

ROMÂNIA
MINISTERUL EDUCATIEI NAȚIONALE

UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI

REZUMAT

TEZĂ DE DOCTORAT

**Aplicarea metodelor descriptive și de
performanță în asigurarea durabilității elementelor și
structurilor din beton realizate cu cimenturi cu
adaosuri**

Conducător științific

Prof. Univ. Dr. Ing. Dan GEORGESCU

Doctorand

Ing. Marius Cristinel MORARU

București – 2021

Cuprinsul general al tezei

Capitolul I. Aspecte generale privind durabilitatea elementelor și structurilor din beton	pag. 3
Capitolul II. Metode de proiectare moderne a durabilității construcțiilor din beton armat	pag. 7
Capitolul III. Măsuri necesare la producerea betonului, execuția și mentenanța lucrărilor din beton armat pentru asigurarea durabilității betonului	pag. 10
Capitolul IV. Cercetări experimentale pentru determinarea durabilității betonului armat la acțiunea carbonatării. Încadrarea în clase de rezistență la carbonatare	pag. 15
Capitolul V. Cercetări experimentale pentru determinarea durabilității betonului armat la acțiunea de îngheț-dezgheț. Încadrarea în clase de rezistență la îngheț-dezgheț	pag. 26
Capitolul VI. Concluzii finale, contribuții personale și potențiale direcții de dezvoltare viitoare	pag. 37
Bibliografie selectivă.....	pag. 44

Oportunitatea si obiectivele generale ale tezei

Asigurarea durabilității construcțiilor reprezintă o problemă vitală pentru economia națională. Preocupările din ultimii ani, pe plan internațional, pentru durabilitatea construcțiilor din beton au apărut odată cu observarea comportării în timp a construcțiilor și cu constatarea unor degradări premature ale construcțiilor din beton armat aflate în diferite medii.

Principalul obiectiv al tezei este de a analiza dacă abordarea actuală descriptivă legată de durabilitate, poate asigura aceeași durată de viață a construcțiilor indiferent de ce tip de materiale (ciment) sunt utilizate. Pentru a aduce argumente în sprijinul acestei evaluări este necesară stabilirea unei legături între rezultatele metodei de performanță, comportarea în timp a betoanelor cu diferite tipuri de ciment și experiența anterioară bazată pe metoda descriptivă. Abordarea propusă în teză reprezintă o propunere de completare a reglementărilor europene în domeniul durabilității construcțiilor din beton armat.

Totodată lucrarea vine în întâmpinarea problematicei lansate prin acordul european „Green Agreement” care, din perspectiva evoluției materialelor de construcții, va presupune utilizarea extensivă a cimenturilor cu procente și tipuri diferite de adaosuri.

Capitolul I. Aspecte generale privind durabilitatea elementelor și structurilor din beton

Actualul sistem de specificare și asigurare al durabilității structurilor din beton este bazat, în prezent, pe reguli de tip “deemed to satisfy”. În prezent, durabilitatea betonului este specificată prin valori limită (raport maxim A/C, conținut minim de ciment, aer antrenat în norma EN 206), tip ciment (Anexe naționale). [2],[3]

Betonul, fiind un material esențial pentru realizarea construcțiilor, beneficiază de principalul avantaj legat de răspândirea materialelor din care este produs. Acesta,

coroborat cu diversitatea de aplicații, forme și funcționalități pe care le poate crea, face din beton al doilea cel mai utilizat material din lume, după apă.

Betonul se caracterizează din punct de vedere al rezistenței prin clasa de rezistență la compresiune, aceasta fiind și cea mai importantă caracteristică avută în vedere la producerea acestuia. De această caracteristică sunt legate și celelalte proprietăți ale betonului simplu sau armat, clasa de beton fiind aleasă astfel încât să asigure în primul rând rezistența necesară elementelor și structurilor din beton. La proiectarea construcțiilor de beton armat, pe lângă satisfacerea cerințelor de rezistență și stabilitate, comportarea în timp devine un aspect foarte sensibil, tendința internațională fiind de impunere a unor clase de rezistență superioare din considerentul de asigurare a durabilității.

Durabilitatea construcțiilor, fiind o problemă foarte actuală, conduce la impunerea unor exigențe suplimentare betonului pentru asigurarea unei comportări în timp adecvate a construcțiilor din beton armat. Măsurile de extindere a claselor betonului și la durabilitate conduce la o legătură strânsă între proiectarea de rezistență și proiectarea durabilității.

În mod suplimentar este necesară existența unei strânse legături între toți factorii implicați în asigurarea durabilității construcțiilor din beton armat. Astfel, alături de proiectanți și executanți, producătorii de materiale de construcții au o sarcină deosebit de importantă în identificarea soluțiilor tehnico-economice menite să concure la atingerea cerințelor de durabilitate ale construcțiilor.

Durabilitatea betonului poate fi definită ca fiind „capacitatea acestuia de a-și păstra proprietățile fizico-chimice și mecanice în timp, la acțiunea distructivă și agresivă a mediului exterior, care provoacă degradări și uneori distrugerii ale elementelor de construcții”. [1]

Cunoașterea cauzelor și factorilor de degradare a betonului și betonului armat prezintă o importanță deosebită, având la bază noțiunea de durabilitate. Aceasta implică, pe lângă realizarea inițială a unor caracteristici (reglementate tehnic) pentru diferite componente sau elementele de construcție și menținerea lor nealterată în timp (sau înscrierea în toleranțe admise).

Principalii factori de care depinde durabilitatea unei construcții sunt: calitatea materialelor utilizate, calitatea executării lucrărilor, întreținerea construcțiilor în funcție de acțiunile fizico – chimico – mecanice care solicită construcția.

Studierea durabilității construcțiilor din beton necesită cunoștințe multidisciplinare, de la chimia materialelor, comportarea elementelor la diferite tipuri de solicitări, până la științele fundamentale sau aplicative. Se utilizează tehnici sau metode de experimentare din ce în ce mai performante și complexe pentru cercetările de laborator și pentru investigarea unor construcții existente. Cuantificarea factorilor care influențează durabilitatea apare specificată la nivelul reglementărilor internaționale de execuție. În cazul examinării construcțiilor existente, nu există însă relații directe, care să indice influența stării de degradare asupra caracteristicilor specifice, necesare analizelor structurale. Un aspect semnificativ îl constituie faptul că durabilitatea construcțiilor de beton armat sau precomprimat nu este considerată o problemă numai în cazul mediilor agresive, ci și în cazul mediilor "curente", în care se găsesc cele mai multe dintre construcții și la care sau înregistrat, de asemenea, fenomene îngrijorătoare.

Degradarea betonului nu are, în mod practic, niciodată o singură cauză. De aceea, clasificarea proceselor de deteriorare trebuie făcută cu prudență. Evident, tipul și gradul proceselor de degradare pentru beton (fizice, chimice, biologice), cât și pentru beton armat (coroziunea) influențează în sens negativ rezistența și rigiditatea materialelor și elementelor ce compun structura construcțiilor.

Primul capitol al tezei conține elementele principale care stau la baza proiectării, execuției și exploatării unor construcții de beton armat durabile, subliniindu-se în mod deosebit fenomenele și caracteristicile teoretice care au stat la baza efectuării studiilor experimentale la care prezenta teză face referire.

Betonul prezintă o rețea de pori de care depind, în mare măsură, caracteristicile de rezistență și de durabilitate ale betonului. Transportul fluidelor printr-un mediu poros depinde, în mare măsură, de dimensiunile porilor și de distribuția acestora. Astfel, mecanismele de transport presupun studierea următoarelor elemente:

- Porozitatea betonului - reprezintă raportul între volumul porilor (golurilor) și volumul total al betonului.
- Permeabilitatea betonului - prezintă interes pentru estimarea potențialului de durabilitate al betonului în raport cu capacitatea sa de a rezista la pătrunderea gazelor sau a lichidelor.
- Difuzia fluidelor în beton - reprezintă procesul de deplasare a fluidului, determinat de gradientul de concentrație sau de potențial chimic.

-
- Absorbția betonului - cantitatea de apă absorbită este direct proporțională cu riscul de apariție al unor degradări de suprafață ale betonului, de exemplu provocate de fenomenul de îngheț-dezghet.

Cauzele degradării sunt favorizate adesea de deficiențele calitative ale betonului și sunt determinate de regulă de condițiile ambientale la care este expusă construcția. Cauzele degradării se pot împărți în următoarele grupe:

- ❑ Cauze fizice
 - Îngheț-dezghet
 - Degradare mecanică
- ❑ Cauze chimice
 - Carbonatarea betonului
 - Difuzia ionilor de clor
 - Atacul chimic/sulfatic
 - Reacții alcalii-agregate
- ❑ Cauze mecanice
 - Abraziune mecanică

Pe parcursul primului capitol al tezei au fost detaliate particularitățile celor trei categorii de procese de degradare a betonului.

Generalizând, alegerea tuturor caracteristicilor betonului ce urmează a fi utilizat trebuie să pornească de la studiul impactului previzionat al mecanismelor de degradare a betonului asupra construcției, astfel încât să fie îndeplinite cerințele tehnice în concordanță cu cele economice, logistice și juridice.

Această analiză detaliată realizată cu scopul alegerii caracteristicilor betonului este prezentată de autor în capitolul dedicat proiectării betonului armat pentru durabilitate. Aceasta presupune studierea măsurilor ce trebuie luate începând cu faza de proiectare a construcției, continuând cu prepararea și punerea în operă a betonului și finalizând cu măsurile de întreținere pe toată perioada de exploatare.

Capitolul II. Metode de proiectare moderne a durabilității construcțiilor din beton armat

Asigurarea durabilității în timp a betonului armat necesită luarea unor măsuri complexe în ceea ce privește proiectarea, prepararea, punerea în operă, tratarea betonului, precum și prevederea unor măsuri de întreținere pe toată perioada de exploatare.

În acest scop sunt definite două moduri de tratare a acestor măsuri: metoda descriptivă (care se referă la exigențele legate de compoziția betonului) și metoda de performanță (care specifică nivele de performanță ale caracteristicilor betoanelor în funcție de diferite tipuri de acțiuni ale mediului).

În conformitate cu standardul românesc armonizat cu cel european, SR EN 206:2014 [2], asigurarea durabilității se face printr-o abordare descriptivă, specificându-se cerințe referitoare la compoziția și rezistența la compresiune a betonului în funcție de încadrarea construcției în anumite clase de expunere. Această abordare are avantajul simplității însă necesită uneori completări prin abordări specifice, prin care să se stabilească nivele de performanță, valori sau intervale de valori, pentru anumite caracteristici ale betonului în funcție de o aplicație particulară. Această abordare este necesară pentru verificarea unei anumite compoziții a betonului și mai ales pentru stabilirea unor criterii necesare precizării domeniilor de utilizare a unor noi tipuri de cimenturi cu adaosuri.

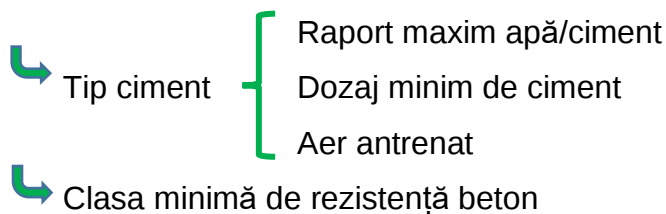
Verificarea compoziției betonului pentru o anumită aplicație sau stabilirea domeniilor de utilizare a cimenturilor trebuie să se efectueze pe baza unei metodologii unitare. Aceasta metodologie presupune într-o primă fază parcurgerea unor etape de verificare plecând de la tipul elementului/structurii și clasele de expunere, printr-o abordare descriptivă, pentru alegerea clasei minime de rezistență a betonului (tipul de ciment, a dozajului de ciment, raportul apă/ciment maxim, conținutul de aer antrenat etc.). A doua etapă a acestei metodologii presupune o abordare de performanță, cu scopul aplicării unor criterii relative cu privire la proprietăți ale betonului (absorbție, permeabilitate, penetrarea clorurilor, carbonatare) și a unor criterii absolute privind rezistența betonului la diferite acțiuni ale mediului (îngheț-dezgheț, atac sulfatic etc.) și a modului de manifestare a acestor acțiuni asupra betonului.

Această metodologie se poate prezenta conform schemei următoare.

Tip element / structura

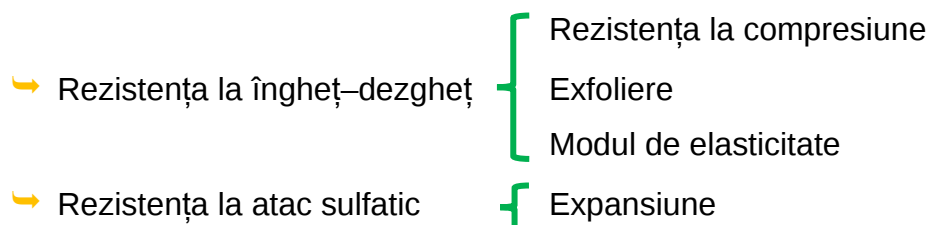
↳ Clasa de expunere

↳ A. Abordare descriptivă



↳ B. Abordare de performanță

↳ Criterii absolute



↳ Criterii relative

- ↳ Absorbție
- ↳ Permeabilitate
- ↳ Penetrarea clorurilor
- ↳ Carbonatare

Observație: după fiecare dintre etapele A și B se evaluează respectarea condițiilor și în funcție de răspunsul primit (DA/NU) se parcurg pașii următori sau se revine asupra datelor de intrare.

În continuarea acestui capitol se va prezenta descrierea elementelor care stau la baza aplicării acestei metodologii.

