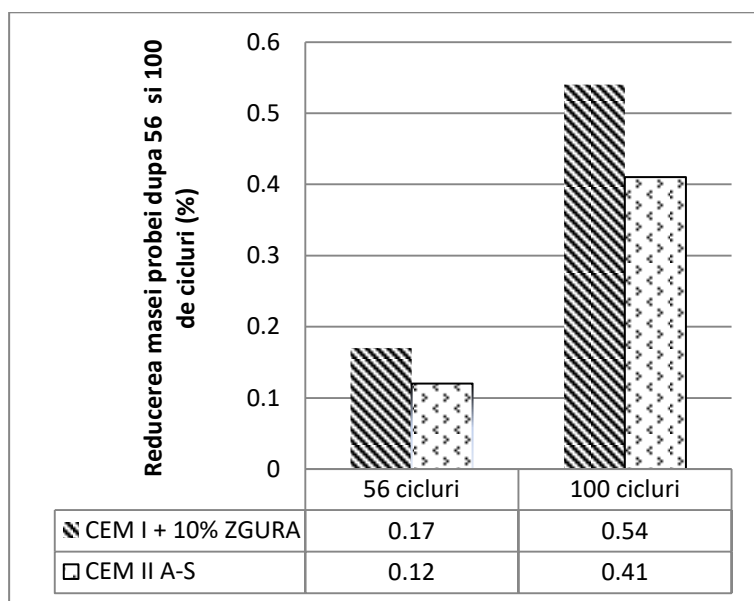


Fig. V.28. – Reducerea masei cuburilor din beton de clasa C20/25a după 56 si 100 de cicluri de îngheț-dezgheț cu agenți de dezghețare

Aplicarea unor metode de performanță

Carbonatarea betonului

Metoda “europeană”

Analizând aspectele rezistenței de carbonatare legate de conceptul de performanță echivalentă din *normativul european CEN/TC104/SC1-N 703* [59] s-a făcut o comparație între betonul cu CEM I+10%

zgură considerat ca beton candidat si betonul cu CEM II/A-S fiind beton de referință (tabelul V.23.).

Valoarea măsurată a adâncimii de carbonatare a betonului candidat trebuie să fie mai mică sau egală cu valoarea betonului de referință

$$\pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33\sigma_R)^2 - (2.33\sigma_r)^2 \left(\frac{n-1}{n}\right))} \quad (V.3.)$$

luându-se în considerare valorile medii la 90 și 180 de zile pentru $n \geq 3$.

unde: σ_r s-a considerat abaterea medie standard pentru betonul candidat;

σ_R – s-a considerat abaterea medie standard pentru betonul de referință.

Metoda olandeză

Analizând aspectele rezistenței de carbonatare legate de conceptul de performanță echivalentă din *normativul olandez VC12 WG4* [61] s-a făcut o comparație între betonul cu CEM I+10% zgură considerat ca beton candidat și betonul cu CEM II/ A-S fiind beton de referință (tabelul V.23.).

Pentru fiecare aspect al durabilității, evaluarea se bazează pe parametrul de evaluare T_j :

$$T_j = \sqrt{\frac{[m_r - \frac{m_t}{1+0.01d_j}]^2}{s/\sqrt{n}}} \quad (V.4.)$$

$$\text{unde: } s = \sqrt{\left\{ s_r^2 + \frac{s_t^2}{(1+0.01d_j)^2} \right\}} \quad (V.5.)$$

unde notațiile sunt cele din rezumatul capitolului IV.

Pentru validare trebuie ca $T_j > 1.533$ când $n = 3$ și $d_j = 30$.

