

CONTRIBUȚII LA DEZVOLTAREA UNOR BETOANE SPECIALE

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul Inginerie Civilă
de către

Liana Iureș

Conducător științific:

Referenți științifici:

prof.univ.dr.ing. Corneliu Bob

prof.univ.dr. ing.Liviu Groll

prof.univ.dr.ing. Traian Oneț

prof.univ.dr.ing. Iosif Buchman

Ziua susținerii tezei: 09.07.2009

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|------------------------|---|
| 1. Automatică | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie | 8. Inginerie Industrială |
| 3. Energetică | 9. Inginerie Mecanică |
| 4. Ingineria Chimică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 5. Inginerie Civilă | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 6. Inginerie Electrică | |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2006

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Departamentului de Construcții Civile, Industriale și Agricole al Universității „Politehnica” din Timișoara.

Mulțumiri deosebite se cuvin conducătorului de doctorat, prof.dr.ing. Corneliu Bob, pentru permanentul sprijin, suport, îndrumări și încurajări, pe care mi le-a acordat pe parcursul întregilor ani de studii doctorale.

Colegilor din departamentul mai sus menționat, în special domnilor profesori: dr. ing. Ioan Cađar și dr. ing. Iosif Buchman, cu ajutorul cărora am efectuat o parte din cercetările experimentale prezentate în teza de doctorat, le mulțumesc frumos pentru colegialitatea și prietenia pe care mi le-au arătat.

Mulțumesc, de asemenea, conducerii Universității “Politehnica” din Timișoara, pentru întregul sprijin acordat de-a lungul anilor de studii doctorale.

Aprecieri și gânduri deosebite se cuvin domnului prof. dr. ing. Corneliu Cișmașu de la “Nova Universidade” din Lisabona, Portugalia, precum și conducerii acestei universități, pentru îndrumarea și sprijinul pe care mi le-au oferit în anul 2007, pe parcursul bursei pentru studii doctorale de care am beneficiat.

Gânduri frumoase și deosebite, aprecieri și mulțumiri, aduc Laboratorului Național de Inginerie Civilă – LNEC, din Lisabona, Portugalia, care a avut amabilitatea de a mă accepta în cursul anului 2007, pentru efectuarea unui stagiu cu durata de o lună, pe parcursul căruia am realizat cercetarea experimentală asupra vâscozității pastelor de ciment, nerealizabilă la noi în țară.

Mulțumesc domnului ing. Manuel Vieira pentru îndrumări și sprijinul acordat pe parcursul acestui stagiu.

Suportul moral și sufletesc acordat de către familia mea nu se poate descrie în cuvinte. Le mulțumesc!

Timișoara, iulie 2009

Liana Iureș

IUREȘ, LIANA

**Titlul tezei CONTRIBUȚII LA DEZVOLTAREA UNOR
BETOANE SPECIALE**

Teze de doctorat ale UPT, Seria X, Nr. YY, Editura Politehnica,
2009, 167 pagini, 97 figuri, 46 tabele.

ISSN:uuuu-vvvv

ISBN (10):; ISBN (13):

Cuvinte cheie: contracții reduse, aditivi reducători ai contracției, fisurarea betonului, beton autocompactant, vâscozitatea pastelor de ciment, deșeuri industriale, betoane foarte ușoare
Rezumat, Teza de doctorat cuprinde 7 capitole și o anexă. Se prezintă un studiu bibliografic asupra caracteristicilor fizico-mecanice ale betoanelor speciale, precum și domeniile de utilizare ale acestora. Un larg program experimental asupra stabilirii aditivului cu cel mai puternic efect reducător al contracției la uscare al betonului, precum și contribuții teoretice ale doctorandului, sunt subiectul capitolului 4 al tezei de doctorat. Capitolul 5 are ca și subiect betoanele autocompactante și determinările efectuate de către doctorand pentru optimizarea și stabilirea unei rețete a unui astfel de beton. Capitolul 6 redă cercetările experimentale efectuate în vederea realizării unui beton foarte ușor termoizolator din deșeuri de poliuretan rigid.....

CUPRINS

1. INTRODUCERE. SCOPUL ȘI OBIECTUL TEZEI	7
1.1. Introducere	7
1.2. Scopul și obiectul tezei	10
2. CARACTERISTICI FIZICO-MECANICE ALE BETOANELOR SPECIALE FRECVENT UTILIZATE ..	11
2.1. Betoane ușoare	11
2.2. Betoane macroporoase	12
2.3. Betoane ușoare de rezistență	14
2.4. Betoane cu polimeri. Betoane armate cu fibre	16
2.5 Betoane de înalte și ultra înalte performanțe	18
2.5.1. Betoane din pudre reactive - BPR	18
2.5.2. Betoane speciale industriale - BSI	25
2.5.3. Betonul compact cu fibre de oțel - BCFO	25
2.5.4. Betonul din împâslitură de fibre de oțel injectată cu pastă - BIFOIP	26
3. POSIBILITĂȚI DE UTILIZARE ALE BETOANELOR SPECIALE	27
3.1. Betoane armate cu fibre de oțel	27
3.2. Betoane armate cu fibre de sticlă	27
3.3. Betoane armate cu fibre de cânepă	28
3.4. Betoane armate cu fibre de carbon	28
3.5. Betonul special industrial (BSI)	29
3.6. Betonul compact cu fibre de oțel (BCFO)	29
3.7. Betonul din împâslitură de fibre de oțel injectată cu pastă (BIFOIP)	32
3.8. Betoane din pudre reactive (BPR)	33
3.9. Betoane ușoare	39
3.10. Betoane rutiere	40
3.11. Betoane antiacide	40
3.12. Betoane rezistente la temperaturi înalte	40
3.13. Betoane aparente – decorative	41
3.14. Materiale pe bază de polimeri pentru protecția și/sau reabilitarea construcțiilor	41
3.15. Domeniile de utilizare ale betoanelor cu polimeri fără ciment	43
3.16. Microbetonul fluid	44
3.17. Betoane cu contracții reduse	45
3.18. Structuri existente realizate cu betoane de înaltă performanță	45
3.18.1. Clădiri	45
3.18.2. Poduri	47
3.18.3. Platforme de foraj marin	48
4. BETOANE CU CONTRACȚII REDUSE	50
4.1. Contracția betonului – scurte noțiuni teoretice	50
4.1.1. Contracția la uscare a betonului	56
4.2. Aditivi reducători ai contracției utilizați	57
4.3. Cercetări experimentale pe mortare realizate cu aditivi reducători ai contracției	59
4.4. Optimizarea compozițiilor de beton martor și cu aditivi reducători ai contracției	63
4.4.1. Caracteristicile betoanelor în stare proaspătă	65
4.4.2. Caracteristicile betoanelor în stare întărită	66
4.4.3. Considerații teoretice privind apariția fisurilor în elementele de construcții	77
4.4.4. Caz practic al necesității utilizării aditivilor reducători ai contracției la elementele structurale din beton	84
4.4.4.1. Efectul fisurării culeelor	86
5. BETOANE AUTOCOMPACTANTE	88
5.1. Introducere	88
5.2. Dezvoltarea betonului autocompactant	89
5.3. Cerințe pentru producerea betonului autocompactant	90
5.3.1. Condiții pentru materialele componente	90
5.3.1.1. Generalități	90
5.3.1.2. Cimentul	91
5.3.1.3. Adaosurile	91

5.3.1.4. Agregatele.....	92
5.3.1.5. Aditivii	93
5.3.1.6. Fibrele	94
5.3.1.7. Apa de amestecare.....	95
5.3.2. Condiții pentru compoziția betonului autocompactant	95
5.3.2.1. Generalități	95
5.3.2.2. Principiile stabilirii compoziției.....	95
5.3.2.3. Compoziția și proprietățile betonului autocompactant	96
5.3.2.4. Metode de control a compoziției betoanelor autocompactante	97
5.3.3. Condiții privind betonul proaspăt.....	99
5.3.3.1. Detalii privind metodele de testare ale betonului autocompactant in stare proaspătă.....	100
5.3.4. Condiții privind betonul întărit	103
5.3.5. Livrarea betonului proaspăt.....	104
5.3.5.1. Informații de la utilizatorul betonului către producător	104
5.3.5.2. Informații de la producătorul de beton pentru utilizator	105
5.3.5.3. Bon de livrare pentru betonul gata de utilizare	105
5.3.5.4. Controlul conformității și criteriile de conformitate	105
5.3.5.5. Controlul producției	106
5.3.6. Limitări în folosirea betonului autocompactant	107
5.4. Exemple de structuri realizate cu beton autocompactant	107
5.4.1. Program experimental realizat sub directa îndrumare a Departamentului de Inginerie Civilă – Universitatea “Politehnica” Timișoara.....	113
5.4.1.1. Concluzii ale încercărilor experimentale	115
5.5. Avantajele betonului autocompactant.....	115
5.6. Stabilirea compoziției betonului autocompactant prin teste experimentale.....	116
5.6.1. Determinări experimentale asupra pastei de ciment din compoziția betonului autocompactant – cercetări experimentale realizate în colaborare cu LNEC, Lisabona, Portugalia.....	116
5.6.1.1. Scurte noțiuni teoretice.....	116
5.6.1.2. Teste preliminare pe pastă de ciment.....	119
5.7. Teste experimentale pentru stabilirea compoziției optime a unui beton autocompactant	133
5.7.1. Generalități	133
5.7.2. Compoziția betoanelor.....	134
5.7.3. Betonul proaspăt	136
5.7.4. Betonul întărit	140
5.8. Concluzii	141
6. BETOANE FOARTE UȘOARE REALIZATE CU AGREGATE DIN POLIURETAN RIGID.....	142
6.1. Generalități.....	142
6.1.1. Spuma poliuretanică rigidă.....	142
6.2. Tehnologia de încorporare a agregatelor din PUR în masa betonului	143
6.3. Proprietăți fizico-mecanice ale betoanelor ușoare realizate cu agregate din PUR	145
6.3.1. Rezistența la compresiune.....	148
6.3.2. Masa volumică.....	150
6.3.3. Rezistența la întindere prin încovoiere	150
6.3.4. Conductivitatea termică	151
6.4. Concluzii	155
7. CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE.....	157
BIBLIOGRAFIE.....	161
ANEXA.....	168

1. INTRODUCERE. SCOPUL ȘI OBIECTUL TEZEI

1.1. Introducere

Betonul constituie principalul material pentru realizarea construcțiilor de toate tipurile, datorită marilor sale avantaje tehnice și economice. Prin capacitatea sa de a suporta orice fel de solicitare, de a lua orice formă, betonul este materialul secolului nostru.

Principalele avantaje ale betonului, cunoscut de peste 2000 de ani și în forma actuală de peste 100 de ani, sunt următoarele:

- materii prime ieftine și practic nelimitate în toate regiunile globului;
- durabilitate mare și cheltuieli de întreținere reduse, cu condiția respectării regulilor de alcătuire și execuție;
- rezistență sporită la foc în comparație cu alte materiale de construcții;
- ușurința de a executa elemente și structuri de forme complexe;
- energie înglobată și preț de cost mai reduse față de alte soluții.

Ca orice material, betonul obișnuit are însă și unele dezavantaje, dintre care cele mai importante sunt:

- rezistență mică la întindere;
- densitate aparentă mare și valoare redusă a raportului rezistență la compresiune/densitate aparentă;
- conductivitate termică ridicată;
- permeabilitate la apă;
- coroziune în anumite condiții de mediu și de exploatare;
- grad de industrializare mai redus ca în cazul structurilor metalice.

Menținerea competitivității betonului se referă la realizarea unor betoane de înaltă rezistență și a unor betoane speciale pentru domenii specifice de folosire, cum ar fi: betoane hidrotehnice, betoane în mediu marin, betoane rutiere, betoane rezistente la diferite agresivități chimice, betoane rezistente la temperaturi înalte, betoane de protecție împotriva radiațiilor, betoane de înaltă performanță, betoane aparent-decorative etc.

Materialele pe bază de cimenturi sunt, din punct de vedere chimic, complexe și, chiar în zilele noastre, după 150 de ani de utilizare, procesul de hidratare a cimentului portland nu este complet înțeles în toate detaliile sale. Utilizarea adaosurilor chimice, a aditivilor pentru ciment, a materialelor înlocuitoare ale cimentului (cum ar fi: cenușa de termocentrală, zgura granulată de furnal și microsilia), au adus beneficii tehnice și economice, dar au introdus și complicații suplimentare, apărând frecvent confuzii sau chiar contradicții privind claritatea normelor, a prevederilor de folosire eficientă a acestor materiale [1].

În condiții de șantier, calitatea lucrărilor efectuate de către muncitori este foarte importantă, iar tratarea betonului nu poate fi prevăzută întotdeauna, aceasta impunând concluzia că normele care prevăd o rezistență minimă necesară, un conținut minim de ciment și un raport minim apă/ciment, vor fi inadecvate în privința asigurării durabilității.

8 1. INTRODUCERE. SCOPUL ȘI OBIECTUL TEZEI

Actualmente, cercetările sunt orientate spre găsirea unor surse alternative de agregate, crearea unor noi tipuri de betoane: cu polimeri, cu armare dispersă, utilizând fibre din diferite materiale. Se încearcă, de asemenea, reducerea energiei înglobate în ciment, prin mărirea eficienței cuptoarelor de clincherizare, prin folosirea reziduurilor ca și carburanți etc.

Betonul simplu, armat și precomprimat, material compozit și asociat, sub diferite variante tehnologice și structurale cunoscute, reprezintă actualmente materialul de construcții cu cea mai amplă utilizare. Studiile și prognozele elaborate în diferite țări și de către unele organizații științifice și profesionale, arată că, datorită progreselor remarcabile înregistrate în ingineria betonului în ultimii 20-30 ani, s-a asigurat dezvoltarea actuală și în perspectivă a primelor decenii ale secolului XXI, ceea ce permite în continuare dezvoltarea, sub aspectul creșterii performanțelor tehnice și economice și al consolidării rolului betonului de principal material de construcții.

În anii '50 - '60, în domeniul betonului ca material de construcție, s-a trecut la o dezvoltare pe orizontală și verticală, fără precedent în istoria acestui material compozit și a materialelor de construcții în ansamblu. Astfel, s-a extins și dezvoltat mult gama diferitelor tipuri de betoane: betoane grele de uz curent în diferite tipuri de construcții, betoane rutiere, betoane hidrotehnice, betoane ușoare de izolație, izolație - rezistență, rezistență, betoane grele și ușoare preparate cu diferite subproduse industriale, betoane foarte grele, rezistente la radiații nucleare, betoane cu lianți minerali și rășini sintetice, betoane cu rășini sintetice fără lianți minerali, betoane armate dispers, cu fibre metalice, fibre din sticlă zirconică, de polipropilenă, fibre de carbon etc [1].

Performanțele betonului sunt în continuă creștere, în concordanță cu necesitățile societății și, în consecință, depășesc cererile tradiționale asupra rezistenței și a lucrabilității. S-au conturat deja, în diferite studii și aplicații, avantajele utilizării superplastifiantilor, care au ridicat barierele impuse de conținutul minim de apă necesar unui beton lucraabil. Au apărut, ca rezultat, betoanele de înaltă performanță cu durabilitate superioară. Alte caracteristici ale performanțelor betoanelor au beneficiat, în ultimii ani, de dezvoltarea tehnologiei de amestecare. Un astfel de aspect este contracția betonului, caracteristică de majoră importanță în proiectarea structurilor, unde deformațiile împiedicate pot duce la fisurări nedorite în elementele structurale.

Betonul este cel mai utilizat material de construcții la ora actuală. Aceasta ridică probleme importante privind modul în care betonul trebuie proiectat și construit pentru a avea un cost efectiv economic, atât pe termen scurt, cât și pe lungă durată. De asemenea, trebuie să fie un material "prietenos cu mediul înconjurător", atât în timpul fabricării cât și din punct de vedere estetic atunci când este utilizat în structuri.

Proprietățile ce pot fi obținute la beton sunt variate și excepționale: rezistențe la compresiune de la 0.1 MPa la 800 MPa, densități între 100 kg/m³ și 5000 kg/m³.

Pentru menținerea competitivității betonului ca principal material de construcție s-au îmbunătățit performanțele betonului greu (obișnuit) și s-au creat noi tipuri de betoane cu proprietăți fizico - mecanice sau chimice mult superioare betonului obișnuit.

- S-au studiat, realizat și folosit în practică următoarele noi tipuri de betoane:
- **Betoane ușoare** – betoane cu agregate ușoare – au o densitate aparentă cu 1/3 – 1/4 mai mică decât cea a betoanelor obișnuite, rezistențe mecanice comparabile, capacitate de izolare termică ridicată și rezistență la foc sporită.
 - **Betoane cu armare dispersă** – se obțin prin înglobarea în masa betonului a anumitor cantități de fibre discontinue (fibre anorganice sau organice artificiale, fibre organice naturale). Betoanele cu armare dispersă au o rupere ductilă, rezistențe la întindere sporite, o foarte bună comportare la șoc, acțiuni dinamice și oboseală, precum și o rezistență sporită la uzură.
 - **Betoane cu polimeri** – prezintă rezistențe sporite la întindere, uzură și atacuri chimice, impermeabilitate ridicată.
 - **Betoane de înalte și foarte înalte performanțe** – posedă rezistențe ridicate la compresiune, la agenți chimici agresivi. Alte caracteristici îmbunătățite sunt: modulul de elasticitate, contracția, curgerea lentă etc.

O comparație între proprietățile altor materiale de construcții și beton este prezentată în tabelul 1.1 [1].

Tabelul 1.1

Proprietăți specifice materialelor de construcții

Materiale		Limitele uzuale ale unor caracteristici				
		Fizice		Mecanice		
		ρ kg/m ³	λ W/mg	f_c N/mm ²	f_{ct} N/mm ²	E kN/mm ²
Oțeluri		7850	60	150-350	150-350	210
Betoane	obișnuite	2200-2500	1,3-1,5	10-60	1,0-3,5	17-38
	ușoare compacte	1300-1800	0,41-0,80	10-50	0,7-2,0	11-22
	celulare	400-750	0,10-0,20	1,5-5,0	0,2-0,8	0,6-3,0
	de mare rezistență	2200-2500	1,3-1,5	60-100	3,5-7,0	40-50
Zidărie de cărămidă		1300-1800	0,4-0,7	1-6	0,03-0,6	-
Lemn	Brad	400-500	0,15-0,25	30-40	110-120	10
	Stejar	700-800	0,20-0,35	50-60	120-130	10
Polimeri	PVC - dur	1200-1400	0,30-0,50	80-90	60-90	1,5-3,0
	Polistiren	1000-1100	0,20-0,30	100-115	40-60	1,5-3,5

1.2. Scopul și obiectul tezei

Scopul acestei teze constă în studierea și îmbunătățirea unor betoane speciale cu caracteristici superioare din punct de vedere al durabilității, mentenanței și a proprietăților fizico-mecanice, oferind astfel posibilitatea deschiderii unor noi piețe în domeniul construcțiilor de la noi din țară.

Betoanele speciale cercetate sunt: betoane cu contracții reduse, betoane autocompactante și betoane foarte ușoare realizate cu agrgate din poliuretan rigid.

Atingerea obiectivului tezei s-a realizat prin derularea următoarelor programe de cercetări teoretice și experimentale:

- studiu documentar asupra betoanelor speciale, aditivilor, adaosurilor, agregatelor, filelelor, durabilității și sustenabilității betonului;
- cercetări experimentale de laborator cuprinzând stabilirea de compoziții, procedee de amestecare, realizarea probelor și efectuarea testelor experimentale;
- introducerea unor noi considerații teoretice privind contracția și fisurarea betonului la uscare;
- optimizarea compozițiilor unor betoane speciale;
- optimizarea procedeeleor de amestecare a unor betoane speciale;
- realizarea aparaturii pentru testarea caracteristicilor unui beton autocompactant, în concordanță cu *European Guidelines for Self Compacting Concrete*, EN 12350-1: 1999 E , Mai 2004;
- realizarea unor studii comparative între betoanele clasice și cele noi analizate.

2. CARACTERISTICI FIZICO-MECANICE ALE BETOANELOR SPECIALE FRECVENT UTILIZATE

2.1. Betoane ușoare

- Betoanele ușoare în funcție de structură și granulozitate, pot fi:
- compacte (cu agregate minerale ușoare sau cu agregate vegetale);
 - macroporoase (cu agregate având diametrul granulelor de cel puțin 5mm, iar pasta de ciment nu umple spațiul dintre granule);
 - celulare (obținute prin înspumare sau pe bază de adaosuri generatoare de gaze).
- După domeniul de folosire:
- termoizolatoare ($\lambda \leq 0,4$ W/m grad ; $R_b \leq 5$ N/mm²);
 - termoizolatoare și de rezistență ($\lambda \leq 0,75$ W/m grad ; $R_b > 5$ N/mm²);
 - de rezistență ($\lambda > 0,75$ W/m grad ; $R_b \geq 15$ N/mm²).

Clasificarea funcțională a betoanelor ușoare este prezentată în tabelul 2.1 [1].

Tabelul 2.1

Clasa	Tipul de beton ușor	Densitatea aparentă în stare uscată (kg/m ³)	Rezistența la compresiune (N/ mm ²)	Coefficient de conductivitate termică (W/m grad)
S	Beton ușor de rezistență	1600 - 1900	30 - 70	0,6 - 1,0
SI	Beton ușor de rezistență și izolație	1300 - 1600	15 - 20	0,5 - 0,8
I	Beton ușor termoizolator	< 1450	< 15	< 0,75

În funcție de densitatea aparentă și de rezistența la 28 de zile (clasificare făcută în normele americane în anul 1968) [1]:

12 2. CARACTERISTICI FIZ.-MEC. ALE BETOANELOR SPECIALE FRECVENT UTILIZ.

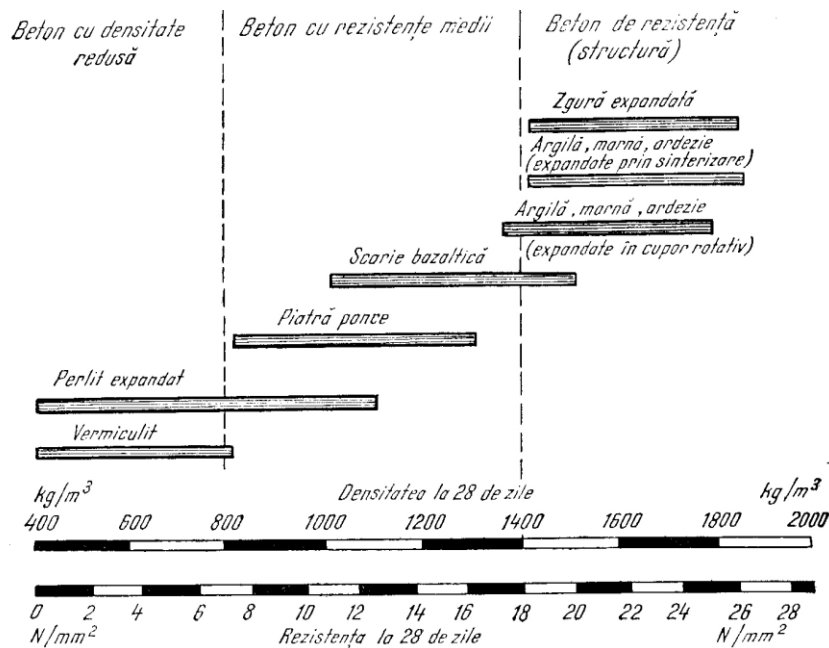


Fig. 2.1. Clasificarea betoanelor ușoare funcție de rezistență și de densitatea aparentă.

2.2. Betoane macroporoase

Densitatea aparentă (ρ_a) a betoanelor macroporoase este determinată de următorii factori:

- de natura, respectiv de densitatea aparentă și de densitatea în vrac a agregatului utilizat;
- de volumul total al golurilor intergranulare (macropori), respectiv de granulozitatea agregatului utilizat;
- de dozajul de ciment.

În funcție de factorii mai sus menționați, densitatea aparentă a betoanelor macroporoase variază între limitele $300 - 1900 \text{ kg/m}^3$, în cazul utilizării agregatelor ușoare și $1700 - 1900 \text{ kg/m}^3$, în cazul utilizării agregatelor grele.

Marca betoanelor macroporoase oscilează în mod obișnuit între C10/12 și C50/60, fiind influențată de natura agregatului, de forma și dimensiunile granulelor sale, de caracterul suprafeței acestora, precum și de porozitatea betoanelor macroporoase (de granulozitatea agregatului utilizat). Astfel, agregatele rotunde, cu suprafața închisă și netedă, cum sunt pietrișurile naturale grele și granulitul, duc la obținerea unor betoane cu rezistențe mecanice mai ridicate pentru dozaje minime de ciment. Granulele colțuroase rezultate din concasare duc în general pentru același dozaj, la obținerea unor betoane macroporoase cu rezistențe mecanice mai scăzute, datorită suprafeței rugoase care consumă un surplus de pastă de ciment pentru nivelarea tuturor asperităților. Acest surplus de ciment nu contribuie practic la îmbunătățirea sudurii dintre granulele agregatului. Betoanele cu agregate

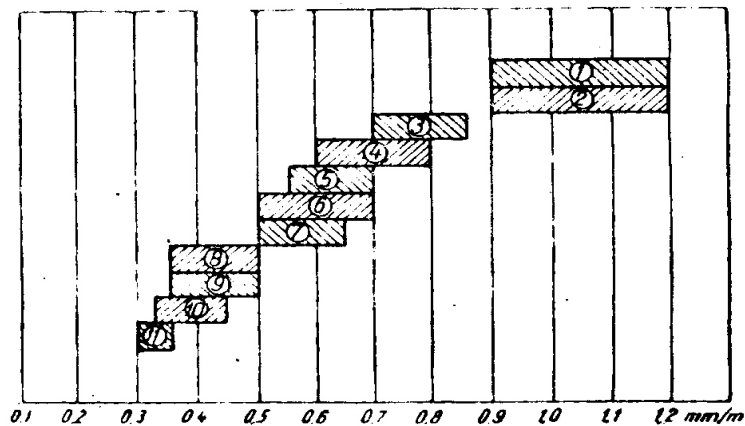
de concasaj și porozitate aparentă pronunțată, cum sunt cele din argilă expandată și concasată sau din zgură expandată, consumă o însemnată parte din pasta de ciment, atât pentru nivelarea rugozității de la suprafața granulelor, cât și pentru colmatarea porilor și fisurilor existente. Acest fapt contribuie favorabil asupra rezistențelor mecanice ale betonului, în special în cazul agregatelor fragile, cu rezistențe mecanice mici, deoarece învelișul de pastă de ciment parțial absorbit de porii, capilarele și fisurile de suprafață, mărește apreciabil rezistența acestor granule, ducând astfel la obținerea unor betoane cu rezistență destul de mare [1].

Viteza de întărire a betoanelor macroporoase depinde de aceiași factori ca și în cazul betoanelor obișnuite, și în special de natura cimentului utilizat, respectiv de viteza lui de întărire și de temperatura mediului ambiant. În general rezistențele la compresiune obținute la 7 zile de la turnare, pentru aceste betoane, în regim de întărire normal, reprezintă 65 – 75% din rezistențele la 28 de zile.

Contrația la uscare a betoanelor macroporoase este în general mai mică decât a betoanelor cu structură compactă și depinde în mare măsură de natura agregatului utilizat. Contrația cea mai mică o prezintă betoanele macroporoase cu agregate grele (naturale sau de concasaj), în care caz ea ajunge de ordinul 0,35 mm/m. Betoanele cu agregate ușoare artificiale au în general o contrație ce nu depășește 0,60 mm/m, iar cele cu agregate ușoare naturale prezintă contrația cea mai mare la uscare, ajungând la 0,70 – 0,80 mm/m (în cazul utilizării scoriilor bazaltice) sau chiar depășind 1mm/m (în cazul utilizării diatomitului).

Pentru același tip de agregat, contrația variază puțin în funcție de dozajul de ciment, în schimb variază în limite importante în funcție de conținutul în părți lavigabile (argilă nearsă sau insuficient arsă).

Evoluția contrației la uscare a betoanelor macroporoase depinde de natura agregatului, de porozitatea betonului și de posibilitățile de uscare (temperatura mediului, umiditate, curenți de aer etc.). În figura 1.2. [1] este arătată contrația diferitelor betoane cu agregate ușoare naturale și artificiale.



Legenda:

1- beton cu perlit; 2 – beton cu diatomit; 3 – beton cu scorie bazaltică; 4 – beton cu zgură de cazan; 5 – beton cu tuf andezitic; 6 – beton cu steril de mină; 7 – beton cu deșeuri ceramice; 8 – beton cu argilă expandată; 9- beton cu agloporit; 10 – beton cu granolit; 11 – beton cu pietriș greu.

Fig. 2.2. Contrația la uscare a betoanelor ușoare

14 2. CARACTERISTICI FIZ.-MEC. ALE BETOANELOR SPECIALE FRECVENT UTILIZ.

Capacitatea termoizolatoare a betoanelor macroporoase depinde în mare măsură atât de densitatea aparentă a betonului cât și de natura agregatelor utilizate. În general conductivitatea termică λ_0 variază între 0,50 și 0,60 kcal/m-h-grd pentru betoanele macroporoase cu agregate grele și între 0,25 și 0,45 kcal/m-h-grd pentru cele confecționate cu agregate ușoare. Betoanele cu agregate foarte ușoare, de tipul perlitului, au λ_0 sub 0,20 kcal/m-h-grd.

Modulii de elasticitate al betoanelor macroporoase cu agregate grele compacte, la mărci echivalente, sunt mai mari decât ai betonului obișnuit, rezultând deformații mai reduse (de exemplu, contracția finală este de 0,2 mm/m).

Permeabilitatea la apă și difuziunea capilară a betoanelor macroporoase. Datorită porozității lor deschise, betoanele macroporoase se caracterizează printr-o mare permeabilitate la apă. Difuziunea capilară este foarte redusă la betoanele macroporoase cu agregate grele; având totodată și o capacitate redusă de reținere a apei.

Rezistența la gelivitate a betoanelor macroporoase este în general destul de ridicată datorită atât capacității reduse de reținere a apei cât și golurilor mari și numeroase din masa lor, care permit realizarea unei expansiuni a apei prin îngheț, fără solicitări mecanice ale materialului. În general betoanele macroporoase rezistă cu succes la 15 – 25 de cicluri îngheț – dezgheț, excepție face betonul cu diatomit care are o rezistență mică la gelivitate, datorită faptului că agregatul provine dintr-o rocă moale și cu absorbție foarte mare de apă.

Comportarea armăturii în betoanele macroporoase. Betoanele macroporoase au adeziune mică la armătură, datorită suprafeței reduse de contact cu acestea. În același timp, datorită porozității deschise, protecția acestei armături contra coroziunii nu este asigurată, fiind necesare măsuri speciale. Un exemplu de astfel de măsură specială este înglobarea armăturii într-un strat de beton compact, de preferință confecționat cu același tip de agregate. În plus, trebuie să se ia măsuri contra infiltrării umidității de orice natură în elementul respectiv, prevăzându-se la partea inferioară bariere de vapori, iar la cea superioară un înveliș hidrofug [1].

2.3. Betoane ușoare de rezistență

Lucrabilitatea și tendința de segregare. Betoanele cu agregate ușoare au în general o lucrabilitate mai redusă și o tendință de segregare mai mare decât cele obișnuite, cu agregate grele. Datorită densității aparente mai mici a granulelor cu dimensiuni mari, acestea prezintă tendința ca la zguduituri și trepidații să se ridice la suprafață, în timp ce mortarul se scurge la bază. Această deficiență poate fi înlăturată printr-un dozaj corespunzător și prin măsuri corespunzătoare în timpul transportului și al compactării în cofraje.

Rezistența la compresiune. Betonul cu agregate ușoare necesită în comparație cu betonul obișnuit de aceeași marcă, un consum de ciment în medie cu 20 – 30% mai mare. Aceasta se datorează faptului că marca betoanelor cu agregate ușoare depinde în mare măsură de natura agregatelor și de dozajul de ciment, care la rândul său depinde de caracterul suprafeței granulelor (pentru o anumită marcă de beton, agregatele cu suprafețe rugoase și pori deschiși necesită un consum mai mare de ciment, deoarece o însemnată cantitate de pastă de liant pătrunde în aceste deschideri de suprafață, contribuind mai puțin la creșterea rezistenței betonului).

Rezistența la compresiune a betonului crește odată cu sporirea dozajului de ciment și cu îmbunătățirea calității cimentului (fig. 2.3. și 2.4.) [1]. Influența

raportului A/C asupra rezistenței la compresiune a betonului ușor este analoagă cu cea a betonului obișnuit.

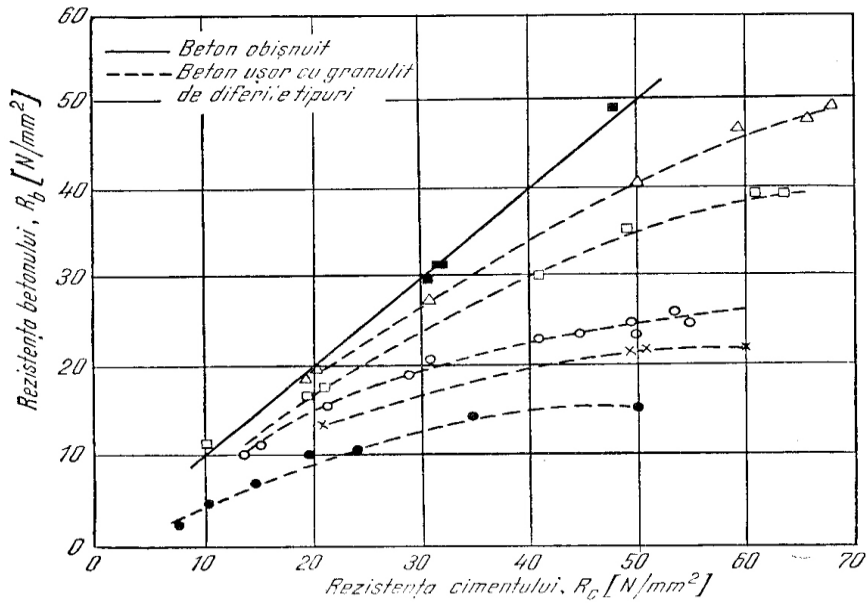


Fig. 2.3. Rezistența la compresiune a betonului ușor funcție de calitatea cimentului.

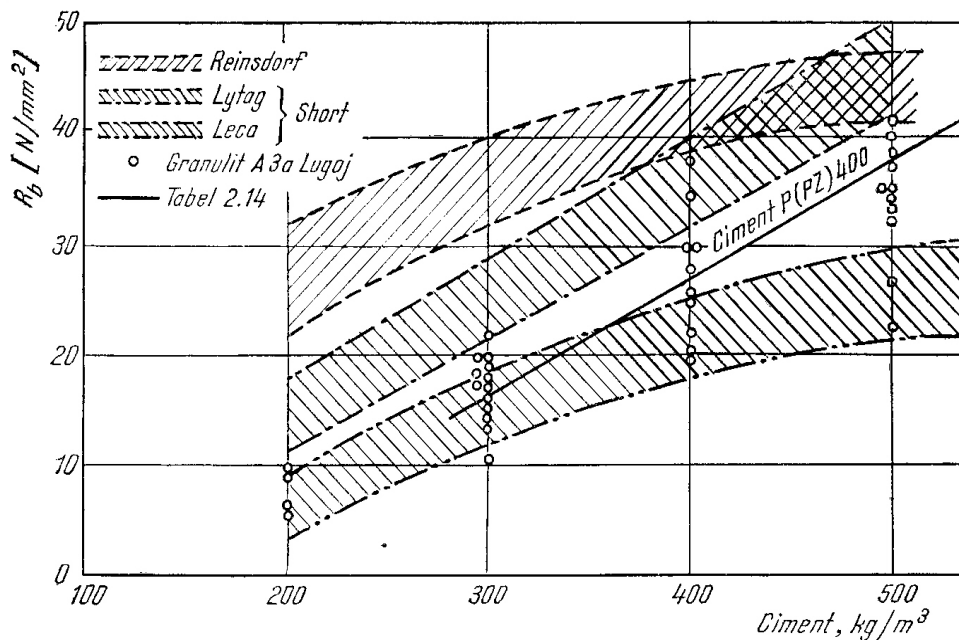


Fig. 2.4. Rezistența la compresiune a betonului ușor funcție de dozajul de ciment.

16 2. CARACTERISTICI FIZ.-MEC. ALE BETOANELOR SPECIALE FRECVENT UTILIZ.