Metodologia aplicată pentru verificarea compoziției betonului pentru o anumită aplicație sau stabilirea domeniilor de utilizare a cimenturilor presupune într-o primă etapă parcurgerea verificării printr-o abordare descriptivă care implică alegerea tipului de ciment, a dozajului de ciment, a clasei minime de rezistență etc.. Odată confirmată

prima etapă, urmează aplicarea unei abordări de performanță prin aplicarea criteriilor absolute și relative asupra modului de manifestare a acțiunilor de mediu asupra betonului.

După parcurgerea fiecăreia din cele două etape descrise anterior se evaluează respectarea condițiilor stabilite inițial și în funcție de răspunsul primit se trece la etapa următoare sau se revine asupra datelor de intrare.

Pe cuprinsul capitolului s-au trecut în revistă aspecte generale referitoare la aplicarea metodelor descriptive și de performanță la proiectarea durabilității betonului armat.

Specificațiile referitoare la amestecul de beton (tip ciment și dozaj, raport apă/ciment maxim etc.), cerințele de proiectare (grosimea stratului de acoperire cu beton, deschiderea maximă admisă a fisurilor, detaliile constructive) și de execuție (compactare, tratare etc.) sunt esențiale în ceea ce privește stabilirea parametrilor necesari și a condițiilor de realizare a unor elemente/structuri din beton armat în anumite condiții de mediu. Cu toate acestea ele nu sunt suficiente pentru determinarea duratei de viață a unei construcții și prognozarea evoluției proceselor de degradare.

[4]

Pentru proiectarea durabilității, problema principală constă în dificultatea precizării, din faza inițială de proiectare a unei construcții, a modalităților de comportare a materialelor în diverse condiții de mediu. Cunoștințele teoretice, testele de laborator, observațiile comportării unor structuri similare în medii apropiate pot oferi date importante, dar nu întotdeauna suficiente pentru stabilirea cu precizie a duratei de viață a unei construcții. În consecință, pentru stabilirea duratei de serviciu, utilizarea rezultatelor experimentale efectuate asupra materialelor, inclusiv prin modelarea acțiunilor de mediu în laborator, trebuie făcută cu maximă responsabilitate.

Capitolul III. Măsuri necesare la producerea betonului, execuția și mentenanța lucrărilor din beton armat pentru asigurarea durabilității betonului

Asigurarea durabilității unei structuri din beton armat trebuie luată în considerare încă din faza de proiectare când se pot identifica și prescrie măsurile ce trebuie luate în toate etapele existenței construcției.

În acest capitol vor fi prezentate măsuri pentru sporirea durabilității construcțiilor din beton armat. De asemenea, vor fi luate în considerare măsuri particulare specifice betonului fabricat cu cimenturi cu adaosuri de zgură, având în vedere faptul că cercetările experimentale care stau la baza elaborării acestei teze se concentrează asupra studierii acestor sortimente de ciment.

Măsurile ce trebuie stabilite urmăresc toate etapele existenței unei construcții începând cu proiectarea, execuția (incluzând producerea betonului) și finalizând cu întreținerea / mentenanța.

Din experiență s-a observat că proiectarea clasică și stabilirea unor durate de serviciu pe termen lung nu au confirmat comportarea reală a structurilor și nu au asigurat o durabilitate corespunzătoare, în special în medii agresive.

Pentru structuri aflate în diferite medii, stabilirea unor anumite nivele de performanță este o activitate complexă ce ține seama de elemente de ordin tehnic, economic, managerial, politic, legislativ precum și de tradițiile naționale. O tendință a ultimilor ani în România a fost de asigurare pe termen scurt, cu cheltuieli minime de investiții, fără a lua în considerare totalul cheltuielilor pe durata de viață a construcției. Responsabilitatea apariției degradărilor având consecințe asupra durabilității construcțiilor, aparține deopotrivă proiectanților, executanților și utilizatorilor.

Toate aceste aspecte conduc la necesitatea creării unui nou concept de proiectare a durabilității și de caracterizare a stării construcțiilor existente.

În ceea ce privește durabilitatea betonului în faza de proiectare, plecând de la exigențele impuse unui element din beton de încărcările unei construcții, prin proiectarea structurală se stabilesc un set de valori limită ale acestuia, în principal clasa minimă de rezistență a betonului. Este foarte important de subliniat că nu doar prin proiectarea structurală se stabilește clasa de rezistență a betonului. O evaluare

complet separată va impune betonului o altă serie de valori limită compoziționale (clasa minimă de rezistență, raport apă/ciment maxim, tipuri de ciment utilizabile etc.), plecând de la condițiile de mediu înconjurător în care elementul este exploatat pe durata de serviciu. Aceasta reprezintă proiectarea durabilității în conformitate cu prevederile obligatorii ale CP 012/1:2007. [8]

Proiectantul este obligat să parcurgă atât proiectarea structurală cât și pe cea a durabilității. Pentru stabilirea clasei minime de rezistență se alege valoarea maximă dintre valorile determinate din condiții de rezistență și respectiv din condițiile de mediu, încadrabile în clase de expunere (X).

Stabilirea compoziției betonului inclus în proiect și care urmează a fi comandat la stație, presupune adaugarea exigențelor rezultate din proiectarea durabilității betonului (valoarea maximă a raportului apă/ciment, tipul sau tipurile de ciment, dozajul minim de ciment etc.) la valoarea clasei minime de rezistență. Pentru majoritatea elementelor de construcții civile proiectate în mod obișnuit, o mare parte a specificațiilor betonului din structură sunt identificate doar parcurgând etapa obligatorie de proiectare a durabilității (nu prin proiectarea structurală). Astfel, este foarte importantă includerea în proiect a tuturor specificațiilor necesare betonului (clasa de rezistență, raportul maxim apă/ciment, tipul cimentului, diametrul maxim al granulei de agregat, consistența etc.).

Limitările privind clasa minimă de rezistență și cele ale caracteristicilor betoanelor în ceea ce privește raportul maxim apă/ciment, dozajul minim de ciment și utilizarea unor aditivi antrenori de aer, au suferit o evoluție pe fondul creșterii exigențelor prin prisma durabilității. Astfel, la nivelul reglementărilor românești putem face o comparație între *Codul de practica pentru producerea betonului CP 012/1- 2007* [8] și standardul *SR EN 206:2014 Beton - Specificație, performanță, producție și conformitate* [2].

Grosimea stratului de acoperire reprezintă o valoare acoperitoare între grosimea minimă din cerințe de aderență a armăturilor la beton, din cerințe de asigurare a durabilității față de acțiunile mediului înconjurător precum și din cerințe asociate unei rezistențe la foc convenabile, suficiente.

Modul de stabilire a grosimii stratului de acoperire este prezentat în SR EN 1992-1-1 (Eurocod 2) [5], acesta fiind și documentul de referință, după care se stabilește în prezent, în mod direct, grosimea stratului de acoperire. O serie de referiri

indirecte, referitoare la stratul de acoperire, se regasesc, pentru poduri, în Eurocodul 2 specific [25] precum și în SR EN 13670 [26].

Reglementările naționale care fac referire la acest subiect au ieșit din vigoare, prin urmare se poate spune faptul că, modul de stabilire al grosimii stratului de acoperire se realizează în România integral în conformitate cu prevederi europene. De altfel acest domeniu a fost armonizat în întreg ansamblul țărilor Uniunii Europene prin aplicarea Eurocod-urile [5], [25]. Această uniformizare a modului de stabilire a grosimii stratului de acoperire a fost posibilă întrucât clasele de expunere XC, XD, XS nu țin seama de specificul local (național) în clasificarea intensității agresiunii.

Etapele de execuție a unei structuri de beton armat se referă la toate operațiunile complexe efectuate începând cu pregătirea de șantier și până la recepția (punerea în exploatare) a construcției respective. Ținând cont de faptul că acest capitol își propune să abordeze problematici specifice asigurării durabilității betonului ca material de construcție, în prezentul subcapitol se va face referire la cerințele de durabilitate legate de cauzele degradării betonului în etapa de producere și punere în operă și la măsurile necesare a fi luate pentru prevenirea sau limitarea acestor degradări.

În faza de execuție a unui element de construcție contracția betonului reprezintă o problemă extrem de importantă datorită implicațiilor pe care le are acest fenomen asupra durabilității elementului de beton realizat. Prin împiedicarea contracției betonului sunt generate eforturi secundare care evoluează în timp, conducând progresiv la apariția unor fisuri, rezultatul fiind durabilitatea redusă a structurii.

Tratarea betonului după punerea sa în lucrare se referă la măsurile ce se iau după turnarea betonului și compactarea acestuia, în vederea asigurării condițiilor optime de întărire.

Zona suprafeței trebuie tratată și protejată o anumită perioadă de timp în vederea obținerii proprietăților potențiale ale betonului funcție de tipul și forma structurii/elementului, condițiile de mediu din momentul turnării și condițiile de expunere în perioada de serviciu a structurii.

Decizia privind măsurile necesare unei mentenanțe adecvate funcție de tipul de construcție și de mediu îi aparține proiectantului.

Deteriorările progresive pot conduce la o siguranță inacceptabilă pentru construcție. Pe de altă parte, intensificarea operațiunilor de întreținere curentă și

reparații, chiar dacă implică o creștere a costului global al construcției, poate prelungi durata de viață a construcției pe o perioadă nedefinită. [2]

În trecut, betonul era considerat un material "indestructibil". Această convingere i-a determinat pe mulți constructori și proiectanți să ignore cele mai elementare norme pentru a garanta durabilitatea structurilor din beton. Rezultatul este acela că după 20-30 de ani de la construire, cea mai mare parte a construcțiilor din beton prezintă semne evidente de degradare.

Sub aspectul durabilității betonul corect proiectat compozițional, pus în operă, tratat și întreținut în mod corespunzător, prin caracteristicile sale fizico-mecanice și chimice, prin costul redus al materialelor componente, precum și prin modul favorabil, specific, în care răspunde agresiunilor la care este supus pe durata de serviciu, reprezintă cea mai avantajoasă soluție tehnico-economică pentru construcții [12]. Apariția însă a unor degradări structurale la scurt timp de la punerea în funcțiune, asociată cu costurile mari ale reparațiilor au stimulat apariția, începând cu anii '50, unui nou domeniu de preocupări: durabilitatea betonului și a unei noi discipline „patologia betonului”.

Durata de serviciu este în strânsă legătură cu durabilitatea unei structuri din beton, aceasta reprezentând perioada de timp care începe imediat după construire și în care cerințele relevante sub aspectul durabilității nu depășesc anumite limite (stări limită) prestabilite în condițiile unei întrețineri curente și necostisitoare. [30] Astfel durata de serviciu reprezintă o cuantificare în unități de timp a durabilității, ca proprietate a betonului.

Un volum important din fondul construit în România înainte de anii '60 a împlinit deja o vârstă semnificativă sub aspectul durabilității betonului, foarte multe construcții prezentând o stare avansată de degradare. Sub aspectul durabilității acestea sunt afectate în special de fenomene de îngheț-dezgheț în stare saturată, de atacul ionilor de clor din diverse surse, precum și de agresiuni chimice industriale sau naturale. Trebuie menționat însă că există categorii de construcții care se prezintă încă bine sub aspectul durabilității, având depășită cu succes durata de serviciu de 50 de ani. Astfel se poate stabili o legătură stransă între problematica durabilității, parametrii compoziționali ai betonului și mediul de expunere în care este exploatată o structură. Toate acestea în strânsă corelație cu grosimea stratului de acoperire cu beton a armăturii, deschiderea maximă a fisurilor în exploatare și eventual forma elementului.

Structurile de beton trebuie proiectate, executate și întreținute în așa fel încât să poată satisface, pe durata de serviciu, toate cerințele esențiale și anume: rezistență și stabilitate, siguranță în exploatare, siguranță la foc, igienă, sănătatea oamenilor, refacerea și protecția mediului, izolație termică, hidrofugă și economie de energie, protecție împotriva zgomotului etc. cf Legii Calității 10/1995 [31]. O analiză de tip „life cycle cost” [32] poate pune în evidență soluția optimă din acest punct de vedere, pentru diferite soluții constructive și aplicații.

Principalele aspecte de care depinde durabilitatea unei structuri din beton, aplicabilă prin durata de serviciu a acesteia, sunt:

- alegerea corectă a parametrilor compoziționali ai betonului în directă corelație cu agresivitatea mediului;
- calitatea punerii în operă și a tratării betonului;
- păstrarea pe cât posibil constantă a nivelului de agresivitate al acțiunilor fizico-chimice și mecanice, luat în considerare la proiectare, pe întreaga durată de serviciu;
- aplicarea lucrărilor de reparații și întreținere la timp și de calitate.

Modul în care fiecare caracteristică a betonului se reflectă în proiectarea, producerea și execuția betonului proaspăt sau întărit, reprezintă un element esențial în studiul durabilității betonului.

De asemenea, prin aplicarea metodelor descriptive și de performanță pentru asigurarea durabilității betoanelor, se pot determina factorii compoziționali ai betonului, necesari asigurării aceleiași durate de serviciu a construcțiilor din beton armat, indiferent de tipul de ciment utilizat. Și dezvoltând această idee, se pot aplica metode descriptive pentru determinarea domeniilor de utilizare a adaosurilor în cimenturi și betoane, factorul cheie în cercetările care stau la baza elaborării actualei teze de doctorat.

Concluzia esențială însă, pe care se bazează elaborarea studiilor care au fost prezentate în teză, este că până în prezent nu au putut fi stabilite metode care să asigure construcțiilor din beton aceleași performanțe în timp indiferent de materialele utilizate.