Sinteza rezultatelor obținute

În tabelul V.23. se prezintă rezultatele obținute prin aplicarea celor două metode de performanță. Tabelul V.23. - Analiza performanțelor la carbonatare, pentru betonul de clasă C16/20 preparat cu CEM I+10% zgură luând ca referință betonul preparat cu CEM II/A-S

Normativ	Carbonatarea betonului	
Document european CEN/TC104/SC1-N 703 [59]	Valoarea beton candidat $\leq$ 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 $n \geq 3$	
	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
	$1.20 \leq 0.89 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 0.18)^2 - (2.33 \times 0.36)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))}$	
Normativ olandez VC12 WG4 [61]	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
	$3.13 \leq 2.02 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 0.69)^2 - (2.33 \times 0.30)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))} = 3.07$	
	$T_j = \frac{[m_r - \frac{m_t}{1+0.01d_j}]}{s/\sqrt{n}}$, unde $s = \sqrt{s_r^2 + \frac{s_t^2}{(1+0.01d_j)^2}}$	
	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

		$T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[0.89 - \frac{1.20}{1+0.01x30}]}{0.33/\sqrt{3}} < 0$
	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 $T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[0.89 - \frac{1.20}{1+0.01x30}]}{0.33/\sqrt{3}} < 0$

Legenda: X este criteriu îndeplinit;

0 = criteriu neîndeplinit.

Rezistența la îngheț-dezgheț

Metoda europeană

Analizând aspectele rezistenței la îngheț-dezgheț cu săruri de dezghețare, în legătura cu conceptul de performanță echivalentă din *documentul european CEN/TC104/SC1-N 703* [59], s-a făcut o comparație între betonul cu CEM I+10% zgură considerat ca beton candidat și betonul cu CEM II/A-S fiind beton de referință (tabelul V.24.).

Metoda olandeză

Considerând valorile obținute pentru reducerea masei probelor de beton după 56 cicluri la îngheț-dezgheț cu săruri de dezghețare (Tabelul V.21.) și 100 cicluri (Tabelul V.22.), s-a făcut aceeași comparație între betonul cu CEM I+10% zgură considerat drept beton candidat și betonul cu CEM II/A-S fiind beton de referință în conformitate cu *normativul olandez VC12 WG4* [61] (Tabelul V.24.).

Sinteza rezultatelor obținute

În tabelul V.24. se prezintă rezultatele obținute prin aplicarea celor două metode de performanță.

Tabelul V.24. – 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-dezgheț cu agenți de dezghețare

Normativ	Rezistența la îngheț-dezgheț cu agenți de dezghețare a betonului	
Document european CEN/TC104/SC1-N 703 [59]	Valoarea beton candidat $\leq$ 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 cicluri	$m_r = 7.05$ (beton candidat); $m_R = 5.55$ (beton de referință); $\sigma_r = 0.81$; $\sigma_R = 0.71$
	criteriu	0 $7.05 \leq 5.55 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 0.71)^2 - (2.33 \times 0.81)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))} = 5.94$
	100 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 WG4 [61]	criteriu	0 $27.69 \leq 20.83 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{((2.33 \times 4.05)^2 - (2.33 \times 5.72)^2 \left(\frac{3-1}{3}\right))}$
	$T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}}$, unde $s = \sqrt{sr^2 + \frac{st^2}{(1+0.01dj)^2}}$	
	56 cicluri	$m_r = 7.05$ (beton candidat); $m_R = 5.55$ (beton de referință); $s_t = 0.81$; $s_r = 0.71$; $s = 0.94$; $T_j = 0.233 < 1.533$
	criteriu	0

		$T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[5.55 - \frac{7.05}{1+0.01 \times 30}]}{0.94/\sqrt{3}} = 0.23 < 1.533$
100 cicluri		$m_r = 27.69$ (beton candidat); $m_R = 20.83$ (beton de referință); $s_t = 5.72$; $s_r = 4.05$; $s = 5.98$; $T_j < 0$
criteriu	0	$T_j = \frac{[mr - \frac{mt}{1+0.01xdj}]}{s/\sqrt{n}} = \frac{[20.83 - \frac{27.69}{1+0.01 \times 30}]}{5.98/\sqrt{3}} < 0.$

Legenda: X este 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 unui beton având același conținut de zgura, dar în componenta 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 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-dezghet 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.