Rezistența la întindere a betonului ușor este cu 10 – 30% mai mică decât cea a betonului greu obișnuit de aceeași marcă, fapt ce se datorește influenței mai directe, la această solicitare, a rezistenței scăzute a agregatului (ruperea producându-se prin agregat) cât și a acțiunii hotărâtoare a unor factori din mediul ambiant (umiditate, temperatură).

Modulul de elasticitate E_b al betoanelor ușoare este aproximativ 1/3 până la 2/3 din modulul de elasticitate al betonului obișnuit, la aceeași marcă.

Deformațiile în timp ale betoanelor ușoare de rezistență. În baza cercetărilor efectuate până în prezent la INCERC asupra unor betoane cu argilă expandată (granulit) și scorie bazaltică, se pot afirma următoarele:

- deformațiile elastice ale acestor betoane sunt aproximativ de două ori mai mari decât ale betoanelor grele obișnuite de aceeași marcă;
- deformațiile din contracție depind în mare măsură de natura agregatelor utilizate; pentru betoanele de granulit aceste deformații sunt practic echivalente cu cele ale betoanelor grele;
- deformațiile plastice sub sarcină sunt echivalente cu cele ale betoanelor grele de aceeași marcă.

Conductivitatea termică a betoanelor ușoare compacte depinde de diferiți factori, printre care cea mai mare influență o exercită densitatea aparentă, tipul și structura agregatului, umiditatea relativă. La o porozitate identică, conductivitatea termică crește odată cu mărirea porilor, deoarece sporește convecția aerului în pori, ceea ce favorizează trecerea căldurii. S-a constatat că la creșterea umidității are loc întotdeauna și creșterea conductivității termice.

2.4. Betoane cu polimeri. Betoane armate cu fibre

Cele mai mari rezistențe la compresiune le asigură betonul impregnat și polimerizat (BIP) și totodată și indicele de calitate (R_c/ρ_a) cel mai ridicat. Betonul cu polimeri fără ciment (BP) se caracterizează prin rezistențe mecanice mari și un indice de calitate ridicat. Alte tipuri de betoane cu polimeri au rezistențele mecanice și indicii de calitate cu puțin mai mari decât betonul obișnuit [2].

Betonul compact cu fibre de oțel se poate considera, după compoziția și performanțele sale, ca făcând parte din categoria betoanelor cu pudre reactive; fiind studiat și dezvoltat în Danemarca de către Societatea AALBORG PORTLAND. A apărut în anul 1986 sub denumirea păstrată și astăzi, de CRC – Compact Reinforced Concrete, având proprietăți ultra performante:

- rezistența la compresiune: 150 – 400 N/mm²;
- rezistența la întindere din încovoiere: 100 – 300 N/mm²;
- modulul de elasticitate: 50000 – 100000 N/mm²;
- densitatea aparentă 3000 – 4000 kg/m³;
- durabilitate foarte bună.

Betonul din împâslitură de fibre de oțel injectată cu pastă (BIFOIP) este un material nou dezvoltat în SUA și se obține prin introducerea în cofraj a unei împâslituri din fibre lungi continue de oțel inoxidabil și injectarea rețelei dese de fibre cu o pastă fluidă pe bază de ciment. Datorită unui raport ridicat al aspectului (lungime/diametru) fibrelor, se obțin îmbunătățiri considerabile ale rezistenței, ductilității și procesului de fisurare, atingându-se o rezistență la întindere directă de

2.4. Betoane cu polimeri. Betoane armate cu fibre 17

până la 17 N/mm², corespunzătoare unei deformații de până la 1,5% pentru un procent volumetric de fibre de numai 5,29%. Împâsliturile de fibre sunt ușor de manipulat.

Caracteristicile BIFOIP îl recomandă pentru elemente structurale cum sunt stâlpii unde se cere o creștere considerabilă a rezistenței și a ductilității în direcție transversală. Împâsliturile din fibre de oțel livrate sub formă de suluri pot fi înfășurate în jurul elementelor din beton armat existente pentru lucrări de consolidare. Cercetări efectuate pentru consolidarea elementelor de beton armat la încovoiere și tăiere au arătat că acest material nou este foarte eficient pentru creșterea capacității portante, a energiei absorbite, ductilității și durabilității elementelor consolidate.

În tabelul 2.2 se prezintă câteva date privind unele caracteristici fizico – mecanice ale betoanelor cu polimeri în comparație cu betonul obișnuit [2]:

Tabelul 2.2

Tipul materialului	Beton obișnuit	Betoane cu polimeri	
		Epoxizi	Poliesteri
Caracteristica			
Densitatea [kg/m ³]	2300...2400	1800...2160	1900...2400
Rezistența la întindere [N/mm ²]	2,0...4,0	18...26	13...50
Rezistența la compresiune [N/mm ²]	20...60	20...100	10...120
Modulul de elasticitate [kN/mm ²]	20...35	10...30	10...35
Contractie [mm/m]	2...5	2...4	2...4
Conductivitate termică [W/mK]	1,3...1,5	0,3	0,3
Rezistența la uzură [mm]	1,3	-	-
Absorbția de apă [%]	4...6	-	0,03...0,05
Rezistența la îngheț –dezgheț [nr. cicluri]	100	-	-

Valorile medii ale coeficienților de eficiență tehnică pentru materialele mai sus menționate, sunt prezentate în tabelul 2.3:

Tabelul 2.3

Coeficienți		$\frac{f_{ct}}{f_c}$	$\frac{f_c}{E} \times 10^{-3}$	$\frac{f_c}{\rho_a}$ [kNm/kg]	$\frac{f_c}{\lambda}$ [MpamK/W]	Durabilitatea
Material						
Beton obișnuit		0,10	0,80	14,60	19,50	redușă
Betoane cu poli-meri	Epo-xizi	0,37	3,00	30,00	200,00	bună
	Poli-esteri	0,48	2,89	30,23	216,70	bună

2.5 Betoane de înalte și ultra înalte performanțe

2.5.1. Betoane din pudre reactive - BPR

Progresele relativ recente în domeniul conceperii și realizării betoanelor au condus la obținerea betoanelor de înalte și foarte înalte performanțe având o rezistență la compresiune stabilită pe cilindri ce ajunge la 100-120 N/mm².

Mai recent s-au conturat două căi de cercetare. Prima se referă la betoanele cu matrice granulară compactă (DSP) cu dozaje ridicate de superplastifiant și silice ultrafină, precum și cu agregate cu duritate ridicată provenite din bauxită calcinată și granit. Acestea sunt foarte performante la compresiune, dar păstrează neajunsurile betonului obișnuit și anume o rezistență mică la întindere și o ductilitate foarte redusă. Cea de-a doua cale de cercetare abordează mortarele cu polimeri simbolizate MDF (Macro Defect Free), care au o rezistență la întindere foarte ridicată. Producerea acestora se face în condiții foarte dificile iar punerea în operă trebuie efectuată prin presare. În plus aceste mortare sunt foarte sensibile la apă și sunt foarte puțin ductile. Cercetarea lor continuă în scopul limitării sensibilității lor la apă și a îmbunătățirii ductilității prin încorporarea de fibre nemetalice [3].

Pornind de la experiența dobândită în realizarea și punerea în operă a sute de mii de m³ de betoane de înalte performanțe, Direcția Științifică a Societății BOUYGUES-Franța a inițiat, în ultimii ani, un program de cercetare în scopul definirii și dezvoltării unor betoane ductile de ultra înalte performanțe. Aceste betoane denumite betoane din pudre reactive (BPR) au rezistențe la compresiune ce ating 200-800 N/mm² și energii de rupere care pot atinge 40000 J/m² [3].

La ora actuală, pe plan mondial, sunt cunoscute și alte betoane de ultra înalte performanțe denumite Slurry Infiltrated Mat Concrete (SIMCON) în SUA, Compact Reinforced Composite (CRC) în Danemarca și Béton Spécial Industriel (BSI) în Franța.

Începând cu anul 1990 în Franța se studiază un beton cu performanțe inedite denumit beton din pudre reactive (BPR), caracterizat prin proprietăți mecanice și de durabilitate remarcabile. Este denumit și beton de ultra înalte performanțe.

Betoanele din pudre reactive posedă pe lângă o rezistență la compresiune foarte ridicată ce poate atinge valori de 200-800 N/mm² și alte caracteristici

2.5 Betoane de înalte și ultra înalte performanțe 19

performante printre care etanșeitate la apă și gaze, punerea în operă fără armături pasive, rezistență la agenți chimici agresivi, rezistență la îngheț-dezghet ș.a.

Pentru obținerea betoanelor din pudre reactive se utilizează prafuri: ciment, nisip fin, cuarț măcinat, silice ultrafină, cu granule ce nu depășesc 0,6 mm. Prepararea se face în condiții asemănătoare cu ale betonului obișnuit, folosind însă un dozaj foarte scăzut de apă de amestecare. Utilizarea unui superplastifiant și a silicei ultrafine asigură reducerea raportului apă / liant la valoarea 0,15 sau chiar mai puțin.

Se consideră că performanțele BPR sunt date de microstructura lor care le conferă o porozitate foarte mică, o permeabilitate abia măsurabilă și o durabilitate excepțională. Comparată cu a betoanelor obișnuite s-a observat o modificare structurală completă a compușilor hidratați care conduce la o structură continuă a fazei liante la scară microscopică.

La nivel microscopic matricea BPR constituie un mediu aproape impermeabil pentru aer, agenții agresivi, cât și pentru ionii de clor. Lipsa aproape completă a porilor capilari determină o rezistență foarte mare la gelivitate. Adăugarea de fibre de oțel aduce BPR o creștere semnificativă a rezistenței la întindere și o ductilitate sensibil sporită, ceea ce permite realizarea de structuri fără armătură pasivă [3].

Efectele unui tratament termic mixt constând, în primă fază, într-o păstrare a probelor în autoclavă la 200 sau 300°C, urmată de o păstrare în etuvă la 300°C (tabelul 2.4 și fig. 2.5) [3].

Tabelul 2.4

Rezistența la compresiune funcție de tratamentul termic

Tipul betonului	Temperatura în autoclavă	Temperatura în etuvă	Rezistența la compresiune, N/mm ²
BPR cu fibre	300°C	-	279
	-	300°C	493
	200°C	300°C	474
BPR fără fibre	300°C	-	235
	-	300°C	385
	300°C	300°C	346

Acest tratament mixt favorizează formarea hidraților cristalini în condițiile hidrotermale din autoclavă, apoi deshidratarea probelor prin păstrarea în etuvă.

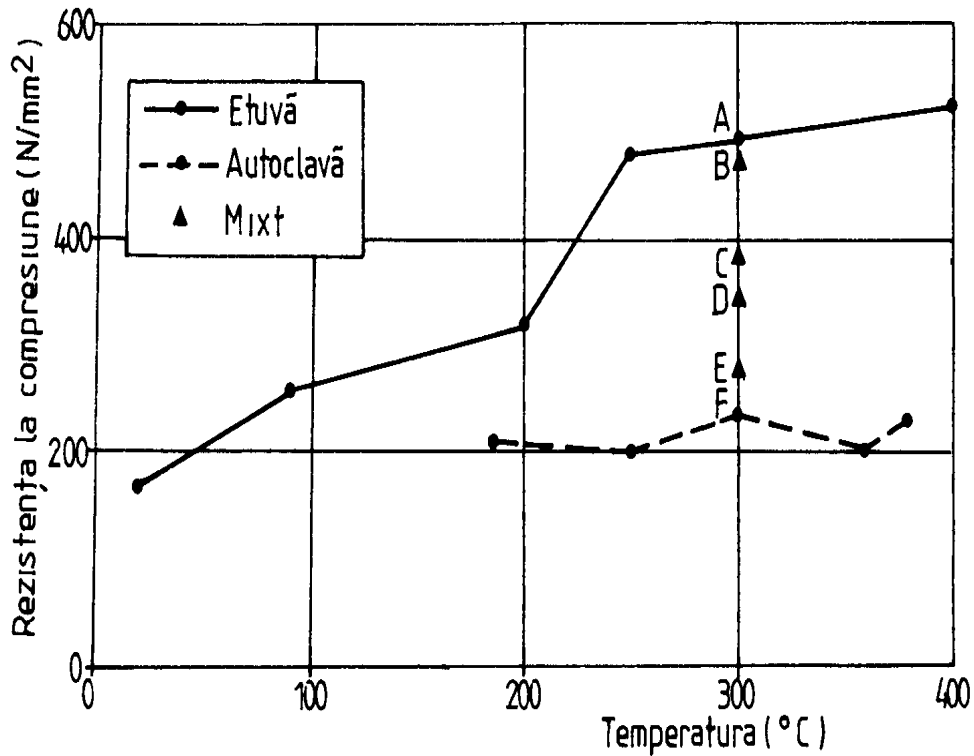


Fig. 2.5. Rezistența la compresiune funcție de temperatură

În fig. 2.5 curba reprezentată cu linie continuă corespunde rezistențelor la compresiune obținute pe probe din BPR cu fibre, cu diametrul de 7 cm, păstrate în etuvă la temperaturi cuprinse între 20 și 400°C. Curba reprezentată întrerupt corespunde rezistențelor la compresiune ale epruvetelor din BPR fără fibre, cu diametrul de 2 cm tratate în autoclavă la temperaturi cuprinse între 185 și 300°C. Punctele A, B, C, D, E și F corespund rezistențelor epruvetelor din BPR de 2 cm diametru, cu fibre (A, B, E) sau fără fibre (C, D, F) cu tratamente termice mixte [3].

Performanțele mecanice ale BPR sunt prezentate în continuare în tabelele 2.5 și 2.6 [3]:

Tabelul 2.5

Caracteristicile mecanice ale BPR

Caracteristica	BPR 200 (fără presare, tratament termic la 20-90°C)	BPR 800 (presare la 50 N/mm ² și tratament termic la 250-400°C)
Rezistența la compresiune, N/mm ²	170 - 230	490 - 680 (cu nisip cuarțos) 650 - 810 (cu agregate metalice)
Rezistența la întindere din încovoiere, N/mm ²	30 - 60	45 - 141
Modulul de elasticitate, N/mm ²	50000 - 60000	65000 - 75000
Alungirea de rupere la întindere, m/m	(5000 - 7000)×10 ⁻⁶	-
Energia de rupere, J/m ²	20000 - 40000	1200 - 20000

Tabelul 2.6

Caracteristicile mecanice ale BPR, comparate cu cele ale betoanelor obișnuite (BO) și ale betoanelor de înalte performanțe (BIP)

Caracteristica	BO	BIP	BPR
Rezistența la compresiune, N/mm ²	20 - 50	60 - 80	200 - 800
Rezistența la întindere, N/mm ²	4 - 8	6 - 10	15 - 140
Energia de rupere, J/mm ²	130	140	1000 - 40000
Deformația ultimă la întindere, 10 ⁻⁶ m/m	100 - 150	100 - 150	2000 - 8000

Comportarea BPR la acțiunea încărcărilor

a) Comportarea la compresiune centrică

Betoanele BPR 200 și BPR 800 au o comportare diferită la solicitarea de compresiune centrică. În fig. 2.6 este prezentată diagrama efort-deformație pentru un beton din gama BPR 200. Modulul de elasticitate (Young) este 64000 N/mm^2 , iar coeficientul lui Poisson are valoarea $0,22$. Limita de elasticitate liniară reprezintă 60% din rezistența de rupere. Ruperea corespunde unui efort mediu de compresiune de 200 N/mm^2 [3].

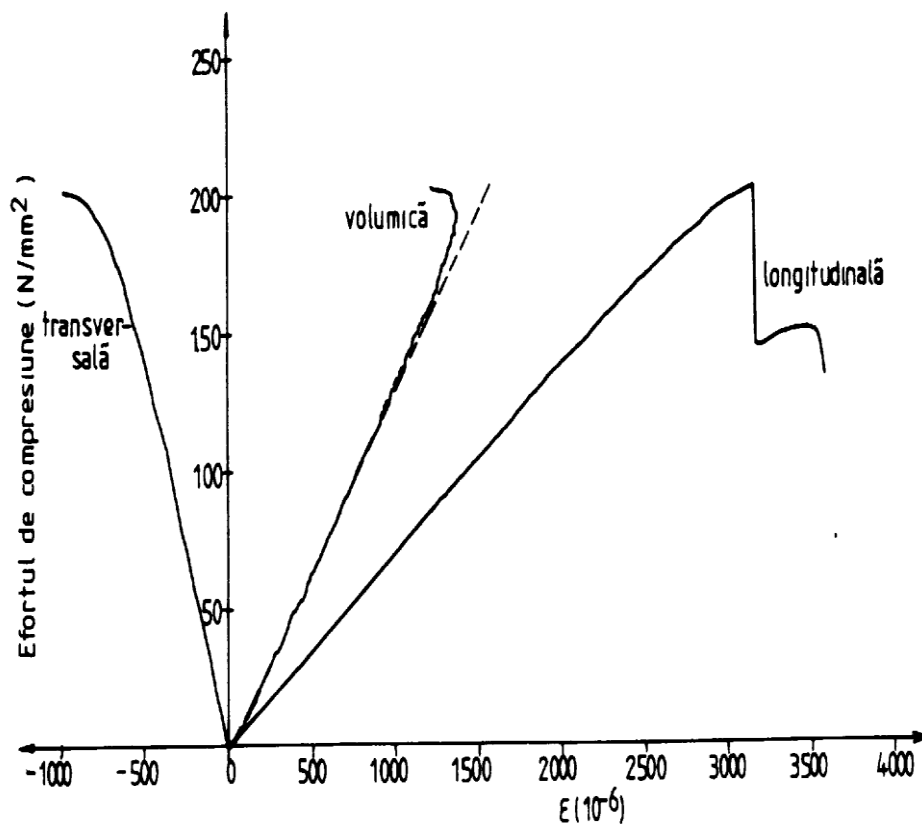


Fig. 2.6. Diagrama efort-deformație la compresiune centrică pentru BPR 200

Diagrama efort-deformație pentru un beton din gama BPR 800, presat înainte și în timpul prizei și tratat termic la temperaturi înalte, este dată în fig. 2.7 [3].

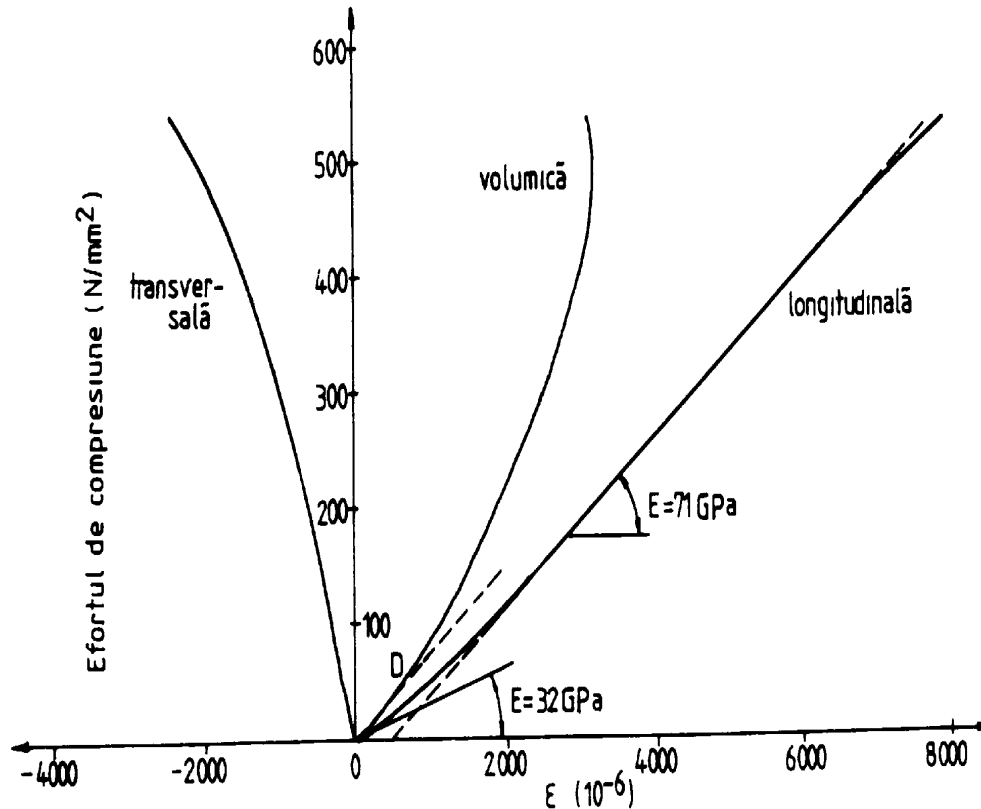


Fig. 2.7. Diagrama efort-deformație la compresiune centrică pentru BPR 800

Se constată diferențe de comportare față de BPR 200 și unele similitudini cu rocile naturale de tipul gresiei. BPR 800 nu are o comportare elastic-liniară la încărcări mici. Modulul lui Young crește progresiv de la 32000 la 71000 N/mm² când se ajunge în domeniul liniar-elastic care începe la un efort de compresiune ce reprezintă 5 - 10 % din efortul de rupere. Coeficientul lui Poisson trece din 0,19 în 0,28 în faza liniar-elastică. Începutul ruperii însoțit de o micșorare a modulului lui Young are loc abia după atingerea a 85 % din încărcarea de rupere. Comportarea care indică o consolidare a materialului sub încărcări mici se explică prin închiderea porozității apărute la tratamentul termic efectuat la temperatură înaltă. Punctul D din diagramă (fig. 2.7) semnalează schimbarea compresibilității BPR 800. De comportamentul de consolidare al BPR 800 trebuie să se țină seama în calculul structurilor, mai ales dacă acestea sunt precomprimate.

Principalele caracteristici mecanice măsurate la încercările la compresiune centrică sunt sintetizate în tabelul 2.7 [3].

Tabelul 2.7

Caracteristici mecanice la compresiune centrică ale BPR 200 și BPR 800 [3]

Caracteristica	BPR 200	BPR 800
Rezistența la compresiune, N/mm^2	194 - 203	422 - 520
Modulul de elasticitate în origine E_0 , N/mm^2	-	29 - 36
Modulul de elasticitate pe porțiunea liniară E , N/mm^2	62 - 66	63 - 74
Coeficientul lui Poisson	0,22 - 0,24	0,19 - 0,28
Limita de elasticitate liniară, % din rezistența de rupere	60	85

b) Comportarea la încovoiere

Comportarea la încovoiere a BPR 200 s-a verificat pe grinzișoare încercate la încovoiere în 4 puncte. Diagrama încărcare-săgeată la mijlocul deschiderii este redată în fig. 2.8 [3].

Diagrama permite identificarea unor caracteristici și anume: efortul de rupere egal cu 22 N/mm^2 , modulul de elasticitate egal cu 43000 N/mm^2 , limita de elasticitate liniară egală cu 55 % din efortul de rupere. Rezistența la încovoiere determinată după normele EN 196 pe epruvetele standardizate de 40×40×160 mm este de 32 N/mm^2 .

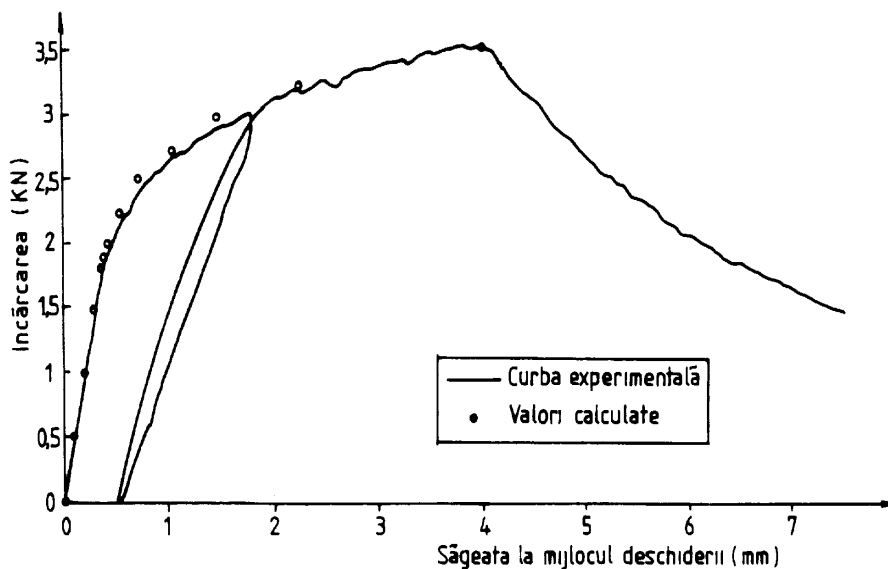


Fig. 2.8. Diagrama încărcare-săgeată la mijlocul deschiderii, pentru o grinzișoară (50×40×600 mm) din BPR 200 încărcată în 4 puncte

2.5.2. Betoane speciale industriale - BSI

Rezistențele mecanice ale BSI 150 sunt prezentate în tabelul 2.8. În același tabel sunt prezentate pentru comparație și rezistențele betonului din pudre reactive din gama BPR 200 [3].

Tabelul 2.8
Rezistențele mecanice ale BSI 150 comparativ cu cele ale BPR 200

Tipul betonului	Rezistența la compresiune, N/mm ²	Rezistența la întindere din încovoiere, N/mm ²
Beton special industrial BSI 150	150	17
Beton din pudre reactive BPR 200	170 - 230	30 - 60

Se constată că betonul special industrial are rezistențe mai mici decât betonul din pudre reactive din gama BPR 200 dar totuși superioare față de betonul de înalte performanțe. În acest context trebuie menționat că betonul special industrial, față de betonul din pudre reactive, prezintă marele avantaj că la întărirea lui nu este necesară utilizarea unui tratament termic.

Rezistența la întindere din încovoiere semnificativă este asigurată de fibrele de oțel care, de altfel, îmbunătățesc foarte mult și ductilitatea acestui material.

BSI posedă, ca și BPR și alte proprietăți sensibile îmbunătățite printre care: rezistența la îngheț-dezghet, rezistența la acțiuni chimice agresive, rezistența la uzură, la șoc ș.a.

2.5.3. Betonul compact cu fibre de oțel - BCFO

Unele caracteristici ale BCFO [3]

Tabelul 2.9

Caracteristica	Betonul compact cu fibre de oțel (BCFO)
Rezistența la compresiune, N/mm ²	150 - 400
Rezistența la întindere din încovoiere, N/mm ²	100 - 300
Modulul de elasticitate, N/mm ²	50000- 100000
Densitatea aparentă, kg/m ³	3000 - 4000
Durabilitatea	Nu s-au observat fenomene de coroziune de la începutul producerii BCFO (1986)

26 2. CARACTERISTICI FIZ.-MEC. ALE BETOANELOR SPECIALE FRECVENT UTILIZ.

Analiza datelor din tabelul 2.9 conduce la următoarele asemănări și diferențe, comparativ cu alte betoane de ultra înalte performanțe prezentate în cadrul celorlalte capitole ale prezentului tratat:

- rezistență la compresiune comparabilă;
- rezistență la întindere din încovoiere mult mai mare;
- modul de elasticitate cu valori mai mari pentru clasele superioare;
- densitate aparentă deosebit de ridicată;
- durabilitate asemănătoare.

2.5.4. Betonul din împâslitură de fibre de oțel injectată cu pastă – BIFOIP

Tabelul 2.10

Caracteristici mecanice la întindere centrică ale BIFOIP [3]

Cod amestec	f_{pu}^f , %	Modulul de elasticitate, N/mm ²	Rezistența la fisurare, N/mm ²	Deformația la fisurare, %	Rezistența la rupere, N/mm ²	Deformația la rupere, %
A	0	14145	1,20	0,008	1,20	0,008
B	2,16	18110	2,53	0,014	7,06	1,003
C	3,24	19370	3,40	0,019	9,85	1,430
D	4,31	20360	9,83	0,021	12,13	1,001
E	5,29	23680	6,39	0,027	16,90	1,122
f_{pu}^f - procentul volumetric de armare cu fibre de oțel						

Din tabelul 2.10 se constată că adăugarea de fibre conduce la creșteri ale modulului de elasticitate, rezistenței și deformației la fisurare, rezistenței și deformației la rupere.

Cercetări efectuate pe BIFOIP arată că fibrele de oțel îmbunătățesc, pe lângă rezistența la întindere, rezistența la oboseală, rezistența la șoc, ductilitatea ș.a.

3. POSIBILITĂȚI DE UTILIZARE ALE BETOANELOR SPECIALE

În prezent se derulează numeroase cercetări pentru evaluarea avantajelor pe care îl au utilizarea betoanelor speciale. Diferite tipuri de fbetoane utilizate și/sau cercetate prezintă o optimizare a proprietăților mecanice. Noile materiale asigură o creștere a durabilității, lucrabilității, ductilității și rezistențe mecanice sporite.

3.1. Betoane armate cu fibre de oțel

Betoanele armate cu fibre de oțel au fost utilizate în SUA în anul 1971 la repararea și ramforsarea îmbrăcăminților rutiere rigide. În prezent aceste betoane se folosesc la reparații și ramforsări în multe alte țări, cum ar fi: Anglia, Japonia, Canada și țări din Europa occidentală, având utilizare largă la lucrări și reparații în mine și tuneluri, la stabilizarea taluzurilor, reparații la deversoarele barajelor, la acoperișuri industriale, la fabricarea unor elemente prefabricate.

Totuși, în SUA, acest material a fost studiat și folosit cel mai mult până în prezent. Pentru lucrări de reparații betonul armat cu fibre de oțel s-a aplicat la rosturi deteriorate, zone exfoliate și deteriorate, margini rupte etc., caracteristicile tehnice ale acestor lucrări au fost apropiate celor ale soluțiilor cu rășini epoxidice, dar au avut un cost mult mai redus. În domeniul lucrărilor de mine și tuneluri, betonul armat cu fibre de oțel s-a aplicat la: consolidarea pereților și acoperișurilor pentru a putea preveni sfărâmarea rocilor; elemente de etanșare etc.

"US Army Corps of Engineers" a folosit un beton cu 1,5% (în volume) fibre de oțel de 0,25x12,7 mm și o grosime de 7,6 – 12,7 cm, în locul unui beton obișnuit, armat cu o plasă de armătură flexibilă și torcretat pe o grosime de 12,8 – 22,8 cm, pentru stabilizarea taluzurilor. Betonul cu fibre a fost pus în operă tot prin torcretare [4].

Betoanele armate cu fibre de oțel au o rezistență la compresiune mult mai mare decât cea a betoanelor obișnuite, precum și o comportare mai bună la întindere, împiedică formarea fisurilor și deasemenea prezintă deformații mai mici în timp.

Este bine cunoscut că după fisurare betonul dintre crăpături este tensionat și deci întărește răspunsul părții de beton armat supusă la întindere. Acest efect de întărire după fisurare poartă denumirea de "întărire - întindere".

După formarea primelor fisuri efortul mediu va începe să se reducă. Comportarea la aderență este un aspect cheie a procesului de întindere – întărire deoarece controlează abilitatea armăturii de a transfera eforturile de întindere betonului [4].

3.2. Betoane armate cu fibre de sticlă

Betoanele armate cu fibre de sticlă au început să fie fabricate în fosta URSS încă din anul 1941 având ca și liant cimentul aluminos. În Anglia s-au fabricat

28 3. POSIBILITĂȚI DE UTILIZARE ALE BETOANELOR SPECIALE

pentru prima dată în anul 1970, când s-au realizat sticle rezistente în mediul alcalin [6].

Principalele avantaje ale utilizării unor produse din beton armat cu fibre de sticlă, în locul produselor clasice, sunt: reducerea substanțială a greutateii elementelor, conducând la realizarea unor construcții mai ușoare, cu manipulare și transport mai economic; dimensiuni geometrice exacte; rezistențe mecanice (întindere, șoc) ridicate; rezistențe apreciabile la coroziune, la foc și la atacul insectelor și microorganismelor; economie de oțel.

Primele aplicații ale BFS au fost realizarea unor panouri monostrat folosite la placarea interioară și exterioară a clădirilor. Un astfel de exemplu îl constituie clădirea societății de asigurări "Credit Lyonnais Bank" din Londra. Panourile monostrat se realizează cu grosimi relativ mici și cu diverse nervuri de rigidizare, în funcție de necesități [6].

Repararea tencuielilor se poate realiza și cu ajutorul BFS utilizate ca și mortare pentru tencuieli, prezentând avantajul reducerii timpului de execuție, a unei impermeabilități mai ridicate și o reducere a propagării fisurilor datorate solicitărilor [6].

3.3. Betoane armate cu fibre de cânepă

În ultimii ani o multitudine de cercetări au avut în centrul atenției cânepa. Cercetarea asupra fibrelor de cânepă împletite a început în Germania cu 10 ani în urmă. Acest nou interes a apărut în urma eforturilor de a exploata enormele potențialuri a resurselor re folosibile în domeniile nealimentare, ca o alternativă economică împotriva taxelor scăzute din agricultură și a reducerii folosirii materialelor petrochimice brute, prin folosirea produselor ecologice [1].

Există multe motive pentru care fibrele de cânepă folosite la armarea structurilor de beton sunt sortite eșecului. În ceea ce privește proprietățile mecanice, fibrele de cânepă sunt mult în urma altor materiale. Pentru o stabilizare a unor produse de înaltă calitate este necesară egalizarea variațiilor naturale ale materialului. Rezistența sa și modulul lui Young depind de tipul și de sortimentul cânepii.

Cânepa conține acid silicic care nu rezistă la acțiuni alcaline, ceea ce duce la expansiunea alcalinelor și la fisurare [1].

3.4. Betoane armate cu fibre de carbon

Unele dintre fibrele de carbon utilizate sunt rebuturi rezultate în urma fabricării diversilor produși de carbon. Fibrele sunt confecționate din poliacrilonitril carbonizat, fiecare fibră având un diametru de 5 μm . De obicei fibrele de carbon sunt produse și vândute sub formă de colaci. Trei tipuri diferite de fibre au fost testate în Viena, Austria: întâi materialul a fost despicat, în al doilea caz materialul a fost mărunțit, iar în al treilea caz s-au folosit mici "bețișoare" [7].

Multe dintre proprietățile materialului pot fi comparate cu acelea ale oțelului, în plus, rezistența fibrelor de carbon la coroziune și magnetism poate fi privită ca un mare avantaj. În afară de fibrele de oțel, fibrele de carbon sunt privite ca fiind cele mai promițătoare tipuri de fibre pentru aplicații în domeniile ingineriei civile, dar să crezi un beton armat cu fibre înseamnă mai mult decât să adaugi fibre unui beton

obișnuit, implicând optimizarea scheletului granular pentru a garanta lucrabilitatea și proprietățile mecanice în ciuda proporției ridicate de fibre [7].

În anul 1996, din tavanul unei școli din Budapesta s-au desprins bucăți de beton. Clădirea a fost construită la începutul secolului. Investigațiile făcute au arătat că elementele portante ale tavanului erau grinzi de oțel I/60. Spațiul dintre grinzi era umplut cu beton cu zgură. Cea mai probabilă cauză a deteriorării a fost spargerea unei conducte de apă situată peste planșeu. Apa a produs și o ușoară coroziune a grinzilor de metal. Reabilitarea s-a făcut prin lipirea unor fâșii de fibre de carbon pe fața de jos a grinzilor. Rezistența betonului nu era adecvată pentru aplicarea fâșiilor. O rețea de fibre de sticlă a fost fixată tot în partea inferioară a grinzilor, pentru a evita în viitor desprinderile de beton [8].

La o clădire P+4 cu apartamente, în Budapesta, balcoanele care erau în consolă prezentau fisuri ale plăcii. S-a făcut o armare pe partea inferioară a plăcilor cu fibre de carbon. În final s-a aplicat o acoperire de mortar pentru mascarea acestei reabilitări [8].

În martie, 1999, în orașul Jaszberny din Ungaria, a fost necesară reabilitarea grinzilor distruse în urma unui incendiu. Această reabilitare avea în vedere și o mărire a capacității portante a fermelor din beton armat. S-au aplicat straturi succesive de fâșii de fibre de carbon [13].

3.5. Betonul special industrial (BSI)

Prima aplicație a betonului special industrial a fost făcută la centrala industrială de la Cattenom (Franța), fiind folosit la renovarea structurilor interne ale refrigeratoarelor. În acest scop s-au folosit grinzi și grinzișoare din BSI precomprimat. S-a avut în vedere greutatea redusă a acestor elemente, care nu impunea consolidarea fundațiilor existente, cât și rezistența chimică ridicată comparativ cu soluția utilizării unor grinzi din oțel. Grinzile au avut deschiderea de 14 m. Grinzișoarele au dimensiuni la fel de reduse cu cele realizate din BPR în prima etapă de consolidare: 24 cm înălțime, 6,9 m lungime, 5 cm grosimea inimii (cu o alură asemănătoare cu grinzile din oțel).