Capitolul IV. Cercetări experimentale pentru determinarea durabilității betonului armat la acțiunea carbonatării. Încadrarea în clase de rezistență la carbonatare

Acest capitol are ca scop prezentarea conceptului de clasă de rezistență la diferite acțiuni ale mediului, în special la carbonatare, care va reprezenta o schimbare majoră în ceea ce privește reglementările pentru producerea betonului, dar și în privința durabilității. Această prezentare este efectuată în contextul abordării de performanță la nivel european a durabilității. În acest sens a fost realizată o analiză a rezultatelor experimentale obținute în cadrul unor cercetări efectuate asupra betoanelor preparate cu diferite tipuri de cimenturi, realizate în colaborare cu colectivul laboratorului Departamentului de Construcții din Beton Armat din cadrul Universității Tehnice de Construcții București. De asemenea, am prezentat propuneri de încadrări în clase de rezistență la carbonatare pentru betoanele preparate cu trei tipuri de cimenturi.

IV.1. Prezentarea conceptului de clase de rezistență la durabilitate

Actualul sistem de specificare și asigurare al durabilității structurilor din beton este bazat, în prezent, pe reguli de tip “deemed to satisfy”.

În prezent, durabilitatea betonului este specificată prin valori limită (raport maxim A/C, conținut minim de ciment, aer antrenat), tip ciment (Anexe naționale). Aceste reguli empirice se bazează pe experiența locală, neavând un suport tehnic în ceea ce privește „durata de viață”. Din acest motiv există variații semnificative între regulile diferitelor țări europene.

Având în vedere aceste aspecte, precum și dezvoltarea unui sistem de standardizare care permite determinarea unor caracteristici importante ale durabilității (carbonatare, penetrarea clorurilor, îngheț-dezghet) s-a putut elabora un sistem nou de caracterizare a durabilității betonului.

Acest sistem consideră principalii parametri ai proiectării durabilității betonului:

- Caracterizarea condițiilor de expunere;
- Caracterizarea rezistenței betonului;
- Reguli legate de rezistența la diferite expuneri;

- Cerințe legate de grosimea minimă a stratului de acoperire cu beton a armăturii, fisurare etc. [34]

Sistemul actual de caracterizare a condițiilor de expunere va fi menținut. Acesta este un sistem suficient de robust care ține seama de principalele mecanisme de deteriorare a betonului:

- ✓ Coroziunea armăturilor din cauze legate de carbonatare, cloruri;
- ✓ Deteriorarea betonului din cauza acțiunii de îngheț-dezgheț, atacuri chimice etc.

Definiția clasei de rezistență la acțiuni ale mediului se bazează pe performanță. Pentru implementarea în practică, poate fi utilizată regula “deemed to satisfy” bazată însă pe calibrări tehnice obiective.

Definirea unei clase trebuie enunțată pe bază de performanță, aceasta trebuie să fie legată de actualul sistem de clase de expunere.

Cerința pentru clasa de rezistență la carbonatare va fi legată de clasa de expunere XC3, în timp de clasa de rezistență la cloruri va fi legată de clasa de expunere XS2. XC3 „oferă” condițiile unei viteze de carbonatare relativ mari, iar condițiile de coroziune sunt semnificative. Dacă luăm în considerare faptul că durata de viață este definită ca perioada în care carbonatarea este la nivelul armăturii, clasa de expunere XC3 prezintă condiții mai severe în ceea ce privește carbonatarea comparativ cu XC4. Umiditatea relativă mai mare în clasa XC4, indică faptul că în acest mediu viteza de carbonatare este mai mică, dar cea de coroziune este mai mare [34].

Tabelul 4.1 – Clasele de expunere și caracteristicile acestora: [35]

	Clasa de expunere				
	XC1		XC2	XC3	XC4
Definitie EN 1992	uscat	permanent ud	ud, rareori uscat	umiditate moderată	alternanță umezire - uscare
Umiditate (RH) [%]	constant 30 - 60	constant 100	constant 90	Distribuție Weibull(max) (75/12/100)	Distribuție Weibull(max) (75/12/100)
Re-umectare (ToW și p_{SR})	-	ToW = 1.0 p_{SR} = 1.0	ToW = 1.0 p_{SR} = -	-	ToW = 0.2 p_{SR} = 0.1

Legenda: ToW – Perioada cu umiditate; ToW = (zile cu ploaie $\geq 2,5$ mm/an)/365
 p_{SR} – Parametru care depinde de direcția vântului și perioadele ploioase, p_{SR} = 1 pentru elemente orizontale exterioare, p_{SR} = 0 pentru elemente situate la interior.

Tabelul 4.2 – Propunerea inițială a EC2, inclusiv notațiile privind clasele de rezistență la diferite acțiuni ale mediului [36].

Coroziunea armăturii						Degradarea betonului			
Clasa de Rezistență la Carbonatare			Clasa de Rezistență la Cloruri			Clasa de Rezistență la Îngheț-Dezghet		Clasa de Agresivitate Chimică	
RC (Scăzut)	RC (Mediu)	RC (Ridicat)	RSD (Scăzut)	RSD (Mediu)	RSD (Ridicat)	RF (Mediu)	RF (Ridicat)	RCA (Mediu)	RCA (Ridicat)
Definiția clasei este de expunere 50 de ani la XC3 (Rh 65%) cu probabilitate 10% depășire față de carbonatarea de suprafață [mm]			Definiția clasei de expunere 50 ani la XS2, cu o probabilitate de 10% de depășire a concentrației de cloruri de peste 0,5% în adâncime [mm]			Definiția clasei este de expunere 50 ani la XF4, cu o probabilitate de 10% de depășire a pierderii de beton la suprafață [kg/m ²]		Definiția clasei este de expunere 50 ani la XA3, apă subterană cu SO ₂ ⁴ 6000mg/l și 10% - probabilitatea de depășire a pierderii de masă [g/m ²]	
40	30	20	75	60	45	10	2	?	?

Pentru ca noțiunea de clase de rezistență la diferite tipuri de expunere să fie un instrument practic, trebuie ca acestea să fie suplimentate de reguli de tip “deemed to satisfy”, calibrate la diferite clase de expunere.

În ceea ce privește cerințele de durabilitate din EC2 [5], inițial s-a propus abordarea prezentată în Tabelul 4.3.

Tabelul 4.3 - Propunerea inițială a EC2 privind cerințele de durabilitate

Clasa de Expunere	Clasa de Rezistență la Expunere	Acoperirea minimă $C_{min,dur}$ (mm)	
		50 Ani Durata de serviciu proiectată	100 Ani Durata de serviciu proiectată
X0	RC-	$C_{min,b}$	$C_{min,b}$
XC1	RC-	-	-
XC2, XC3, XC4	RC-	-	-
XD1, XS1	RSD-	-	-
XD2, XS2	RSD-	-	-
XD3, XS3	RSD-	-	-

Pe baza acestor definiții ale claselor de expunere trebuie să se întocmească tabele care să exprime capacitatea betoanelor preparate cu anumite cimenturi de a atinge diferite clase de rezistență la acțiunea mediului.

În acest fel se pot cunoaște performanțele fiecărui tip de compoziție / tip de ciment și se poate încadra betonul respectiv în clase de rezistență la diferite tipuri de expuneri.

Aplicarea practică pentru încadrarea în anumite clase de expunere necesită, în primul rând, efectuarea unor încercări experimentale standardizate. Majoritatea acestor standarde europene sunt elaborate într-o formă aproape finală, deja elaborate sau în curs de elaborare.

Astfel, pentru determinarea adâncimii de carbonatare se aplică standardul european SR EN 12390-10:2019 [37]. Acest standard prezintă metodele de determinare a adâncimii de carbonatare, fie în condiții controlate, fie în mediu natural. Locul natural de expunere trebuie să fie situat într-un mediu extern, ferit de precipitații directe, dar care să permită un schimb de aer. Locul de amplasare trebuie ales astfel încât probele să nu fie supuse gazelor de eșapament provenite din conductele de aer condiționat, încălzire sau ventilație sau din alte sisteme.

Determinarea adâncimii de carbonatare în conformitate cu SR EN 12390-10:2019 [37] este în funcție de durată, necesitând cel puțin încercări la intervale de 3, 6 și 12 luni, iar dacă adâncimea de carbonatare este mai mică de 5 mm, durata de încercare trebuie prelungită la 2 ani. Această situație se întâlnește în cazul în care umiditatea este mai mare de 65%, adică pentru menținerea probelor în mediu natural (care prezintă dezavantajul că necesită o monitorizare zilnică a temperaturii și umidității). Condițiile detaliate legate de modul de efectuare a încercărilor sunt prezentate în standardul menționat.

IV.2 Încadrarea betoanelor în clase de rezistență la carbonatare

În capitol IV al tezei se prezintă rezultatele obținute pentru betoanele preparate cu cimenturi CEM II/A-M (S-LL) 32,5R fabricate cu procente diferite de zgură și calcar și CEM II/A-S 32,5R, cu următoarele procente de adaosuri:

1. CEM II/ A-M (S-LL) 32,5R (D) – zgură 10%, calcar 7% - prescurtat CEM 1;
2. CEM II/ A-M (S-LL) 32,5R (B) – zgură 14%, calcar 4% – prescurtat CEM 2;
3. CEM II/ A-S 32,5R – zgură 17%, calcar 3% –prescurtat CEM 3.

Cu aceste tipuri de cimenturi s-au preparat betoane cu dozaje de ciment cuprinse între 280 și 470 kg/m³, agregate sort 0-4mm (35%), 4-8mm (15%), 8-16mm (21%) și 16-32mm (29%) și aditiv superplastifiant (substanța de bază dinaftilmetan-sulfonat)/ hiperplastifiant (substanța de bază polycarboxilati) în conformitate cu programul de desfășurare a cercetărilor experimentale.

Prepararea și cercetările experimentale efectuate asupra betoanelor s-au făcut în conformitate cu reglementările aflate în vigoare în momentul desfășurării cercetărilor.

În cadrul programului de cercetare au fost determinate rezistențele la compresiune și au fost măsurate adâncimile de carbonatare ale betoanelor preparate cu cele trei tipuri de cimenturi, până la vârsta de 1 an.

Menționez faptul că aceste încercări au fost facute în colaborare cu colectivul laboratorului Departamentului Construcții de Beton Armat, Facultatea de Construcții Civile, Industriale și Agricole, Universitatea Tehnică de Construcții București.

IV.3. Clase de rezistență la carbonatare

În cadrul programului de cercetare s-au efectuat măsurători ale adâncimii medii de carbonatare (în conformitate cu SR EN 14630:2007) [39], probele fiind menținute 7 zile în apă, apoi în condiții standardizate de laborator (umiditate 65%, temperatură 20°C, concentrație naturală de CO₂) până la vârsta de încercare. Cu ajutorul acestor valori se vor calcula vitezele de carbonatare și implicit dimensiunea stratului de acoperire cu beton al armăturii.

De precizat este faptul că, în general, valorile adâncimii de carbonatare ale probelor de beton menținute în condiții standardizate de laborator sunt sensibil mai mari decât valorile probelor menținute în exterior sau în camera climatică în conformitate cu SR EN 12390-10:2019 (umiditate 65%, temperatură 20°C, concentrație CO₂ 0,4%).



În figura 1 se prezintă exemplificativ evoluția adâncimii de carbonatare până la vârsta de 365 zile, funcție de diferite rapoarte A/C, pentru cimentul CEM 3:

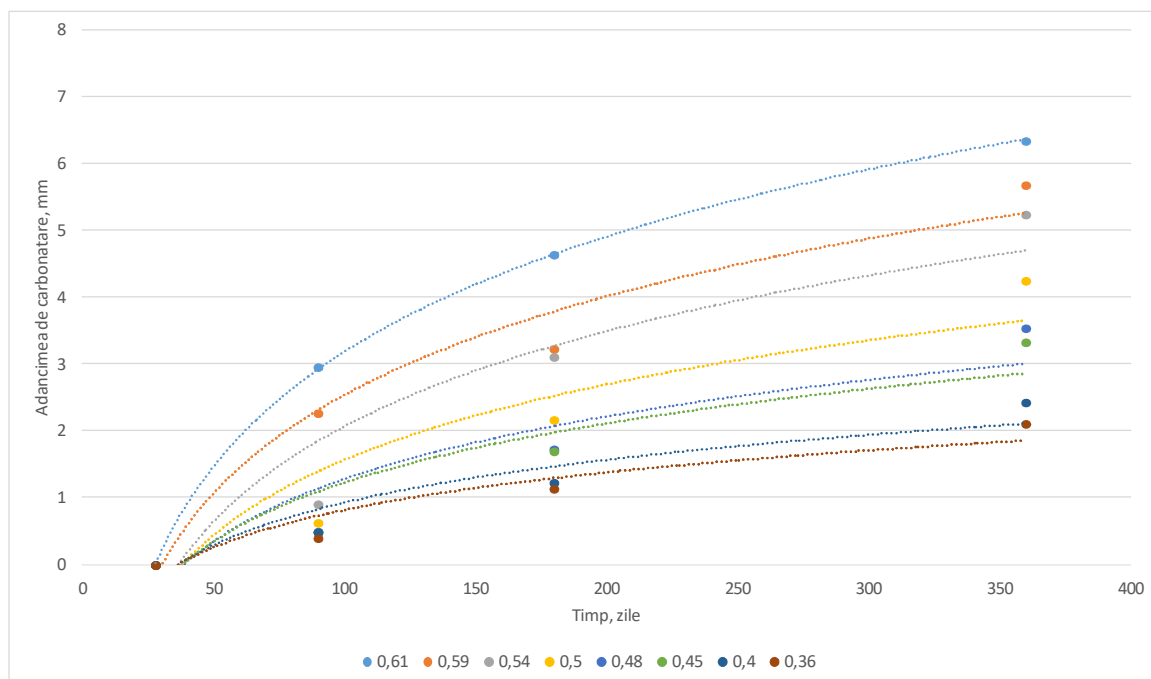


Fig. 1 - Evoluția adâncimii de carbonatare în timp

Determinarea vitezei de carbonatare se face prin determinarea pantei dreptei obținută prin trasarea unei drepte prin punctele de coordonate y (adâncimea de carbonatare) și x (rădăcina patrată a timpului).