Rezumatul capitolului VI

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 cementoide suplimentare care este influențată de durata și eficiența tratării, raportul a/c (fig.VI.1), 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.

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

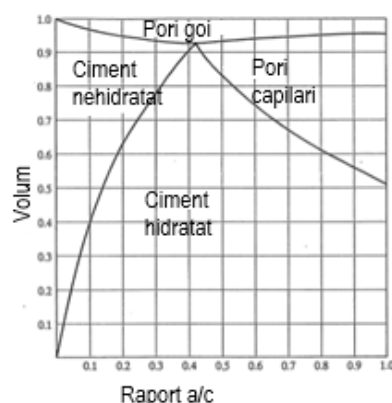


Figura VI.1.- Influenta raportului a/c asupra volumului porilor capilari [111].

Durabilitatea betonului sau, mai corect, lipsa de durabilitate în unele dintre condițiile de expunere mai severe, este încă o problemă la nivel mondial. Cauza dominantă a deteriorării premature a structurilor din beton este coroziunea armăturii datorită carbonatării betonului sau a penetrării clorurilor în beton.

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.

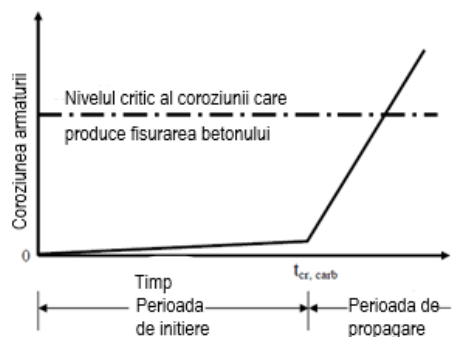


Figura VI.2. - Stadii ale coroziunii armăturii din beton [39].

În literatura de specialitate se recomandă ca viteza de carbonatare a betonului să se determine cu relația:

$$X_{carb} = k \times t^m \quad (VI.1)$$

în care: X_{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.

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 maxima 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.

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.

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
 - Raport scăzut a/c
 - Aer antrenat în condiții de îngheț-dezghet
 - 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.

VII.1. Concluzii generale

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 constat 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 compresie 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 compresie 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 cementoide 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 cementoide 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 aceleiași 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 compresie 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

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. Partea 1: 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 compresie 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 armatura. 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_BETONELOR_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
- [37] http://www.sginstitute.in/Downloads/Civil_Downloads/LectureNo_15.pdf
- [38] R. Gavrilesu - 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
- [41] 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
- [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
- [49] 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

-
- [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_Physic-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 pasta. Partea 1. Definiții, specificații și criterii de conformitate
- [64] NBN B 15-100 - Norme belge - Methodologie pour l'évaluation et l'attestation a l'emploi de ciments et d'additions de type II destinés du béton , 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 rezistență și durabilitate a betoanelor preparate cu cimenturi tip II/A-S, III/A și respectiv cu ciment tip I și adaosuri de 10% și 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 și protecția betonului, Editura Tehnica București, 1965;
- [89] N. Panait (Saca) - Implicații ale CaCO₃ în întărirea și proprietățile materialelor compozite pe baza de liant mineral-Teza de doctorat, UPB
- [90] Igor Terte, Traian Oneț - Verificarea calității construcțiilor de beton armat și beton precomprimat, Editura Dacia Cluj Napoca, 1979;
- [91] SR 3832-10 - Materiale puzzolanice și 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
- [109] http://www.concrete.ie/downloads/concrete_standards.pdf
- [110] https://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/tecnologia_hormigon/europeNorm206.pdf
- [111] http://www.intrans.iastate.edu/reports/taylor_ocm_w_cvr2.pdf
- [112] documents.epfl.ch/users/s/st/ston/www/8%20Durability.pdf
- [113] http://www.standard.no/Global/PDF/Bygg,%20anlegg%20og%20eiendom/2018_Eurokodeseminar/307%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
- [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.