Având în vedere că BSI nu necesită utilizarea unui tratament termic, este evident că se poate utiliza atât la elemente prefabricate executate pe șantier cât și la elemente monolite. Se poate deci presupune o utilizare viitoare a lui la execuția unor lucrări de artă, a clădirilor înalte precum și la realizarea coșurilor de fum și a turnurilor de răcire [3].

3.6. Betonul compact cu fibre de oțel (BCFO)

Betonul compact cu fibre de oțel (BCFO) se poate considera, după compoziția și performanțele sale, ca făcând parte din categoria betoanelor din pudre reactive. El a fost studiat, dezvoltat și aplicat în Danemarca de către Societatea AALBORG PORTLAND.

A apărut în anul 1986 sub denumirea, păstrată și astăzi, de Compact Reinforced Composite (CRC).

Are la bază experiența dobândită de către Societatea AALBORG PORTLAND în urma utilizării așa numitelor materiale DSP (betoane cu matrice granulară compactă, cu un procent ridicat de superplastifiant și silice ultrafină, cu agregate de mare rigiditate provenite din bauxită sau granit) [3].

30 3. POSIBILITĂȚI DE UTILIZARE ALE BETOANELOR SPECIALE

Este rezultatul unor vaste programe de cercetare care au avut în vedere stabilirea comportării CRC referitoare la durabilitate, încovoiere, forță tăietoare, ductilitate, oboseală, aderența beton-armătură, șoc, compresiune triaxială ș.a, având ca scop final punerea în evidență a avantajelor utilizării acestui material în unele aplicații specifice.

Betonul compact cu fibre de oțel se poate considera, după compoziția și performanțele sale, ca făcând parte din categoria betoanelor cu pudre reactive; fiind studiat și dezvoltat în Danemarca de către Societatea AALBORG PORTLAND. A apărut în anul 1986 sub denumirea păstrată și astăzi, de CRC – Compact Reinforced Concrete, având proprietăți ultra performante [5]:

- rezistența la compresiune: 150 – 400 N/mm²;
- rezistența la întindere din încovoiere: 100 – 300 N/mm²;
- modulul de elasticitate: 50000 – 100000 N/mm²;
- densitatea aparentă 3000 – 4000 kg/m³;
- durabilitate foarte bună.

BCFO au fost utilizate în anul 1995 la un tunel important de pe un traseu feroviar de centură (Great Belt Link) în Marea Britanie, sub formă de plăci prefabricate pentru drenarea zonei căii de rulare. La acest proiect au participat specialiști din Anglia și Danemarca. S-a garantat integritatea într-un mediu agresiv a plăcilor, pentru o durată de exploatare de 100 de ani [3].

Utilizarea pe scară largă a betonului compact cu fibre de oțel a făcut obiectul a două proiecte de cercetare europene. La primul proiect au participat specialiști din Danemarca și Anglia și s-a finalizat prin utilizarea în 1995 a 42000 de plăci prefabricate din BCFO la un tunel important de pe un traseu feroviar de centură (Great Belt Link). Plăcile realizează drenajul din zona căii de rulare (fig. 3.1). S-a garantat integritatea într-un mediu agresiv al plăcilor pentru o durată de exploatare de 100 ani [3].

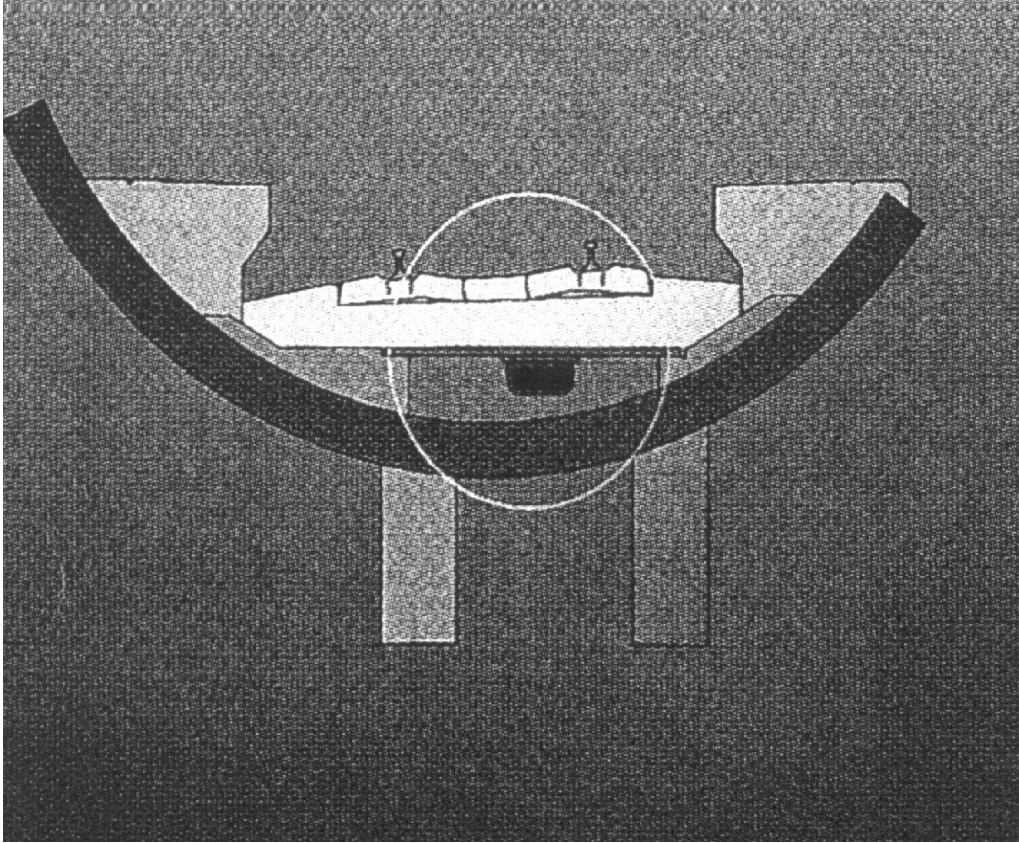


Fig. 3.1. Plăci de BCFO folosite la drenajul căii de rulare la un tunel

Cel de-al doilea proiect a fost rezolvat de specialiști din Danemarca, Franța și Spania și a urmărit utilizarea pe scară largă a BCFO pentru producerea de stâlpi și grinzi cât și pentru realizarea îmbinărilor.

Încercările privind aderența BCFO la armătură au stabilit că pentru bare de 8 mm diametru este suficientă o lungime de ancorare de numai 40-80 mm. Acest avantaj a făcut posibilă folosirea BCFO la îmbinarea unor plăci prefabricate de planșeu pentru construcția Universității din AALBORG. Îmbinările au avut lățimea de 100 mm și au fost amplasate la mijlocul deschiderii planșeelor [3].

Domeniile de utilizare indicate pentru BCFO, cât și motivațiile lor, sunt prezentate în tabelul 3.1 [3].

Domenii de aplicare ale BCFO

Domeniul de aplicare	Motivația
Stâlpi, grinzi și dale de planșeu	Rezistența ridicată care permite reducerea dimensiunilor
Îmbinări de elemente prefabricate	Aderența superioară care asigură reducerea dimensiunilor îmbinării Rezistența deosebită Durabilitatea excepțională Ductilitatea îmbunătățită
Structuri amplasate în zone seismice	Ductilitatea sporită Comportarea favorabilă la oboseală
Platforme marine	Rezistența chimică ridicată Ductilitatea și rezistența la oboseală sporite
Structuri supuse la impact	Rezistența la compresiune foarte mare Ductilitatea deosebită
Pardoseli	Rezistența mare la uzură
Protecții anticorozive	Rezistența chimică superioară

Funcție de inspirația proiectanților este posibil ca și alte aplicații să-și găsească rezolvarea prin folosirea BCFO.

3.7. Betonul din împâslitură de fibre de oțel injectată cu pastă (BIFOIP)

Betonul din împâslitură de fibre de oțel injectată cu pastă este un material nou dezvoltat în SUA. Este denumit Slurry Infiltrated Continuous-Fiber-Mat Reinforced Concrete (SIMCON). Se obține prin introducerea în cofraj a unei împâslituri din fibre lungi continue de oțel inoxidabil și injectarea rețelei dese de fibre cu o pastă fluidă pe bază de ciment. Datorită unui raport ridicat al aspectului (lungime / diametru) fibrelor, se obțin îmbunătățiri considerabile ale rezistenței, ductilității și procesului de fisurare, atingându-se o rezistență la întindere directă de până la 17 N/mm² corespunzătoare unei deformații de până la 1,5% pentru un procent volumetric de fibre de numai 5,29%. Pe de altă parte, împâsliturile de fibre sunt mai ușor de manipulat [3].

Cercetările privind utilizarea BIFOIP au arătat că noul material îmbunătățește rezistența la încovoiere și forfecare, capacitatea de absorbție de energie și durabilitatea.

Ductilitatea sporită asigurată de fibrele de oțel, rezistența la compresiune foarte ridicată (150-400 N/mm²), durabilitatea excepțională și posibilitatea utilizării unui procent ridicat de armătură sunt avantaje ale BCFO, care oferă inginerilor constructori șansa realizării unor noi soluții structurale comparativ cu cele obținute cu betonul obișnuit [3].

BIFOIP face parte din categoria betoanelor cu fibre de oțel de înaltă performanță (High Performance Fiber Reinforced Concretes - HPFRCs), din care mai face parte și betonul cu fibre de oțel injectate cu pastă (BFOIP) denumit Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON). Din toate betoanele cu fibre discontinue BFOIP este cel mai folosit. El se obține prin introducerea unui volum mare de fibre scurte în cofraje și injectarea lor cu o pastă fluidă pe bază de ciment. BFOIP a fost folosit pentru realizarea nodurilor cadrelor prefabricate amplasate în zone seismice și a grinzilor supraarmate, datorită creșterii, comparativ cu betonul armat obișnuit, a ductilității, rezistenței la întindere, a capacității de disipare a energiei și a eliminării necesității utilizării etrierilor. S-au obținut performanțe superioare și atunci când acest material a fost folosit pentru: pereți de separare rezistenți la impact în camerele cu echipament militar și arme; un model la scara 1/8 al unui buncăr pentru proiectile; dale prefabricate de 50 mm grosime așezate pe un suport de beton proaspăt la o parcare a unui aeroport. Apar, însă, unele dezavantaje la folosirea acestui material referitoare la controlul uniformității și calității distribuției fibrelor și la costul ridicat al împrăștierii manuale a fibrelor discontinue, care împiedică utilizarea lui pe scară largă. Aceste dezavantaje ale BFOIP pot fi eliminate prin folosirea BIFOIP.

Față de BFOIP, BIFOIP prezintă avantaje cum sunt [3]:

- reducerea volumului de fibre necesar atingerii îmbunătățirilor dorite pentru rezistență, ductilitate ș.a;
- un control mai eficace al orientării și distribuției fibrelor în direcție longitudinală și transversală;
- îmbunătățirea lucrabilității;
- controlul mai ușor al proprietăților materialului pe direcție longitudinală și transversală.

Caracteristicile BIFOIP îl recomandă pentru elemente structurale cum sunt stâlpii unde se cere o creștere considerabilă a rezistenței și a ductilității în direcție transversală. Împâsliturile din fibre de oțel livrate sub formă de suluri pot fi înfășurate în jurul elementelor din beton armat existente pentru lucrări de consolidare. Cercetări efectuate pentru consolidarea elementelor de beton armat la încovoiere și tăiere au arătat că acest material nou este foarte eficient pentru creșterea capacității portante, a energiei absorbite, ductilității și durabilității elementelor consolidate [3].

3.8. Betoane din pudre reactive (BPR)

Apariția la începutul anilor '80 a betoanelor de înalte performanțe a permis specialiștilor constructori să aducă inovații în proiectarea și execuția lucrărilor de artă (clădiri înalte, construcții monumentale, poduri ș.a.).

34 3. POSIBILITĂȚI DE UTILIZARE ALE BETOANELOR SPECIALE

Începând cu anul 1990 se afirmă un material de ultra înalte performanțe, realizat din pudre reactive și denumit, în Franța, betonul din pudre reactive (BPR). BPR tinde să revoluționeze tehnica realizării unor structuri și elemente de construcții prin dezvoltarea unor soluții noi și să devină un material concurențial pentru o serie de aplicații industriale.

Betoanele din pudre reactive constituie o familie nouă de materiale ale căror domenii de aplicare depind de mai mulți factori printre care: performanțele lor, costul, ușurința de preparare și punere în operă.

Cercetările efectuate până în prezent au condus la două game de betoane din pudre reactive și anume: BPR 200 și BPR 800 [3].

Betoanele din gama BPR 200, obținute fără presare și cu un tratament termic la 90°C pot fi preparate și puse în operă (malaxate și vibrată) în condiții apropiate cu ale unui beton obișnuit. Având în vedere ductilitatea foarte mare a acestor betoane, ca urmare a prezenței în compoziție a fibrelor de oțel, ele sunt recomandate pentru realizarea unor structuri lipsite de armături pasive. Pentru elementele încovoiate (grinzi și plăci) sau întinse (diagonale ale structurilor cu zăbrele) asimetria dintre performanța lor la tracțiune și la compresiune poate fi compensată prin precomprimare. La aceste structuri eforturile de întindere sunt preluate de precomprimare iar eforturile de compresiune, de strivire, tangențiale ș. a. sunt preluate direct de beton. Se pot obține în aceste condiții structuri de circa 3 ori mai ușoare decât cele realizate din beton obișnuit [11].

Prezența fibrelor de oțel care permite eliminarea armăturilor pasive, performanțele mecanice deosebite care asigură realizarea de elemente și structuri de dimensiuni mai mici și în consecință reducerea consumului de beton pot conduce la importante avantaje economice.

Înlocuirea în unele aplicații a betonului obișnuit cu BPR, permite printre altele, reducerea substanțială a consumului de materiale minerale (nisip și pietriș) a căror exploatare masivă provoacă o neliniște tot mai mare din punct de vedere ecologic.

Betoanele din gama BPR 800, care implică o presare înainte și în timpul prizei și un tratament termic la 250°C, pot fi utilizate doar pentru elementele prefabricate realizate uzinal. Aceste betoane prezintă o rezistență deosebită la impactul proiectilelor și în consecință ar putea constitui o soluție pentru realizarea, protecția și consolidarea structurilor și echipamentelor militare.

Întrucât BPR au pe lângă proprietățile mecanice excepționale și o microstructură foarte densă (compactă), care le conferă o etanșeitate și o durabilitate remarcabile, sunt indicate și pentru stocarea deșeurilor industriale și a deșeurilor radioactive.

Societatea BOUYGUES din Franța, renumită pe plan mondial în cercetarea, proiectarea și execuția construcțiilor deosebite, este puternic ancorată începând cu anul 1990 în studierea, producerea și aplicarea betoanelor din pudre reactive. Rezultatele obținute au condus la recomandarea utilizării BPR în următoarele domenii [3]:

- stații de epurare a apelor uzate;
- depozitarea deșeurilor industriale și radioactive;
- industria petrolieră;
- foraje și ambutisaje;
- exploatarea miniere;
- mecanică generală;
- construcții navale;
- construcții aeronautice;

- clădiri și lucrări publice;
- industria frigorifică;
- placarea și acoperirea unor suprafețe;
- industria chimică;
- mașini-unelte;
- echipamente hidraulice.

Unele din aplicațiile BPR sunt prezentate în continuare.

Aplicații în domeniul clădirilor și lucrărilor publice

Caracteristicile mecanice ale BPR permit realizarea unor structuri zvelte cu o reducere importantă a volumului de material pus în operă.

Eliminarea armăturilor pasive oferă o mare mobilitate în alegerea formelor. BPR se pretează în special la realizarea structurilor spațiale triunghiulare, tablierelor pentru poduri, grinzilor, stâlpilor, prefabricatelor pentru tuneluri sau pasarele, plăcilor de acoperire a fațadelor.

Prima lucrare de artă executată din BPR, în anul 1997, o constituie pasarela de la Sherbrooke (Canada), proiectată de Societatea Bouygues (Franța) (fig. 3.2) [3].

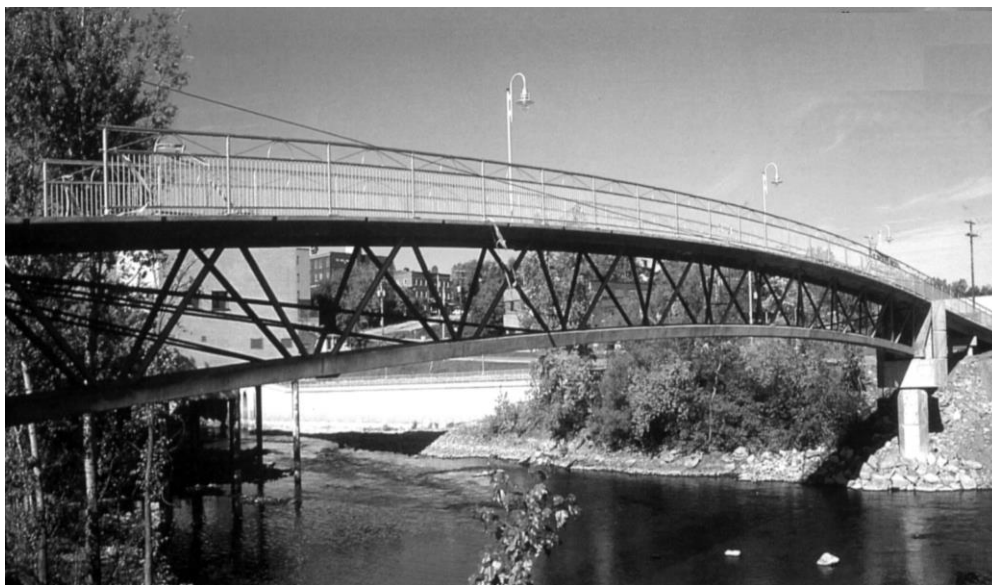


Fig. 3.2. Pasarela din Sherbrooke (Canada)

Pasarela are o deschidere de 60 m și este realizată din 6 elemente prefabricate, cu lungimea de 10 m și înălțimea de 3 m, asamblate prin postcomprimare. Prefabricatele reprezintă structuri reticulate tridimensionale, alcătuite dintr-o dală superioară din BPR nervurată având grosimea plăcii de 3 cm, diagonale din BPR turnat în țevi de inox cu diametrul de 15 cm și o grindă inferioară din BPR cu înălțimea de 38 cm. Fiecare prefabricat a fost supus unui tratament

36 3. POSIBILITĂȚI DE UTILIZARE ALE BETOANELOR SPECIALE

termic la 90°C, timp de 48 ore, care a condus la atingerea pentru BPR a unei rezistențe medii la compresiune de 200 N/mm² [3].

Un volum impresionant de BPR, de 823 m³, a fost utilizat, sub formă de grinzi și grinzișoare prefabricate precomprimate, la renovarea structurilor interne ale refrigeratoarelor din centrala nucleară de la Cattenom (Franța) (fig. 3.3). Rețeaua de grinzi este supusă acțiunii unor agenți agresivi fizico-chimici (îngheț-dezgheț, ape de deversare). Calitățile excepționale de etanșare și de rezistență la îngheț-dezgheț ale BPR au făcut ca acest material să fie utilizat pentru înlocuirea vechilor rețele de grinzi. Performanțele sale mecanice au condus la reducerea greutateii proprii a structurii de circa 3 ori și în consecință au micșorat costul fundațiilor. Grinzile au deschiderea de 14 m și înălțimea de 75 cm iar grinzișoarele au o deschidere de 6-6,9 m și o înălțime de 24 cm. Au fost supuse la un tratament termic la 90°C timp de 48 ore. Rezistența la compresiune medie a betonului a fost de 220 N/mm² [3].

BPR a fost utilizat și sub formă de panouri de fațadă. Acestea pot asigura în același timp funcțiunile mecanice și estetice. Astfel de panouri au fost utilizate la o clădire din Paris-Bercy (fig. 3.4). Ele au o suprafață de 6m² și o grosime de numai 15 mm. Prezența fibrelor de oțel conferă panourilor o rezistență la vânturi cu viteza mai mare de 300 km/h [3].



Fig. 3.3. Grinzi din BPR, utilizate la centrala nucleară din Cattenom (Franța)



Fig. 3.4. Panouri de fațadă din BPR, la o extindere a unei clădiri cu fațada din lemn

Se pot realiza mai multe forme de astfel de panouri de fațadă: plane sau curbe cu simplă și dublă curbură. Suprafața lor poate fi netedă, profilată, nervurată, strălucitoare sau mată. Pot fi colorate prin folosirea unor coloranți pulverulenți introduși în masa BPR sau a vopselelor din polimeri [3].

Aplicații industriale

Folosirea betoanelor din pudre reactive în industrie răspunde la o serie de cerințe care se referă la proprietăți diferite de cele corespunzătoare clădirilor publice. Aceste proprietăți se referă la stabilitatea dimensională, posibilitatea realizării unor forme cât mai variate, rezistența la uzură. Posibilitatea utilizării BPR în industria mecanică și chimică este demonstrată de următoarele aplicații [3]:

- execuția de mașini-unelte, unde BPR poate substitui fonta, toleranța dimensională fiind garantată la 10 micrometri;
- ancoraje pentru armăturile betonului precomprimat (fig. 3.5);
- containere de înaltă integritate pentru stocarea deșeurilor radioactive cu radioactivitate slabă și durată lungă de viață;
- dală-filtru pentru epurarea apelor uzate (fig. 3.6);
- plăci pentru pardoseli și blocuri pentru fixarea mașinilor (utilajelor) în medii industriale agresive.

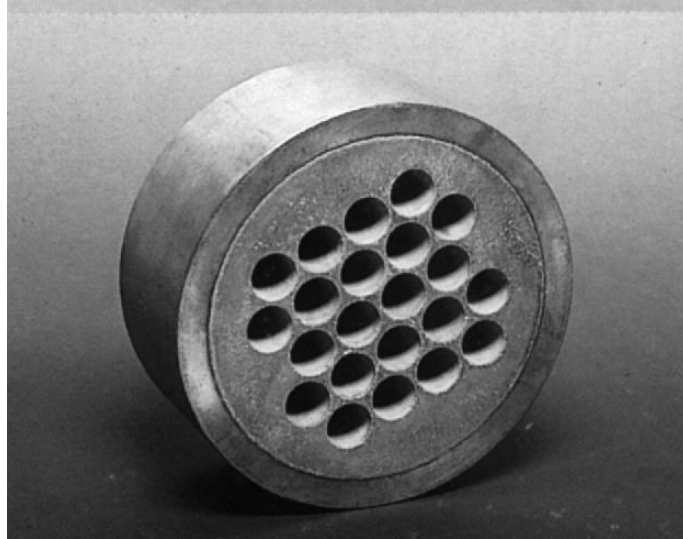


Fig. 3.5. Ancoraje din BPR pentru armăturile de precomprimare



Fig. 3.6. Dală-filtru din BPR pentru epurarea apelor uzate

Aplicații militare

Rezistența mecanică excepțională, combinată cu o ductilitate deosebită, recomandă acest nou material ca fiind foarte rezistent la acțiunea proiectilelor. Straturi subțiri din BPR pot asigura o protecție împotriva atacurilor balistice și a fragmentelor de obuze. BPR poate fi avut în vedere și pentru protecții împotriva noilor arme de mare putere distructivă [3].

3.9. Betoane ușoare

Betoanele ușoare au o mare dezvoltare în prezent, grație unor caracteristici tehnice care le fac deosebit de apreciate: densitate aparentă redusă, capacitate de izolare termică ridicată și rezistență la foc sporită, în comparație cu betoanele grele. Aceste caracteristici conduc la elemente de beton (simplu, armat sau precomprimat) cu greutate proprie redusă, bune termoizolatoare, ușor de prefabricat etc [1].

După domeniile de utilizare, conform C.E.B. și colocviul F.I.P. – C.E.B. – Copenhaga 1971, betoanele ușoare se clasifică astfel:

- 1. Beton ușor de rezistență (structură);
- 2. Beton ușor de rezistență și izolație;
- 3. Beton ușor termoizolator.

Betonul ușor de rezistență (structură) este denumit și *beton ușor compact*, este larg utilizat în numeroase țări. Astfel, au fost realizate elemente portante și neportante (panouri) pentru clădiri cu mai multe niveluri, elemente de acoperișuri pentru clădiri industriale, sportive și social-culturale, la poduri și viaducte (Rusia, S.U.A., Anglia, Germania, Belgia și în alte țări). Un exemplu elocvent privind eficiența tehnico – economică a betonului ușor compact îl constituie imobilul One Shell Plaza Building din Houston (Texas – S.U.A.), construit în 1970, care are 52 de etaje și 217 m înălțime și la care investiția totală a fost redusă cu 25% prin folosirea betoanelor ușoare din agregate cu sisturi expandate; s-au realizat betoane cu rezistența de până la 42 N/mm². La noi în țară s-au făcut studii și cercetări de laborator, precum și unele lucrări în diverse zone ale țării. Dintre lucrările mai importante realizate din beton ușor de rezistență cu granulit, se menționează: panouri mari autoportante pentru fațadele unor blocuri P+10E și P+4E în Timișoara, Cluj - Napoca și Iași; diafragmele de rezistență ale unor blocuri P+10E în Timișoara, Lugoj, Buziaș și Cluj – Napoca; elemente de închidere și de acoperiș pentru hale industriale; panouri prefabricate pentru planșee etc [1].

Betoane macroporoase (semicompacte) se utilizează la: blocuri de zidărie mici și mari, șape termoizolante, structuri termoizolante la panouri mari, plăci termoizolante, straturi de umplutură și de egalizare, drenaje și ca și înlocuitor al filtrelor inverse clasice în construcții hidrotehnice. Caracteristicile ce permit utilizarea betoanelor semicompacte în domeniile mai sus menționate sunt: datorită porilor de dimensiuni mai mari, au conductivitatea termică mai mare decât cea a betoanelor ușoare compacte cu aceeași densitate; permeabilitatea ridicată și rezistența la îngheț – dezgheț superioară betoanelor ușoare compacte, caracteristici provenite din existența golurilor specifice betonului macroporos, goluri care joacă rolul unor vase de expansiune pentru apa înghețată, permițând trecerea apei, nereținând-o [1].

Betoanele celulare au fost create la sfârșitul anilor 1930 în Suedia, cunoscând până în prezent o intensă răspândire datorită avantajelor pe care le au: densitate aparentă foarte redusă, caracteristici termotehnice superioare, rezistență bună la foc, prelucrare și manipulare cu mijloace simple, caracteristici mecanice ce le asigură un domeniu foarte larg de folosire. Aceste betoane au însă și mari neajunsuri, cum ar fi: absorbție mare de apă, neputând fi folosite în medii umede fără o barieră contra vaporilor; rezistență slabă la îngheț – dezgheț repetat și sunt friabile. Prezintă deasemenea contracții mari (5mm/m), armăturile și piesele metalice înglobate în masa lor sunt expuse coroziunii dacă nu se iau măsuri de protecție. Betoanele celulare autoclavizate sunt utilizate la realizarea de pereți exteriori autoportanți și neportanți, pereți portanți, pereți despărțitori, pereți din

40 3. POSIBILITĂȚI DE UTILIZARE ALE BETOANELOR SPECIALE

panouri mari preasamblate, pereți din blocuri mici la clădiri civile și industriale, planșee pentru clădiri civile, acoperișuri de hale industriale, izolarea termică a construcțiilor ș.a [1].

3.10. Betoane rutiere

Betonul de ciment se folosește ca îmbrăcămintă rutieră la autostrăzi, drumuri și străzi de orice tip, platforme de parcare, piste de aerodromuri etc. Betonul de ciment se mai poate folosi și la fundațiile acestor construcții, îmbrăcămințile fiind realizate din mixturi asfaltice. Folosirea îmbrăcăminților din beton de ciment, denumite sisteme rutiere rigide, necesită investiții inițiale mai mari la drumuri față de îmbrăcămințile asfaltice. Aceste îmbrăcăminți au însă avantajul unor cheltuieli de întreținere și reparații curente cu mult mai reduse decât mixturile asfaltice. În plus, perioada de serviciu a sistemelor rutiere rigide este cu mult mai mare în comparație cu sistemele rutiere nerigide. Rezultă că îmbrăcămințile din beton de ciment, prin calitățile lor, constituie una dintre soluțiile care corespund în bune condiții creșterii traficului rutier, ca număr de vehicule și sarcină pe osie [1].

În unele țări (S.U.A., Belgia) se folosesc în ultimul timp și îmbrăcăminți rutiere din beton armat, sau chiar beton precomprimat; aceste soluții conduc la obținerea unor straturi rutiere relativ suple, cu economii de beton de 25-28% și fac posibilă eliminarea rosturilor transversale, cu excepția celor de lucru (întreruperi de turnare) [1].

3.11. Betoane antiacide

Betoanele antiacide au proprietatea de a rezista la acțiunea mediilor acide, fiind folosite ca straturi de protecție a elementelor de beton la fundații de rezervoare și bazine, la căptușirea unor utilaje și agregate, la rosturile pardoselilor din plăci antiacide etc. În afara mediilor acide aceste betoane se folosesc și în medii cu agresivitate carbonică sau sulfatică și la dezalcalinizare, caz în care alegerea liantului folosit este foarte importantă [1].

3.12. Betoane rezistente la temperaturi înalte

Betoanele rezistente la temperaturi ridicate sunt acele betoane care își mențin caracteristicile fizico-mecanice esențiale în anumite limite, chiar după ce au fost expuse timp îndelungat unor temperaturi înalte. Clasificarea acestor betoane în funcție de temperaturile la care sunt folosite este prezentată în tabelul 3.2 [1].

Tabelul 3.2

Denumire	Refractaritatea (°C)	Temperatura de folosire (°C)
Beton termorezistent	<1500	200 - 1100
Beton refractar	1500 - 1790	1100 - 1300
Beton foarte refractar	>1790	>1300

Față de ceramica refractară, betonul refractar are următoarele avantaje: rapiditate de execuție, nu necesită ardere prealabilă, turnare în forme complicate, eliminarea rosturilor, rezistență mai mare la șoc termic și vibrații, preț de cost mai redus, conductivitate termică mult mai scăzută, durabilitate mai mare, permite reparația la cald sau la rece a agregatelor termice etc.

Folosirea betoanelor refractare a început să fie tot mai largă la: căptușirea unor agregate termice din industria siderurgică, metalurgică feroasă și neferoasă, industria ceramică și a sticlei, industria cimentului, industria chimică, tehnica nucleară [1].

3.13. Betoane aparente – decorative

Folosire la unele construcții sau elemente ale construcțiilor a betoanelor aparente este o soluție cu efecte estetice deosebite și avantaje economice globale evidente. Betonul aparent este folosit la elemente monolite și prefabricate – mai cu seamă panouri mari – ale clădirilor social-culturale și de locuit precum și la construcții industriale, sportive, de poduri etc., rezultând economii de manoperă și micșorarea consumurilor de materiale la execuție cât și la întreținerea ulterioară, în comparație cu soluțiile clasice cu aceeași valoare decorativă. Betoanele aparente se realizează cu parament natural obișnuit sau cu parament natural colorat [1].

3.14. Materiale pe bază de polimeri pentru protecția și/sau reabilitarea construcțiilor

Materialele pe bază de polimeri sunt foarte folosite pentru realizarea căptușirilor și acoperirilor. Polimerii, care pot fi de multe tipuri, au rolul de liant al diverselor materiale folosite pentru protecție, furnizând majoritatea proprietăților sistemului de protecție inclusiv rezistența la carbonatare și, în unele cazuri, flexibilitatea. În realizarea straturilor de acoperire sau căptușire se mai folosesc pigmentii pentru culoare și filer pentru obținerea grosimii și structurii suprafeței. Agentul purtător al polimerilor poate fi apa sau un solvent, încorporate în sistem pentru reducerea vâscozității și îmbunătățirea aplicării pe suprafața betonului. În general solvenții au un efect sporit în reducerea vâscozității, împiedicarea spălării premature, uscare rapidă și fac posibilă aplicarea la temperaturi reduse a sistemului de acoperire [2].

Dintre polimeri, cei epoxidici - EP sunt foarte utilizați în ciuda prețului relativ ridicat. Acoperirile cu polimeri epoxidici se pot prezenta sub forma emulsiilor, soluțiilor sau fără solvent și sunt în majoritatea cazurilor compuse din 2 substanțe de bază: rășinile lichide și agenții de întărire. Soluțiile de rășini epoxidice au, în general, vâscozitatea mai redusă decât sistemele fără solvent, deci vor avea un efect penetrant mărit în beton față de sistemele care folosesc apa. Rășinile epoxidice prezintă o excelentă aderență la beton, contracție scăzută și durabilitate ridicată la apă, acizi și baze. Dezavantajul major este tendința de carbonatare când sunt supuse la acțiunea razelor ultraviolete în mediu exterior, dezavantaj care poate fi redus prin îmbunătățirea tehnologiei. Rășinile epoxidice, în general, nu sunt așa flexibile ca și poliuretani. Polimerii epoxidici pot fi utilizați ca strat de aderență pentru alte acoperiri, ca film de protecție al suprafeței, sau ca liant pentru mortare de protecție. Pentru preparare este necesar a avea cantități bine precizate, o bună

42 3. POSIBILITĂȚI DE UTILIZARE ALE BETOANELOR SPECIALE

amestecare a componentilor și o pregătire îngrijită a suprafeței de beton. Întărirea se produce gradual într-o perioadă mai lungă de timp [2].

O altă categorie de polimeri folosiți pentru acoperiri sunt poliesterii - PES care se caracterizează prin polimerizare rapidă în comparație cu EP, fiind indicați pentru acoperirea unor suprafețe mari, așa cum sunt pistele de aerodromuri (aceste piste pot fi utilizate la o oră după acoperirea cu PES).

Acoperirile cu poliuretani - PU formează filme flexibile anti-carbonatate cu comportare excelentă la radiații ultraviolete, acțiunea solvenților exteriori și o foarte bună aderență la beton.. Principalul dezavantaj este susceptibilitatea la distrugerile provocate de îngheț-dezghet precum și de umiditate.

Polimerii furanici - FU se utilizează ca lianți la materialele de acoperire, având o bună rezistență la agenți chimici și la abraziune.

Rășinile acrilice sau metacrilice sunt foarte folosite datorită bunelor rezultate obținute. Fiind deschise la culoare permit obținerea unor acoperiri nepigmentate. Rășinile acrilice curate, neamestecate, dau un film mai puțin rezistent la carbonatate în comparație cu produsele pigmentate pe bază de rășini metil-metacrilice diluate cu o serie de solvenți care prezintă o excelentă rezistență la carbonatate. Aceste rășini sunt, deasemenea, durabile având durata de viață mai mare de 15 ani și rezistente la radiații ultraviolete [2].

Un alt tip de polimeri folosit pentru protecția betonului este clor-cauciucul cu care se execută acoperiri rezistente la umiditate, alcali și carbonatate. Clor-cauciucul prezintă și o anumită flexibilitate dar nu este rezistent la acțiunea radiațiilor ultraviolete.

Limitarea folosirii acoperirilor pe bază de polimeri provine din lipsa de flexibilitate a filmelor de protecție realizate. Astfel, în zonele unde betonul fisurează filmul de acoperire poate el însuși fisura permițând accesul direct al agenților externi corozivi. Metoda tradițională de mărire a flexibilității constă în adăugarea unui plastifiant extern ceea ce duce, însă, la formarea de murdărie pe suprafața acoperirilor. Aceasta deoarece agentul plastifiant nu este încorporat în structura polimerului și continuă să fie eliminat la suprafața acoperirii chiar după ce sistemul a fost tratat, ceea ce duce la atragerea murdăriei. Soluția la această problemă o reprezintă rășinile acrilice flexibile care încorporează agentul plastifiant în polimerul de bază (plasticizare internă) și care prezintă toate proprietățile rășinilor acrilice convenționale, adică rezistența la carbonatate, stabilitatea la radiații ultraviolete, precum și capacitatea de acoperire a fisurilor cu deschidere (0 - 3) mm [2].

Polimerii pot fi folosiți și la impregnarea suprafețelor elementelor de beton, urmată de aplicarea a 2 sau 3 straturi de polimeri ceea ce asigură o foarte bună impermeabilitate și rezistență la îngheț-dezghet. Pentru realizarea impregnării, polimerul trebuie să aibă o vâscozitate scăzută și să nu conțină solvenți volatili. Folosindu-se polimeri epoxidici EP se pot obține penetrări de până la 10 mm; micșorarea vâscozității se poate realiza prin ridicarea temperaturii polimerului și betonului.