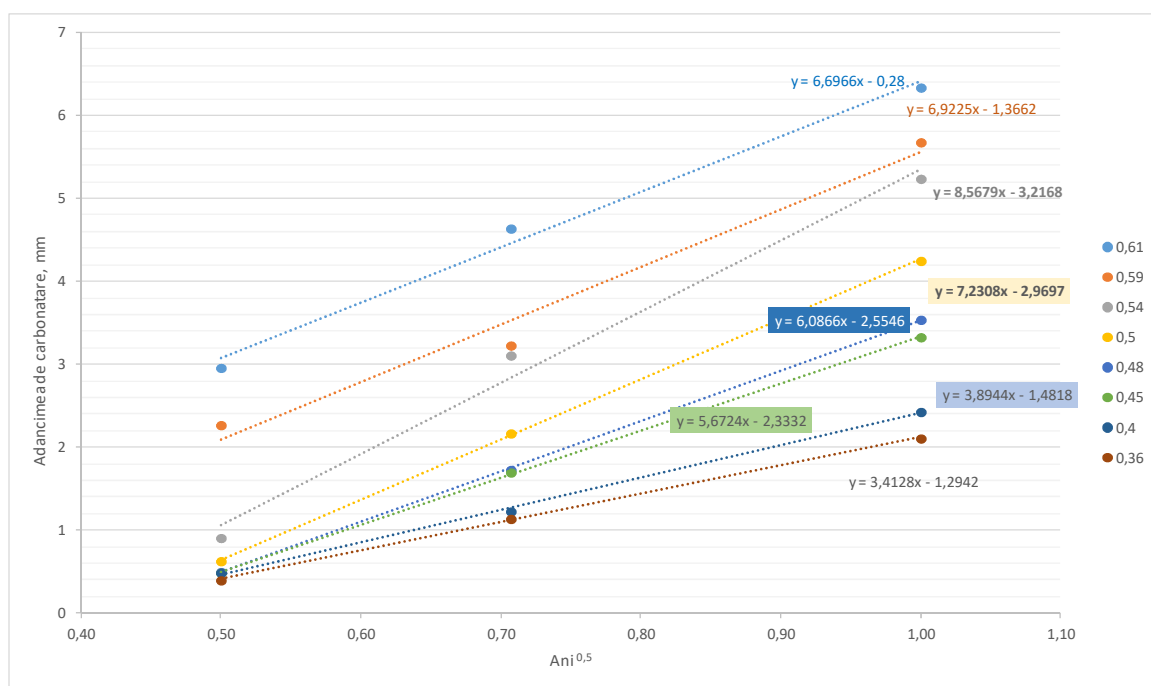


Fig. 2 - Variația adâncimii de carbonatare în funcție de rădăcina pătrată a timpului

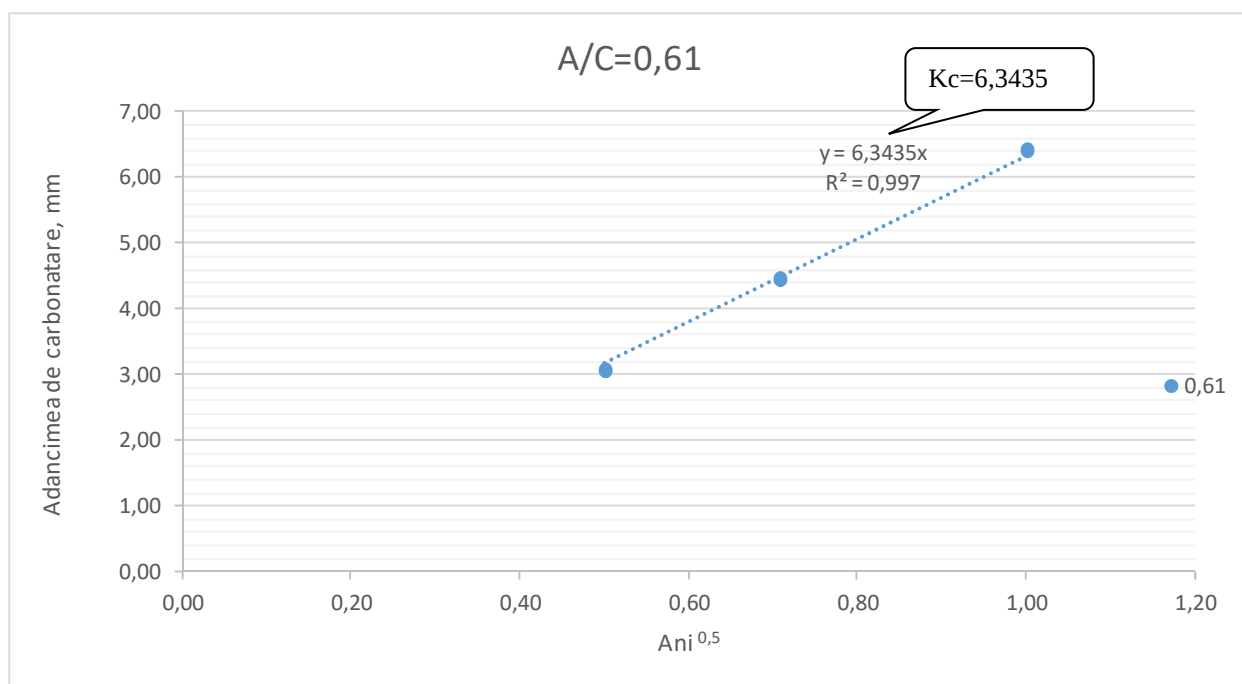


Fig. 3 – Determinarea valorii lui K_c ($\text{mm/a}^{0,5}$), raport $A/C = 0,61$
Asemănător se determină viteza de carbonatare pentru celelalte rapoarte A/C .

Sintetizând, valorile obținute pentru viteza de carbonatare pentru betoanele preparate cu CEM 3 sunt prezentate în figura 4.

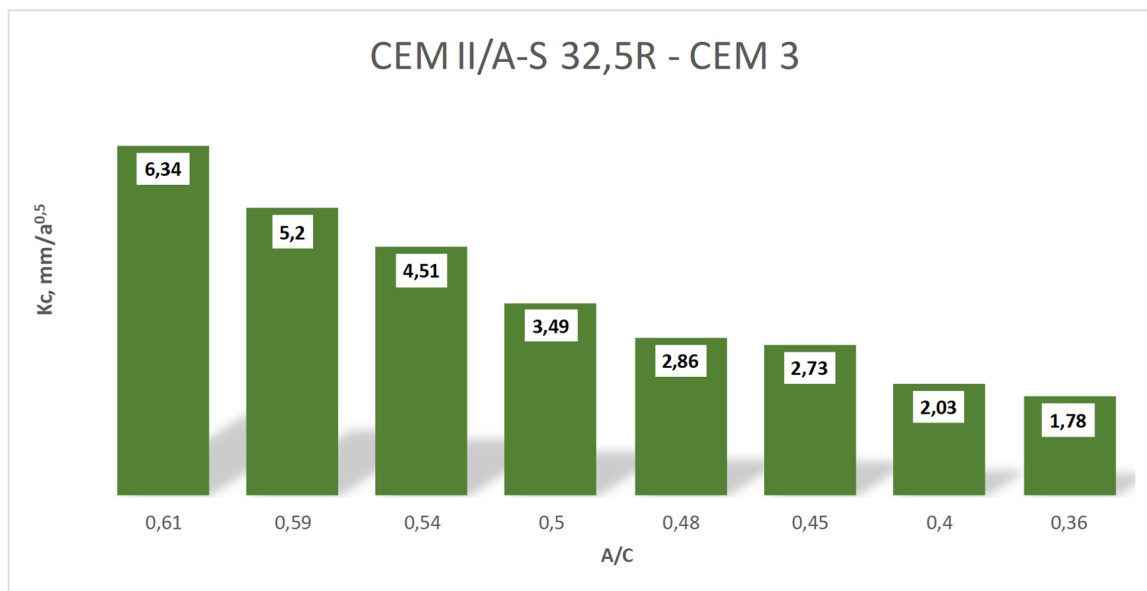


Fig. 4 - Valorile lui K_c în funcție de raportul A/C , ciment CEM II/A-S 32,5R

Cunoscându-se coeficientul K_c se poate determina adâncimea de carbonatare la 50 sau 100 de ani, adică încadrarea în clase de rezistență la carbonatare.

Media adâncimii de carbonatare se poate calcula utilizând relația:

$$XC = K_c \sqrt{t} \quad (4.3)$$

unde:

K_c = viteza de carbonatare, în $\text{mm/a}^{0,5}$

t = timpul efectiv, în ani

În Tabelul 4.4 se prezintă valorile adâncimii de carbonatare la 50 de ani calculate în funcție de valorile lui K_c și o propunere de încadrare în clase de rezistență la carbonatare pentru acest tip de ciment.

Trebuie menționat că valorile prezentate în Tabelul 4.4 au un caracter de exemplu de aplicare a metodologiei deoarece valorile lui K_c nu au fost determinate experimental în condițiile date de SR EN 12390-10:2019. [37]

Tabelul 4.4 - Valorile adâncimii de carbonatare la 50 de ani calculate în funcție de valorile lui K_c și propunere de încadrare în clase de rezistență la carbonatare

A/C	K_c , $\text{mm/a}^{0,5}$	XC, mm/50 ani	RXC
0,61	6,34	44,83	RXC50
0,59	5,2	36,77	RXC40
0,54	4,51	31,89	RXC40
0,50	3,49	24,68	RXC30
0,48	2,86	20,22	RXC30
0,45	2,73	19,30	RXC20
0,40	2,03	14,35	RXC20
0,36	1,78	12,59	RXC20

Clasele de rezistență la carbonatare au fost considerate în conformitate cu propunerea de completare a EN 206 prezentată la începutul acestui capitol.

Pe parcursul capitolului IV al tezei este prezentată o abordare asemănătoare și pentru cele două cimenturi CEM II/A-M (S-LL) 32,5R.

Rezultatele aplicării metodei detaliate anterior conduc pentru cimentul CEM 1, la valorile adâncimii de carbonatare la 50 de ani calculate în funcție de valorile lui K_c și o propunere de încadrare în clase de rezistență la carbonatare conform tabelului 4.5:

Tabelul 4.5 – Propunere de încadrare în clase de rezistență la carbonatare CEM 1

A/C	K_c, mm/a^{0,5}	XC, mm/50 ani	RXC
0,61	7,01	49,57	RXC50
0,49	5,77	40,80	RXC 40*
0,43	3,63	25,67	RXC30
0,40	2,57	18,17	RXC20
0,37	2,48	17,54	RXC20

*) S-a considerat clasa de rezistență la carbonatare RXC40 având în vedere valoarea destul de apropiată de 40. În acest caz trebuie efectuate teste suplimentare pentru a determina exact valoarea adâncimii de carbonatare.

Similar în Tabelul 4.6 se prezintă valorile vitezei de carbonatare în funcție de raportul A/C, adâncimea de carbonatare la 50 de ani și o propunere de încadrare în clase de rezistență la carbonatare a betoanelor preparate cu CEM 2.

Tabelul 4.6 – Propunere de încadrare în clase de rezistență la carbonatare CEM 2

A/C	K_c (mm/a^{0,5})	XC, mm/50 ani	RXC
0,58	6,68	47,23	RXC50
0,50	4,64	32,81	RXC40
0,43	3,17	22,42	RXC30
0,40	2,55	18,03	RXC20
0,36	2,17	15,34	RXC20

Pentru un același raport A/C=0,4 și același dozaj de ciment de 400 kg/m³, viteza de carbonatare a betoanelor preparate cu CEM II/A-S 32,5R este 2,03 mm/a^{0,5},

mai mică decât a betoanelor preparate cu CEM II/A-M 32,5R - CEM 1 (2,57 mm/a^{0,5}) și CEM 2 (2,55 mm/a^{0,5}).

Pentru un același raport A/C de aproximativ 0,5, valorile vitezei de carbonatare sunt destul de diferite (figura 5).

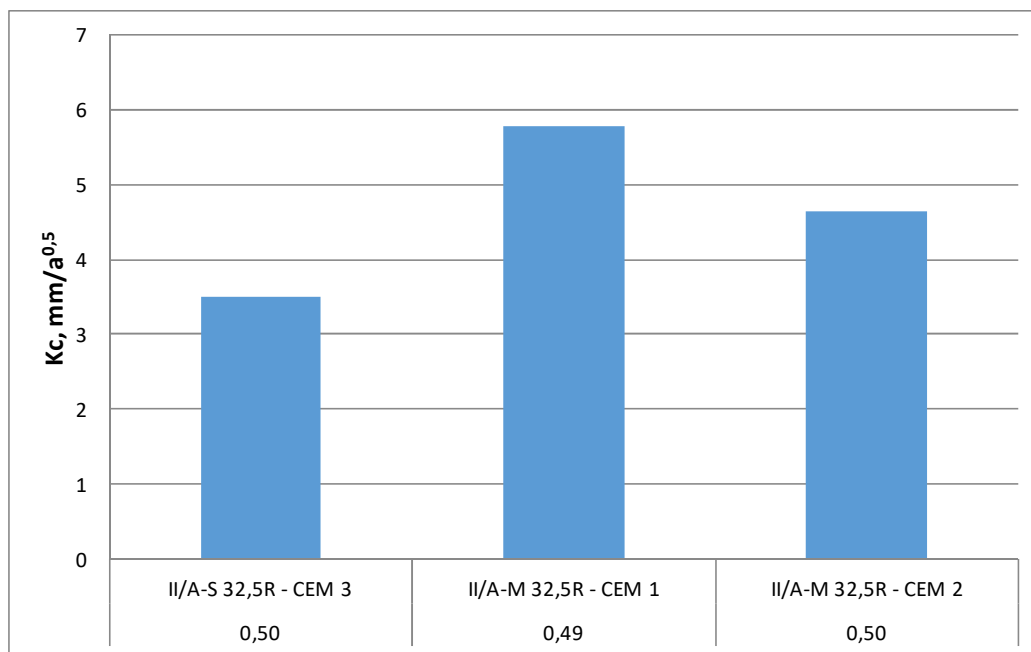


Fig. 5 – Valorile vitezei de carbonatare obținute pentru un raport A/C aprox egal cu 0,5

Capacitatea betoanelor preparate cu cele trei tipuri de cimenturi de a atinge diferite clase de rezistență la carbonatare sunt prezentate în Tabelele 4.4 și 4.5.

Tabelul 4.4 – Propunere de clasificare în 4 clase de rezistență la carbonatare a betoanelor preparate cu cele trei tipuri de cimenturi

Valori preliminare	Clase de rezistență la carbonatare RC			
	RC20	RC30	RC40	RC50
Definirea clasei, adâncimea după 50 ani (mm)	20	30	40	50
Criteriu prescriptiv	Raport A/C maxim			
CEM II A-S 32,5R – CEM 3	0,45	0,50	0,59	0,61
CEM II A-M (S-LL) 32,5R – CEM 1	0,40	0,43	0,49	0,61
CEM II A-M (S-LL) 32,5R – CEM 2	0,40	0,43	0,50	0,58
Dozaj minim ciment (Kg/m ³)	280	280	280	280

O altă propunere de clasificare a claselor de rezistență la carbonatare este prezentată în tabelul 4.5. [51]

Tabelul 4.5 – Propunere de clasificare în 6 clase de rezistență la carbonatare

	Clasa	RC2	RC3	RC4	RC5	RC6	RC7
	Interval Kc (mm/a ^{0,5})	1 < Kc ≤ 2	2 < Kc ≤ 3	3 < Kc ≤ 4	4 < Kc ≤ 5	5 < Kc ≤ 6	6 < Kc ≤ 7
Parametru	Kc (mm/a ^{0,5})	2	3	4	5	6	7
Adaos	Tip ciment	A/C maxim					
17%S, 3%LL	CEM II A-S 32,5R- CEM 3	0,40	0,48	0,50	0,54	0,59	0,61
10%S, 7%LL	CEM II A-M (S-LL) 32,5R - CEM 1		0,4	0,43		0,49	0,61
14%S, 4%LL	CEM II A-M (S-LL) 32,5R - CEM 2		0,4	0,43	0,5		0,58

Acestea sunt exemple de posibilități de aplicare a claselor de rezistență la carbonatare, pornind de la studiile efectuate pe betoanele preparate cu cele trei cimenturi studiate. Aceste exemple se pot compara cu rezultate obținute pe plan internațional [40].

În concluzie, proiectarea și executia structurilor de beton trebuie să țină cont de cerințele de siguranță în exploatare, de asigurare a duratei de serviciu proiectate, de funcționalitate și nu în ultimul rând de aspectul estetic al acestora. Impunerea măsurilor de întreținere eficiente vor asigura durabilitatea structurilor de beton, reprezentând varianta optimă din punct de vedere tehnico-economic.

Creșterea clasei de beton determină reducerea valorilor adâncimii de carbonatare a betoanelor, indiferent de tipul de ciment utilizat la prepararea betoanelor.

Indiferent de varianta care va fi aleasă pentru introducerea claselor de rezistență la carbonatare în noile norme, pentru un tip de ciment, trebuie considerată valoarea cea mai defavorabilă obținută în urma testelor experimentale. De asemenea, clasele de rezistență la carbonatare și nu numai ar trebui propuse în funcție de tipul de adaos al cimentului.



Capitolul V. Cercetări experimentale pentru determinarea durabilității betonului armat la acțiunea de îngheț-dezgheț. Încadrarea în clase de rezistență la îngheț-dezgheț

În prezent, în reglementările naționale, asigurarea durabilității se face, așa cum este în majoritatea anexelor naționale de aplicare a EN 206 [42] din Europa, printr-o abordare descriptivă (beton „proiectat să dureze”) făcându-se referire (cu statut de obligativitate) la o serie de cerințe ale compoziției betonului (raport apă/ciment, dozaj minim ciment, aer antrenat, agregate rezistente la îngheț-dezgheț etc.) și ale rezistenței la compresiune (clasa betonului) în funcție de încadrarea elementului într-o anumită clasă de expunere „X”.

Susținerea acestei abordări naționale descriptive se bazează pe un număr mare de rezultate ale unui program experimental complex, conținând cimenturi „candidat” și cimenturi „de referință” precum și încercări/determinări „in situ” pe elemente de construcții tip „stâlp din beton armat” realizate cu ambele categorii de cimenturi.

Pe baza cercetărilor experimentale efectuate se pot determina criterii de performanță pentru rezistența betonului la îngheț-dezgheț (abordare de performanță).

Metodele de încercare utilizate la nivel european sunt:

- CEN/TS 12390-9 - Încercări asupra betonului întărit - Partea 9: Rezistența la îngheț – dezgheț a betonului. Exfoliere;
- CEN/TR 15177 – Testarea rezistenței la îngheț-dezgheț a betonului. Degradări structurale interne.

Metodele de testare a rezistenței la îngheț-dezgheț acceptate pe plan european sunt completate de propuneri de criterii de încadrare, în funcție de rezultatele obținute, în diferite clase de expunere XF. Aplicarea acestora reflectă într-o bună măsură comportarea în timp real a betoanelor supuse la îngheț-dezgheț.

Prevederile anexei naționale SR 13510:2006 [19] sunt corelate cu nivelul de acceptare al unor anumite tipuri de cimenturi și în alte anexe naționale (aparținând unor țări dezvoltate din punct de vedere tehnologic și cu o climă similară - temperaturi

continentală - cu cea a țării noastre) și chiar mai restrictive în anumite aspecte decât cele din Franța și Germania, de exemplu.

Prevederile anexei noastre naționale se opresc, la nivelul anului 2006, la cimenturile CEM I, selectiv la CEM II și punctual doar la tipul CEM III/A urmând ca pe măsură ce se produc noi tipuri de cimenturi acestea să fie testate în vederea definirii unor domenii de utilizare, conform celor prevăzute de NE 012/1:2007 (#5.1.2.) cu caracter obligatoriu. [3]

Tipurile de ciment care fac obiectul acestui raport de cercetare pot fi considerate că reprezintă cimenturi noi, „candidat” pentru care nu există o experiență națională relevantă în utilizare. În plus, cimenturile CEM II/A-M având calcar în compoziție reprezintă cimenturi pentru care pe plan european nivelul de cunoaștere și acceptare în reglementări rămâne destul de limitat.

Asigurarea durabilității betonului prin stabilirea unor nivele (criterii) de performanță funcție de locul de utilizare al betonului (materializat prin clasa de rezistență la acțiuni ale mediului “RX”) reprezintă un pas înainte absolut necesar în condițiile în care, chiar pe plan european, s-a atins un anumit „grad de saturație” în ceea ce privește acceptarea de noi tipuri de ciment “candidat” în diferite clase de expunere prin metoda (actuală) descriptivă.

Acest capitol a avut ca scop prezentarea conceptului de clasă de rezistență la acțiunea de îngheț-dezgheț („RXF”) și propuneri de încadrare a betoanelor preparate cu diferite tipuri de cimenturi în clase de rezistență la îngheț-dezgheț. Alături de acțiunea mediului asupra betonului privind carbonatarea, vor avea loc schimbări la nivelul reglementărilor pentru producerea betonului, dar și a celor de proiectare în ceea ce privește durabilitatea.

V.1. Definirea claselor de rezistență la îngheț-dezgheț

Anexa națională a SR EN 206-1: 2002, SR 13510 [19], aflată în vigoare la data realizării cercetărilor experimentale, prevede pentru cele patru clase de expunere la îngheț-dezgheț valorile limita prezentate în tabelul 5.1.

Tabelul 5.1 – Valorile limită recomandate pentru compoziția și proprietățile betonului

	Clase de expunere					
	Atac îngheț-dezgheț					
	XF1	XF2		XF3		XF4
Raport maxim apă/ciment	0,50	0,55 ^a	0,50	0,55 ^a	0,50	0,50 ^a
Clasa minimă de rezistență	C25/30	C25/30	C35/45	C25/30	C35/45	C30/37
Dozaj minim de ciment (kg/m ³)	300	300	320	300	320	340
Conținut minim de aer antrenat (%)	-	a	-	a	-	a
Alte condiții	Agregate rezistente la îngheț-dezgheț conform SR EN 12620					d

^{a)} Conținutul de aer antrenat se stabilește în funcție de dimensiunea maximă a granulei. Dacă betonul nu conține aer antrenat cu intenție, atunci performanța betonului trebuie să fie măsurată conform unei metode de încercări adecvate, în comparație cu un beton pentru care a fost stabilită rezistența la îngheț-dezgheț pentru clasa de expunere corespunzătoare.

^{d)} În cazul expunerii în zonele marine se vor utiliza cimenturi rezistente la acțiunea apei de mare.

De asemenea, există recomandări pentru alegerea valorilor limită ale compoziției și proprietăților betonului în funcție de clasa de expunere conform SR EN 206+A1: 2017 (tabelul 5.2) [42].

Tabelul 5.2 – Valorile limită recomandate pentru compoziția și proprietățile betonului

	Atac îngheț-dezgheț			
	XF1	XF2	XF3	XF4
Raportul apă/ciment maxim ^c	0,55	0,55	0,50	0,45
Clasa de rezistență minimă	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37
Dozajul minim de ciment kg/m ³	300	300	320	340
Conținutul minim de aer %	-	4,0 ^a	4,0 ^a	4,0 ^a
Alte cerințe	Agregate în conformitate cu EN 12620 cu o rezistență suficientă la îngheț-dezgheț			

^a Dacă betonul nu conține aer antrenat, atunci performanța betonului trebuie să fie măsurată utilizând o metodă de încercări adecvată, prin comparație cu un beton, pentru care rezistența la îngheț-dezgheț, pentru clasa de expunere corespunzătoare a fost stabilită.

^c Când este aplicat conceptul valorii k, raportul maxim apă/ciment și dozajul minim de ciment se modifică în conformitate cu 5.2.5.2.

În SR EN 206 [42] se observă modificări ale rapoartelor A/C, dozajelor de ciment și claselor de beton comparativ cu SR EN 206-1:2002. XF2 este singura clasă de expunere la care compoziția este aceeași.

În România, la ora actuală, pentru clasa de expunere XF1 raportul A/C maxim este 0,5, dozajul minim de ciment 300 kg/m³, clasa de beton C25/30. Domeniile de utilizare pentru cimenturi sunt prezentate în tabelul F.2.1. și F.2.2. din CP 012-1 [8]

Există o propunere de introducere în EN 206 [42] a claselor de rezistență la îngheț-dezghet RXF – cap 4.2, tabelul 3 și respectiv tabelul F.1 din anexa F.

Tabelul 5.4. (tabelul 3 din pr EN 206) - Clase de rezistență la expunere, valori limită și standarde aplicabile [36]

Clase de rezistență la îngheț-dezghet RXF		
	RXF0,5	RXF1
Valori limita, kg/m ²	0,5	1,0
Standarde aplicabile	CEN/TS 12390-9 CEN/TR15177	

Tabelul 5.5. (Tabelul F.1 - parțial din pr EN 206) - Clase de rezistență la îngheț-dezghet; valorile considerate satisfăcătoare pentru diferite compoziții de liant (exemplu, valori preliminare)

Valori Preliminare	Clase de rezistență la îngheț-dezghet RXF		
	RXF 0,2	RXF 0,5	RXF 1,0
Tip de ciment sau combinație echivalentă de liant	Raport apă/liant maxim liantul însumează cantitatea de ciment și adaosurile din beton, în limitele definite conform EN 206-1 pentru ciment		
CEM I	0,4	0,45	0,5
CEM II-A	?	?	?
CEM II-B	?	?	?
CEM III-A	?	?	?
CEM III-B	?	?	?
Conținut minim de liant [kg/m ³]	280	280	280
Conținut minim de aer antrenat	4%	4%	-

Metoda alternativă, mai rafinată, care face distincție între diferitele tipuri de lianți în Anexa F din pr EN 206 este prezentată în tabelul 5.6.

Tabelul 5.6 - Clase de rezistență la îngheț-dezgheț pentru diferite tipuri de ciment sau combinații de lianți [47]

Valori preliminare		Clase de rezistență la îngheț-dezgheț RXF		
		RXF0,2	RXF0,5	RXF1,0
Tip de ciment sau combinație echivalentă de liant				
CEM I		0,40	0,45	0,50
CEM II/A-	V			
	S			
	D			
	L			
	LL			
	M			
CEM II/B	V			
	S			
	D			
	L			
	LL			
	M			
CEM III/A	S			
CEM III/B	S			
Conținut minim de liant [kg/m ³]		280	280	280

V.2. Cercetări experimentale

Programul de cercetare prezentat în capitolul V. constă în determinarea rezistenței la îngheț-dezgheț pe probe de beton, în conformitate cu standardul românesc SR 3518 [13], a normativului NE012-1 [3] și a standardului european CEN/TS 12390-9 [9], metoda slab test și utilizarea rezultatelor obținute la clasificarea betoanelor în clase de rezistență la îngheț-dezgheț.