O altă soluție pentru acoperiri și căptușiri de protecție o reprezintă finisajele pe bază de ciment. Aceste sisteme sunt folosite, în general, pentru aspectul estetic plăcut și uneori furnizează și protecția elementelor din beton. Cele mai utilizate soluții de acest gen sunt materialele cu proprietăți modificate datorită polimerilor, rezultatul fiind un finisaj comparativ mai ieftin, cu o durabilitate rezonabilă combinată cu capacitatea de a adera la suprafețe umede. Probleme apar când se folosesc polimerii foarte ieftini cum ar fi poliacetatul de vinil care nu este suficient de rezistent. Cu aceste materiale, degradarea acoperirilor poate fi extrem de rapidă. Recent s-a dezvoltat utilizarea rășinilor acrilice foarte flexibile care împreună cu

cimenturile dau un produs cu un grad de flexibilitate suficient pentru urmărirea deformațiilor și deplasărilor din fisurile fine existente în beton. S-au propus în ultimul timp ca soluții pentru bariere contra clorurilor și dioxidului de carbon, finisaje care conțin "materiale care dezvoltă cristale" care se presupun că migrează în porii substratului de beton și cristalizează blocând acești pori. Totuși există rezerve asupra performanțelor acestor materiale.

În America de Nord s-a inițiat dezvoltarea sistemelor combinate care au atât o excelentă rezistență la clor, cât și calități excepționale anti – carbonatare. Unul dintre sistemele cu cele mai bune rezultate constă într-un strat primar de silani/siloxani acrilici plus o acoperire superioară de rășini acrilice pigmentate. În acest sistem, stratul primar conținând silan/siloxan cu vâscozitate și volatilitate redusă penetrează substratul de beton obținându-se rezistența la săruri solubile în apă. În completare, procentul mic de rășină epoxidică conținut în sistem acționează ca un stabilizator și condiționează porozitatea. Acoperirea superioară este o rășină epoxidică pigmentată, un film format peste suprafața betonului care dă sistemului rezistență la carbonatare. Combinația celor 2 substanțe dă posibilitatea eliminării din structură a vaporilor de apă potențial dăunători. Două straturi de acoperire superioară sunt necesare pentru a minimiza posibilitatea apariției unor orificii, pori care vor reduce semnificativ proprietățile generale ale sistemului [2].

Sistemele flexibile sunt necesare în zonele deformabile iar acoperiri texturate sunt cerute pentru a masca imperfecțiunile grosiere ale substratului de beton. Trebuie reținut faptul că sistemele texturate folosite singure nu oferă, în general, o barieră suficientă anti-carbonatare datorită filmului limitat de substanță constituit între imperfecțiunile cu profil ridicat. Deci, dacă este cerută rezistență la carbonatare, va trebui aplicat suplimentar un strat superior de acoperire.

3.15. Domeniile de utilizare ale betoanelor cu polimeri fără ciment

- Domeniile de utilizare ale betoanelor cu polimeri fără ciment sunt [2]:
- protecții superficiale ale elementelor de construcții din beton, metal și zidărie împotriva acțiunii corozive a diversilor agenți, cât și pentru mărirea impermeabilității acestor elemente. Betonul cu polimeri se poate folosi pentru protecții superficiale la silozuri, buncăre, rezervoare etc., fiind un material impermeabil și cu mare rezistență la abraziune mecanică și agenți corozivi;
 - monolitizarea prefabricatelor, închiderea rosturilor și repararea unor elemente fisurate și deteriorate din beton armat și precomprimat. În astfel de lucrări cele mai bune rezultate s-au obținut cu betoanele cu EP.
 - straturi de protecție și uzură la drumuri peste îmbrăcămintile de beton, cât și la repararea acestora;
 - utilizarea betoanelor cu polimeri furanici este extinsă în țările fostei U.R.S.S. la lucrări hidrotehnice, miniere sau diferite elemente portante. Astfel s-au reparat deversoarele de la cinci baraje din sistemul de irigații din Republica Uzbekă. În domeniul lucrărilor miniere, s-au executat și folosit la minele din Dombas peste 20000 de elemente de susținere sub forme de montanți și traverse.

44 3. POSIBILITĂȚI DE UTILIZARE ALE BETOANELOR SPECIALE

În SUA betonul cu polimeri (BP) se aplică cu succes la reparația tablierelor de poduri și la realizarea panourilor mari pentru construcții, a pavajelor industriale și a canalizărilor.

La noi în țară, betoanele cu polimeri au fost executate sub asistența tehnică a INCERC, cu scopul utilizării lor la lucrări cum ar fi [2]:

- la Aeroportul Otopeni s-au fixat 250 de lămpi de balizaj folosindu-se mortar epoxidic pentru umplerea orificiilor cilindrice special create în pista aeroportului;
- la Uzina de apă – Arad, au fost etanșate 21 de cuve cu rosturi de turnare și zone de beton segregat;
- remedierea a 25 de grinzi de beton armat fisurat, la Întreprinderea Electroputere Craiova;
- reparația a 60 de grinzi fisurate, alcătuite din beton precomprimat, la o întreprindere de prefabricate din București;
- reparația și consolidarea unor structuri și elemente avariate în urma cutremurului din 4 martie 1977.

3.16. Microbetonul fluid

Microbetonul fluid a fost folosit inițial la reparația grinzilor longitudinale la o autostradă din Marea Britanie, grinzi afectate de clorurile ce au pătruns prin rosturile de îmbinare ale îmbrăcăminții drumului. Aria afectată a fost de aproximativ 0,25 m², fiind considerată prea mare pentru o reparație obișnuită cu mortar aplicat manual. Microbetonul utilizat în acest caz a fost conceput astfel încât să prezinte o bună curgere, dar să nu prezinte segregare și să nu picure din locurile unde este folosit [1].

Un alt exemplu de utilizare al microbetonului fluid este reparația unor grinzi și a marginilor unor balcoane din beton la un zgârie – nori din New York. Grinzile erau de 7,5 m lungime, iar în unele locuri de 15 m lungime. După pregătirea suprafeței de beton și curățarea armăturilor, s-a fixat cofrajul pentru a forma profilul corect. Deoarece în unele zone acoperirea de beton inițială nu era suficientă, microbetonul fluid a fost turnat pentru a îndeplini acest neajuns, astfel încât secțiunile originale ale grinzilor s-au mărit cu 25 mm, asigurându-se totodată și o protecție suplimentară armăturilor. 11 kilometri de grinzi și margini de balcoane au fost reparate cu ajutorul procedurii de mai sus.

La reparațiile efectuate la centura orașului Coventry, din Anglia, microbetonul fluid a fost de asemenea utilizat. Centura a fost executată în 1970 și are structura supraînălțată pe un număr mare de grinzi transversale. Probabil datorită unui număr mare de scurgeri de săruri de cloruri printre îmbinări, combinate cu carbonatarea betonului, armăturile din grinzile transversale s-au corodat. Această coroziune a dus la fisurarea și exfolierea acoperirii de beton [1].

Reparația acestor grinzi a reprezentat o adevărată provocare pentru toate materialele ce puteau fi folosite. Grinzile transversale erau la aproximativ 17 metri înălțime, iar armăturile lor erau dispuse foarte des. Datorită mărimii grinzilor, fiecare de aproximativ 16 metri lungime, era necesară o cantitate mare de material pentru efectuarea reparațiilor, și totodată reparația nu trebuia să dureze un timp îndelungat. Acești factori au făcut ca aplicarea tradițională, manuală sau pulverizarea mortarului obișnuit pentru reparații, să fie imposibilă. Microbetonul fluid s-a dovedit a fi cel mai adecvat material. Datorită naturii foarte fluide a acestui material, el poate curge printre armăturile dese și formează un contact intim între

armături și substrat. Microbetonul fluid poate fi aplicat prin pompare; putând fi preparat la nivelul solului și apoi pompat continuu în cofrajele din jurul grinzilor. Acest procedeu a redus considerabil timpul necesar reparațiilor [1].

3.17. Betoane cu contracții reduse

Fisurarea betonului în timpul contracției este o problemă complexă care depinde de nivelul contracției, de condițiile prevăzute pentru a împiedica contracția, de proprietățile materialului cum ar fi: modulul de elasticitate, rezistența la întindere a betonului etc. Pentru stabilirea rezistenței la fisurare, nivelul maxim al contracției, deși nu este suficient, poate fi totuși un indiciu cheie [22].

Performanțele pe care trebuie să le prezinte betoanele utilizate în prezent sunt în continuă creștere, pentru a satisface cerințele societății aflate într-un progres continuu. Depășirea barierelor impuse de conținutul minim de apă al betoanelor, pentru a avea o anumită lucrabilitate, s-a realizat cu ajutorul superplastifiantilor, rezultând betoane de înaltă performanță cu o durabilitate superioară și integritate mecanică de lungă durată [14]. Și alte caracteristici critice referitoare la performanțele betoanelor au beneficiat recent de dezvoltarea tehnologiei de amestecare și preparare; cum ar fi contracția betonului – caracteristică de o importanță deosebită la proiectarea structurilor cu deformații împiedicate unde pot apărea fisuri nedorite ale betonului. Dezvoltarea și utilizarea aditivilor reducători ai contracției betonului la uscare a început încă din anii 1980 în Japonia și SUA, astăzi acești aditivi se găsesc pe piața produselor pentru betoane, iar utilizarea lor reduce substanțial deformațiile de contracție la uscare. Acești aditivi sunt în general polimeri organici care reduc tensiunea superficială a apei din structura betonului. Utilizarea lor dizolvați sau dispersați în apa de amestecare necesară fabricării betonului, duce la micșorarea tensiunilor capilare în porii structurii betonului, reducându-se totodată deformațiile de contracție la uscare. Acest mecanism este foarte diferit de cel produs de alți componenți care compensează contracția prin producerea unei expansiuni a betonului [15].

3.18. Structuri existente realizate cu betoane de înaltă performanță

3.18.1. Clădiri

Pentru realizarea construcțiilor înalte, cu o suprafață de planșee mare și o reducere a secțiunilor stâlpilor, se utilizează betoane de înaltă performanță cu o rezistență cubică de 120 MPa.

Clădirea destinată Parlamentului European din centrul orașului Bruxelles, Belgia, construită în anul 1992, are 4 niveluri la subsol și 24 de niveluri supraterane, dimensiunile în plan fiind: 80 x 260 m. Stâlpii prefabricați sunt realizați din BIP, având secțiuneade 1000 x 440 mm și armarea 18 ϕ 40 mm. Lungimile stâlpilor sunt de 12 m. S-a ales utilizarea BIP pentru a reduce secțiunea transversală a stâlpilor de la subsol, precum și pentru creșterea vitezei de construcție.

Prima utilizare în Germania a BIR (beton de înaltă rezistență) a fost în Frankfurt pe Main la BfG Building – construcție datând din 1990 – 1992, având 182

46 3. POSIBILITĂȚI DE UTILIZARE ALE BETOANELOR SPECIALE

m înălțime, 47 niveluri supraterane și 4 niveluri la subsol. Pentru realizarea unor rezistențe mai înalte a betonului, care să permită reducerea dimensiunilor stâlpilor și o economie de armătură, s-a utilizat un beton de clasă C 85 aplicat prin pompare pentru realizarea unor stâlpi de secțiune de 1,20 x 1,20 m și a unor pereți structurali la nivelurile inferioare.

În Seattle, statul Washington, clădirea cu 56 niveluri *Two Union Square* (fig.3.7), datorită cerințelor arhitecturale, a fost concepută cu forme exterioare curbe, zone fără stâlpi și o distanță curentă între stâlpii exteriori de 14 m. Structura aleasă a fost mixtă, oțel – beton, iar stâlpii circulari au fost umpluți cu un beton cu o rezistență de 131 MPa și modulul de elasticitate de 50 000 MPa. Betonul de înaltă performanță a fost ales pentru calitatea sa de a realiza niveluri ridicate de rigiditate axială, la un cost foarte rezonabil per ansamblu. Execuția a fost programată noaptea, pentru a asigura un ritm ridicat și a evita staționări ale transportoarelor cu beton cauzate de aglomerația de trafic în cursul zilei, iar producția fabricii de beton a fost axată în totalitate numai pe producerea betonului de înaltă rezistență [3].



Fig. 3.7. Two Union Square, Seattle, SUA

În Kuala Lumpur Citz Centre, Malaiezia, două clădiri turn de 450 m înălțime, în construcție în 1994, au fost proiectate cu beton clasa 80 MPa în nucleu și stâlpi la nivelurile inferioare, reducând rezistența betonului pe înălțime la 60 MPa și apoi la 40 MPa. Modulul de elasticitate minim prevăzut pentru clasa 80 MPa a fost de 35 500 MPa la 56 zile.

3.18.2. Poduri

BIP sau BIR se utilizează în special la realizarea structurilor podurilor, prezentând următoarele avantaje tehnice și economice [3]:

- posibilitatea realizării unor secțiuni transversale mai reduse;
- pierderi de precomprimare mai mici;
- eforturi unitare de lucru mai mari;
- durată de viață mai mare;
- rezistență la abraziune.

În Danemarca, Great Belt Link, constituie o conexiune majoră între poduri și tunele care leagă părțile de est și de vest ale Danemarcei și asigură comunicația între țările scandinave și continentul european. Construcția s-a desfășurat în anii 1988 – 1998. Partea centrală a podului de șosea, de 6800 m, este constituită dintr-un pod suspendat cu deschiderea principală de 1624 m, piloni de 254 m înălțime, iar podul Vest are structura alcătuită din grinzi prefabricate de 110 m.

Pentru durata de serviciu stabilită la 100 de ani prin proiect, atât experiența scandinavă cât și experiența internațională au concluzionat că rezistența la pătrunderea clorului și durabilitatea betonului obișnuit nu sunt suficiente. Pentru protecția armăturilor s-au conceput, prin proiectare, bariere constând dintr-un beton cu impermeabilitate ridicată, combinat cu o grosime de 50 și 75 mm la suprafețele expuse. La stabilirea compoziției betonului au stat investigații asupra performanțelor in situ ale structurilor marine din zonă, precum și diferite cercetări experimentale pe probe cu diferite compoziții expuse în condiții de laborator și de amplasament.

Compoziția finală pentru betonul ales este:

- | | |
|--|----------------------|
| - raport A/C | $<0,35$ |
| - conținut total de apă | $<135 \text{ l/m}^3$ |
| - conținut zgură ultrafină | $>10\%$ |
| - conținut SUF | $5 - 8\%$ |
| - conținut zgură ultrafină+SUF | $<25\%$ |
| - antrenor de aer pentru expunere la îngheț – dezgheț. | |



Fig. 3.8. Great Belt Link, Danemarca – grindă prefabricată

48 3. POSIBILITĂȚI DE UTILIZARE ALE BETOANELOR SPECIALE

În Japonia, CNT Super Bridge, este un pod pietonal cu o singură deschidere, realizat în 1993, pentru a lega două clădiri. Pentru a reduce, din cerințe estetice, înălțimea grinzii de beton precomprimat cu secțiune transversală casetată, s-a adoptat un beton de înaltă rezistență de 102 MPa, rezultând un raport secțiune deschidere foarte scăzut: 1/40 [3].

3.18.3. Platforme de foraj marin

În Marea Nordului, începând cu anii 1995, s-au realizat platforme plutitoare semisubmersibile, din BIR cu agregate ușoare, ancorate cu tiranți la amplasament:

The Troll gas platform, Norvegia, este o platformă cu bază de gravitate, proiectată cu o durată de serviciu operațională de 70 de ani. Platforma are o înălțime de 370 m, în apă cu adâncimea de 302 m, cu un volum de beton de 234000 m³ (fig.3.9).

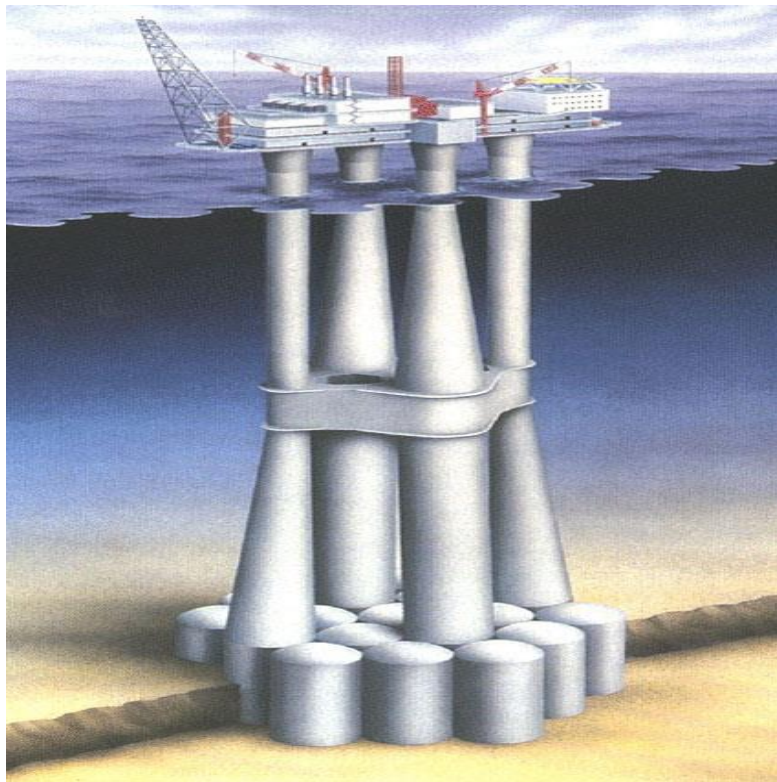


Fig. 3.9. The Troll gas platform, Norvegia

Rezistența caracteristică a betonului a fost de 80 MPa pentru o densitate normală de 2,5 t/m³ a amestecului. Rezistența caracteristică la 28 de zile a fost 82 MPa, cu modulul de elasticitate de 29500 Mpa [3].

Tabelul 3.3

Caracteristici și domenii de utilizare a diferitelor tipuri de betoane

Denumire	Caracteristici	Domenii de utilizare
Umpluturi fluide	Rezistență scăzută (<0.5MPa), contracții reduse	Umpluturi
Beton permeabil	Agregat monogranular, conținut scăzut de ciment, rezistență medie (5 – 30 MPa), consistență vâscoasă	Placi, țevi de irigații
Beton impermeabil	Raportul A/C scăzut (<0.45)	Rezervoare, pavaje la stații petroliere
Beton autoclavizat (gazbetonul)	Bulele de aer ocupă 30 – 80% din volumul total, A/C =0.5 – 0.6, densitatea în stare uscată: 150 – 1550 kg/m ³ , Rc=0.5 – 10MPa, rezistență bună la îngheț	Izolații termice ale clădirilor, bazinelor de înot, etc.Elemente structurale și zidării.
Beton rezistent la temperaturi scăzute	Conține bule de aer antrenate într-o contitate și cu dimensiuni controlate, agregate rezistente la îngheț. Are permeabilitatea scăzută.	În zone cu temperaturi scăzute; la rezervoare frigorifice
Betoane hidraulice	Aderență ridicată datorată unor adaosuri speciale	Pentru betoane sub apă
Beton torcretat	Întărire rapidă, lucrabilitatea și aderența corespunzătoare pentru aplicare	Reabilitări, reparații în mine, tunele, rambleuri
Betoane decorative	Au în compoziție ciment alb și/sau pigmenți	Scopuri arhitecturale
Beton prefabricat	Necesită de obicei tratament termic, se întărește rapid și atinge în timp scurt rezistențe ridicate	Elemente structurale
Betoane pentru medii agresive	Permeabilitate scăzută (A/C scăzut), materiale componente rezistente la medii agresive, tratamente de suprafață	Structuri expuse mediilor agresive
Beton armat cu fibre	Fibre (oțel, sintetice, sticlă) sunt adăugate pentru îmbunătățirea rezistenței la fisurare, durabilității	Pardoseli industriale, elemente impermeabile, rezistente la explozii, impacte
Betoane ultra performante	Raportul A/C scăzut, praf de silice, agregate speciale, fibre	Elemente struct. performanțe sporite, piese supuse uzurii

4. BETOANE CU CONTRACȚII REDUSE

4.1. Con tracția betonului – scurte noțiuni teoretice

Betonul vine pe șantier cu două caracteristici garantate: se va întări și va fisura. Este important a se menționa că fisurile datorate contracției la uscare reprezintă pricipalele plângeri în domeniul construcțiilor.

Pe plan internațional și național beneficiarii au următoarea percepție: dacă apar fisuri în beton la uscarea acestuia se crede că produsul este eșuat.

Fisurarea nu poate fi înlăturată total, poate fi însă redusă sau controlată dacă se iau măsuri speciale în acest scop. Fisurarea betonului poate apărea înainte sau după întărirea acestuia. Poate fi cauzată de un singur factor sau de o combinație de mai mulți factori cum ar fi: contracția la uscare, contracția termică, condiții de rezemare (interne sau externe), încărcări etc.

În anul 1980, în Japonia, s-au publicat primele studii referitoare la aditivii reducători ai contracției betoanelor. Aditivii testați fiind în general polimeri organici cu proprietăți de reducere a tensiunii superficiale a apei din beton. Shoya, în anul 1990, precum și Balogh, în anul 1996, au arătat că la dizolvarea sau dispersia acestor aditivi în apa utilizată la prepararea betonului duce la reducerea eforturilor capilare din structura porilor betonului, fapt ce conduce în final la micșorarea deformațiilor betonului datorate contracției. Acest mecanism este foarte diferit de cel dat de utilizarea altor aditivi în beton pentru reducerea contracției, care aveau ca și rezultat final o expansiune a masei de beton.

Studiul realizat de către Shoya și alții în 1990, pe paste de ciment și pe betoane cu aditivi reducători ai contracției de pe piața japoneză, demonstrează o reducere a deformațiilor datorate contracției la uscare. Se arată, deasemenea, că pierderea în greutate datorită uscării betonului, crește proporțional cu adaosul aditivilor reducători de contracție, fapt ce duce la concluzia că efectul de reducere a contracției a acestor aditivi nu poate fi atribuit unei întârzieri a procesului de uscare și întărire a betonului. Aceeași autori au analizat și comportarea la uscare a unor elemente din beton ce prezentau contracții împiedecate, concluzia finală fiind aceea că, aditivii reducători ai contracției au ca și efect o reducere semnificativă a tendinței de fisurare a betonului.

La Universitatea Northwestern din SUA, în anul 1992, Shah ș.a., apoi în 1999, Weis ș.a., au stabilit că pe lângă efectul de reducere al contracțiilor libere la uscare ale betonului, aditivii reducători ai contracției, reduc, deasemenea, volumul macroporilor prezenți în pasta de ciment întărită, permeabilitatea betonului și lățimea fisurilor în betonul cu contracții împiedecate la uscare. Rezistențele la compresiune și întârzierea prizei cimentului sunt două efecte secundare produse de către acești aditivi, subliniate și de către autorii mai sus menționați.

În literatura de specialitate sunt definite patru tipuri de contracții:

- 1. Con tracția plastică – are loc în betonul proaspăt datorită pierderii de umiditate înainte de începerea prizei pastei de ciment. Acest lucru se poate produce fie evaporării apei de la suprafața betonului proaspăt, fie prin pierderea ei în pământ – cazul plăcilor de beton. Pierderea în umiditate conduce la formarea de meniscuri ce produc presiuni capilare negative,

rezultând o micșorare a volumului pastei de ciment. Con tracția în volum nu este uniformă datorită faptului că depinde direct de cantitatea de umiditate pierdută, acesta din urmă fiind la rândul său influențată de suprafața expusă condițiilor prielnice de pierdere a umidității. Variațiile de ordin diferențial ale volumului produc eforturi de întindere în beton, ceea ce poate duce la apariția fisurilor în betonul plastic.

- 2. Con tracția autogenă (con tracția chimică) – este asociată de către Holt [35] în anul 1998, cu pierderea apei prin pori și capilare datorită hidratării cimentului. Acest tip de con tracție este sporit la betoanele cu un conținut ridicat de ciment (betoane de înalte performanțe cu un raport apă/ciment mic) precum și la temperaturi sporite ale mediului ambiant.
- 3. Con tracția de carbonatare – este produsă de reacțiile chimice a diversilor produși de hidratare ai cimentului, în contact cu dioxidul de carbon prezent în mediul înconjurător. Acest tip de con tracție este de obicei limitat la suprafața elementelor de beton (Dilger, 1997). Se presupune că CO_2 reacționează cu hidratul silicat de calciu (C-S-H) producând o scădere a raportului calciu/siliciu concomitent cu o pierdere de apă. Con tracția de carbonatare depinde de umiditatea relativă și este maximă în jurul unei umidități relative de 50%.
- 4. Con tracția la uscare a betonului - este definită în literatura de specialitate ca fiind modificarea volumului de beton în timp, apare o dată cu începerea prizei acestuia. Dintre toate tipurile de con tracții menționate anterior, con tracția la uscare conduce, de obicei, la cele mai mari modificări în volumul betonului (vezi paragraful 4.1.1).

În figura 4.1. se prezintă tipurile de con tracție ce apar în beton și deformațiile care rezultă. Se poate observa că betonul suferă înainte de începerea uscării, o con tracție autogenă. La t_0 se consideră că începe uscarea betonului, rezultă începerea con tracției la uscare. Sub încărcări apar atât fisuri datorită con tracției la uscare cât și fisuri de bază (din încărcări).

52 4. BETOANE CU CONTRACȚII REDUSE

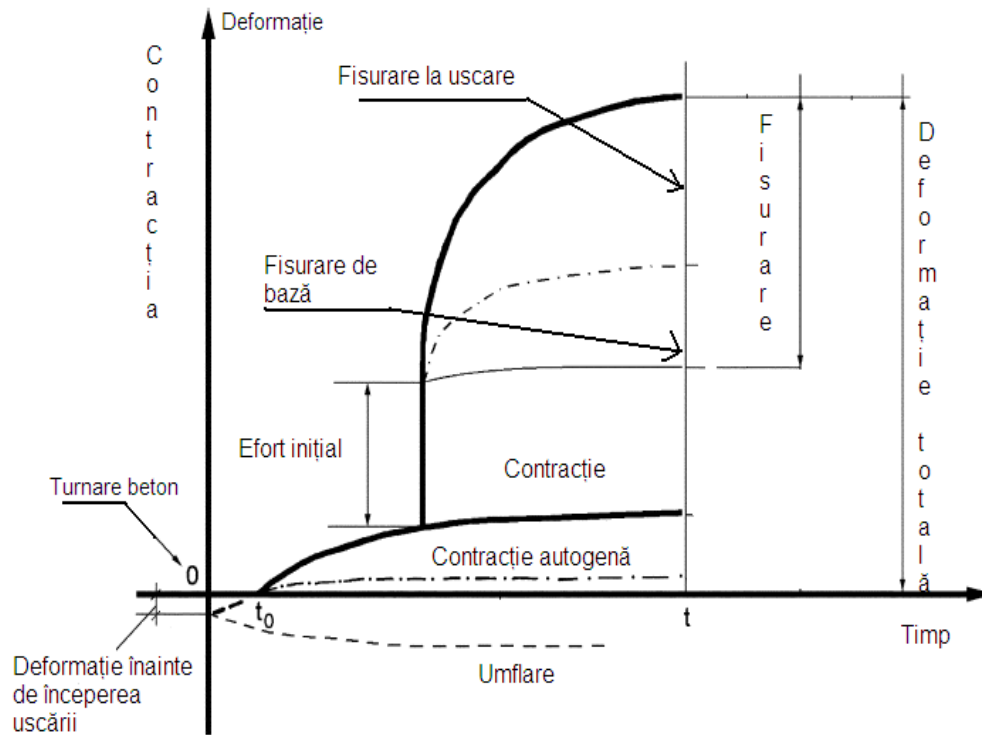


Fig. 4.1. Contractia betonului

În cazul unui studiu efectuat doar din punct de vedere structural, nu este necesară separarea contracției apărută datorită uscării betonului de alte tipuri de contracții cum sunt: contracția autogenă, contracția datorită carbonatării betonului. Dacă nu este controlată, contracția la uscare a betonului poate conduce la probleme de durabilitate ale structurii (aparitia coroziunii armaturilor prin fisuri, deteriorări datorate ciclurilor de îngheț – dezgheț) dar și la probleme de exploatare (aparitia săgețiilor în elementele structurale din beton).

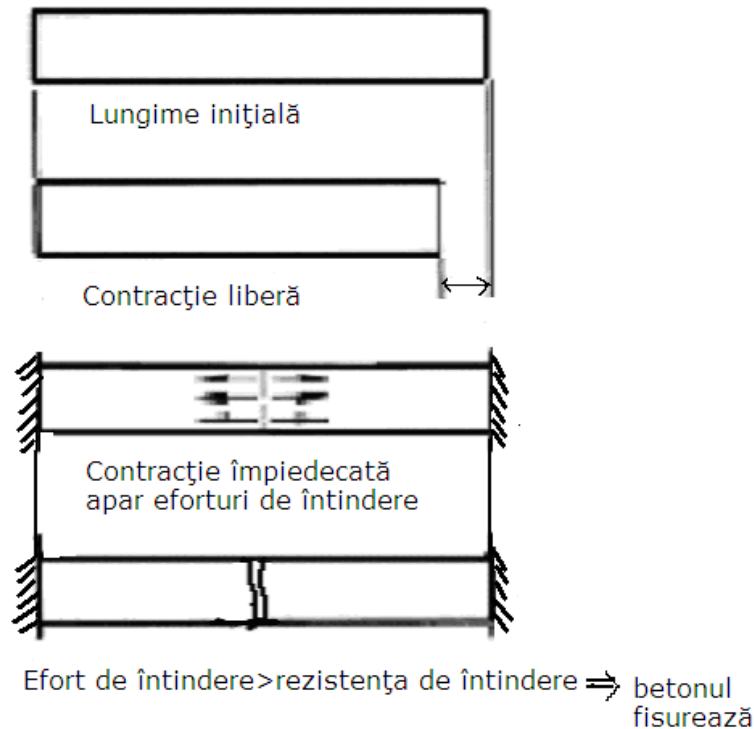


Fig. 4.2. Fisurarea betonului datorită con tracției la uscare

Fisurarea și con tracția betonului sunt fenomene de o largă complexitate fiind cercetate și investigate de aproape un secol. Aceste fenomene depind de metodele și procedeele de tratament aplicate betonului, de condițiile de mediu, de compoziția betonului.

Există trei teorii principale care explică acest fenomenul de con tracție la uscare a betonului:

1. **Prima teorie** prezintă fenomenul de con tracție a betonului ca fiind caracterizat printr-o micșorare a volumului, care, păstrat în aer, este provocată de modificarea conținutului de apă din structura pietrei de ciment. Micșorarea volumului datorită legării apei prin adsorbție și folosirii ei la hidratare, are loc și în stare proaspătă (con tracție plastică) și este mai puternică în primele zile de întărire a betonului. La prepararea betonului, cimentul reacționează cu apa de amestecare formându-se hidratul silicat de calciu în porii și capilarele betonului pline cu apă. În majoritatea betoanelor, nu toți porii și capilarele sunt pline cu silicați de calciu hidratați, apa de amestecare rămasă liberă formează o rețea de goluri capilare în pasta de ciment întărită. Deși aceste goluri sunt inițial interconectate, ele devin discontinue în timpul întăririi betonului, dacă raportul apă/ciment este mai mic de 0,70. În interiorul hidrațiilor silicațiilor de calciu hidratați sunt, deasemenea, prezente goluri microscopice. O parte a spațiilor dintre aceste goluri sunt umplute cu apă ce este adsorbită la suprafața hidrațiilor de silicat de calciu. Această apă adsorbită, precum și apa din porii capilari sunt susceptibile, în literatura de specialitate, ca jucând un rol determinant în con tracția betonului. Con tracția plastică

54 4. BETOANE CU CONTRACȚII REDUSE

rezultă datorită evaporării de suprafață, fiind influențată de condițiile mediului ambiant (umiditate, vânt, temperatură).

2. **Teoria sorbției superficiale (teoria coloidală)** explică fenomenul de contracție al betonului prin migrarea apei în gelurile fazei hidratate a cimentului. Evaporarea spre exterior a apei din geluri este însoțită și de o absorbție spre nucleul nehidratat al granulei de ciment, rezultând micșorarea volumului masei gelice = contracție. În timpul întării betonului în aer se produce pierderea apei libere datorită evaporării ei, apoi, pentru a se restabili echilibrul molecular cu umiditatea mediului înconjurător, apa legată fizic prin absorbție migrează pe suprafața cristalelor fine din scheletul gelurilor. Gelurile sunt caracterizate de o suprafață specifică mare, deci vor reține prin absorbție o cantitate mare de apă. Această apă se va deplasa fie spre porii mari din structura betonului, de unde se va evapora spre exterior, fie spre nucleele nehidratate de ciment. Astfel, peliculele de apă absorbite de la suprafața gelurilor, își vor micșora grosimea, ceea ce conduce la apariția unor forțe de atracție între cristalele gelurilor, rezultând o contracție de volum a betonului [12].

Contracția la uscare a betonului, se datorează difuziei apei din beton către mediul înconjurător. Contracția la uscare se presupune că se desfășoară de-a lungul întregii vieți a structurii din beton, dar marea majoritate a fenomenului are loc în primele trei luni de la turnarea betonului. Aceasta este asociată cu variațiile umidității în beton. Potențialul apei este un efort care determină schimbarea umidității betonului, ducând la contracția și umflarea particulelor de ciment hidratate. De aceea se consideră că potențialul apei trebuie legat direct de fenomenul de contracție la uscare. Acest tip de contracție are ca și rezultat o micșorare a volumului de beton, producând și o sporire a eforturilor de întindere în betoanele cu contracții împiedecate. Ultimul efect menționat conduce la apariția fisurilor, dar și a deformațiilor externe la elementele din beton amintite, chiar fără a fi supuse vreunor încărcări exterioare.

Contracția la uscare a betonului are loc de-a lungul multor ani, dar 80% din ea se consumă în primele trei luni de la turnarea betonului.

3. **Teoria tensiunilor capilare (E. Freyssinet)** se bazează pe contracția betonului prin efectul tensiunii superficiale a apei din porii capilari. În porii mijlocii apa formează meniscuri care conduc la apariția unor tensiuni superficiale ce solicită pereții porilor; dacă umiditatea aerului scade, presiunea pe pori crește, rezultând o micșorare a volumului, deci are loc contracția betonului. Contracția autogenă reprezintă schimbarea în volum a pastei de ciment datorită contracției chimice, după începerea prizei cimentului. Contracția autogenă se manifestă printr-o schimbare în volum la nivel microscopic, ceea ce apare atunci când necesarul de apă din exterior pentru hidratarea cimentului nu este suficient. Pe măsură ce hidratarea cimentului are loc, datorită formării gelurilor, rezultă pori foarte mici în pasta de ciment. Continuarea procesului de hidratare, duce la consumarea apei din porii capilari și din geluri, formându-se meniscuri. Ca și rezultat al presiunii negative apărute în pori, pasta întărită se contractă. Contracția autogenă este contracția timpurie a betonului și apare în orice tip de beton, indiferent de raportul apă/ciment.

Din punct de vedere teoretic, două formule stabilite de către Laplace și, respectiv, Kelvin, stau la baza calculului variației dispersiei capilare:

$$p_v - p_c = \frac{2\sigma}{r} \cos \theta \quad (\text{Laplace}) \quad (4.1a)$$

$$p_c - p_v = \frac{RT}{Mv} \ln(H) \quad (\text{Kelvin}) \quad (4.1b)$$

Unde:

σ - tensiunea superficială la interfața apei cu vaporii de apă;

θ - unghiul de umiditate;

p_c - presiunea în apă;

p_v - presiunea în vaporii de apă;

r - raza porilor unde se formează meniscul;

v - volumul specific al apei;

M - masa moleculară a apei;

R - constantă gaz ideal;

T - temperatura;

H - umiditatea relativă.

Factorii care influențează contracția betonului sunt:

1. Cimentul:
 - prin natura mineralogică (componentul C_3A prezintă cea mai mare contracție);
 - prin dozaj – creșterea cantității de ciment duce la creșterea contracției pastei de ciment;
 - prin finețea de măcinare- creșterea componentei gelice implică o creștere a contracției pastei de ciment.
2. Apa:
 - Creșterea raportului A/C conduce la creșterea contracției betonului, deoarece crește și numărul porilor din beton.
3. Agregatele:
 - creșterea cantității de agregate duce la reducerea contracției;
 - prin natura și rigiditatea lor;
 - prin granulozitate.
4. Umiditatea și temperatura mediului ambiant.
5. Modul de punere în operă.
6. Dimensiunile elementului.