Cercetările prezintă rezultatele obținute pentru betoanele preparate cu cimenturile descrise în capitolul IV. CEM II/ A-M (S-LL) 32,5R și CEM II/A-S 32,5R.

Cu aceste tipuri de cimenturi s-au preparat betoane cu diferite dozaje de ciment, agregate sort 0-4mm (35%), 4-8mm (15%), 8-16mm (21%) și 16-32mm (29%),

aditiv hiperplastifiant (substanța de bază policarboxilați) / superplastifiant (substanța de bază dinaftilmetan-sulfonat) în combinație cu diferiți aditivi antrenori de aer.

Prepararea și cercetările experimentale efectuate asupra betoanelor s-au făcut în conformitate cu reglementările aflate în vigoare în momentul desfășurării cercetărilor.

Menționez faptul că aceste încercări au fost făcute în colaborare cu colectivul laboratorului Departamentului Construcții de Beton Armat, Facultatea de Construcții Civile, Industriale și Agricole, Universitatea Tehnică de Construcții București.

În Europa cele mai frecvente metode de testare se efectuează în conformitate cu standardul CEN/TS 12390-9 [9]. Acest standard descrie o metodă de referință (slab test) și două metode de testare alternative (cube test și CF/CDF test).

În introducerea standardului CEN /TS 12390-9 se precizează că, în special, în cazul utilizării unor materiale componente noi sau a unor compoziții noi acestea trebuie să fie testate în conformitate cu metodele prezentate.

Aplicarea metodelor nu poate reproduce complet condițiile reale, dar în orice caz metodele trebuie corelate cu situațiile practice pentru a oferi rezultate credibile.

De asemenea, aplicarea unor valori limită impune stabilirea unei corelări cu rezultatele obținute în laborator și experiența comportării în medii reale. Având în vedere natura acțiunii de îngheț-dezgheț a betonului, această corelare trebuie să aibă în vedere condiții locale.

Standardul descrie metodele de testare privind rezistența la îngheț-dezgheț pentru determinarea cantității de material exfoliat.

Metodele sunt utilizate inclusiv în cazul acțiunii de îngheț-dezgheț și a agenților de dezghețare pentru a compara materiale componente noi sau compoziții noi față de material, cu materiale sau compoziții de beton care au furnizat performanțe adecvate in-situ, sau pentru a compara rezultatele obținute experimental cu valori limită, absolute stabilite pe baza experienței locale.

Nu sunt stabilite corelații între rezultatele obținute prin aplicarea acestor trei metode.

→ **Slab test (metodă de referință)**

Probele sunt obținute prin tăiere în plan median și sunt supuse atacului de îngheț-dezgheț în prezența apei de 3 mm adâncime, apă deionizată sau soluție de 3% NaCl.

Rezistența la îngheț-dezgheț este evaluată prin măsurarea masei de beton exfoliat de pe suprafața expusă după 56 de cicluri de îngheț-dezgheț.

După (7 ± 1) (14 ± 1) (28 ± 1) (42 ± 1) și 56 de cicluri se determină masa de material exfoliat, uscat la masă constantă $(110 \pm 10) ^\circ\text{C}$ (rotunjind cantitatea de material exfoliat la 0,1g).

Rezultatele se exprimă cu ajutorul expresiei:

$$s_n = \frac{m_{s,n}}{A} \times 10^3 \quad (5.1)$$

s_n reprezintă masa materialului exfoliat raportată la suprafața, după n cicluri de îngheț-dezgheț

$m_{s,n}$ - reprezintă masa materialului exfoliat după n cicluri de îngheț-dezgheț, rotunjită la 0,1g

A = aria totală a suprafeței testate calculată înainte de pregătirea dispozitivului de încercare

V.3. Clase de rezistență la îngheț-dezgheț

Încercările pentru determinarea rezistenței la îngheț-dezgheț s-au efectuat în conformitate cu standardul CEN/TS 12390-9. [9]

Încadrarea betoanelor în clase de rezistență la îngheț-dezgheț utilizând rezultatele metodelor de testare europene și criteriile propuse în comitetele tehnice de elaborare a standardelor europene în domeniu, reprezintă elementul de noutate al acestei teze de doctorat.

Experimentele efectuate prezintă în mod comparativ modul de comportare al cimenturilor Portland compozite CEM II/A-M(S-LL) prin comparație cu un ciment “de referință” CEM II/A-S. În aceasta situație, a testării unor cimenturi „candidat” la îngheț-dezgheț, abordarea comparativă, folosind criterii relative, trebuie asociată cu abordarea bazată pe criterii de performanță. Compararea cu cimentul candidat face parte din abordarea de performanță. Existența metodelor/ criteriilor de apreciere conduce la necesitatea introducerii claselor de durabilitate ca sistem unitar de apreciere.

Încercările de laborator au fost efectuate respectând standardele în vigoare la data efectuării determinărilor. Aplicarea metodelor europene și interpretarea

rezultatelor pe baza criteriilor specificate în propunerile de îmbunătățire a standardelor europene reprezintă o direcție de studiu pentru definirea unor domenii de utilizare a cimenturilor studiate la diferite nivele de intensitate ale acțiunii de îngheț-dezgheț.

Determinarea rezistenței la îngheț-dezgheț prin norme românești

Betoanele preparate cu CEM 1 și CEM 3 încadrate în aceeași clasă de beton C40/50 au valori similare după 150 de cicluri de îngheț-dezgheț cu agenți de dezghețare. Betoanele preparate cu cele trei tipuri de cimenturi au avut pierderi de rezistență mai mici decât valoarea impusă de SR 3518 [13] (25%).

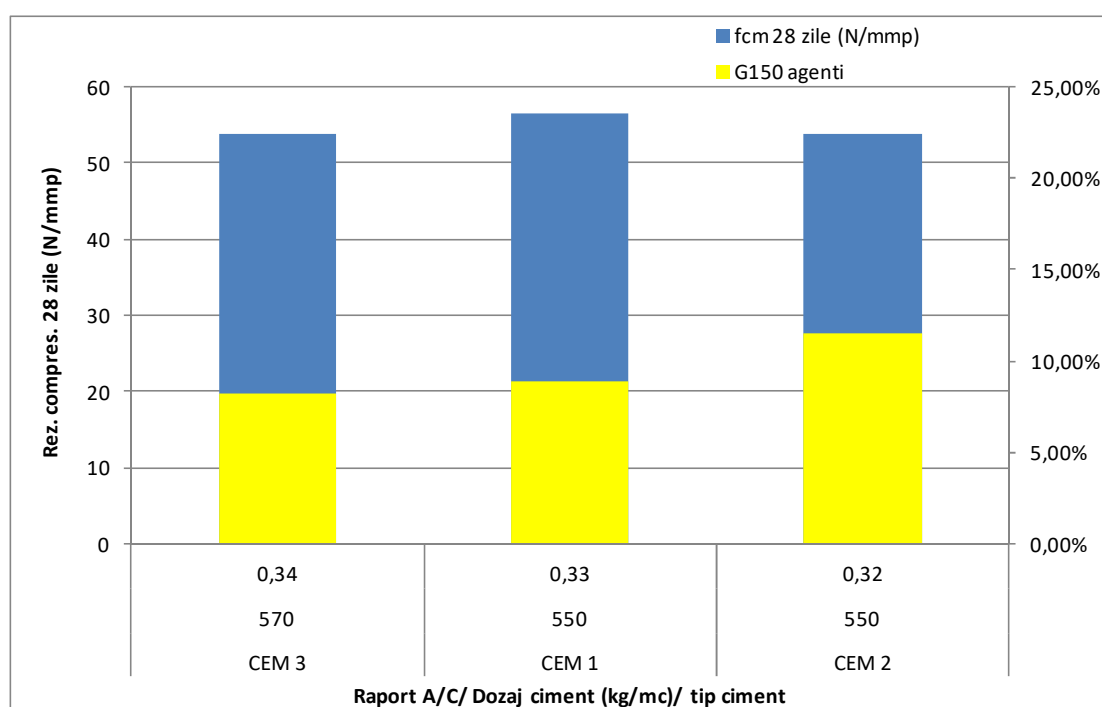


Fig. 6 – Comparația pierderilor de rezistență f_{cm} 28 zile / G150 cu agenți de dezghețare

De asemenea, se poate sublinia importanța aditivului hiperplastifiant utilizat la prepararea betoanelor cu CEM 1 și CEM 2 pentru reducerea raportului apă/ciment și implicit creșterea rezistenței la compresiune.

Determinarea rezistenței la îngheț-dezgheț prin norme europene

Pentru a putea compara mai eficient betoanele preparate cu cele trei tipuri de cimenturi, s-au utilizat aceleași compozitii, dozaj de ciment 320 kg/m^3 și $A/C=0,5$, încercările fiind efectuate în conformitate cu CEN/TS 12390-9. [9]

Rezistențele la compresiune obținute pentru cele trei tipuri de betoane sunt diferite. Rezistențele betoanelor preparate cu CEM II/A-S (CEM 3) sunt mai ridicate decât cele obținute pentru betoanele preparate cu cimenturile CEM II/A-M (CEM 1 și CEM 2). Valorile obținute pentru CEM 1 și CEM 2 sunt aproximativ egale, fapt ce se reflectă și la valorile cantității de beton exfoliat, după efectuarea ciclurilor fără agenți de dezghețare.

Valorile S_n obținute în cazul betoanelor preparate cu CEM II/A-S sunt inferioare celor obținute pentru betoanele preparate cu cele două cimenturi CEM II/A-M, toate încadrându-se în criteriile de evaluare pentru rezistența la îngheț-dezgheț prin exfoliere.

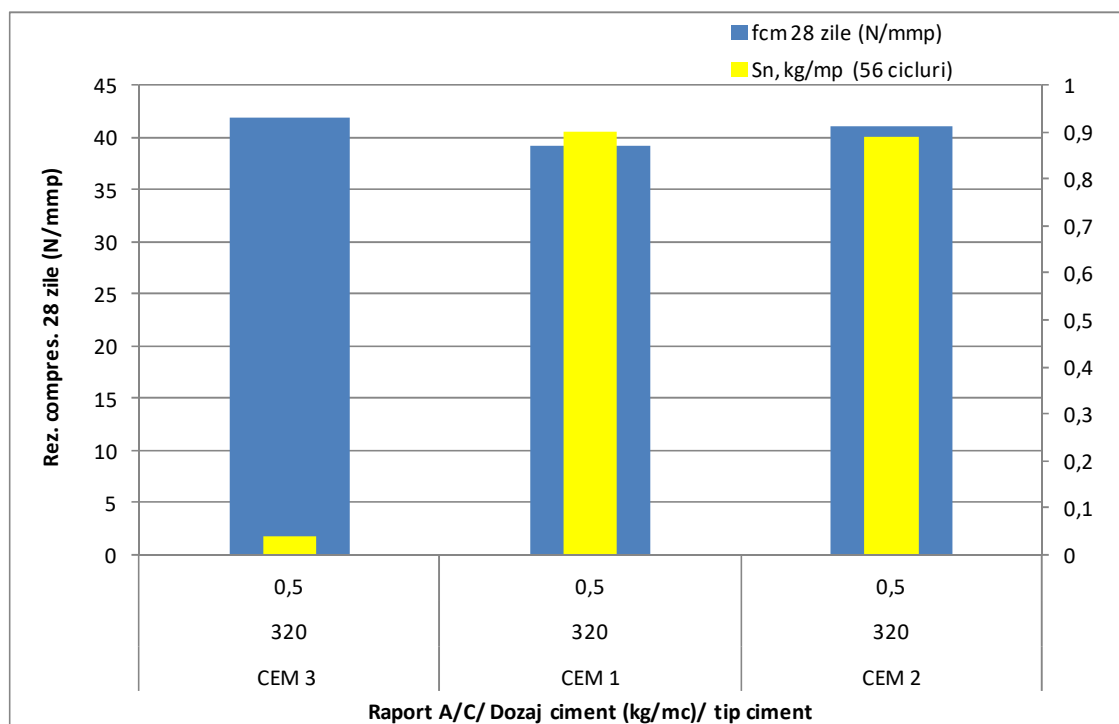


Fig. 7 – Comparația maselor materialului exfoliat după 56 cicluri de îngheț-dezgheț, fără agenți de dezghețare

În ceea ce privește betoanele expuse la îngheț-dezgheț cu agenți de dezghețare, valorile pentru cantitatea de beton exfoliat obținute pentru CEM 3 sunt inferioare celor obținute pentru CEM 1 și CEM 2.

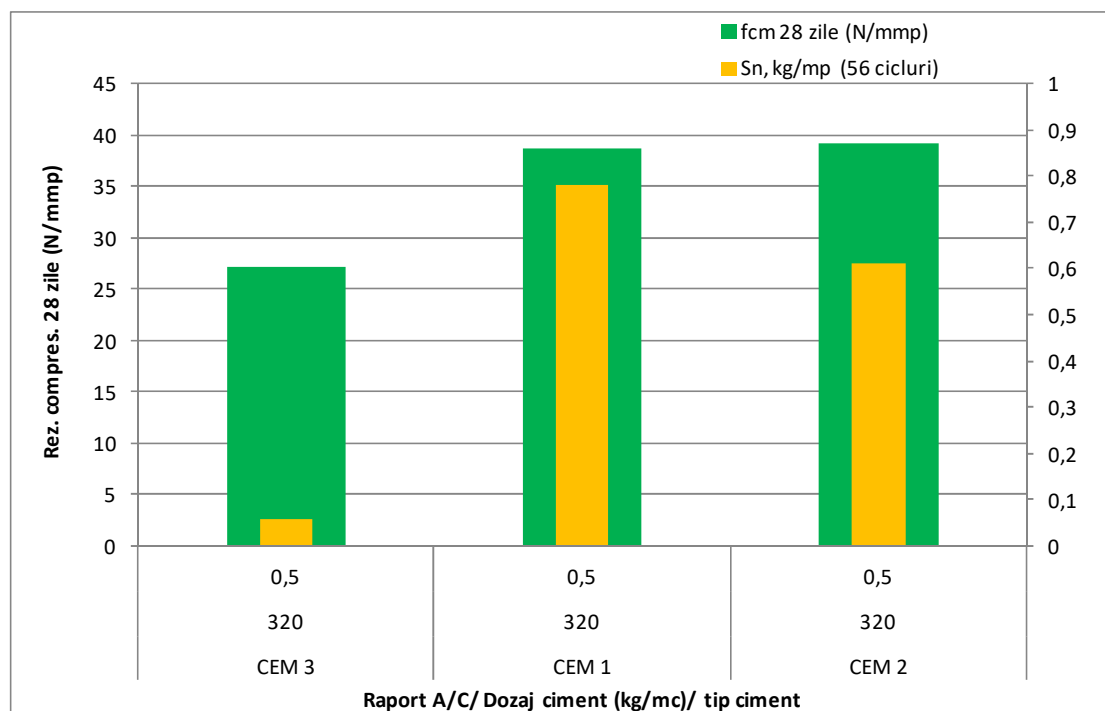


Fig. 8 – Comparația maselor materialului exfoliat după 56 cicluri de îngheț-dezgheț, cu agenți de dezghețare

Betoanele preparate cu cele trei tipuri de cimenturi îndeplinesc criteriul pentru încadrarea în clasele de expunere XF.

Expunere	XF1	XF2	XF3	XF4
Metoda	Slab test**	Slab test**	Slab test**	Slab test*
CEM III/A-M (CEM 1)	X	X	X	X
CEM III/A-M (CEM 2)	X	X	X	X
CEM III/A-S (CEM 3)	X	X	X	X

X = criteriu îndeplinit,

*) criteriu european

**) criterii propuse de UTCB și avizate de MDRAP

Rezultatele obținute pentru cantitatea de beton exfoliat pentru cele trei tipuri de betoane se pot folosi în continuare pentru a propune încadrări în clase de rezistență la îngheț-dezgheț.

În Tabelele 5.7 (îngheț-dezgheț fără agenți de dezghețare) și 5.8 (îngheț-dezgheț cu agenți de dezghețare) se prezintă rezultatele înregistrate pentru rezistența

la îngheț-dezgheț și încadrarea în clase de rezistență la îngheț-dezgheț pe tipuri de ciment.

Tabelul 5.7 - Rezultatele înregistrate pentru rezistența la îngheț-dezgheț și încadrarea în clase de rezistență la îngheț-dezgheț pe tipuri de ciment

Tip ciment	Dozaj ciment (kg/m ³)	A/C	Rez. compres. 28 zile (N/mm ²)	Sn, kg/m ² (56 cicluri)	Clase rezistență la îngheț-dezgheț
CEM II/A-S 32,5R - CEM 3	320	0,5	41,93	0,04	RXF0,2
CEM II/A-M (S-LL) 32,5R - CEM 1	320	0,5	39,12	0,90	RXF1
CEM II/A-M (S-LL) 32,5R - CEM 2	320	0,5	41,11	0,89	RXF1

Se observă comportari similare ale betoanelor preparate cu CEM 1 și CEM 2.

Tabelul 5.8 - Rezultatele înregistrate pentru rezistența la îngheț- dezgheț și agenți de dezghețare și încadrarea în clase de rezistență la îngheț-dezgheț pe tipuri de ciment

Tip ciment	Dozaj ciment (kg/m ³)	A/C	Rez. compres. 28 zile (N/mm ²)	Sn, kg/m ² (56 cicluri)	Clase rezistență la îngheț-dezgheț
CEM II/A-S 32,5R - CEM 3	320	0,5	27,22	0,06	RXF0,2
CEM II/A-M (S-LL) 32,5R - CEM 1	320	0,5	38,73	0,78	RXF1
CEM II/A-M (S-LL) 32,5R - CEM 2	320	0,5	39,18	0,61	RXF1

Rezultatele încercărilor permit obținerea de recomandări cu privire la proiectarea corectă a unui beton rezistent la exfoliere.

Ca direcție de cercetare viitoare se observă necesitatea realizării mai multor teste pe diferite amestecuri de beton cu rapoarte apă/ciment cuprinse între 0,6 și 0,4, pentru a observa încadrarea betoanelor preparate cu diferite tipuri de cimenturi în clasele de rezistență la îngheț-dezgheț.

În lipsa existenței în practică a conceptului de rezistență la acțiuni ale mediului (deocamdată), aceste încercări sunt utile în scopul promovării anumitor sortimente de ciment, recomandate pentru utilizarea în diverse aplicații speciale.

Capitolul VI. Concluzii finale, contribuții personale și potențiale direcții de dezvoltare viitoare

Actuala teză de doctorat cu tema *"Aplicarea metodelor descriptive și de performanță în asigurarea durabilității elementelor și structurilor din beton realizate cu cimenturi cu adaosuri"* tratează în mod teoretic și experimental domeniul asigurării durabilității betoanelor preparate cu cimenturi Portland cu adaosuri - în particular a celor cu adaos de zgură CEM II/A-S și a cimenturilor compozite cu zgură și calcar CEM II/A-M(S-LL).

Teza de doctorat cuprinde prezentarea unor metode moderne de stabilire a performanțelor betoanelor în diferite medii de expunere, precum și modalități de analiză a duratei de serviciu a construcțiilor din beton armat, pe baza rezistenței acestora la acțiunile de mediu, în special la carbonatare și îngheț-dezgheț.

Teza de doctorat, încearcă să răspundă provocărilor actuale lansate la nivelul Uniunii Europene prin „**Green Agreement**”, prin care Europa își propune să fie primul continent neutru din punct de vedere climatic, devenind o economie modernă, eficientă din punct de vedere al resurselor. Acest acord privind reducerea poluării, are un puternic impact asupra industriei construcțiilor prin necesitatea reducerii la maximum a emisiilor de CO₂. În acest context teza abordează teme generale și particulare privind asigurarea durabilității betonului realizat cu cimenturi cu conținut redus de clincher Portland și optimizarea dozajului de ciment în beton.

În contextul studierii influenței proprietăților materialelor de construcții asupra durabilității elementelor și structurilor de beton armat, în teza au fost evidențiate o parte din rezultatele experimentale realizate cu scopul identificării celor mai bune combinații de adaosuri din ciment, prin prisma respectării cerințelor de durabilitate impuse de normele europene. Rezultatele obținute în urma cercetărilor experimentale realizate în colaborare cu colectivul laboratorului Departamentului de Construcții din Beton Armat din cadrul Universității Tehnice de Construcții București sunt parte componentă a unor ample studii efectuate pe perioade lungi de timp, cu scopul evidențierii modificărilor în timp a caracteristicilor unor betoane preparate cu cimenturi cu adaosuri.

În capitolul 4 al tezei se prezintă rezultatele cercetărilor experimentale obținute în cadrul unor studii efectuate asupra betoanelor preparate cu diferite tipuri de cimenturi cu adaosuri. În cadrul programului de cercetare au fost determinate rezistențele la compresiune și au fost măsurate adâncimile de carbonatare ale betoanelor preparate cu trei tipuri de cimenturi, până la vârsta de 1 an.

Un aspect necesar a fi luat în considerare, este faptul că cercetările experimentale au demonstrat variația unor caracteristici de bază ale betoanelor preparate cu cimenturi având aceeași clasă de rezistență, aceleași adaosuri dar în procente diferite. Utilizând astfel de cimenturi, cu caracteristici standard similare, au fost preparate betoane cu același dozaj de ciment, condițiile de păstrare în laborator fiind identice. Rezultatele obținute au evidențiat diferențe ale comportamentului betoanelor testate în ceea ce privește rezistențele la compresiune și adâncimea de carbonatare.

Aceste rezultate scot în evidență influența adaosurilor asupra vitezei de carbonatare a betoanelor. Din punct de vedere al caracteristicilor de durabilitate, pentru aceeași clasă de beton, s-au obținut diferențe semnificative în cazul adâncimilor de carbonatare ale betoanelor preparate cu cele trei cimenturi studiate. Rezultatele obținute pot oferi indicații privind posibilele sensibilități la diferite tipuri de acțiuni de mediu ale betoanelor preparate cu diferite procente de adaosuri.

Prezentarea conceptului de clasă de rezistență la diferite acțiuni ale mediului, în special la carbonatare, reprezintă una dintre principalele schimbări care va avea loc la nivelul reglementărilor pentru producerea betonului, dar și a celor de proiectare în ceea ce privește durabilitatea. Această prezentare este efectuată în contextul abordării de performanță la nivel european a durabilității. În acest sens, am prezentat propuneri de încadrări în clase de rezistență la carbonatare pentru betoanele preparate cu cele trei tipuri de cimenturi studiate.

Cu ajutorul valorilor adâncimilor de carbonatare obținute pentru betoanele preparate cu cimenturi cu adaos de zgura și calcar și utilizând propunerile de completare a EN 206 și a EN 1992-1-1 existente pe plan european, am încadrat betoanele în diferite clase de rezistență la carbonatare și am determinat acoperirea minimă cu beton a armăturilor în funcție de clasele de rezistență la carbonatare și rapoartele A/C.

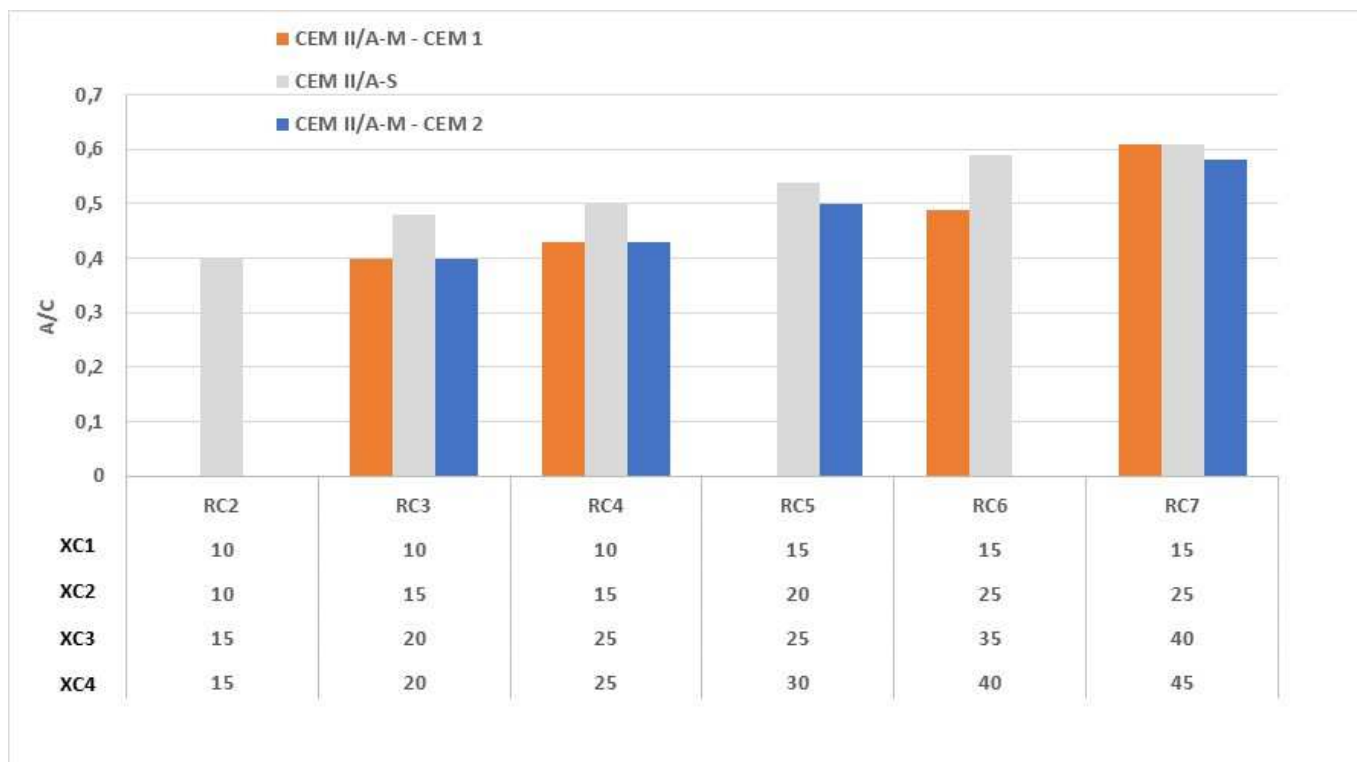


Fig. 9 – Grosimea de acoperire cu beton a armăturilor, în funcție de clasele de rezistență la carbonatare și raportul A/C

Grosimea stratului de acoperire trebuie stabilită în funcție de fiecare tip de ciment și compoziție.

În ceea ce privește stabilirea grosimii stratului de acoperire cu beton a armăturilor în funcție de clasele de rezistență și de expunere, în continuare se prezintă comparații între actualul EC2 [5] și noua propunere de EC2 [52] pentru o durată de serviciu proiectată de 50 de ani (Tabel 6.1).