O caracteristică negativă a utilizării betonului ca și material de construcție o reprezintă instabilitatea volumică de-a lungul timpului, cu alte cuvinte proprietatea betonului de a se contracta și de a fisura în timpul uscării sale.

Este cunoscut faptul că eliberarea apei din betonul proaspăt în aer determină contracția la uscare. Principalii factori care influențează mărimea contracției sunt:

- Agregatele din beton exercită cea mai importantă influență asupra contracției, acestea reducând mărimea reală a contracției ce se poate produce.
- Conținutul de apă din beton influențează contracția prin aceea că reduce ponderea volumului de agregat care împiedică contracția. Prin creșterea conținutului de apă din beton, contracția crește aproape proporțional.
- Caracteristicile cimentului au o influență mai mică asupra contracției betonului; o contracție mai mare a unei paste de ciment întărit nu determină și o contracție mai mare a betonului realizat cu cimentul respectiv.

56 4. BETOANE CU CONTRACȚII REDUSE

- Con tracția se produce timp îndelungat, dar în mod practic aceasta se manifestă cu viteze mari în primele zile și săptămâni și este neglijabilă după 1-5 ani.
- Valoarea contracției se reduce continuu cu creșterea umidității, aceasta devenind nulă la umiditate de 100 %.
- Con tracția este influențată sensibil de dimensiunile elementelor de construcție: la creșterea raportului volum element/suprafața elementului, contracția descrește liniar în funcție de ceilalți parametri.

4.1.1. Con tracția la uscare a betonului

Con tracția la uscare a betonului este măsurată începând de la 24 de ore de la prepararea și turnarea betonului, mai exact din momentul decofrării. Conform standardelor internaționale ASTM C157 și RILEM CPC9, contracția la uscare a betonului se determină pe prisme din beton cu dimensiuni standard, prin măsurarea modificării lungimii în timp. Fenomenul derulării contracției la uscare depinde de dimensiunea și forma elementului din beton, deoarece aceste două caracteristici geometrice influențează direct pierderea de umiditate. Elementele mari vor dezvolta contracții la uscare pe o durată mai lungă de timp, dar valoarea finală a acestora s-ar putea dovedi a fi mai mică decât cea a elementelor ce au un raport volum/suprafață mic. Această perioadă lungă de dezvoltare a contracțiilor în elemente din beton cu raport volum/suprafață ridicat, este calculată (conform CEB-FIB, 1990) cu ajutorul relației:

$$\varepsilon_s(t, t_0) = \varepsilon_{s0} [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)] \quad (4.2)$$

în care:

$\varepsilon_{s0} = \varepsilon_1 \times \varepsilon_2$	- coeficient de contracție inițială;
ε_1	- factor care depinde de mediu;
ε_2	- factor care depinde de h_0 ;
h_0	- coeficient de grosime, depinde de dimensiunea elementului și de umiditatea mediului;
β_s	- factor al evoluției contracției în timp, depinde de h_0 ;
t	- vârsta betonului;
t_0	- vârsta la care începe uscarea betonului.

Con tracția la uscare a pastei de ciment hidratate începe la suprafața elementului din beton, apoi, depinzând de mărimea capilarelor din structura pastei de ciment, precum și de umiditatea relativă a mediului înconjurător, se propagă, mai repede sau mai încet, în structura internă a betonului. Astfel se poate explica de ce la betoanele obișnuite, care prezintă o structură internă formată din capilare mari interconectate, contracția la uscare este mai rapidă. La betoanele de înalte performanțe, contracția la uscare este încetinită datorită prezenței unor capilare mici și foarte mici care sunt deconectate rapid de către apariția produșilor de hidratare.

Tensiunile capilare apar în condițiile unor umidități relative cuprinse între 45 și 95%, datorită formării unor meniscuri în porii cu apă din pasta de ciment. Meniscul este sub tensiune hidrostatică, formând o suprafață curbă. Apa exercită compresiune asupra scheletului solid, rezultând o micșorare a dimensiunii porilor.

Efortul capilar (P_{cap}) este definit ca depinzând de raza porilor (r), tensiunea superficială a apei (γ), și umiditatea relativă (RH), și este dat de către relația:

$$P_{cap} = \frac{2\gamma}{r} = \frac{\ln(RH)}{K} \quad (4.3), \text{ unde } K \text{ este o constantă.}$$

Presiunea de separare, reprezintă presiunea cauzată de apa absorbită ce se află în porii capilari. La pierderea apei absorbite, presiunea de separare scade ceea ce conduce la apropierea particulelor de ciment, rezultând contracția.

4.2. Aditivi reducători ai contracției utilizați

Folosirea aditivilor reducători ai contracției în tehnologia betoanelor a început în 1980 în Japonia și America. După 1989 ea a cunoscut un puternic avânt și în țara noastră. Prin apariția - Codului de practică pentru executarea lucrărilor din beton, beton armat și beton precomprimat - (NE 012 /1999), s-a introdus practic obligativitatea utilizării superplastifianților la majoritatea tipurilor și claselor de beton.

Cercetările pentru stabilirea unor rețete de betoane cu contracții reduse au fost efectuate în cadrul contractului Grant CNCSIS Tip AT, nr. 32940, Tema nr. 5 Cod CNCSIS 203, cu durata pe 2 ani, intitulat "Betoane cu contracții reduse realizate cu aditivi speciali", unde autorul a avut calitatea de director [15].

Testele experimentale efectuate au avut la bază stabilirea procentului optim de utilizare a aditivilor reducători ai contracției betonului, efectuarea și optimizarea unor rețete și procedee tehnologice pentru realizarea unor betoane cu contracții reduse, ce au la baza compoziției materiale și tehnologii disponibile în țara noastră.

S-a urmărit, ca și obiectiv principal, evaluarea și compararea eficienței a trei aditivi reducători ai contracției la uscare a betonului. În paralel, s-a analizat efectul aditivilor asupra tasării, densității, precum și a rezistențelor la compresiune și întindere prin încovoiere.

Aditivii pentru reducerea contracțiilor la uscare ale betonului se pot recomanda pentru a fi utilizați la toate proiectele de construcții în care apar probleme datorită contracției, respectiv a fisurării betonului, lucru ce afectează durabilitatea, funcționalitatea sau estetica elementelor, de exemplu:

- Planșee industriale de înaltă performanță;
- Poduri;
- Garaje pentru parcare;
- Structuri maritime;
- Structuri hidraulice;
- Facilități pentru tratarea apelor evacuate.

58 4. BETOANE CU CONTRACȚII REDUSE

Aditivi utilizați în cercetările experimentale:

SR - 2 este un aditiv pe bază alcool superior, folosit pentru prepararea betoanelor și mortarelor la care se dorește o creștere a durabilității și a impermeabilității, prin prevenirea contracțiilor la uscare și implicit a fisurilor de contracție, produs de către firma SIKA [48].

Efectul produs de SR - 2: creșterea coeziunii.

Dozajul recomandat este de (0,5 - 3,0) % soluție din cantitatea de ciment.

Tabelul 4.1

Caracteristici tehnice	SR - 2
Aspect	solzi albi
Densitate la 20°C, g/cm ³	0,54
Conținut de substanță uscată, %	100,0
pH	7
Conținut de cloruri, %	≤ 0,1%

Firma italiană Grace, producătoare de produse pentru betoane, a realizat de curând un aditiv care reduce contracția la uscare a betonului cu până la 50 -80% la 28 de zile, cu o reducere a contracției finale a betonului de 25-50%; acest aditiv poartă denumirea **Eclipse**. Aditivul Eclipse acționează asupra mecanismului de contracție a betonului fără să adauge nici un material expansiv în beton.

ECLIPSE este un aditiv lichid pentru reducerea fisurilor provocate de contracțiile hidraulice și a fenomenului de curbare a suprafeței turnate la betoane și mortare. Dozajul recomandat este de (1,0 - 2,5) % soluție din cantitatea de ciment (2,5 - 10 l/m³) [47].

Tabelul 4.2

Caracteristici tehnice	ECLIPSE
Aspect	lichid de culoare galben
Densitate la 20°C, g/cm ³	0,93
Conținut de substanță uscată, %	30,0
pH	7
Conținut de cloruri, %	fără

FM 40 este un aditiv superplastifiant pe bază de esteri policarboxilici, folosit pentru prepararea betoanelor fluide și a betoanelor cu rezistențe superioare. Aditivul are și un efect întârziator de priză. Dozajul recomandat este de (0,2 - 2,5) % soluție din cantitatea de ciment (produs de către firma SIKA) [49].

Tabelul 4.3

Caracteristici tehnice	FM 40
Aspect	lichid de culoare maro
Densitate la 20°C, g/cm ³	1,044
Conținut de substanță uscată, %	30,0
pH	7
Conținut de cloruri, %	≤ 0,1%

4.3. Cercetări experimentale pe mortare realizate cu aditivi reducători ai contracției

FAZA I:

Primele cercetări experimentale s-au realizat cu un ciment de calitate inferioară și anume: **CEM II/B-S32,5 R și aditiv Eclipse**, măsurarea contracției realizându-se pe mortar de ciment, pe o perioadă de **14 zile**. S-au realizat patru rețete de mortare de ciment prezentate în tabelul 4.4., turnându-se câte 3 prisme de 40x40x160mm pentru fiecare rețetă.

Tabelul 4.4

Mortar	A/C	Ciment	Agregat	L/N
Martor	0,5	CEM II/B-S32,5R 450g	Agregat silicios de râu $\phi_{max}=2mm$	1/3
1% Eclipse	0,5	CEM II/B-S32,5R 450g	Agregat silicios de râu $\phi_{max}=2mm$	1/3
1,5% Eclipse	0,5	CEM II/B-S32,5R 450g	Agregat silicios de râu $\phi_{max}=2mm$	1/3
2% Eclipse	0,5	CEM II/B-S32,5R 450g	Agregat silicios de râu $\phi_{max}=2mm$	1/3

Tabelul 4.5

Proprietățile mortarelor proaspete

Mortar	Densitatea ρ_a [kg/m ³]	Consistența [cm]
Martor	2246,09	4,5
1% Eclipse	2265,62	6
1,5% Eclipse	2265,62	6,5
2% Eclipse	2269,53	6,5

Pentru probele de mortar realizate cu cimentul CEM II/B-S32,5R și păstrate în mediul ambiant, la 14 zile, s-au realizat teste privind rezistențele mecanice. Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul 4.6.

Se observă influența negativă asupra rezistențelor la întindere a aditivului Eclipse.

Tabelul 4.6

Rezistențele mecanice la 14 zile

Proba	f_c [N/mm ²]	f_{ct} [N/mm ²]	f_{ct}/f_c [%]
Martor	22,40	6,03	26,9
1% Eclipse	25,26	5,75	22,8
1,5% Eclipse	25,71	5,79	22,5
2% Eclipse	23,76	5,3	22,3

60 4. BETOANE CU CONTRACȚII REDUSE

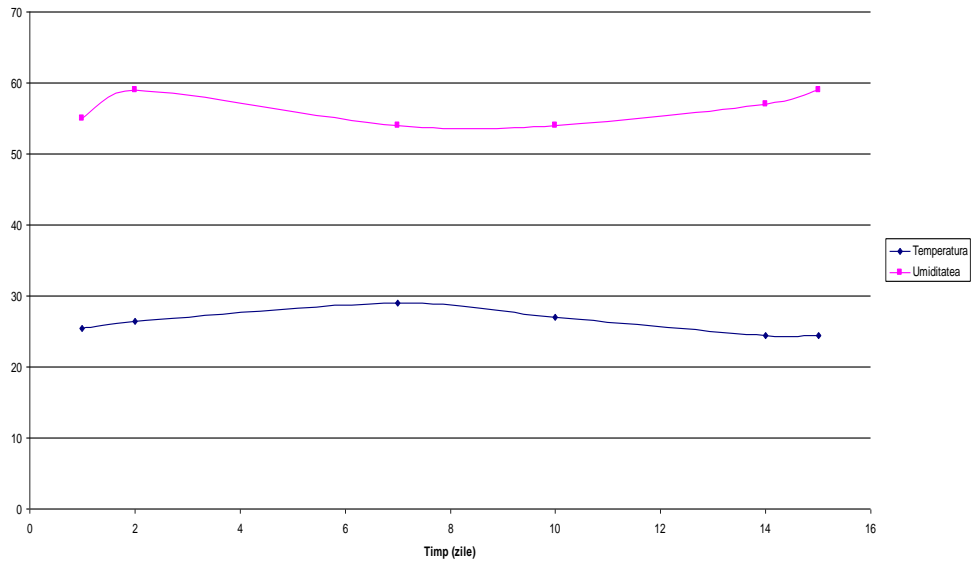


Fig. 4.3. Umiditatea relativă (%) – Temperatură (°C) a mediului ambiant pe o perioadă de 14 zile

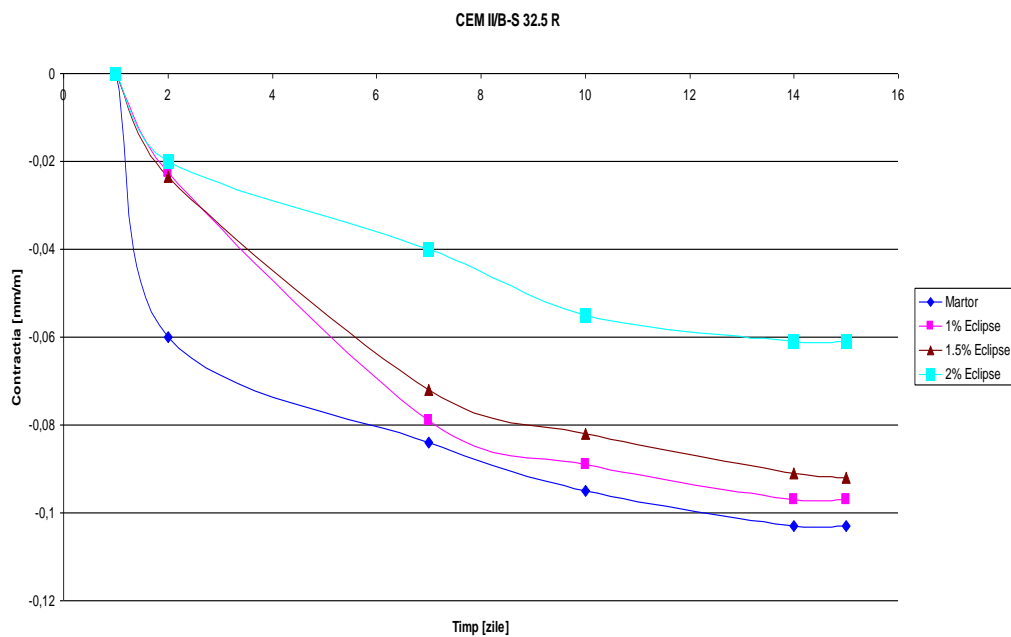


Fig. 4.4. Contractie (mm/m) – Timp (zile) pentru mortar de ciment realizat cu CEM II/B-S32,5 R

4.3 Cercetări experim. pe mortare
4.2. Aditivi reducători ai contracției utilizați
realizate cu aditivi reducători ai contracției 61

Din figura 4.4 se observă că utilizarea aditivului Eclipse în proporție de 2% din cantitatea de ciment duce la o înjumătățire a valorii contracției.

FAZA II:

S-au cercetat trei rețete de **mortare realizate cu cimentul CEM II/A-S 32,5 R și aditivul Eclipse**, utilizat în următoarele procente (raportate la dozajul de ciment): 1%, 1,5% și 2%.

S-au preparat patru compoziții de mortare conform tabelului 4.7.

Probele s-au păstrat în mediul ambiant. Măsurarea contracției s-a făcut cu aparatura din figura 4.5.

Tabelul 4.7

Mortar	Raport A/C	Ciment	Agregat	Raport L/N
Martor	0,5	CEM II/A-S32,5R 450g	Agregat silicios de râu $\Phi_{max}=2mm$	1/3
1% Eclipse	0,5	CEM II/A-S32,5R 450g	Agregat silicios de râu $\Phi_{max}=2mm$	1/3
1,5% Eclipse	0,5	CEM II/A-S32,5R 450g	Agregat silicios de râu $\Phi_{max}=2mm$	1/3
2% Eclipse	0,5	CEM II/A-S32,5R 450g	Agregat silicios de râu $\Phi_{max}=2mm$	1/3



Fig. 4.5. Măsurarea contracției în mediul ambiant la mortare

Caracteristicile mortarelor proaspete sunt prezentate în tabelul 4.8. Se menționează că prepararea mortarelor s-a făcut mecanizat cu malaxorul pentru mortare, în acordanță cu procedeul de preparare a mortarelor standard prezentate în SR EN 19611-1995. Aditivul s-a introdus în apa de amestecare, la începutul preparării mortarelor.

După realizarea mortarelor, acestea au fost introduse în tipare prismatice cu dimensiunile de 40x40x160 mm.

62 4. BETOANE CU CONTRACȚII REDUSE

Tabelul 4.8

Proprietățile mortarelor proaspete		
Mortar	Densitatea pa [kg/m ³]	Consistența [cm]
Martor	2193	4,5
1% Eclipse	2249	5,5
1,5% Eclipse	2251	6,0
2% Eclipse	2254	6,5

Pentru probele păstrate în mediul ambiant s-au înregistrat valorile temperaturilor și ale umidităților relative ale mediului de păstrare. Variația de temperatură și a umidității relative pe o perioadă de **146 de zile** este prezentată în figura 4.6.

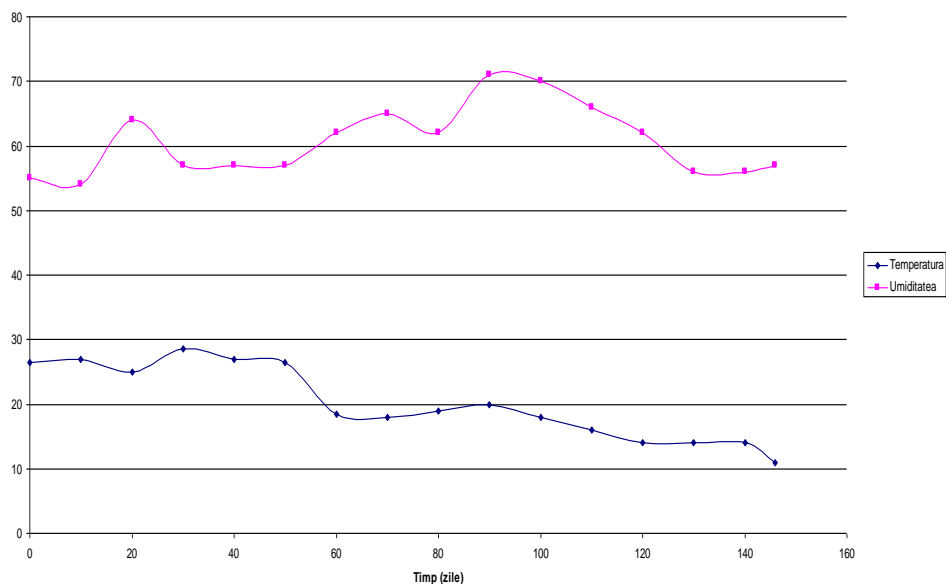


Fig. 4.6. Umiditatea relativă (%) – Temperatură (°C)

Contrația s-a determinat pe o perioadă de 146 zile pentru probele păstrate în mediul ambiant, în tabelul 4.9 se prezintă valorile contrației la vârstele de 7, 14 și 28 de zile, iar figura 4.5. prezintă contrația pe 80 de zile.

Tabelul 4.9

Mortar	Contrația		
	7 zile	14 zile	28 zile
Martor	0,064	0,103	0,123
Eclipse 1%	0,02	0,103	0,117
Eclipse 1,5%	0,021	0,055	0,104
Eclipse 2%	0,014	0,034	0,071

4.4. Optimiz. compozițiilor de beton martor și cu aditivi reducători ai contracției 63

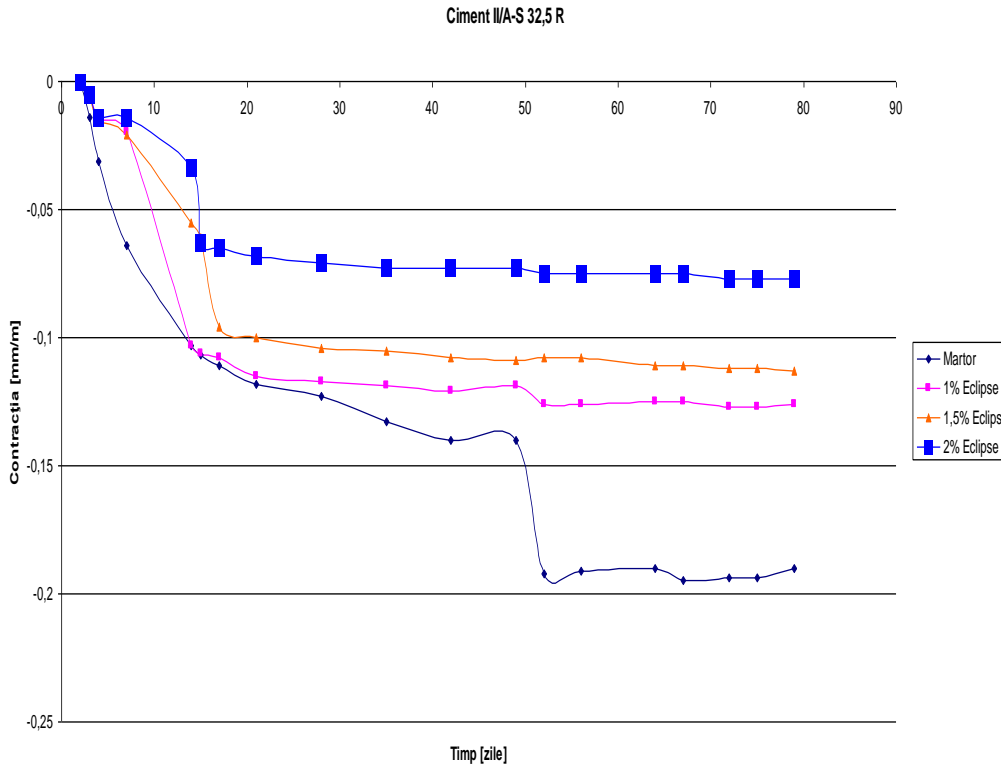


Fig. 4.7. Contractie (mm/m) – Timp (zile) pentru mortar de ciment realizat cu CEM II/A-S32,5 R

Tabelul 4.10

Rezistența mortarelor determinată la **146 zile**

Mortar	f_c [N/mm ²]	f_{ct} [N/mm ²]	f_{ct}/ f_c [%]
Mortar	24,61	6,22	25,3
Eclipse 1%	25,52	6,17	24,2
Eclipse 1,5%	25,60	6,40	25,0
Eclipse 2%	26,76	6,07	22,7

4.4. Optimizarea compozițiilor de beton martor și cu aditivi reducători ai contracției

Autorul și-a propus continuarea cercetărilor prin efectuarea unor determinări experimentale asupra proprietăților betoanelor realizate cu diferite procente de aditiv reducători ai contracției.

Compozițiile s-au stabilit în conformitate cu prevederile Codului de practică pentru betoane NE012 – 1/ 1999. La realizarea lor s-au utilizat [15]:

64 4. BETOANE CU CONTRACȚII REDUSE

- ciment portland cu zgură, II/A – S32,5 R;
- agregate de balastieră cu $d_{\max} = 16$ mm. (Sorturi 0/4; 4/8 și 8/16 mm);
- apă de la rețeaua de alimentare a municipiului Timișoara.

Procentele de aditiv utilizate s-au situat în intervalul recomandat de agrementele lor tehnice.

Prepararea compozițiilor s-a realizat manual. Materialele componente s-au amestecat 3 minute la betoanele martor și 5 minute la cele cu aditiv, astfel: 2 minute agregatele, cimentul și 60% din apa de preparare și apoi 3 minute după adăugarea restului de 40% apă împreună cu cantitatea calculată de aditiv. Compozițiile corespunzătoare fiecărei clase de beton (martor și cu aditiv), s-au realizat la același raport A/C pentru a compara efectul aditivilor asupra proprietăților betoanelor proaspete și întărite (tabelul 4.10). Pentru a avea același raport A/C, cantitatea de apă de preparare a betoanelor cu aditiv s-a stabilit astfel ca apa utilizată plus apa adusă de aditiv să fie egală cu cea a betonului martor corespunzător, la 1m^3 de beton. Pentru încercări s-au turnat cuburi cu $l = 14,1$ cm pe care s-a determinat rezistența la compresiune (f_c) și densitatea aparentă (ρ_b), precum și prisme cu dimensiunile $10 \times 10 \times 55$ cm pentru determinarea rezistenței la întindere (f_{ct}) și a contracției.

La măsurarea contracției, s-a avut ca și etalon de stabilitate al măsurătorilor efectuate, o platbandă din sticlă.

Epruvetele au fost decofrate la 1 zi iar apoi au fost păstrate în laborator la temperatura mediului ambiant, începându-se măsurătorile de contracție.

Tabelul 4.11

Compozițiile analizate

Beton	Ciment	Agregat	Raport A/C la		Raport L/Ag
Martor C20/25	II/A-S32,5R 407 kg/m ³	Agregat silicios de râu $\Phi_{\max}=16\text{mm}$	0,5		0,235
Beton cu Eclipse C20/25	II/A-S32,5R 407 kg/m ³	Agregat silicios de râu $\Phi_{\max}=16\text{mm}$	1,5% ad	0,39	0,235
			2% ad	0,36	
			2,3% ad	0,34	
Beton cu FM 40 C20/25	II/A-S32,5R 407 kg/m ³	Agregat silicios de râu $\Phi_{\max}=16\text{mm}$	1,5% ad	0,39	0,235
			2% ad	0,36	
			2,3% ad	0,34	
Beton cu SR2 C20/25	II/A-S32,5R 407 kg/m ³	Agregat silicios de râu $\Phi_{\max}=16\text{mm}$	1,5% ad	0,39	0,235
			2% ad	0,36	
			2,3% ad	0,34	

4.4.1. Caracteristicile betoanelor în stare proaspătă

Tabelul 4.12

Proprietăți ale betoanelor proaspete

Clasa beton	Tipul betonului	Caracteristici ale betonului proaspăt	
		Densitatea aparentă ρ_{bp} (kg/m ³)	Tasare, cm Clasa, S
C20/25	Beton martor pt. Eclipse	2218,2	$\frac{12,5}{S4}$
	Beton cu Eclipse 1,5%	2384,8	$\frac{17}{S4}$
	Beton cu Eclipse 2,0%	2363,63	$\frac{17,5}{S4}$
	Beton cu Eclipse 2,3%	2400	$\frac{18}{S4}$
	Beton martor pt. FM 40	2461	$\frac{15,5}{S4}$
	Beton cu FM 40 1,5%	2474	$\frac{13,5}{S4}$
	Beton cu FM 40 2,0%	2461,4	$\frac{13,5}{S4}$
	Beton cu FM 40 2,3%	2461	$\frac{15,5}{S4}$
	Beton martor pt. SR - 2	2336,6	$\frac{5,0}{S3}$
	Beton cu SR - 2 1,5%	2366,9	$\frac{6,5}{S3}$
	Beton cu SR - 2 2,0%	2360,1	$\frac{7,2}{S3}$
	Beton cu SR - 2 2,3%	2356,2	$\frac{8,0}{S3}$

Se constată următoarele:

- densitățile aparente ale betoanelor cu superplastifianți au valori asemănătoare cu cele ale betoanelor martor;
- tasarea betoanelor proaspete este slab influențată de superplastifiant.

4.4.2. Caracteristicile betoanelor în stare întărită

Contrația betoanelor în stare întărită a fost măsurată cu ajutorul unor microcomparatoare 1/1000 mm, ținându-se cont și de influența variației de temperatură și umiditate cu ajutorul unui termohigrometru [118]. Probele utilizate pentru măsurarea contrației au fost prisme cu dimensiunile 10x10x550 cm (fig.4.8).



Fig. 4.8. Măsurarea contrației la prismele de beton

În anul 2009 standardul SR EN 2833 aduce modificări privind dimensiunile probelor de beton, precum și a procedeele de determinare a contrației la uscare a betoanelor. Prezentele determinări s-au realizat conform STAS 2833-80.

4.4. Optimiz. compozițiilor de beton martor și cu aditivi reducători ai contracției 67

Tabelul 4.13

Proprietăți ale betoanelor întărite realizate cu ECLIPSE

Clasa beton	Tipul betonului	Caracteristici ale betonului întărit, la 28 zile			
		Rezistența la compresiune		Rezistența la întindere	
		f_c N/mm ²	$\pm\Delta f_c$ %	f_{ct} N/mm ²	$\pm\Delta f_{ct}$ %
C20/25	Beton martor	31,00	-	2,43	-
	Beton cu Eclipse 1,5%	32,6	+5,16	2,22	-8,64
	Beton cu Eclipse 2,0%	33,1	+6,77	2,46	+1,23
	Beton cu Eclipse 2,3%	33,9	+9,35	2,19?	-9,87?

Tabelul 4.14

Proprietăți ale betoanelor întărite realizate cu aditivul FM 40

Clasa beton	Tipul betonului	Caracteristici ale betonului întărit, la 28 zile			
		Rezistența la compresiune		Rezistența la întindere	
		f_c N/mm ²	$\pm\Delta f_c$ %	f_{ct} N/mm ²	$\pm\Delta f_{ct}$ %
C20/25	Beton martor	31,16	-	2,38	-
	Beton cu FM 40 1,5%	36,02	+15,59	2,57	+7,98
	Beton cu FM 40 2,0%	37,24	+19,51	2,54	+6,72
	Beton cu FM 40 2,3%	38,39	+23,2	2,57	+7,98

Tabelul 4.15

Proprietăți ale betoanelor întărite realizate cu aditivul SR - 2

Clasa beton	Tipul betonului	Caracteristici ale betonului întărit, la 28 zile			
		Rezistența la compresiune		Rezistența la întindere	
		f_c N/mm ²	$\pm\Delta f_c$ %	f_{ct} N/mm ²	$\pm\Delta f_{ct}$ %
C20/25	Beton martor	27,3	-	2,95	-
	Beton cu SR - 2 1,5%	23,98	-10,05	1,88	-36,27
	Beton cu SR - 2 2,0%	24,5	-8,10	2,09	-29,15
	Beton cu SR - 2 2,3%	21,5	-19,35	1,61	-45,42

Din măsurătorile realizate pe sticlele etalon reiese faptul că determinările efective ale contracțiilor la uscare realizate de către sunt destul de acurate. Graficul

68 4. BETOANE CU CONTRACȚII REDUSE

4.9. prezintă valorile "constracției" sticlelor etalon: se observă că sticlele prezintă valori ale "constracției" apropiate de zero.

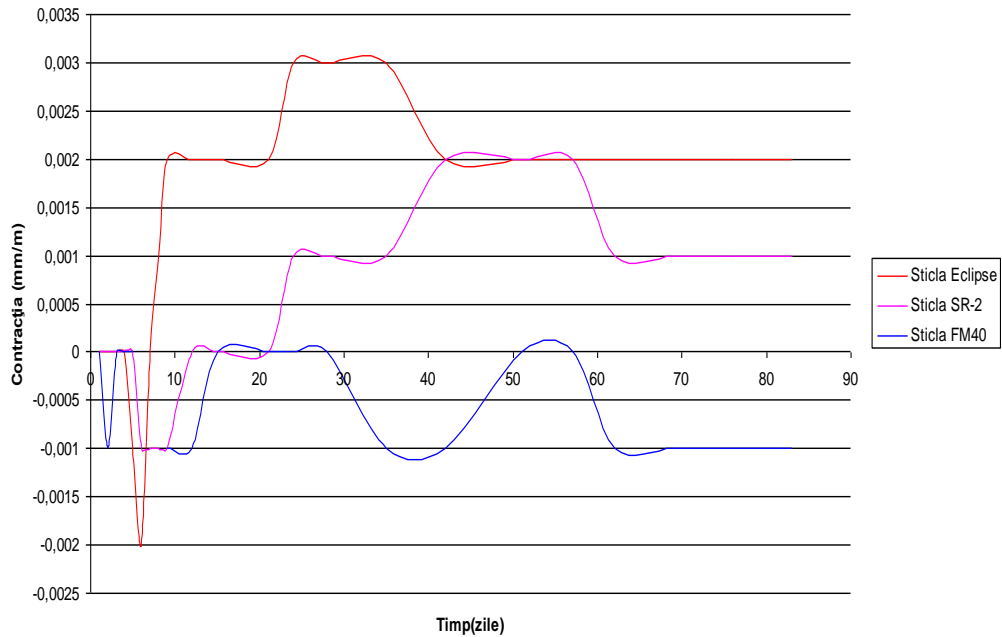


Fig. 4. 9. Valori ale constracției obținute pe sticlele etalon

Fisurarea betonului în timpul constracției este o problemă complexă care depinde de nivelul constracției, de condițiile prevăzute pentru a împiedica constracția, de proprietățile materialului cum ar fi: modulul de elasticitate, rezistența la întindere a betonului etc. Pentru stabilirea rezistenței la fisurare, nivelul maxim al constracției, deși nu este suficient, poate fi totuși un indiciu cheie.

Măsurătorile constracției pe care le prezintă probele realizate cu aditivul Eclipse, sunt conform graficului de mai jos:

4.4. Optimiz. compozițiilor de beton marmor și cu aditivi reducători ai contracției 69

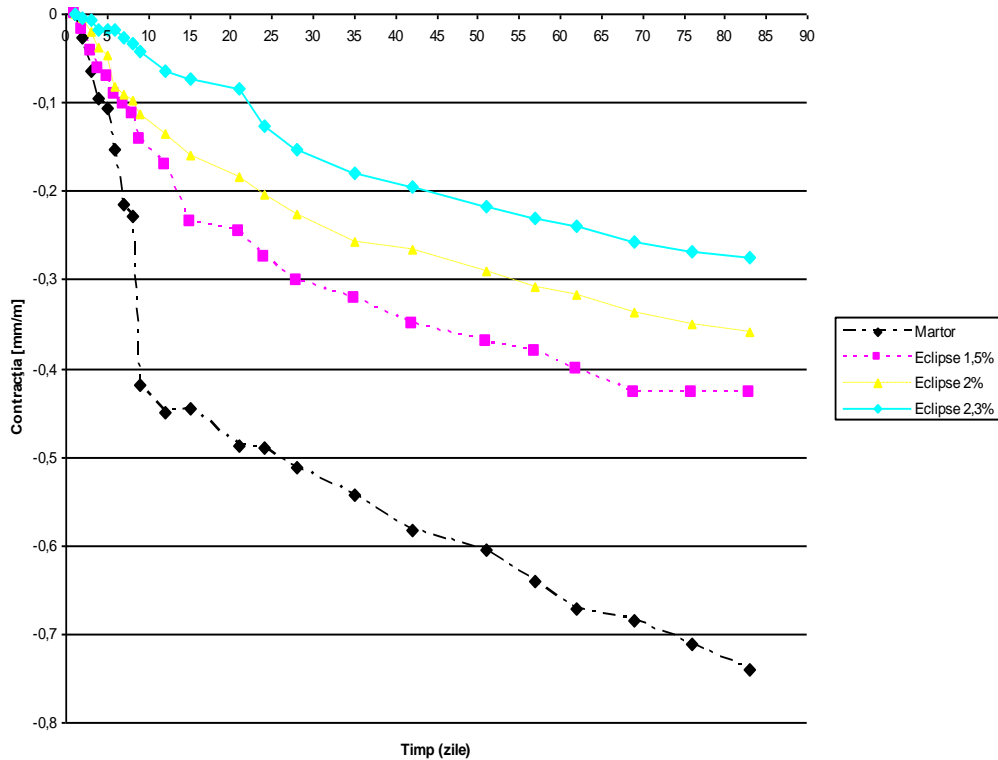


Fig. 4.10. Con tracție (mm/m) – Timp (zile) pentru beton realizat cu CEM II/A-S32,5 R și aditiv Eclipse

Figura 4.11. prezintă variația umiditate relativă(%) – temperatura mediului ambiant de-a lungul delurării măsurătorilor de contracție asupra probelor din beton cu aditivul Eclipse.