Fig. 10, Fig. 11 – Imagini din timpul cercetărilor efectuate în laborator;



SR EN 1992-1-1/2004, clasa structurală S4 [5]		prEN1992-1-1/ 2020 [52]				
Clasa de expunere	C _{min,dur} , mm	C _{min,dur} , mm	Clasa de rezistență la carbonatare	Observații		
XC1 → 15 →		10	RXC 0,5	} Betonul cu clase RXC mici necesită grosime de acoperire mai mică de 15 mm (EC2 actual)		
		10	RXC 1			
		10	RXC 2			
		10	RXC 3			
		10	RXC 4			
		15	RXC 5			
		15	RXC 6			
		15	RXC 7			
XC2/XC3 → 25 →		10	RXC 0,5	} Betonul cu clase RXC mici necesită grosime de acoperire mai mică de 25 mm (EC2 actual)		
		10	RXC 1			
		10	RXC 2			
		15	RXC 3			
		15	RXC 4			
		20	RXC 5			
		25	RXC 6			
		25	RXC 7			
		XC2/XC3 → 25 →		10	RXC 0,5	} Betonul cu clase RXC mici necesită grosime de acoperire mai mică de 25 mm (EC2 actual)
				10	RXC 1	
15	RXC 2					
20	RXC 3					
25	RXC 4					
25	RXC 5			} Betonul cu clase RXC mari necesită grosime de acoperire mai mare de 25 mm (EC2 actual)		
35	RXC 6					
	40	RXC 7				
XC4 → 30 →		10	RXC 0,5	} Betonul cu clase RXC mici necesită grosime de acoperire mai mică de 35 mm (EC2 actual)		
		10	RXC 1			
		15	RXC 2			
		20	RXC 3			
		25	RXC 4			
		30	RXC 5	} Betonul cu clase RXC mari necesită grosime de acoperire mai mare de 30 mm (EC2 actual)		
		40	RXC 6			
		45	RXC 7			

La nivel european exista, la data elaborării tezei, multe propuneri de notații și clasificări ale claselor de rezistență la carbonatare. Indiferent care va fi decizia la nivelul comitetelor pentru aceste propuneri, un lucru este cert: clasele de rezistență la carbonatare depind de tipul de ciment, de procentul de adaos al cimentului și de alte caracteristici care vor fi descoperite prin cercetări experimentale amanuntite.

Încadrarea betoanelor în clase de rezistență la îngheț-dezgheț utilizând rezultatele metodelor de testare europene și criteriile propuse în comitetele tehnice de

elaborare a standardelor europene în domeniu, reprezintă elementul de noutate al acestui raport de cercetare. Cu ajutorul rezultatelor obținute pe cele trei tipuri de cimenturi, s-au încadrat betoanele în clase de rezistență la îngheț-dezghet în conformitate cu propunerile existente pe plan European.

Rezultatele obținute în urma experimentelor efectuate și concluziile care decurg din acestea, sunt puternic influențate și de sursa cimenturilor studiate (de compoziția clincherului, caracteristicile cimentului etc.). Importantă este însă stabilirea unor corelații definitorii între parametrii aceluiași tipuri de cimenturi pentru a se putea identifica cu precizie parametrii cheie care vor conduce la decizia utilizării sau nu a unui anumit tip de ciment în una dintre clasele de expunere XF.

Încercările de laborator au fost efectuate respectând standardele în vigoare la data efectuării determinărilor. Aplicarea metodelor europene și interpretarea rezultatelor pe baza criteriilor specificate în propunerile de îmbunătățire a standardelor europene reprezintă o direcție de studiu pentru definirea unor domenii de utilizare a cimenturilor studiate la diferite nivele de intensitate ale acțiunii de îngheț-dezghet.

Teza de doctorat cuprinde mai multe elemente cu caracter original care vor fi enumerate în cele ce urmează.

A fost realizată o încadrare a betoanelor preparate cu cimenturile studiate în clase de rezistență la carbonatare în funcție de tipul de ciment, de raportul A/C și de procente de adaosuri din ciment. În paralel a fost realizată o comparație a nivelurilor de acceptare a cimenturilor studiate, în clase de rezistență la carbonatare.

Având la bază această interpretare, a fost determinată acoperirea minimă cu beton a armăturilor în funcție de clasele de rezistență la carbonatare și raportul A/C.

În mod similar, utilizând rezultatele metodelor de testare europene și criteriile propuse în comitetele tehnice de elaborare a standardelor europene în domeniu, a fost prezentată încadrarea betoanelor în clase de rezistență la îngheț-dezghet.

Autorul a valorificat concluziile studiilor efectuate elaborând o serie de propuneri pentru completarea EN 206 [2] și EN 1992-1-1 [5] în ceea ce privește clasele de rezistență la carbonatare și îngheț-dezghet pentru anumite tipuri de cimenturi.

Analizând rezultatele cercetărilor experimentale prezentate în cuprinsul acestei lucrări, se poate afirma că cercetarea experimentală este singura care oferă răspunsuri privind caracteristicile betoanelor preparate cu diferite tipuri de cimenturi.

Pornind de la asigurarea durabilității elementelor de beton, dacă se vor lua în considerare restricții doar în ceea ce privește clasa de rezistență a betonului, dozajul de ciment sau raportul apă/ciment, este posibil ca acestea să nu fie suficiente.

Introducerea conceptului de clasă de rezistență la diferite acțiuni ale mediului va fi principala schimbare care va avea loc la nivel european în ceea ce privește durabilitatea și va contribui la elaborarea unui nou sistem de definire a durabilității betonului.

Direcții de cercetare viitoare

Conținutul tezei de doctorat reprezintă o bază solidă de abordare, teoretică și experimentală, a problematicii asigurării durabilității betoanelor preparate cu cimenturi Portland cu adaosuri, în special a celor cu adaosuri de zgură și calcar.

Studiile realizate reprezintă o introducere în domeniul asigurării durabilității betonului, acestea putând fi îmbunătățite prin cercetări experimentale pe betoane preparate cu cimenturi cu diferite tipuri și procente de adaosuri, la rapoarte A/C diferite, cercetări care pot conduce la completarea reglementărilor naționale.

Ca direcție de cercetare viitoare se observă necesitatea realizării mai multor teste pe diferite amestecuri de beton cu rapoarte apă/ciment cuprinse între 0,6 și 0,4, pentru a observa încadrarea betoanelor preparate cu diferite tipuri de cimenturi în clasele de rezistență la îngheț-dezghet.

În lipsa existenței în practică a conceptului de rezistență la acțiuni ale mediului (deocamdată), aceste încercări sunt utile în scopul promovării anumitor sortimente de ciment, recomandate pentru utilizarea în diverse aplicații speciale.

Pentru a putea completa propunerile pentru EN 206 [42] prezentate în teză trebuie făcute teste pentru determinarea cantității de beton exfoliat prin metoda slab test pentru betoanele cu diferite dozaje de ciment, mai mari de 280 kg/m^3 , cu minimum 4% aer antrenat. Rapoartele apă/ciment obținute pentru diferite clase de rezistență la îngheț-dezghet pot fi de asemenea asociate fiecărui tip de ciment în parte.

Metodologia aplicată și detaliată în cuprinsul prezentei teze poate sta la baza realizării următoarelor studii :

- Extinderea cercetării prin diversificarea parametrilor studiați și/sau utilizării altor tipuri de adaosuri,

-
- Efectuarea de studii experimentale pentru încadrarea betoanelor cu cimenturi cu adaosuri în clase de rezistență la penetrarea clorurilor și atac chimic,
 - Efectuarea unor cercetări experimentale pentru acțiuni simultane de mediu și mecanice.

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.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

1. Teodoreanu Ion, Moldovan Vasile, 1982, Durabilitatea betonului, Editura Tehnică, București;
2. SR EN 206:2014 – BETON Specificație, performanță, producție și conformitate;
3. NE 012/1-2007: Normativ pentru producerea betonului și executarea lucrărilor din beton, beton armat și beton precomprimat. Partea 1: Producerea betonului;
4. Dan Paul Georgescu – Îndrumător de proiectare a durabilității betonului în conformitate cu anexa națională de aplicare a SR EN 206-1. Clase de durabilitate;
5. SR EN 1992-1-1:2004 Eurocod 2 – Proiectarea structurilor de beton;
8. CP 012/1- 2007: Cod de practica pentru producerea betonului;
9. SR CEN/TS 12390-9:2017: Încercare pe beton întărit. Partea 9: Rezistență la îngheț-dezgheț cu ajutorul sărurilor de dezghețare. Exfoliere;
12. Neville A., 2003 – Proprietățile betonului, Ed. Tehnică, București;
13. SR 3518:2009 Încercări pe betoane. Determinarea rezistenței la îngheț-dezgheț prin măsurarea variației rezistenței la compresiune și/sau modulului de elasticitate dinamic relativ;
19. SR 13510:2006 – Beton - Partea 1: Specificație, performanță, producție și conformitate. Anexa națională de aplicare a SR EN 206-1;
25. SR EN 1992-2:2006 – Eurocod 2 – Proiectarea structurilor din beton. Partea 2: Poduri din beton – proiectare și prevederi constructive;
26. SR EN 13670:2010 – Executia structurilor din beton;
30. fib (International Federation for Structural Concrete) - MODEL Code 2010 – First complete draft, March 2010;
31. Legea 10/1995 “Legea calitatii in constructii”, varianta consolidata 2021;
32. INCERC, IPTANA și CIROM - Metode și soluții moderne de proiectare și executare a construcțiilor realizate din beton cu adaosuri din materiale reciclate, în conformitate cu reglementările europene. Aplicații pentru autostrazi și drumuri. (PNCDI 2004, Program AMTRANS, NR. 7B1aD, Acronim DRUSOL);
34. Steinar Leivestad, Convenor - Durability Exposure Resistance Classes, a new system to specify durability în EN 206 and EN 1992, JWG Durability JWG 250/104 - N25 2014.02.21;
36. Steinar Leivestad – Durability, Concrete, Environment and Sustainability în the Eurocodes, 02.05.2019, Standard Norge;
37. SR EN 12390-10:2019 - Încercări pe beton întărit. Partea 10: Determinarea rezistenței la carbonatare a betonului la nivelurile atmosferice de dioxid de carbon;
39. SR EN 14630:2007 - Produse și sisteme pentru protecția și repararea structurilor de beton. Metode de încercări. Determinarea adâncimii de carbonatare în betonul întărit prin metoda cu fenolftaleină;
40. Andres Belda Revert, Klaartje De Weerd, Karla Hornbostel, Mette Rica Geiker – State of the art report: Service life modelling carbonation of concrete and corrosion în carbonated concrete, R-1-2017, april 2017;
41. CEN/TC 250/ SC 2/WG 1 N 912 - New ERC Concept, Național Freedom;
42. SR EN 206 +A1:2017, Beton. Specificație, performanță, producție și conformitate;
51. Stefanie von Greve-Dierfeld, Christoph Gehlen - Performance-based durability design, carbonation, part 2: classification of concrete, 2016;

-
-
52. CEN/TC 250/SC 2/WG 1 N 1057, prEN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules – Rules for buildings, bridges and civil engineering structures;
54. SR EN 12390-12:2020 Încercări pe beton întărit. Partea 12: Determinarea rezistenței la carbonatare a betonului. Metodă de carbonatare accelerată;

Referințe selective bibliografice personale sau realizate în colaborare:

107. Cristinel MORARU, Adelina Apostu, Dan Georgescu - Freeze/Thaw Resistance Classes - Romanian Journal of Transport Infrastructure, ISSN: 2286-2218, 2020;
108. Cristinel MORARU - Proiectarea Durabilității Betonului - Buletinul Științific Doctoral, Universitatea Tehnică de Construcții București, L-ISSN: 1224-628X, Decembrie 2020;
109. Cristinel MORARU, Adelina Apostu, Dan Georgescu - Carbonation Resistance Classes - Romanian Journal of Transport Infrastructure, ISSN: 2286-2218, 2021;
110. Cristinel MORARU - Metode de proiectare a duratei de serviciu a structurilor din beton armat - Buletinul Științific Doctoral al Universității Tehnice de Construcții București, L-ISSN: 1224-628X, Nr. 3 Septembrie 2012;
111. Cristinel MORARU - CEM I 52,5R Ciment de înaltă performanță - Revista Română de Materiale (Romanian Journal of Materials), ISSN 2457-502X, ISSN-L 1583-3186, Nr. 4, 2012;
112. Cristinel MORARU, Radu Gavrilescu, Marian Pîrvu - Cimenturi CARPATCEMENT® cu aplicabilitate în domeniul rutier – First International Proficiency Testing Conference, PT-Conf 2006;
113. Cristinel MORARU, Radu Gavrilescu, Marian Pîrvu - Atacul chimic asupra betonului – Simpozionul Științific Cercetare, Administrare Rutieră, "CAR 2009";
114. Cristinel MORARU – CEM I 52,5R Ciment de înaltă performanță - A XI-a Conferința de știința și ingineria materialelor oxidice, CONSILOX București, Octombrie 2012;
115. Marian Pîrvu, Radu Gavrilescu, Cristinel MORARU – Utilizarea cimenturilor de furnal (CEM III) în betoane expuse mediilor agresive – Conferința SELC, ediția a XVIII-a, Neptun 2006;
116. Cristinel MORARU – Raport de cercetare 1, Aspecte generale privind durabilitatea elementelor și structurilor din beton, București 2020;
117. Cristinel MORARU – Raport de cercetare 2, Încadrarea betoanelor în clase de rezistență la carbonatare, București 2020;
118. Cristinel MORARU – Raport de cercetare 3, Încadrarea betoanelor în clase de rezistență la îngheț-dezgheț, București 2020;
119. Cristinel MORARU – Materialele componente ale betonului, Disciplina electivă 1, București 2018;
120. Cristinel MORARU – Asigurarea durabilității betonului armat în reglementările naționale și internaționale, Disciplina electivă 2, București 2018;
-

Autorul tezei de doctorat este angajat al S.C. HeidelbergCement România S.A. ocupând funcția de Consultant Tehnic Clienți. Cele conținute în această lucrare reprezintă opinii personale ale autorului și nu poziția oficială a Companiei, neimplicând în niciun fel Grupul HeidelbergCement.