70 4. BETOANE CU CONTRACȚII REDUSE

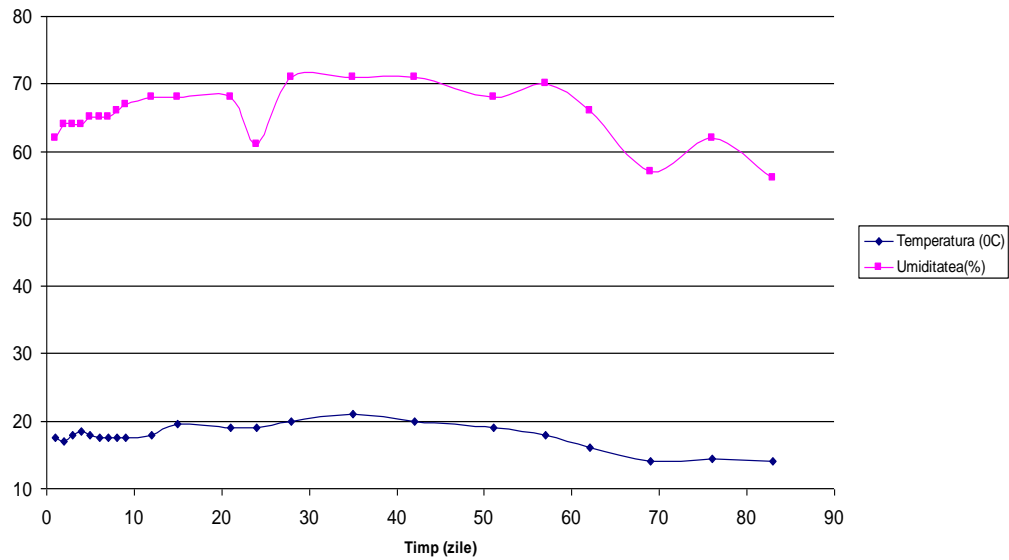


Fig. 4.11. Umiditatea relativă (%) – Temperatură (°C), pentru Eclipse

Măsurătorile contracției pe care le prezintă probele realizate cu aditivul FM40 sunt conform graficului de mai jos:

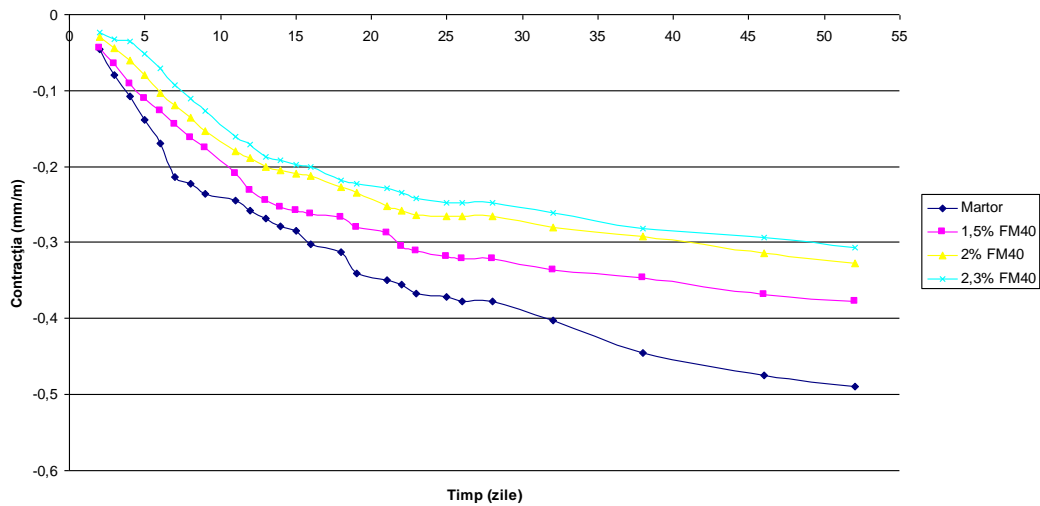


Fig. 4.12. Contractie (mm/m) – Timp (zile) pentru beton realizat cu CEM II/A-S32,5 R și aditiv FM 40

4.4. Optimiz. compozițiilor de beton martor și cu aditivi reducători ai contracției 71

Figura 4.13. prezintă variația umiditate relativă(%) – temperatura mediului ambiant de-a lungul delurării măsurătorilor de contracție asupra probelor din beton cu aditivul FM 40.

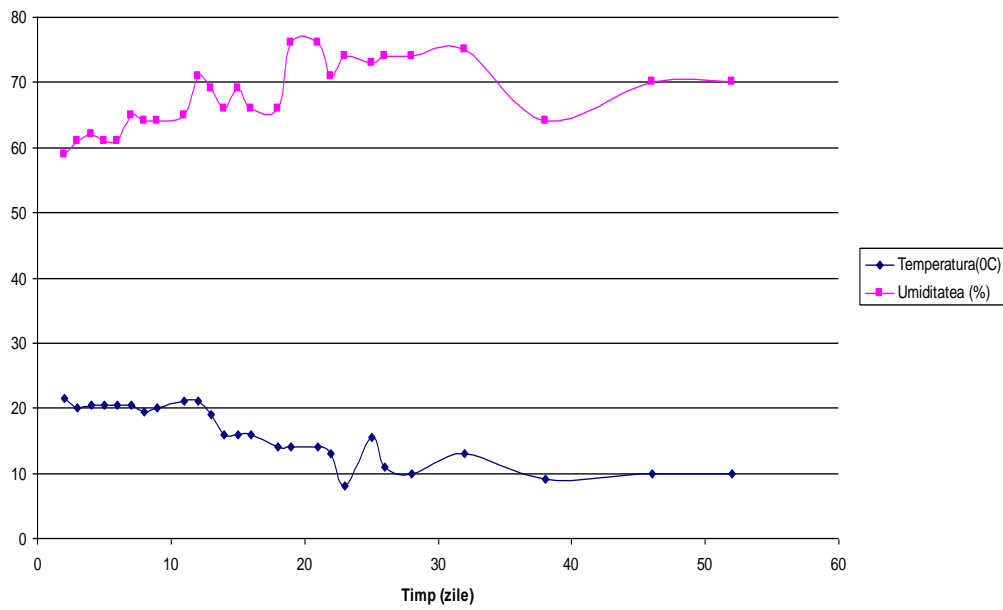


Fig. 4.13. Umiditatea relativă (%) – Temperatură (°C), pentru FM 40

Măsurătorile contracției pe care le prezintă probele realizate cu aditivul SR - 2 sunt conform graficului de mai jos:

72 4. BETOANE CU CONTRACȚII REDUSE

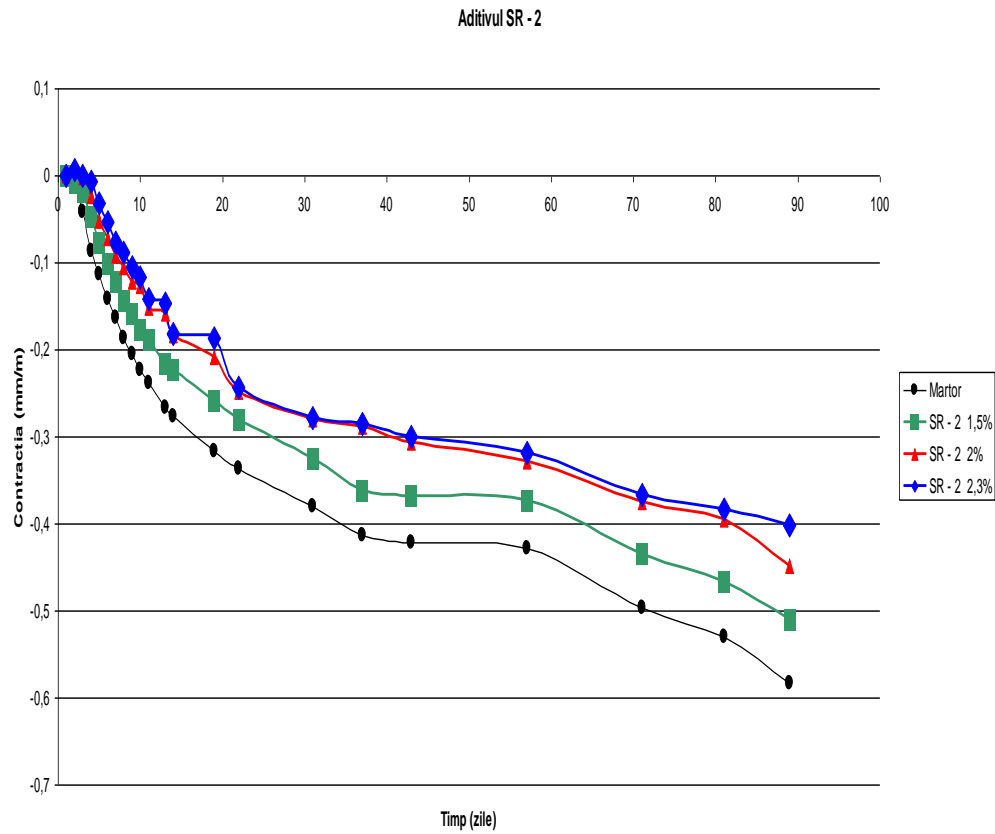


Fig. 4.14. Con tracție (mm/m) – Timp (zile) pentru beton realizat cu CEM II/A-S32,5 R și aditiv SR 2

Figura 4.15. prezintă variația umiditate relativă(%) – temperatura mediului ambiant de-a lungul delurării măsurătorilor de contracție asupra probelor din beton cu aditivul SR-2.

4.4. Optimiz. compozițiilor de beton martor și cu aditivi reducători ai contracției 73

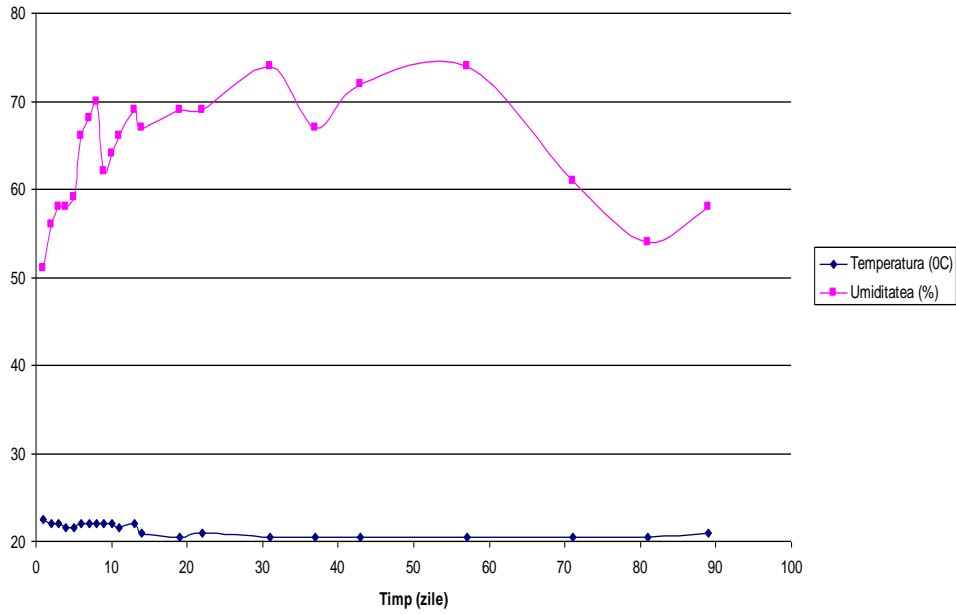


Fig. 4.15. Umiditatea relativă (%) – Temperatură (°C), pentru SR-2

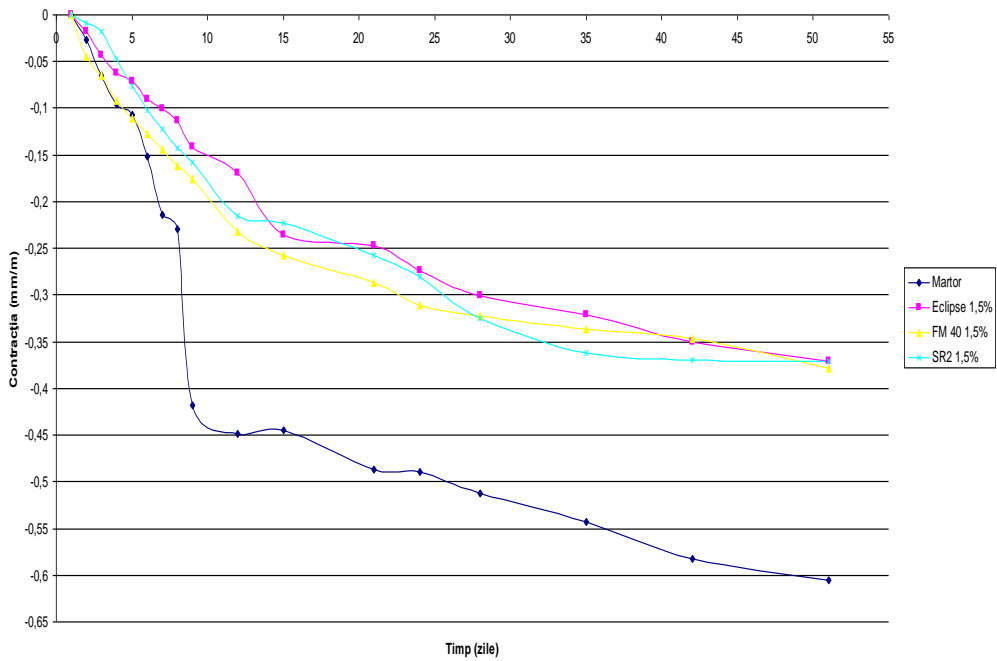


Fig. 4.16. Contractie (mm/m) – Timp (zile) pentru betone cu 1,5% aditiv

74 4. BETOANE CU CONTRACȚII REDUSE

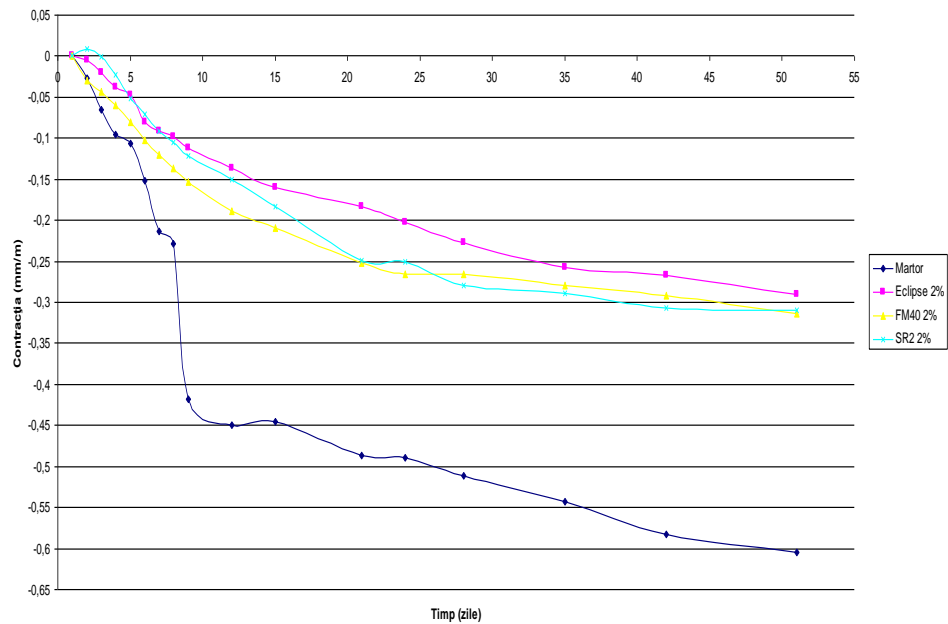


Fig. 4.17. Contractie (mm/m) – Timp (zile) pentru betone cu 2% aditiv

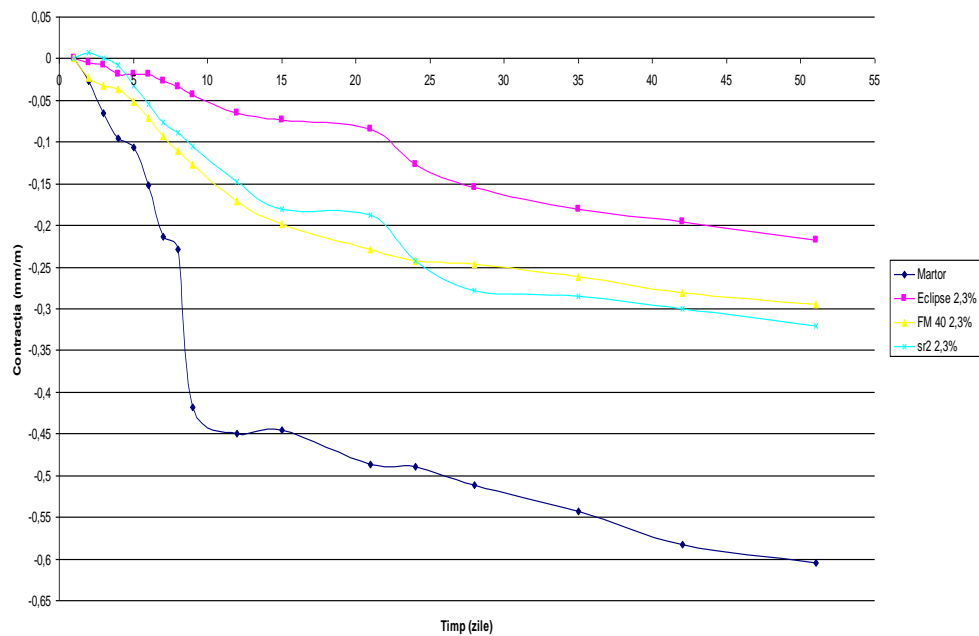


Fig. 4.18. Contractie (mm/m) – Timp (zile) pentru betone cu 2,3% aditiv

4.4. Optimiz. compozițiilor de beton martor și cu aditivi reducători ai contracției 75

Autorul tezei de doctorat propune introducerea a doi noi coeficienți Ω și γ , pentru o caracterizare mai facilă a eficienței unui aditiv asupra efectelor de contracție și fisurare a betoanelor:

1.) Ω - contracția caracteristică, egală cu raportul dintre contracția prezentată de element și rezistența la compresiune, pe cuburi, la 28 de zile, a acestuia.

Pentru elementele de construcții cu cât Ω este mai mic, cu atât eficiența aditivului este mai importantă.

Definind $\Omega = \frac{\varepsilon_c}{f_c} \left(\frac{m^2}{N} \right)$ ca fiind **contracția caracteristică**, rezultă din

tabelul 4.16 că aditivul Eclipse, cu toate că nu are sporuri din punctul de vedere al rezistenței la compresiune la fel de semnificative ca și cele obținute cu aditivul FM 40, prezintă o contracție caracteristică mai importantă:

Tabelul 4.16

Proba		Contracția caracteristică Ω , $\left(\frac{m^2}{N} \right)$
Martor		$1,19 \times 10^{-5}$
Eclipse	1,5%	$0,85 \times 10^{-5}$
	2,0%	$0,66 \times 10^{-5}$
	2,3%	$0,47 \times 10^{-5}$
FM 40	1,5%	$0,88 \times 10^{-5}$
	2,0%	$0,75 \times 10^{-5}$
	2,3%	$0,64 \times 10^{-5}$
SR 2	1,5%	$1,16 \times 10^{-5}$
	2,0%	$1,13 \times 10^{-5}$
	2,3%	$1,14 \times 10^{-5}$

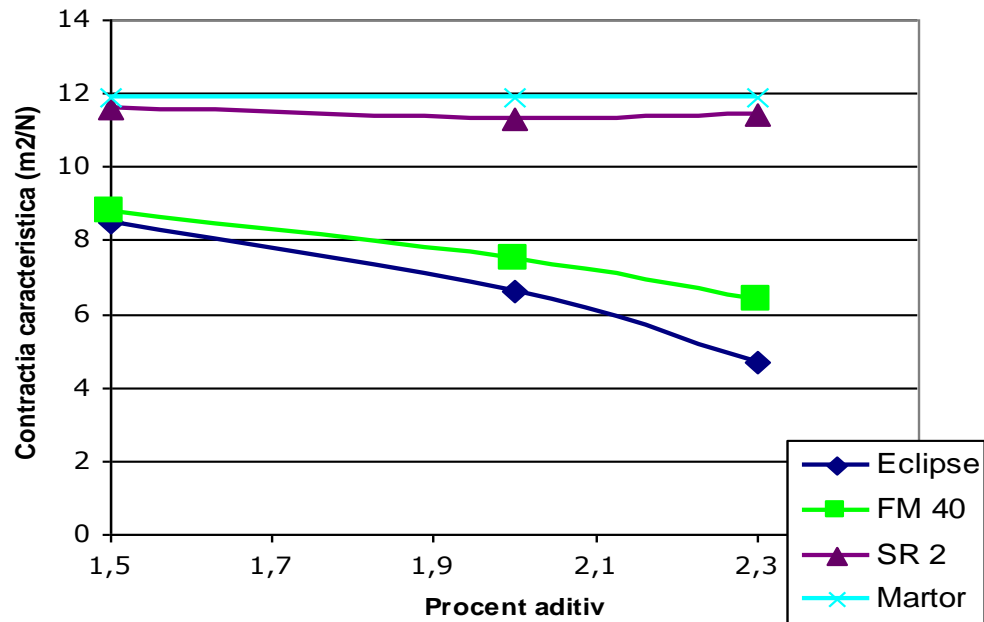


Fig. 4.19. Constrația caracteristică – procent aditiv

2.) γ – indice de fisurare egal cu raportul dintre efortul prezent în element și rezistența la întindere, pe prisme, a acestuia, la 28 de zile.

$$\gamma = \frac{\sigma}{f_{ct}} \Rightarrow \gamma = \frac{E \cdot \varepsilon_c}{f_{ct}}$$

Elementul de beton fisurează dacă $\gamma \geq 1$.

Cu cât valorile lui γ sunt mai reduse, cu atât eficiența aditivului este mai semnificativă.

Tabelul 4.17

Proba	Indice de fisurare γ	
Martor	4,96	
Eclipse	1,5%	4,18
	2,0%	2,92
	2,3%	2,05
FM 40	1,5%	3,85
	2,0%	3,18
	2,3%	2,20
SR 2	1,5%	4,96
	2,0%	4,02
	2,3%	5,03?

4.4. Optimiz. compozițiilor de beton martor și cu aditivi reducători ai contracției 77

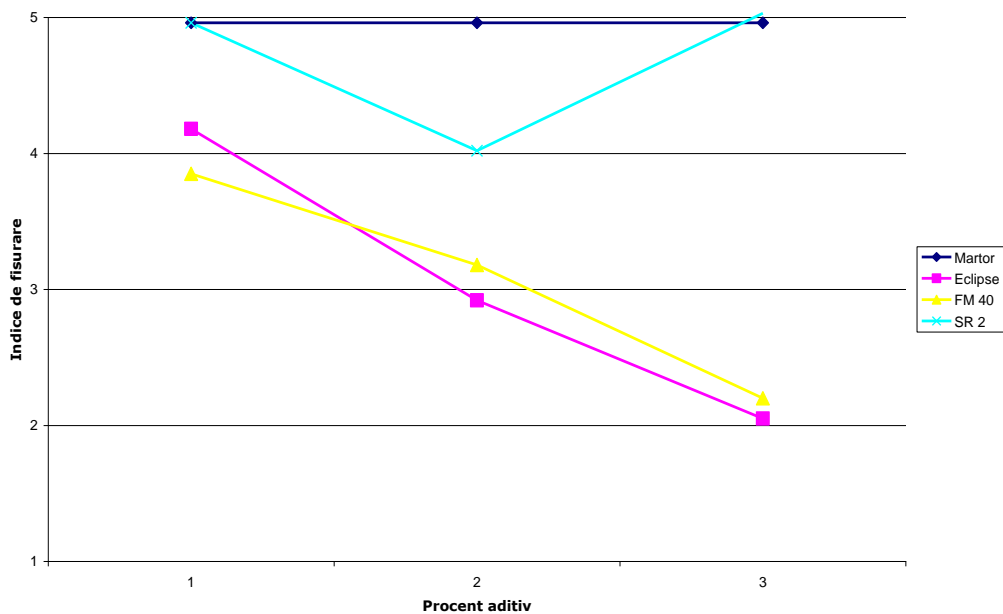


Fig. 4.20. Indice de fisurare γ – procent aditiv

Prin introducerea celor doi coeficienți, Ω - contracția caracteristică și γ - indice de fisurare, se poate estima mult mai acurat tendința de fisurare a betonului întărit, funcție de rezistențele mecanice ale acestuia. Acest lucru este extrem de folositor în proiectarea construcțiilor de beton, dar și în estimarea durabilității acestora.

Cu ajutorul coeficienților, Ω - contracția caracteristică și γ - indice de fisurare, se poate estima eficiența unui aditiv în reducerea contracțiilor, fapt ce conduce la optimizarea compoziției betoanelor cu contracții reduse.

Pe baza acestor coeficienți, se propune redactarea unor instrucțiuni provizorii privind compoziția betoanelor cu contracții reduse.

4.4.3. Considerații teoretice privind apariția fisurilor în elementele de construcții

Contracția la uscare influențează sensibil integritatea structurilor de rezistență. S-a constatat că în elementele la care contracția liberă este împiedicată a se manifesta, există posibilitatea apariției fisurilor în acele elemente. În figura alăturată se prezintă, după A. M. Neville, o imagine schematică a posibilității de apariție a fisurilor într-un element având contracția împiedicată [38].

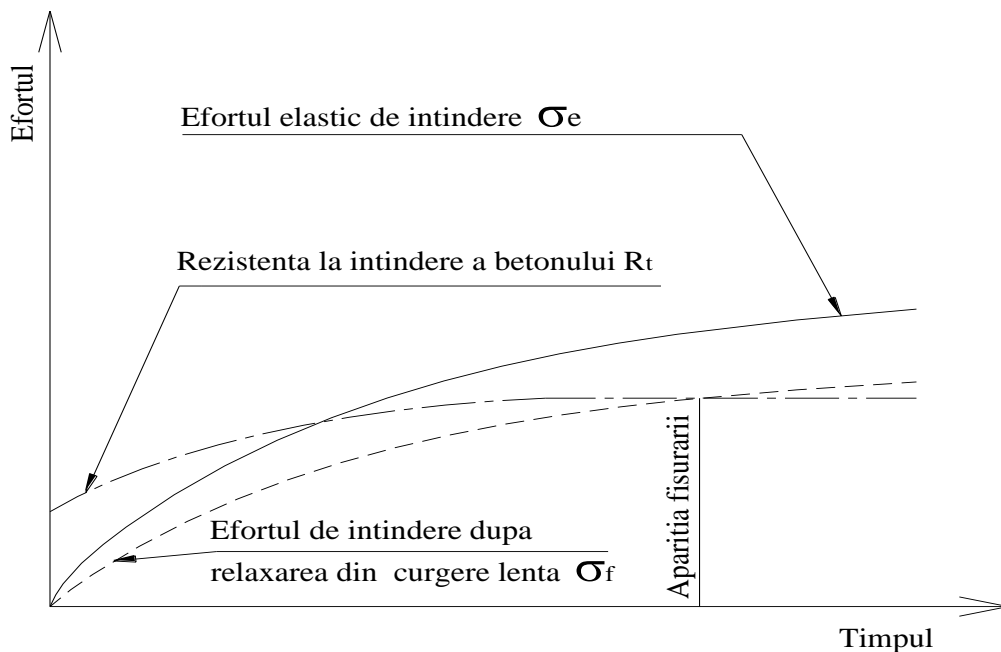


Fig. 4. 21. Apariția fisurilor într-un element cu contracția împiedecată după A. M. Neville [38]

Efortul elastic de întindere, σ_e , rezultă din ecuația de echilibru pentru un element diferențial, și va fi egală cu (fig. 4.21):

$$\sigma_e^m = \varepsilon_c E_b l / 2h \quad (4.1)$$

Relaxarea datorită curgerii lente poate fi introdusă prin modificarea modului de elasticitate cu ajutorul relației dată în literatură:

$$E_{b\varphi} = \frac{E_b}{1 + \varphi} \quad (4.2)$$

Eforturile de întindere după relaxare rezultă:

$$\sigma_f^m = \varepsilon_c E_{b\varphi} l / 2h \quad (4.3)$$

În relațiile anterioare:

l	- lungimea radierului, mm
h	- înălțimea culeei, mm
E_b	- modul de elasticitate beton, N/mm ²
ε_c	- deformație specifică datorită contracției betonului, N/mm ²
φ	- coeficient de curgere lentă

4.4. Optimiz. compozițiilor de beton martor și cu aditivi reducători ai contracției 79

Pe pagina de web a Concrete Foundations Association din America de Nord sunt prezentate următoarele descrieri detaliate a factorilor care contribuie la fisurarea betonului:

- fisurile care apar înainte de întărirea betonului sunt de obicei produse de către tendința de segregare a masei betonului, sau contracția suprafeței acestuia (plastică – fisuri din contracție) cauzată de către pierderea apei în timp ce betonul este încă plastic. Fisurile datorate contracției plastice sunt caracteristice în special plăcilor din beton și au de obicei lungimi mici (între câțiva centimetri până la 3 metri), apărând înainte de finisajul final al suprafețelor în condițiile de mediu cu umiditate scăzută, vânt și temperatură ridicată. Umiditatea de la suprafața betonului se evaporă mai repede ducând la contracții de suprafață mai mari decât cele existente în interiorul betonului. Aceste fisuri ajung de obicei să penetreze plăcile până la jumătatea grosimii lor. În cadrul Conferinței Naționale de Betoane din anul 1984, octombrie, Iași, prof. dr. ing. Corneliu Bob, în lucrarea "Unele considerații privind influența calității materialelor asupra durabilității construcțiilor" [51], prezintă cazul de fisurare a unor dale de beton utilizate pentru ramforsarea drumurilor naționale, la numai 5-6 ore de la turnarea betonului. "Fisurile apărute aveau o înclinație de 45° și erau ireversibile. După opinia autorului apariția acestor fisuri s-a datorat contracției plastice și prizei false a cimentului, iar înclinarea lor față de axul drumului este creată de starea complexă a eforturilor unitare. Astfel, după ce are loc întinderea și vibrarea unei plăci cu dimensiunile de circa 3×3 m, se produce rigidizarea ei datorită prizei false. Contracția plastică este parțial împiedecată a se produce de către structura rigidă cât și datorită frecării cu fundația. Forțele tangențiale de frecare ce se dezvoltă în zona de contact fundație-placă de beton, se cumulează pe suprafața plăcii, dând naștere la eforturi de întindere după cele două direcții ortogonale; eforturile unitare tangențiale și eforturile unitare normale de întindere crează o stare de eforturi complexă. Astfel, având în vedere forma apropiată de un pătrat a plăcii, efortul unitar principal maxim de întindere, care va produce fisurarea, va fi orientat la circa 45° față de direcțiile ortogonale."
- fisurile datorate segregării pot apărea lângă elementele înglobate în beton (armături) sau lângă cofraje sau beton întărit. Aceste fisuri apar datorită vibrării proaste a betonului, a unei tasări ridicate a acestuia (betoane cu multă apă), sau lipsei unei învelitori adecvate a elementelor înglobate în masa betonului.
- fisurile care apar în beton după întărire sunt, de obicei, rezultate datorită contracției la uscare, contracției termice sau a unei tendințe de segregare neadecvată. O modalitate de a reduce acest tip de contracții este plasarea rosturilor de turnare la intervale regulate. Factorul principal care influențează contracția la uscare a betonului este cantitatea de apă din acesta: dacă cantitatea de apă crește și contracția la uscare crește proporțional. Creșteri mari ale conținutului de nisip și reducerea dimensiunii maxime a agregatelor vor mări contracția la uscare deoarece crește și volumul apei, iar agregatele de diametru mic produc o rezistență internă scăzută la contracție.
- fisurile structurale apărute în fundații se datorează de cele mai multe ori, segregării sau încărcărilor orizontale. Marea majoritate a acestor fisuri, rezultate din cauza încărcărilor, sunt aproape orizontale (paralele cu placa parter).

80 4. BETOANE CU CONTRACȚII REDUSE

- fisuri pot apărea și datorită înghețului – dezghețului betonului, reactivitatea alcali – agregate, atacului cu sulf sau coroziunea armăturilor. Acest tip de fisuri apar de obicei în timp lung. La betonul armat, prezența ionilor de clor în mediul înconjurător, ce penetrează betonul prin pori și fisuri, duce la coroziunea armăturilor, lucru ce determină fisurarea betonului, umflarea și exfolierea lui.

În funcție de modul de rezemare al elementelor de construcții, distribuția eforturilor din efectul contracției este diferit. Se disting mai multe cazuri de efecte ale contracției betonului asupra distribuției eforturilor și în consecință a posibilității apariției fisurilor:

- i) Element încastrat la capete:

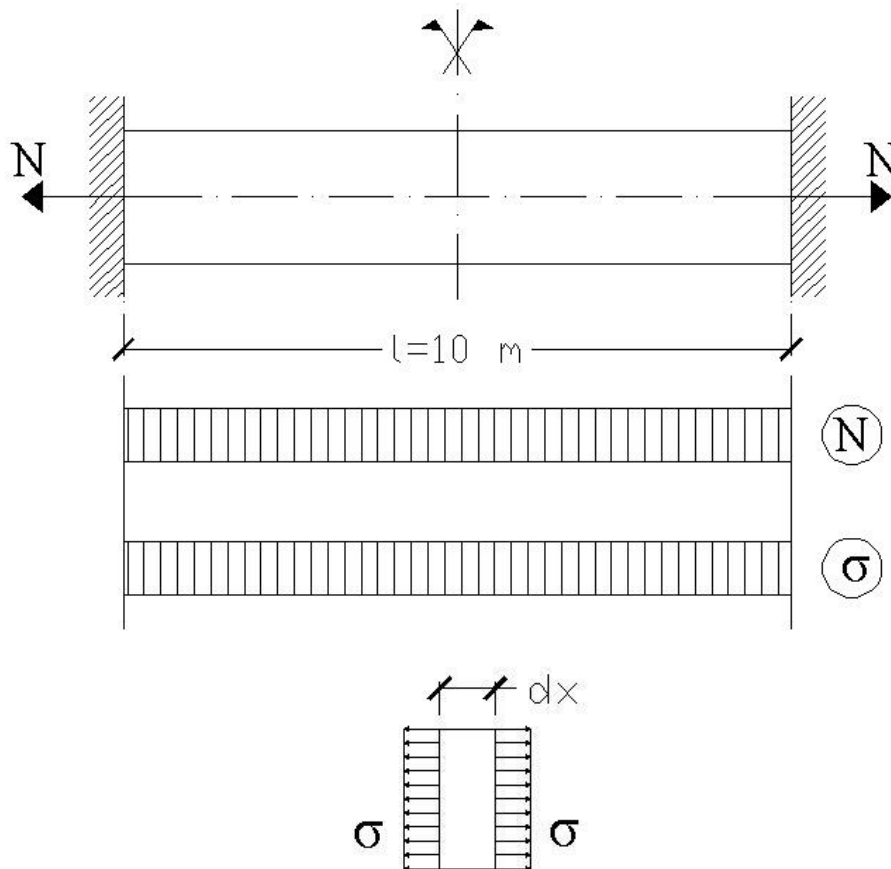


Fig. 4.22. Element încastrat la capete

$$N = \sigma A \quad (4.4)$$

$$\Delta l = \frac{Nl}{EA} \quad (4.5)$$

4.4. Optimiz. compozițiilor de beton martor și cu aditivi reducători ai contracției 81

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{N}{EA} \quad (4.6)$$

Din relațiile anterioare rezultă:

$$N = \varepsilon EA = \sigma A \Rightarrow \sigma = \varepsilon_c E \quad (4.7)$$

$$\text{Deci: } N = f(\varepsilon_{lim}) \quad (4.8)$$

ii) Element încastrat la partea inferioară:

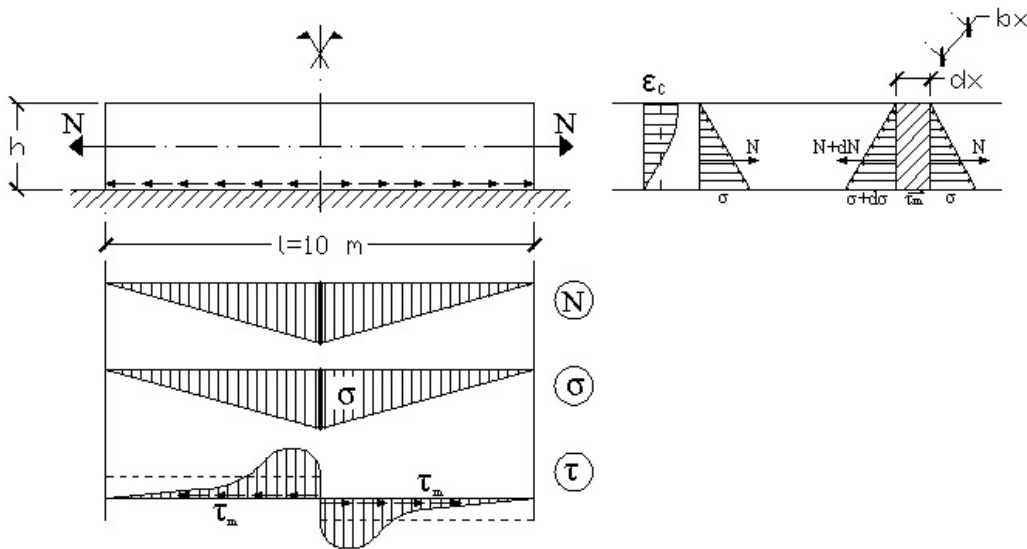


Fig. 4.23. Element încastrat la partea inferioară

Efortul unitar mediu, de legătură între cele două elemente (diafragmă și fundație), este proporțional cu valoarea deformației ε_c produsă de contracția împiedecată:

$$\tau_m = \varepsilon_c E \quad (4.9)$$

Se consideră ecuația de echilibru a unui element diferențial:

$$\frac{1}{2} d\sigma hb = \tau_m b dx \quad (4.10)$$

$$\Rightarrow d\sigma = 2\tau_m \frac{dx}{h} \quad (4.11)$$

Deci:

$$\sigma = 2\tau_m \frac{l}{2h} = \tau_m \frac{l}{h} \quad (4.12)$$

și:

$$dN = \frac{1}{2} d\sigma hb = \tau_m b dx \quad (4.13)$$

82 4. BETOANE CU CONTRACȚII REDUSE

$$\Rightarrow \sigma_c = \varepsilon_c E \quad (4.14)$$

$$\Rightarrow \sigma_{max} = \tau \frac{l}{h} = \varepsilon_c E \frac{l}{h} \quad (4.15)$$

$$\text{și } \sigma_{med} = \frac{\sigma_{max}}{2} = \varepsilon_c E \frac{l}{2h} \quad (4.16)$$

iii) Îmbrăcăminte rutieră rigidă:

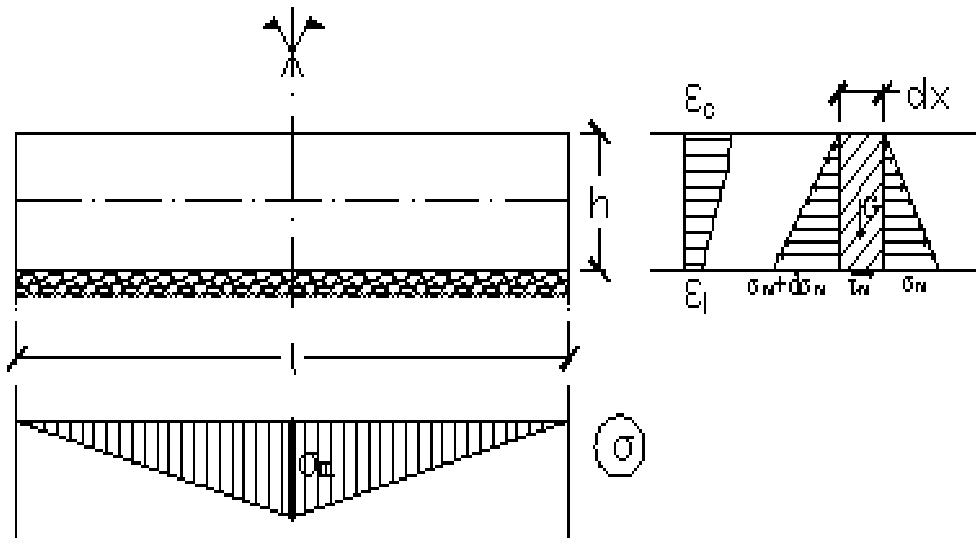


Fig. 4.24. Îmbrăcăminte rutieră rigidă

În acest caz particular trebuie avute în vedere eforturile rezultate în urma efectului de înclieiere (τ_1) și respectiv de frecare (τ_2) ce apar datorită aderenței între dala de beton și stratul de umplutură de la baza acesteia. Se poate scrie:

$$\tau_m = \tau_1 + \tau_2 \quad (4.17)$$

Se va considera în exemplul de față:

$$\tau_m = 0,1f_{ct} \quad (4.18)$$

Ecuția de echilibru pentru un element diferențial este:

$$d\sigma_m h b = \tau_m b dx \quad (4.19)$$

$$\Rightarrow d\sigma_m = \tau_m \frac{dx}{h} \quad (4.20)$$

$$\Rightarrow \sigma_m = \tau_m \frac{l}{2h}$$

Exemplu de calcul:

Se consideră:

$l = 6,00$ m și $h = 0,2$ m

Atunci rezultă:

4.4. Optimiz. compozițiilor de beton martor și cu aditivi reducători ai contracției 83

$$\sigma_m = \tau_m \frac{6}{2 \times 0,2} = 15\tau_m \quad (4.21)$$

Dacă se consideră din nou $\tau_m = 0,1f_{ct}$ și $f_{ct} = 2,0 \text{ N/mm}^2$, se poate scrie:

$$\sigma_m = 3,0 \text{ N/mm}^2 > f_{ct} = 2,0 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{fisuri posibile} \quad (4.22)$$

Sau, dacă $l = 10 \text{ m}$ și $h = 0,2 \text{ m}$, rezultă din nou:

$$\sigma_m = \tau_m \frac{10}{2 \times 0,2} = 25\tau_m \quad (4.23)$$

$$\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2 > f_{ct} = 2,0 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{sigur fisuri} \quad (4.24)$$

iv) Element pe reazeme discontinue:

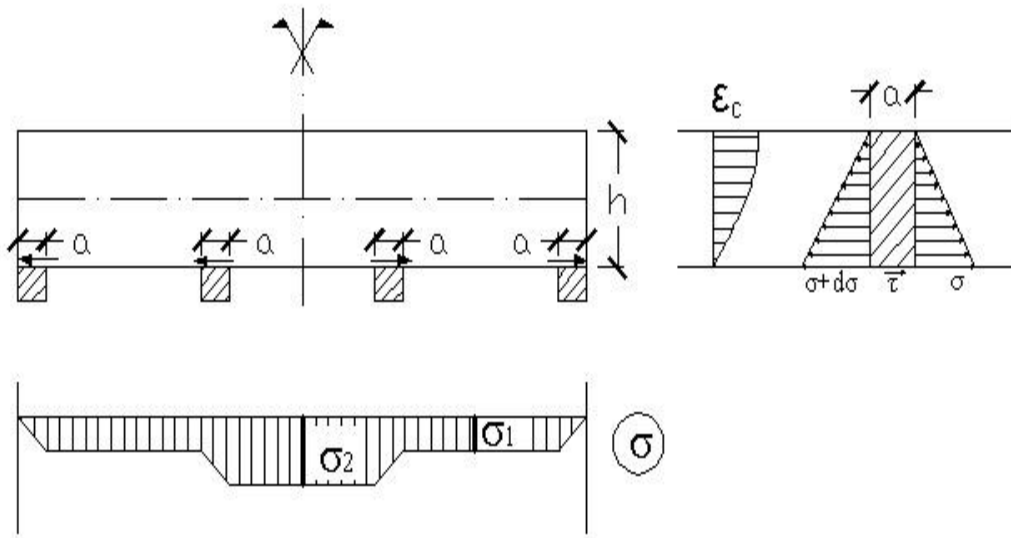


Fig. 4.25. Element pe reazeme discontinue

Se consideră ecuația unui element având lățimea reazemului intermediar:

$$bhd\sigma_1 = \tau a \quad (4.25)$$

De unde rezultă:

$$d\sigma_1 = \tau \frac{a}{h} \Rightarrow \sigma_1 = \epsilon_c E \frac{a}{h} \quad (4.26)$$

$$\text{și, respectiv, } \sigma_2 = 2\epsilon_c E \frac{a}{h} \quad (4.27)$$

Cele patru cazuri anterioare pot constitui un mod de apreciere a efectului contracțiilor asupra unor elemente din beton armat, constituind un punct de plecare în proiectarea și dimensionarea lor.

4.4.4. Caz practic al necesității utilizării aditivilor reducători ai contracției la elementele structurale din beton

În anul 2004, culeele a două poduri de lângă Timișoara, au fost expertizate deoarece au prezentat fisuri [50]. Culeele au fost executate în lunile octombrie – noiembrie ale anului 2004, peste fundația tip radier din beton armat, ce a fost realizată în vara aceluiași an. Legătura dintre fundații și culee s-a realizat prin folosirea unor armături verticale, luându-se în considerare la proiectare și aderența dintre cele două elemente din beton armat. Deoarece elementele de fundație și-au consumat deja deformațiile din contracția betonului, culeele proaspăt turnate au fost supuse la eforturi rezultate din contracții împiedicate.

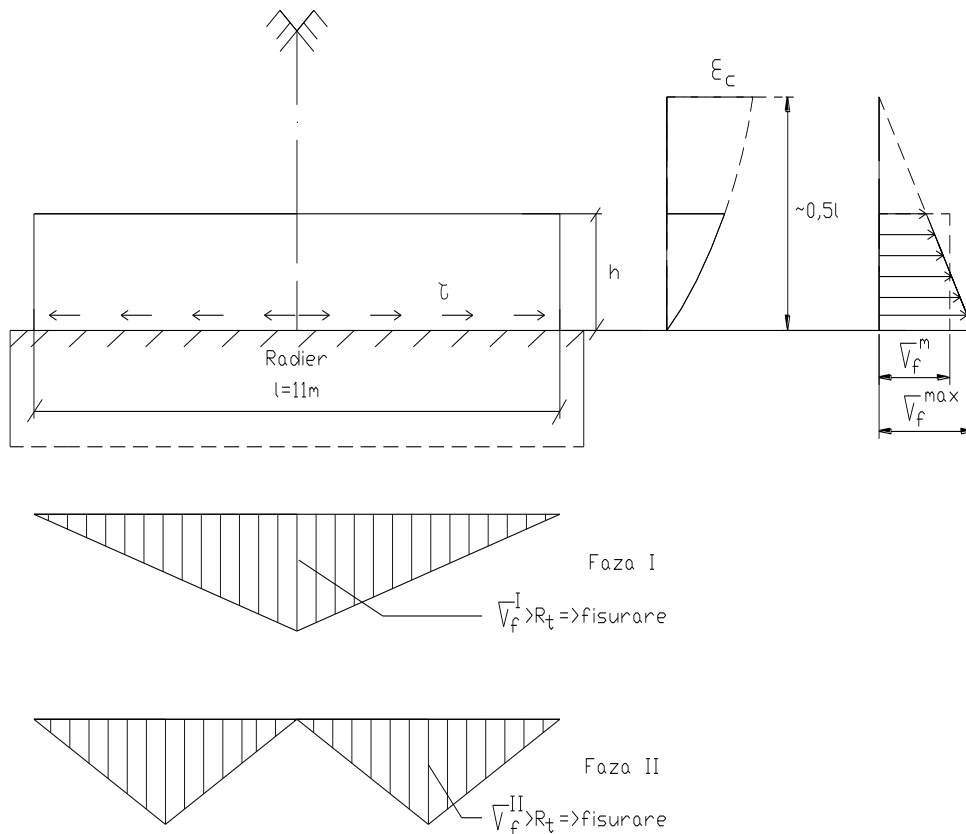


Fig. 4.26. Eforturi în culee

Cea mai mare deschidere de fisuri a fost măsurată la baza culeelor. Din calculele teoretice efectuate rezulta posibilitatea apariției a trei tipuri de fisuri în culee. Acest lucru s-a și produs.

4.4. Optimiz. compozițiilor de beton martor și cu aditivi reducători ai contracției 85

Pentru parametrii măsurați prin determinările experimentale rezultă:

$$\mathbf{a) } f_c = \mathbf{22,7 \text{ N/mm}^2} \quad \mathbf{E = 30000 \text{ N/mm}^2} ; f_{ct}^n = \mathbf{1,65 \text{ N/mm}^2} \Rightarrow \mathbf{C20/25}$$

$$E_{b\phi} = \frac{30000}{1+3} = 7500 \text{ N/mm}^2 ; \text{ unde } \phi = 3,0 - ;$$

$$\varepsilon_c^{lim} = 0,25 \times 10^{-3}$$

($\varepsilon_c^b = 0,4 \times 10^{-3} - 0,6 \times 10^{-3}$ conform determinărilor experimentale proprii, la 3 luni).

$$b \cong 2 \text{ m}; \quad h = 2,08 \text{ m}; \quad l = 11 \text{ m}$$

Faza I:

$$\sigma_f^{med} = 0,25 \times 10^{-3} \times 7500 \times \frac{11}{4} = 5,16 > f_{ct} = 1,65 \Rightarrow \text{fisură}$$

Faza II:

$$\sigma_f^{med} = 0,25 \times 10^{-3} \times 7500 \times \frac{11}{8} = 2,57 > f_{ct} = 1,86 \Rightarrow \text{posibil fisuri}$$

$$\mathbf{b) } f_c = \mathbf{31,3 \text{ N/mm}^2} \quad \mathbf{E = 32500 \text{ N/mm}^2} ; f_{ct}^n = \mathbf{1,86 \text{ N/mm}^2} \Rightarrow \mathbf{C25/30}$$

$$E_{b\phi} = \frac{32500}{1+3} = 8125 \text{ N/mm}^2 ; \phi = 3,0;$$

$$\varepsilon_c^{lim} = 0,25 \times 10^{-3}$$

($\varepsilon_c^b = 0,4 \times 10^{-3} - 0,6 \times 10^{-3}$ determinări experimentale proprii la 3 luni)

$$b \cong 2 \text{ m}; \quad h = 2,08 \text{ m}; \quad l = 11 \text{ m}$$

Faza I:

$$\sigma_f^{med} = 0,25 \times 10^{-3} \times 8125 \times \frac{11}{4} = 5,58 > f_{ct} = 1,65 \Rightarrow \text{fisură}$$

Faza II:

$$\sigma_f^{med} = 0,25 \times 10^{-3} \times 8125 \times \frac{11}{8} = 2,79 > f_{ct} = 1,86 \Rightarrow \text{posibil fisuri}$$

Adâncimea fisurilor apărute a fost de 8÷55,5 mm, cea mai mare deschidere măsurată s-a înregistrat la partea inferioară a culeelor, conform Fig.4. 26.

4.4.4.1. Efectul fisurării culeelor

Scopul culeelor este acela de a prelua și a transmite eforturile din suprastructură la radier. Principala direcție de solicitare a culeelor este cea verticală; la solicitările din trafic, presiunea pământului și seism, apar deasemenea, încărcări transversale pe culee. Numai din încărcări laterale sau diagonale din seism, asupra culeelor apar eforturi longitudinale (transversale pe calea de rulare).

Fisurile datorate contracției împiedecate împart structura culeelor în 4 părți diferite, chiar dacă aceste fisuri nu penetrau, la timpul efectuării expertizei tehnice, întreaga secțiune transversală a culeelor. Aceste 4 părți sunt legate prin intermediul armăturilor existente în culee. Acest fapt a dus la modificarea modului de răspândire a eforturilor în radier în comparație cu cel luat în considerare la proiectare. Situația actuală este vulnerabilă la acțiuni seismice laterale sau diagonale, deoarece s-a produs o reducere drastică a rigidității masive.

Al doilea efect important al fisurilor este acela de reducere a durabilității structurii precum și a perioadei de folosire.

Pentru a preîntâmpina apariția fisurilor datorită contracției împiedecate, la proiectare și execuție, se pot lua următoarele măsuri:

- micșorarea perioadei de timp dintre executarea radierului și a culeelor;
- utilizarea aditivilor reducători ai contracției, care au ca și rezultat, conform celor prezentate de către autor, reducerea deformațiilor specifice datorate contracției cu 50% sau chiar mai mult.

Se desprind următoarele concluzii la acest capitol:

1. Rezultatele testelor experimentale pot sta la baza stabilirii unor direcții principale de concepere a unei compoziții de beton cu contracții reduse. Se menționează însă faptul că valorile cantitative obținute, s-ar putea să nu fie foarte exacte, deoarece măsurătorile contracției efectuate au inclus și dilatarea termică a probelor;

2. Utilizarea aditivului ECLIPSE la prepararea betoanelor conduce la sporuri ale rezistenței la compresiune la betoanele întărite;

3. Utilizarea aditivului SR - 2 la prepararea betoanelor conduce la o micșorare a rezistențelor betonului față de betonul martor, de aceea se recomandă ca la utilizarea lui în betoane să se adauge și un alt aditiv ce are ca și efect sporirea rezistențelor betonului întărit. Acest lucru conduce desigur la un cost mai ridicat al produsului finit;

4. Din analiza rezultatelor obținute până în prezent, rezultă că aditivul ECLIPSE este cel mai eficient în cazul utilizării pentru obținerea unor betoane cu contracții reduse. Raportul preț/efect reducător de contracție fiind deasemenea în favoarea produsului de la firma Grace;

5. Aditivele analizate, utilizate la prepararea betoanelor cu contracții reduse, conduc la micșorarea contracțiilor, față de betonul martor, cu până la 50%;

6. Utilizarea aditivului superfluidizant FM 40 la prepararea betoanelor conduce la sporuri semnificative ale rezistenței la compresiune la betoanele întărite;

7. Superfluidizantul FM 40 nu influențează semnificativ densitatea betoanelor în stare proaspătă precum și rezistențele la întindere la 28 de zile obținute pe probele întărite;

8. Aditivul Eclipse utilizat în aceleași procente, ca și aditivele FM 40 și SR - 2, conduce la obținerea unor betoane cu contracții mai reduse decât cele la

4.4. Optimiz. compozițiilor de beton martor și cu aditivi reducători ai contracției 87

prepararea cărora s-a utilizat aditivul FM 40 sau SR - 2 cu până la 50%, în primele 28 de zile (funcție de procentul de aditiv adăugat la prepararea betonului);

9. Tendința de fisurare scade cu creșterea procentului de aditiv, utilizarea unui procent superior de aditiv reducător al contracției decât cel indicat de către producător, nu conduce obligatoriu la o micșorare a contracției la uscare a betonului superioară;

10. Utilizarea aditivilor reducători ai contracției în betoane conduc la:

- reducerea contracției autogene și de uscare a betonului;
- reducerea posibilității de coroziune a armăturilor și de degradare a betonului prin limitarea posibilității de pătrundere a umidității și a ionilor de clor prin micro sau macro fisuri ⇒ crește durabilitatea;
- suprafețele elementelor din beton sunt mai netede;
- se reduce costul întreținerii în timp al structurilor realizate cu betoane cu aditivi reducători ai contracției.

Costul aditivilor reducători ai contracției este destul de ridicat, dar utilizarea lor poate reduce sau elimina necesitatea utilizării antrenorilor de aer sau a aditivilor reducători de apă în beton;

11. Rezultatele experimentale obținute pe cele trei tipuri de betoane cu superplastifianți sunt comparabile cu cele prezentate în lucrări de specialitate din țară și străinătate.

12. Se propune, pe viitor testarea influenței asupra reducerii contracției betoanelor întărite a altor aditivi apăruți pe piața specifică și stabilirea celei mai eficiente compoziții lunând în considerare raportul cost produs final/efect de reducere a contracțiilor. De asemenea, se propune testarea celor trei aditivi studiați pe alte tipuri de betoane (betoane cu agregate ușoare, beton celular autoclavizat, betoane autocompactante etc), sau înlocuirea în compozițiile analizate a unei cantități din masa cimentului cu pudră de silice sau cenușă de termocentrală.

Notă informativă:

Aditiv	Eclipse	FM 40	SR - 2
Preț pe kg	4,2 €	2,55 €	6,45 €

5. BETOANE AUTOCOMPACTANTE

5.1. Introducere

Betonul reprezintă materialul realizat de om cu cea mai răspândită utilizare. Acest fapt conduce la importante probleme în proiectare și fabricare, în vederea obținerii unui produs eficient pe durate de timp scurte și lungi. Materialul trebuie să fie, deasemenea, "prietenos cu mediul" în timpul procesului de fabricare, cât și să aibă un aspect estetic când este folosit la realizarea de structuri.

Betonul este un material de construcții de succes datorită:

- Materiile prime necesare fabricării betonului au o largă răspândire în lume;
- Prețurile materiilor prime sunt relativ scăzute;
- Proprietățile și performanțele betonului îi conferă acestuia o largă scală de aplicații posibile (Proprietățile betonului pot varia, putând fi chiar excepționale: rezistențe la compresiune cuprinse între 0,1MPa până la 800MPa, densități între 100 kg/m³ până la 5000 kg/m³).

Proprietățile betonului au fost îmbunătățite de-a lungul timpului pentru a satisface diferite cerințe ale societății, astfel încât, s-a depășit cerința clasică de a avea lucrabilitate și rezistențe sporite. S-au efectuat numeroase studii asupra utilizării aditivilor și superplastifiantilor în beton pentru a depăși bariera conținutului minim de apă necesar pentru o bună lucrabilitate a betonului. Ca și rezultat, betoane de înaltă și ultra înaltă performanțe au apărut, betoane ce prezintă deasemenea și o durabilitate superioară.

Turnarea și vibrarea betonului reprezintă fazele cel mai "zgomotoase" în execuția unei construcții. Nivelul sonor al execuției elementelor structurale este un element tot mai puțin tolerat de către societate în contextul actual de protejare a mediului înconjurător. În ultimii ani, s-au instituit, la nivel european, reguli privitoare la sănătatea muncitorilor atât în fabricile de betoane prefabricate cât și pe șantiere [56].

În anul 1986 Profesorul Hajime Okamura de la Universitatea din Tokyo, Japonia, a introdus pentru prima dată noțiunea de beton autocompactant, iar primul prototip a fost dezvoltat de către K. Ozawa, de la aceeași universitate, doi ani mai târziu, ca și răspuns la necesarul tot mai mare a siguranței durabilității structurilor din beton, precum și a lipsei tot mai acute de personal calificat în execuție. De atunci compoziția lui s-a dezvoltat în scopul adaptării ei la producția industrială. În aceeași perioadă, producătorii de aditivi și adaosuri pentru betoane și-au lărgit paleta de produse, dezvoltând producția de betoane și elemente prefabricate [58].

Betonul autocompactant este un beton inovativ care nu necesită vibrație la punerea în operă. Acest beton este capabil să curgă sub greutate proprie, umplând complet cofragul și atingând singur compactarea, chiar în prezența unor armături dese.

Betonul autocompactant întărit este dens, omogen și prezintă aceleași proprietăți ca și betonul tradițional vibrat.

SCC are următoarele avantaje:

- din punctul de vedere al executantului se evită operațiunile scumpe de punere în operă și se mărește și îmbunătățește eficiența pe șantier;
- evitarea vibrațiilor produse asupra muncitorilor ceea ce duce la îmbunătățirea condițiilor de muncă pe șantier (eliminându-se procesul de vibrare al betonului, muncitorii vor lucra într-un mediu cu un nivel mult mai scăzut de sunet și vibrații);
- se apreciază că SCC prezintă o durabilitate sporită în comparație cu betonul tradițional vibrat (acest fapt se poate explica prin evitarea distrugerii structurii interne a betonului, fapt asociat de obicei cu procesul vibrării).

Betonul autocompactant a apărut în scopul realizării unor structuri cu durabilitate sporită. De atunci, numeroase investigații s-au efectuat, iar acest beton a fost utilizat la realizarea unor structuri din Europa, Japonia și SUA.

Cercetările internaționale actuale se îndreaptă astăzi spre stabilirea unor metode de fabricare raționale, precum și a unor teste standard asupra betonului autocompactant, toate având drept scop implementarea acestui beton ca un beton uzual. Ca și rezultat s-au publicat numeroase recomandări și manuale pentru betonul autocompactant.

5.2. Dezvoltarea betonului autocompactant

În ultimii 20 de ani, problema durabilității structurilor din beton a reprezentat un subiect de interes major pe plan internațional. Pentru realizarea unor structuri din beton durabile, betonul trebuie bine și corect compactat la punerea în operă, fapt ce necesită un personal calificat pe șantier. În prezent piața forței de muncă din lume suferă o accentuată reducere a personalului calificat în domeniul construcțiilor, ceea ce rezultă în reducerea calității lucrărilor executate în ultimii 20 de ani. O soluție viabilă a acestui deficit în realizarea unor structuri din beton cu durabilitate sporită este utilizarea betonului autocompactant – beton care se compactează singur, numai prin greutatea proprie în fiecare colț al cofragului în care este turnat, nefiind necesară vibrare (Fig. 5.1) [62].

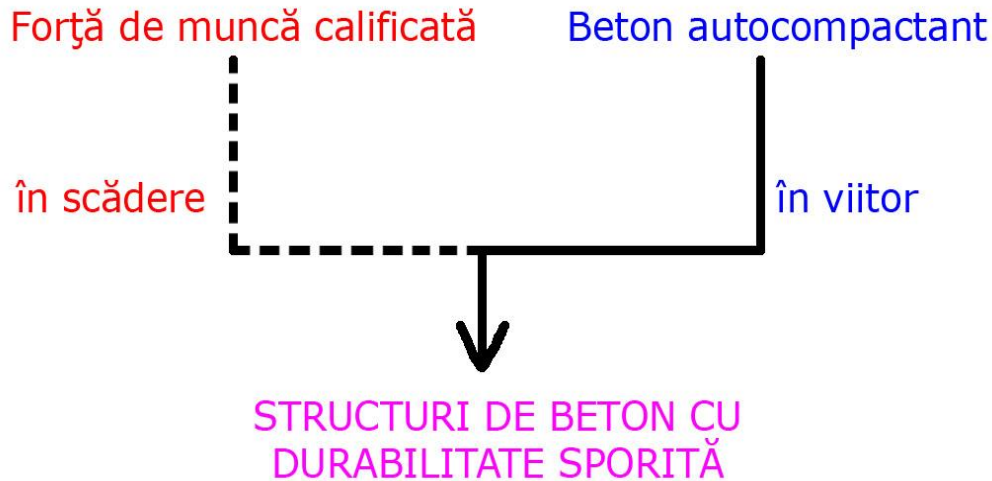


Fig. 5.1. Utilitatea betonului autocompactant

În Europa acest tip de beton a fost utilizat pentru prima dată la realizarea de drumuri în Suedia, în jurul anului 1995.

Comunitatea europeană a pus bazele unui proiect internațional – industrial, denumit: "SCC" 1997-2000, începând de atunci, betonul autocompactant a început să fie mai des utilizat peste tot în Europa.

Betonul autocompactant, reprezintă o inovație importantă care schimbă esențial modul în care este perceput, produs și turnat betonul. Betonul autocompactant reprezintă un pas important spre industrializare în industria de construcții care duce la structuri rezistente și rentabile. Pe de altă parte betonul autocompactant reprezintă un produs important pentru realizarea betoanelor de ultra înaltă rezistență ($f_c=150 - 200 \text{ N/mm}^2$), materiale caracterizate ca fiind sustenabile (emisii reduse de CO_2 , durabile și economice).

5.3. Cerințe pentru producerea betonului autocompactant

5.3.1. Condiții pentru materialele componente

5.3.1.1. Generalități

Materialele utilizate pentru betonul autocompactant sunt aceleași cu cele care se utilizează la betonul compactat prin vibrare cu respectarea în principal a prevederilor standardului SR EN 206-1. Sunt însă necesare și cerințe suplimentare în vederea asigurării proprietăților specifice betonului autocompactant.

Stabilirea unei compoziții de beton autocompactant trebuie să urmeze următorii pași:

5.3. Cerințe pentru producerea betonului autocompactant 91

- 1. stabilirea, prin teste experimentale, a compoziției optime a pastei ce va sta la baza betonului autocompactant;
- 2. stabilirea, prin teste experimentale, a compoziției optime a mortarului autocompactant;
- 3. stabilirea compoziției betonului autocompactant.

În cadrul primilor doi pași se stabilește dozajul optim de apă de amestecare și de superplastifiant, urmând apoi, în pasul 3 stabilirea dozajelor finale prin efectuarea de teste pe beton.

Autocompactarea descrie o proprietate a betonului proaspăt care se poate obține prin diverse metode, dozaje și compoziții. La stabilirea compoziției unui beton autocompactant trebuie avut în vedere locul de punere în operă a acestuia (pentru elemente prefabricate, beton de la stație, clasa de expunere a betonului, forma și suprafața elementelor din beton etc), rezultând, de aici, dozjul minim de ciment, volumul de pastă, timpul minim de lucrabilitate și curbe granulometrică a agregatelor.

Natura cimentului și a adaosurilor, precum și cantitatea lor, influențează dozajul optim de apă din betonul autocompactant, precum și caracteristicile betonului proaspăt. Interacțiunea dintre materialele pudră și adaosurile din beton influențează esențial lucrabilitatea acestuia.

Curba granulometrică a agregatului din betonul autocompactant trebuie să ia în considerare și forma și dimensiunea elementelor ce urmează a fi realizate.

5.3.1.2. Cimentul

Se utilizează cimenturi conforme cu SR EN 197-1. În alegerea tipului de ciment primează cerințele lucrării la care se utilizează betonul.

5.3.1.3. Adaosurile

Pentru a crește coeziunea și pentru a elimina segregarea amestecului de beton proaspăt se utilizează adaosuri inerte, puzzolanice sau hidraulice. Pe de altă parte acestea pot modifica dozajul de ciment în scopul reducerii căldurii de hidratare și a contracției la uscare.

Adaosurile sunt clasificate în funcție de capacitatea lor de a reacționa cu apa în două tipuri:

Tabelul 5.1

Tipul I	Inerte sau semi-inerte	- Filere minerale (calcar, dolomita) (SR EN 12620) - Pigmenți (SR EN 12878)
Tipul II	Puzzolanice	- Cenușa de termocentrală (SR EN 450) - Silice ultrafină (SR EN 13263)
	Hidraulice	- Zgura granulată de furnal macinată

Filele minerale

Granulometria filerelor, forma granulelor și absorbția de apă pot influența necesarul de apă. Filerul de calcar cu granule mai mici de 0,125 mm și cu o trecere >70% pe sita de 0,063 mm poate conduce la rezultate bune.

Cenușa de termocentrală

Cenușa de termocentrală este un adaos care asigură creșterea coeziunii betonului autocompactant. Trebuie utilizată cu precauție deoarece la dozaje ridicate poate să mărească prea mult coeziunea internă a amestecului, ceea ce reduce fluiditatea acestuia.

Silicea ultrafină

Silicea ultrafină caracterizată de o finețe foarte ridicată și având o formă sferică conduce la o bună coeziune și la reducerea tendinței de segregare. Pe de altă parte poate provoca o rigidizare rapidă la suprafața betonului.

Zgura granulată de furnal macinată

Zgura macinată contribuie la reducerea căldurii de hidratare. În cantități mari reduce fluiditatea și crește riscul de segregare.

Pigmenții

Se pot utiliza în concordanță cu SR EN 12878 , cu aceeași atenție și cu aceleași limitări ca și la betonul vibrat. Pot afecta proprietățile betonului proaspăt astfel că sunt necesare teste preliminare înaintea folosirii lor.

5.3.1.4. Agregatele

Atât agregate naturale cât și de carieră se pot folosi pentru betonul autocompactant. Agregatele de carieră necesită de obicei o cantitate de pastă sporită. Din studiile realizate rezultă că se poate utiliza, în compoziția betonului autocompactant, nisip obținut din piatră sfărâmată, dar este necesară sporirea dozajului de superplastifiant. Folosirea unei cantități mici de agregat grosier va necesita desigur o cantitate micșorată de pastă de ciment. Cea mai mare dimensiune a agregatului, recomandată în cercetările internaționale este cuprinsă între 16 – 20 mm. Deoarece betonul autocompactant este foarte sensibil la conținutul de apă, umiditatea agregatelor utilizate în compoziția sa trebuie verificată cu atenție sporită.

Se utilizează agregate cu masa volumică normală și agregate grele conform SR EN 12620 și SR EN 206-1 sau agregate ușoare conform SR EN 13055-1.

Trebuie verificate conținutul de apă, absorbția de apă, conținutul de particule fine pentru a asigura o calitate constantă a betonului autocompactant.

Sunt foarte importante de asemenea forma și granulometria agregatelor pentru a nu rămâne goluri între agregatele grosiere și cele fine.

Agregatele grosiere

Agregatele ce corespund SR EN 12620 sunt adecvate pentru obținerea betonului autocompactant. Agregatele ușoare trebuie utilizate cu precauție pentru că s-ar putea ridica la suprafața betonului dacă pasta de ciment are o vâscozitate scăzută.

Dimensiunea maximă a granulelor este determinată de distanța dintre armături. Este limitată în general la 16-20 mm.

Granulozitatea și forma agregatelor influențează fluiditatea amestecului.

Agregatele fine/nisipul

Influența agregatelor fine asupra proprietăților betonului autocompactant proaspăt este semnificativ mai mare decât cea a agregatelor grosiere. Particulele mai mici de 0,125 mm trebuie incluse la fracțiunea fină a pastei și, de asemenea, în calculul raportului apă/pudră.

Față de cele prezentate se precizează că particulele foarte fine/pudră (ciment+adaosuri+praf de agregate) se situează în intervalul 500 – 600 kg/m³. Între particulele foarte fine de agregat se folosesc: microsilia, metacaolinul și cenușa zburătoare de termocentrală. Între aceste materiale este preferată cenușa zburătoare de termocentrală care are un cost redus comparativ cu microsilia și metacaolinul.

Cerințele de performanță structurală iau în considerare forma, dimensiunile și condițiile de armare a betonului. În funcție de distanța d dintre armături se precizează tipul de beton autocompactant: $d < 60\text{mm}$; $d = 60\text{-}200\text{mm}$; $d > 200\text{mm}$.

Filerul

Numeroase tipuri de filere se pot utiliza la fabricarea betonului autocompactant, cum ar fi: calcar, dolomita, cenușa zburătoare etc. Fiecare filer are propriile influențe asupra betonului autocompactant și trebuie investigat separat, folosindu-se diverse metode de testare (testul reologic, teste de amestecare). Se va evita, dacă este posibil, o curbă granulometrică a filerului care coincide cu cea a cimentului utilizat. Din literatura de specialitate rezultă că o curbă granulometrică relativ plată în comparație cu cea a cimentului va conduce la obținerea unei lucrabilități satisfăcătoare, utilizându-se o cantitate rezonabilă de aditiv.

Filerul natural combinat cu pudra de silice poate fi utilizat pentru crearea necesarului de pastă în vederea obținerii în final a unui beton cu compoziție stabilă. În acest caz însă, trebuie sporită cantitatea de superfluidizant.

5.3.1.5. Aditivii

Agenții de vâscozitate:

Au rolul de a modifica coeziunea betonului autocompactant fără a schimba semnificativ fluiditatea acestuia. Ei se folosesc pentru a reduce efectele unor abateri ale dozajelor și cerințelor materialelor componente.

Efectul utilizării agenților de vâscozitate în beton îl constituie reducerea rezistenței inițiale a acestuia. În literatura de specialitate se arată că prin utilizarea filerului de calcar se poate obține o sporire a rezistenței inițiale a betonului (acest filer poate înlocui o cantitate de ciment considerabilă).

Cercetările făcute în vederea reducerii cantității de filer și înlocuirea lui cu agent de vâscozitate arată că este posibilă înlocuirea a 10% a conținutului de pastă prin utilizarea acestor agenți.

Agenții de vâscozitate sunt recomandați a fi utilizați numai pentru aplicații speciale.

Superplastifianți/Aditivii intensi reducători de apă:

Majoritatea producătorilor de aditivi au o gamă largă de superplastifianți care acoperă anumite cerințe specifice, fiind precizate totodată efectele superplastifianților asupra celorlalți componenți ai betonului.

Efectul aditivilor trebuie să se păstreze pe perioada necesară transportului și punerii în operă a betonului.

94 5. BETOANE AUTOCOMPACTANTE

Superplastifianții sau aditivii intensi reducători de apă (SR EN 934-2) reprezintă componentul esențial al betonului autocompactant. Se pot utiliza, după caz și aditivi care modifică vâscozitatea, aditivi antrenori de aer, aditivi acceleratori și întârziatori de priză în același mod ca și la betonul vibrat.

Alegerea aditivului depinde de proprietățile chimice ale liantului sau adaosului (finețea, conținutul în carbon, alcaliile, C_3A). Se recomandă controlul compatibilității aditivului cu liantul și adaosul.

Superplastifiantul Glenium ACE 30 s-a dovedit a da cele mai bune rezultate în ceea ce privește obținerea unui amestec stabil ce prezintă valori ridicate de curgere-tasare.

În ultimii ani o largă gamă de alte produse pentru betoane autocompactante au apărut pe piață, dintre care se menționează, de exemplu:

- Sika ViscoCrete-1 pentru betoane autocompactante care necesită o lucrabilitate sporită sau sunt puse în operă la temperaturi ridicate ale mediului ambiant.
- Sika ViscoCrete-2 pentru betoane autocompactante cu lucrabilitate normală și condiții de mediu normale la punerea în operă.
- Sika ViscoCrete-3 pentru betoane autocompactante ce au adausuri de pudră de silice.
- Sika ViscoCrete-5 și Sika ViscoCrete-20 H pentru betoane autocompactante utilizate la producția elementelor prefabricate.

Aditivii ViscoCrete reprezintă cea de-a treia generație a reducătorilor de apă. Apa se reduce cu până la 40% depinzând de dozajul de aditiv utilizat în compoziția betonului autocompactant. Datorită acestei reduceri semnificative a dozajului de apă, se pot obține creșteri semnificative de rezistență folosindu-se un dozaj de ciment scăzut. Deasemenea este de menționat faptul că, la reducerea dozajului de apă, se obțin reduceri ale contracției la uscare a betonului.

Aditivii antrenori de aer:

Se folosesc atunci când este necesară îmbunătățirea rezistenței la îngheț-dezghet. De asemenea contribuie la o bună finisare a plăcilor subțiri unde există pericolul decojirii. Aici se pot exemplifica următorii aditivi antrenori de aer: CONPLAST AE383, Sika LPS-A 94, REMI – AIR (LP) etc.

5.3.1.6. Fibrele

Fibrele metalice și fibrele din polimeri sunt utilizabile la betonul autocompactant, dar pot reduce fluiditatea și capacitatea de a ocupa ușor spațiul dintre armături. În consecință trebuie ca prin teste preliminare să se stabilească tipul, lungimea și dozajul de fibre pentru a obține cerințele necesare betonului autocompactant proaspăt și întărit.

Fibrele din polimeri previn fisurarea din contracție iar cele metalice cresc ductilitatea betonului.

5.3.1.7. Apa de amestecare

Apa se utilizează în condițiile precizate de SR EN 1008. Dacă se utilizează apa reciclată trebuie să se țină seama de efectul particulelor aflate în suspensie asupra proprietăților betonului.

Cerințele de performanță ale betonului pot fi realizate, printre altele, prin:

- reducerea proporției de apă și particule fine (material < 0,1 mm) prin folosirea de superplastifianți și aditivi antrenori de aer;
- utilizarea unor aditivi care modifică vâscozitatea amestecului în vederea asigurării rezistenței la segregare;
- realizarea betonului autocompactant pe baza combinațiilor celor două măsuri precedente.

5.3.2. Condiții pentru compoziția betonului autocompactant

5.3.2.1. Generalități

Compoziția betonului autocompactant se alege astfel încât să asigure toate criteriile de performanță ale acestui beton, atât în stare proaspătă cât și în stare întărită.

5.3.2.2. Principiile stabilirii compoziției

Pentru a obține caracteristicile specifice se au în vedere următoarele principii:

- 1) Fluiditatea și vâscozitatea pastei se ating în urma unei alegeri atente a raportului dintre ciment și adaosuri și prin limitarea raportului apă/pudră, după care se adaugă superplastifiantul și (opțional) aditivul modificador de vâscozitate.
- 2) Pentru a reduce creșterea temperaturii și apariția fisurilor din contracție, pudra poate conține o cantitate însemnată de adaosuri de tipul I sau II care permit menținerea cantității de ciment la o valoare acceptabilă.
- 3) Pasta asigură antrenarea agregatelor, ceea ce înseamnă că volumul acestora trebuie să fie mai mare decât volumul de goluri al agregatelor pentru a le acoperi în totalitate și pentru a le lubrifia. Va rezulta o creștere a fluidității și o reducere a frecării dintre agregate.
- 4) Acoperirea agregatelor grosiere cu un strat de mortar va asigura o trecere mai ușoară a acestora printre armături.

Aplicarea acestor principii de obținere conduc, față de betonul vibrat, la următoarele:

- un conținut mai redus de agregate grosiere
- creșterea conținutului de pastă
- reducerea raportului apă/pudră
- creșterea conținutului de superplastifiant
- utilizarea, în unele cazuri, a unui aditiv de modificare a vâscozității.

5.3.2.3. Compoziția și proprietățile betonului autocompactant

Materialele componente de bază ce se regăsesc în betonul autocompactant sunt, în marea lor majoritate, cele existente în betonul clasic.

Pentru a obține un beton cu caracteristici autocompactante în stare proaspătă este necesară utilizarea unor proporții sporite de aditivi chimici cât și de materiale ultra fine în compoziția stabilită.

Cele mai comune filere utilizate sunt: pudră de calcar, pudră de cuarț, deșeuri industriale re folosibile (cum ar fi: cenușa de termocentrală, cenușa de furnal și pudra de silice).

Compoziția tipică a unui beton autocompactant în comparație cu cea a unui beton obișnuit, este prezentată în figura 5.2.

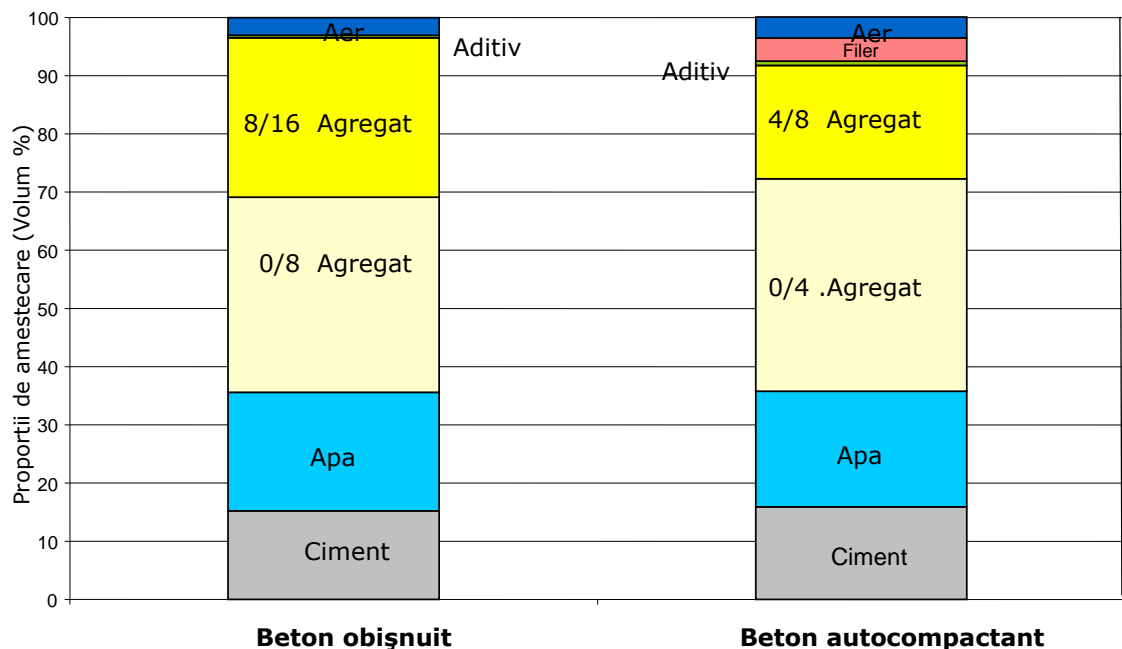


Fig. 5.2. Compoziția betonului autocompactant în comparație cu cea a betonului vibrat normal

Filerele sunt folosite adeseori pentru a înlocui o parte a agregatelor și pentru a modifica vâscozitatea.

În cazul betonului autocompactant se anulează dependența față de tehnica de vibrare folosită pe șantier, iar amestecul prezintă o bună stabilitate și o tendință de segregare redusă.

Luând în considerare lucrările lui Okamura și Ozawa, la ora actuală se cunosc trei tipuri de betoane autocompactante:

- *tipul pudră*, are în compoziție o cantitate sporită de pudră;

5.3. Cerințe pentru producerea betonului autocompactant 97

- *tipul agent de vâscozitate*, are în compoziție un aditiv modificator al vâscozității;
- *tipul combinat*, o combinație a celor două de mai sus.

Spre deosebire de betonul vibrat, toate compozițiile amintite conțin o cantitate sporită de superplastifiant. Alegerea unui anumit tip de beton autocompactant se face luând în considerare criteriile economice și tehnice.

Proprietățile betonului autocompactant întărit:

- rezistența la 28 de zile a betonului autocompactant nu diferă semnificativ de cea atinsă de betoanele vibrat tradițional;
- betonul autocompactant prezintă o rezistență sporită la încercarea la îndindere prin despicare, acest lucru se explică prin faptul că prezintă o microstructură mai bună, în special o porozitate totală mai scăzută; iar prin conținutul sporit de particule ultra fine rezultă o matrice de ciment mai densă;
- modulul de elasticitate al betonului autocompactant poate fi cu 20% mai mic decât cel al betonului vibrat normal și care are aceeași rezistență la compresiune și aceleași agregate în compoziție; după cum se știe, modulul de elasticitate al betonului depinde de proporția modulelor Young a componentelor individuale și de procentajul lor în volum; pe de altă parte, modulul de elasticitate al betonului crește cu sporirea conținutului de agregate cu rigiditate sporită, și descrește cu creșterea conținutului de pastă din pudră și a porozității crescute. Un modul de elasticitate scăzut se poate explica prin utilizarea unui conținut ridicat de pudre ultra fine și aditivi ca materii dominante în betonul autocompactant, în comparație cu cantitățile reduse de agregate grosiere;
- în literatură se arată ca betonul autocompactant prezintă deformații din contracție la uscare cu 10 – 50% sporite decât cele ale betonului obișnuit; o mare influență asupra deformațiilor din contracție rezultă din combinarea agregatelor, în special a relației dintre agregatele grosiere și cele fine și ultra fine; pe de altă parte, o microstructură mai densă a pastei de ciment se poate realiza prin adăugarea de filere ce au o finețe mai mare decât cea a cimentului, rezultând o îmbunătățire a răspunsului la contracții. De asemenea, prin utilizarea mai multor agregate grosiere, dar păstrându-se totuși un volum minim de pastă (pentru a se asigura realizarea unui beton autocompactant fără segregare), se pot reduce contracțiile.

5.3.2.4. Metode de control a compoziției betoanelor autocompactante

Au fost elaborate mai multe metode de verificare a proprietăților betonului proaspăt. Unele dintre acestea sunt prezentate în tabelul dat în continuare [63].

98 5. BETOANE AUTOCOMPACTANTE

Tabelul 5.2

Caracteristica	Metoda de verificare	Valori măsurate
Curgerea	Tasare-raspândire	Răspândirea totală
Vâscozitatea/Curgerea	Pâlnia V	Timpul de curgere
Abilitatea de trecere	Cutia L	Raportul de trecere
Rezistența la segregare	Segregarea prin sită	Procentul de lapte de ciment

Pentru verificarea fluidității pastelor și a mortarului din beton se poate utiliza testul de curgere cu conul lui Marsh.

Proporții tipice pentru materialele componente sunt prezentate în tabelul 5.3.

Tabelul 5.3

Material	Dozajul gravimetric, kg/m ³	Dozajul volumetric, dm ³ /m ³
Pudra (materialele fine)	380 - 600	
Pasta		300 - 380
Apa	150 - 200	150 - 200
Agregate grosiere	750 - 1000	270 - 360
Agregatele fine (nisipul)	48 - 55% din masa totală a agregatelor	
Raportul volumetric: Apă/pudră		0,85 - 1,1

Aceste proporții nu sunt restrictive, astfel că este posibil să se obțină un beton autocompactant la care dozajele unor materiale să nu se încadreze în limitele din tabel.

Stabilirea compoziției betonului se bazează pe următoarele:

- evaluarea necesarului de apă și optimizarea curgerii
- determinarea proporției de nisip și a dozajului de aditiv
- testarea sensibilității la variații mici ale cantităților de componenți
- adăugarea unei cantități estimate de agregate grosiere
- prepararea betonului în malaxorul de laborator și verificarea performanțelor betonului proaspăt
- încercarea betonului întărit
- prepararea de amestecuri în malaxoare de mare capacitate.

Dacă nu s-au obținut rezultate satisfăcătoare, funcție de nerealizările obținute se pot face următoarele corecții:

- modificarea raportului apă/pudră și testarea curgerii pastei
- introducerea altor tipuri de adaosuri
- modificarea proporției dintre agregatele fine și dozajul de aditiv
- introducerea unui aditiv modificator de vâscozitate
- modificarea conținutului de agregate grosiere sau a granulozității acestora.

5.3.3. Condiții privind betonul proaspăt

Betonul proaspăt autocompactant trebuie să satisfacă în primul rând următoarele trei cerințe:

- capacitatea de a curge în cofraje și /sau tipare;
- abilitatea de a trece printre armături;
- rezistență sporită la segregare.

Amestecul trebuie să curgă ușor și totodată să umple complet toate spațiile dintre armături și cofraje numai prin greutatea sa proprie (Fig. 5.3).



Fig. 5.3. Amestecul curge printre armături

Testele standard ce trebuie efectuate pe betonul autocompactant în stare proaspătă sunt:

- curgere – tasare și T_{500} test (pentru curgere);
- testul cu pâlnia V (pentru vâscozitate);
- testul cu cutia L (capacitatea de trecere printre armături);
- testul de rezistență la segregare.

Normele europene valabile betonului proaspăt obișnuit (EN 206-1 și EN 12350) nu sunt aplicabile în cazul betonului autocompactant. Caracteristicile betonului proaspăt pe care betonul autocompactant trebuie să le prezinte depind de următorii factori:

- condițiile de armare, geometria elementului, tipul și poziționarea armăturilor etc;
- tipul de turnare a betonului (prin pompare, injectare, direct din ciferom etc);
- metoda de turnare (adică numărul și poziția distribuitorilor);
- metoda de finisare.

100 5. BETOANE AUTOCOMPACTANTE

Pentru betoanele autocompactante din stații sau pentru cele monolite clasele și caracteristicile trebuie alese cu grijă, controlate și justificate de către producător sau executant pe baza experienței proprii sau a mai multor teste. De aceea se recomandă ca executantul și producătorul să stabilească clar caracteristicile pe care trebuie să le satisfacă betonul autocompactant înainte de începerea proiectului propriu-zis, ținând cont de fiecare aplicație a acestui beton în particular. Capacitatea de curgere printre armături, vâscozitatea și rezistența la segregare vor afecta proprietățile in-situ ale betonului întărit, însă vor fi specificate numai dacă sunt absolut necesare, în schimb se va stabili și specifica în prealabil tasarea – curgerea pentru toate tipurile de betoane autocompactante.

Caracteristicile menționate ca nefiind absolut necesare a fi prestabilite sunt pentru cazurile în care armarea este rară sau nu există - nu se specifică în acest caz abilitatea de curgere printre armături; vâscozitatea este importantă numai pentru cazurile în care se dorește obținerea unor suprafețe finale foarte bune sau în cazurile de armare congestionată; rezistența la segregare este de preferabil a fi de clasa 1 în cazul în care se specifică fiind importantă atunci când se așteaptă un beton autocompactant foarte fluid și de vâscozitate redusă.

Metodele de testare utilizate în diverse țări sunt prezentate în tabelul următor:

Tabelul 5.4

Caracteristica	Metoda de testare	Valori măsurate
Curgerea/abilitatea de umplere	Tasare-curgere	Împrăștierea totală
	Cutia Kajima	Capacitatea de umplere
Vâscozitatea/curgerea	T ₅₀₀	Timp de curgere
	Pâlnia V	Timp de curgere
	Pâlnia O	Timp de curgere
	Orimet	Timp de curgere
Capacitatea de trecere printre armături	Cutia L	Raportul de trecere
	Cutia U	Diferența de înălțime
	Inelul J	Înălțimea treptei, curgerea totală
	Cutia Kajima	Capacitatea de trecere observată vizual
Rezistența la segregare	Penetrația	Adâncimea
	Segregare la cernere	Procente de rest
	Tasarea coloanei	Raportul de segregare

5.3.3.1. Detalii privind metodele de testare ale betonului autocompactant in stare proaspătă

1. Tasarea – curgerea

Acest test se realizează ușor și poate oferi indicații privind abilitatea de umplere. Betonul proaspăt este turnat într-un tipar de formă tronconică cu pereții netezi, iar apoi tiparul este ridicat vertical și se măsoară diametrul de răspândire al materialului (figura 5.4) [63].

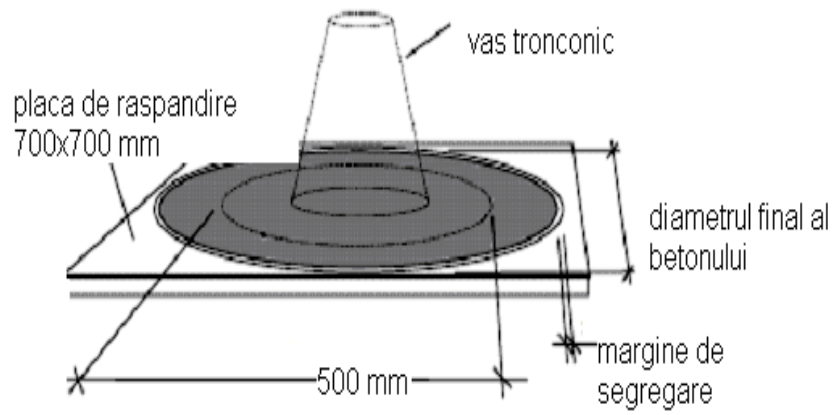


Fig. 5.4. Testarea tasării

2. Cutia L

Acest test simulează cel mai bine capacitatea de curgere și/sau de trecere printre armături a betonului autocompactant [63].

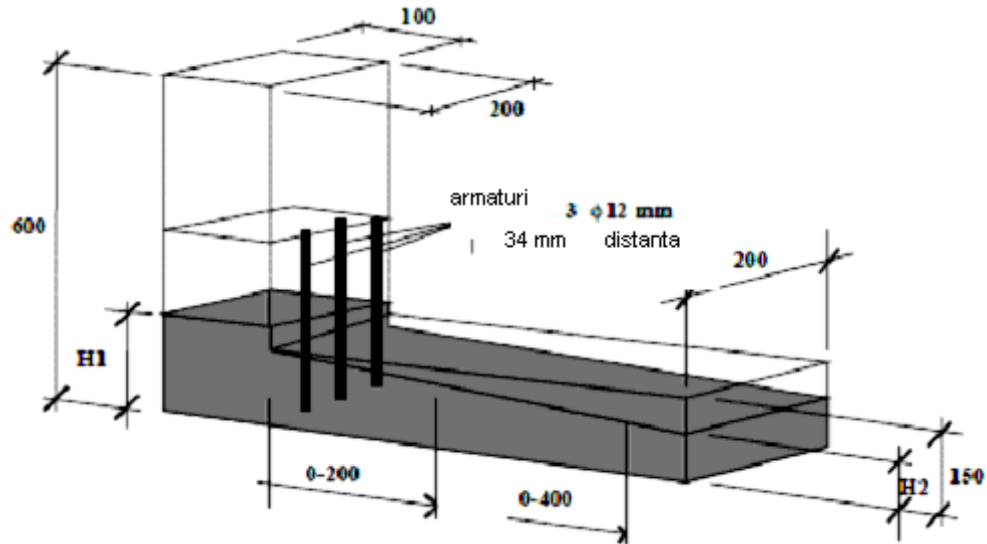


Fig. 5.5.a. Cutia L

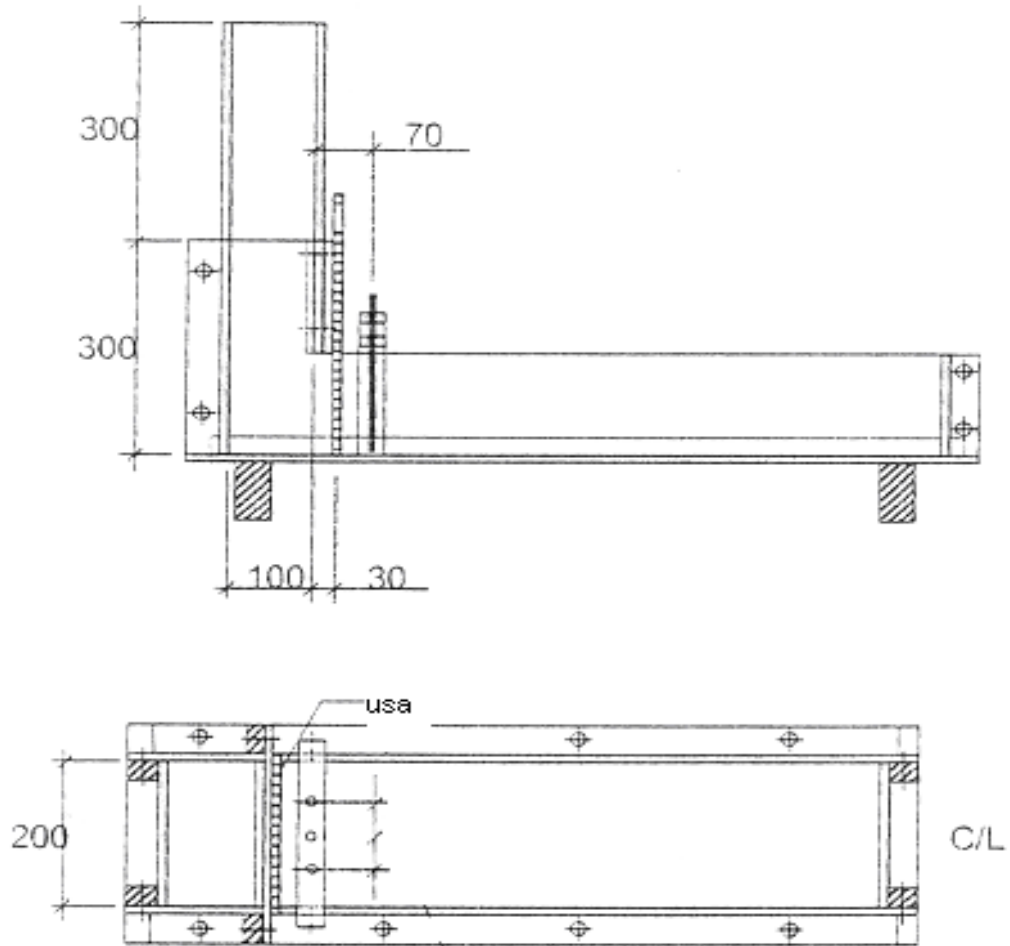


Fig. 5.5.b. Cutia L

Betonul proaspăt este turnat în brațul vertical al cutiei, apoi se ridică ușița iar betonul se răspândește în brațul orizontal. Se măsoară următorii parametrii:

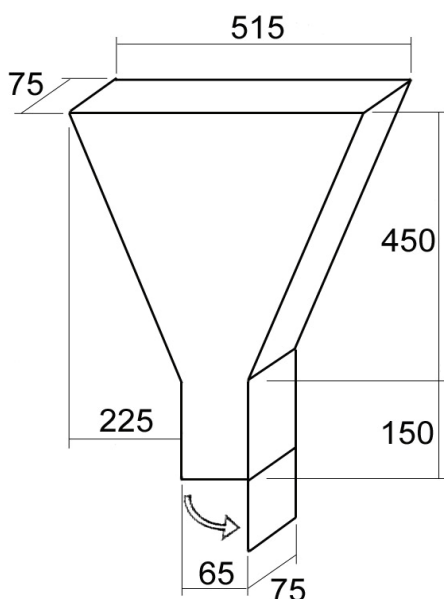
- timpul necesar betonului de a atinge 200 mm;
- timpul necesar betonului de a atinge marcajul de la 400 mm.

Când curgerea a încetat se măsoară distanțele H1 și H2, calculându-se $H2/H1$ (valoarea acceptabilă fiind de 0,8 – 0,85, uneori fiind acceptate și valori de 0,6).

Vizual se mai pot determina cu acest test capacitatea de trecere printre armături precum și tendința de segregare.

3. Pâlnia V

Dimensiunile standard pentru realizarea testului cu pâlnia V sunt prezentate în figura de mai jos [63]:



Pentru estimarea vâscozității aparente a unui amestec se utilizează acest tip de dispozitiv, măsurându-se timpul de curgere t_V prin pâlnie. Factorii care influențează acest timp sunt: cantitatea, forma și mărimea agregatelor, precum și vâscozitatea și cantitatea de pastă etc. Din acest motiv este de așteptat ca valorile obținute cu acest dispozitiv să nu corespundă cu cele determinate prin măsurarea vâscozității cu un reometru.

Fig. 5.6. Dimensiuni standard pentru Pâlnia V, în mm.

5.3.4. Condiții privind betonul întărit

Betonul autocompactant întărit este dens, omogen și prezintă aceeași durabilitate și proprietăți ca și betonul obișnuit. Totuși se pot menționa următoarele avantaje ale acestui tip de beton:

- din punctul de vedere al beneficiarilor se reduce costul lucrărilor laborioase pe șantier și deci se îmbunătățește eficiența;
- muncitorii nu mai sunt supuși unui mediu poluat fonic datorită nefolosirii aparatelor de vibrare a betonului;
- betonul autocompactant prezintă o durabilitate sporită față de cea a betonului obișnuit, fapt datorat în special evitării distrugerii structurii interne a betonului, lucru asociat vibrației.

Tabelul 5.5 prezintă o comparație între caracteristicile principale ale betonului autocompactant întărit și ale betonului obișnuit.

Tabelul 5.5

Caracteristica	Beton autocompactant-beton obișnuit	Explicații
Rezistența la compresiune	Puțin superioară la același A/C	Datorită lipsei vibrării se îmbunătățește interfața între agregate și pasta întărită
Rezistența la întindere	Similară	Volumul de pastă (ciment+agreg. fin+apă) nu are efect semnificativ asupra rezistenței la întindere
Modulul de elasticitate	Inferior	Deoarece betonul autocompactant are de obicei un volum de pastă superior betonului obișnuit de aceeași clasă
Coeficientul de fisurare	Superior	Deoarece betonul autocompactant are de obicei un volum de pastă superior betonului obișnuit de aceeași clasă
Contrația	Superioară	Betonul autocompactant prezintă o cantitate sporită de agregate fine și un volum de pastă sporit deci o contracție la uscare sporită
Coeficientul de expansiune termică	Similar	Coeficientul de expansiune termică variază în funcție de compoziția, vârsta precum și de umiditatea betonului
Rezistența la foc	Similar	Betonul autocompactant atinge ușor clase superioare de rezistență, permeabilitate redusă și se va comporta similar în condiții de foc cu betoanele obișnuite cu rezistențe sporite
Durabilitatea	Superioară	Betonul autocompactant prezintă o permeabilitate mică și uniformă, oferind mult mai puține zone de penetrare a agenților din mediul înconjurător, deci o durabilitate sporită. Permeabilitatea betonului autocompactant și cea a betonului obișnuit (vibrat) depind de tipul materialelor, precum și de rapoartele apă/ciment și apă/liant.

5.3.5. Livrarea betonului proaspăt

5.3.5.1. Informații de la utilizatorul betonului către producător

Utilizatorul și producătorul betonului trebuie să se pună de acord privind ora, data și ritmul livrării.

Daca este necesar utilizatorul trebuie să informeze producătorul asupra:

- transporturilor speciale;
- metode speciale (utilizate) de punere în operă;
- limitări asupra tipului de vehicule de livrare (de exemplu: echipament cu sau fără agitare, dimensiuni, înălțime sau greutate totală).

5.3.5.2. Informații de la producătorul de beton pentru utilizator

În momentul emiterii comenzii de către utilizator acesta poate să ceară informații privind rezultatele unor teste efectuate recent, compoziția betonului pentru a putea pune în operă corect betonul proaspăt, să-i aplice metoda de tratament adecvată și să evalueze evoluția rezistențelor. Aceste informații se furnizează la cerere de către producător înainte de livrarea.

5.3.5.3. Bon de livrare pentru betonul gata de utilizare

Producătorul trebuie să emită un bon de livrare pentru fiecare șarjă de beton. Pe acesta sunt prezentate cel puțin informațiile următoare (cf. SR EN 206-1/2000):

- numele centralei de fabricare a betonului gata de utilizare;
- numărul de serie al bonului;
- data și ora de încărcare (acestea reprezintă primul contact între ciment și apă);
- numărul autovehiculului sau identificarea autovehiculului;
- numele cumpărătorului;
- numele și localizarea șantierului;
- detalii sau referințe privitor la specificații (de ex. numărul de cod, numărul de comandă);
- cantitate de beton, în metri cubi;
- declarația de conformitate cu referințe la specificații și la EN 206-1;
- numele sau marca organismului de certificare dacă este cazul;
- ora de sosire a betonului pe șantier;
- ora de începere a descărcării;
- ora de terminare a descărcării;
- clasa de rezistență;
- clasa de expunere;
- clasa de conținut de cloruri;
- clasa de consistență sau valoarea țintă pentru caracteristica de auto-compactare;
- valorile limită ale compoziției betonului atunci când sunt specificate;
- dimensiunea nominală maximă a agregatelor;
- tipul și clasa de rezistență a cimentului atunci când sunt specificate;
- tipul aditivilor și adaosurilor când sunt specificate;
- proprietățile speciale dacă s-au cerut;
- clasa de masă volumică sau masa volumică țintă;
- alte proprietăți specifice.

5.3.5.4. Controlul conformității și criteriile de conformitate

Controlul de conformitate cuprinde o combinație de acțiuni și decizii care trebuie luate conform regulilor de conformitate adoptate în avans pentru

106 5. BETOANE AUTOCOMPACTANTE

verificarea betonului cu specificații. Controlul de conformitate face parte integral din controlul de producție.

Pentru betonul gata de utilizare, conformitatea constă în verificarea informațiilor înscrise pe bonul de livrare.

În cazul betonului prefabricat și a betonului realizat pe șantier pentru care utilizatorul și producătorul sunt același, testarea și verificarea care fac parte din controlul producției sunt aceleași cu încercările cerute pentru controlul conformității, pot fi luate în considerație pentru evaluarea conformității. În această situație, lipsa realizării criteriilor nu conduce la o declarație de neconformitate dar o investigație internă trebuie să stabilească dacă aceasta indică o neconformitate a cerințelor privind betonului întărit.

Pentru evaluarea consistenței rata verificării tasării se va face conform SR EN 206-1:2000. Alte proprietăți se vor verifica în conformitate cu specificațiile de testare.

Criteriile de conformitate privind proprietățile SCC sunt realizate dacă sunt satisfăcute limitele prevăzute în tabelul de mai jos [63].

Tabelul 5.6

Proprietatea	Criteriul
Tasarea, Clasa SF1	$\geq 520\text{mm}, \leq 700\text{mm}$
Tasarea, Clasa SF2	$\geq 640\text{mm}, \leq 800\text{mm}$
Tasarea, Clasa SF3	$\geq 740\text{mm}, \leq 900\text{mm}$
Tasarea, Clasa specificată ca și valoare precizată	$\pm 80\text{mm}$ of valoarea precizată
Pâlnia V Clasa VF1	$\leq 10\text{s}$
Pâlnia V Clasa VF2	$\geq 7\text{s}, \leq 27\text{s}$
Pâlnia V specificată ca și valoare precizată	$\pm 3\text{s}$
Cutia L Clasa PA1	$\geq 0,75$
Cutia L Clasa PA2	$\geq 0,75$
Cutia L specificată ca și valoare prescrisă	Nu mai mult de 0,05 sub valoarea prescrisă
Rezistența la segregare Clasa SR1	≤ 23
Rezistența la segregare Clasa SR2	≤ 18

5.3.5.5. Controlul producției

Toate betoanele trebuie să fie supuse controlului de producție sub responsabilitatea producătorului. Controlul producției cuprinde toate măsurile necesare pentru menținerea caracteristicilor betonului în conformitate cu condițiile specifice. Ele includ:

- selectarea materialelor;
- proiectarea betonului;
- producția betonului;
- inspecțiile și încercările;

- utilizarea rezultatelor încercărilor pe materiale componente, pe betonului proaspăt, pe betonul întărit și asupra echipamentelor;
- inspecția echipamentului de transport a betonului proaspăt (dacă este cazul);
- controlul de conformitate.

Principiile privind controlul producției de beton proaspăt se va realiza conform SR EN 206-1:2000, paragraful 9 aplicat proprietăților specifice a SCC. În cazul produselor prefabricate se vor aplica prescripțiile din EN 13369:2004, paragraful 6.3.

5.3.6. Limitări în folosirea betonului autocompactant

Una dintre principalele limitări în producția betonului autocompactant este, desigur, costul ridicat – nu numai în ceea ce privește materialele din compoziție, cât și a faptului că este necesar un control de calitate sporit asupra betonului și a agregatelor. Acest neajuns este echilibrat, în produsul final prin reducerea cheltuielilor la turnarea betonului proaspăt (lipsa vibrării, evitarea uzurii cofrajelor, scăderea numărului de muncitori calificați necesari realizării turnării), precum și a costurilor de întreținere pe lungă durată a structurilor realizate cu SCC (durabilitate sporită).

5.4. Exemple de structuri realizate cu beton autocompactant

Din anul 1988, odată cu apariția prototipului betonului autocompactant, utilizarea lui a crescut gradual. Principalele motive pentru care s-a utilizat betonul autocompactant au fost:

- scurtarea perioadei de execuție;
- compactarea betonului este asigurată, în special în zonele cu armare deasă unde vibrarea este dificilă;
- eliminarea zgomotelor produse de către vibratoare: lucru important în special în fabricile de beton prefabricat.

Un exemplu tipic de utilizare a betonului autocompactant îl constituie cele două ancoraje ale podului suspendat *Akashi-Kaikyo*, inaugurat în anul 1998, care are cea mai mare deschidere din lume, și anume 1991 metri. Volumul de beton autocompactant utilizat în aceste ancoraje este de aproximativ 290000 m³.



Fig. 5.7. Podul *Akashi-Kaikyo*

Betonul autocompactant a fost folosit și la realizarea unor ziduri de rezervoare aparținând companiei de gaz Osaka Gas Company, în anul 1998. Volumul de beton autocompactant folosit este de aproximativ 12000 m³. Prin utilizarea betonului autocompactat la această structură, s-au obținut următoarele avantaje:

- (1) numărul de loturi a scăzut de la 14 la 10, deoarece a fost posibilă creșterea înălțimii loturilor de beton.
- (2) numărul de betoniști a fost redus de la 150 la 50.
- (3) perioada de execuție a structurii a scăzut de la 22 de luni la 18 luni.



Fig.5.8. Zid rețea din beton autocompactant



Fig. 5.9. Detaliu suprafață a unui element prefabricat din beton autocompactant

110 5. BETOANE AUTOCOMPACTANTE



Fig.5.10. Turnarea unei plăci cu beton autocompactant –centru comercial, Ferrara, Italia



Fig.5.11. Langara College Library, Vancouver, Canada, 2007



Fig.5.12. Ancorajul podului *Akashi-Kaikyo* Bridge



Fig. 5.13. BURJ Tower, Dubai [119]

112 5. BETOANE AUTOCOMPACTANTE

Suprastructura turnului Burj Dubai este proiectată din beton de ultra-înalte performanțe, bine armat, având în total 156 de nivele. Turnul este în construcție la ora actuală, estimându-se a fi finalizat în cursul acestui an. Betonul autocompactant a fost materialul ales în vederea realizării lui, datorită elementelor mari și a armăturilor dese existente în structură.



Fig. 5.14. TRUMP building SUA [120]

Trump International Hotel and Tower din Chicago, va fi finalizat în cursul anului curent, și va avea o înălțime de 345,6 metri. Aici s-a pompat pentru prima dată un beton autocompactant de la o înălțime de 200 metri. Rezistența betonului a fost de 110 Mpa (pe cilindrii) la 90 de zile. Betonul autocompactant a fost utilizat în elementele care prezentau zone de armături congestionate. Compoziția betonului autocompactant a fost bazată pe: ciment cu adaos de cenușă, cenușă de termocentrală, ciment portland și pudră de silice[120].

- Alte utilizări ale betonului autocompactant ce pot fi menționate:
- căptușirea unui tunel, două tuburi paralele de 160 m, la Uddevalla, autostrada E6, Suedia.
 - centrul de artă Meudon, Franța, cu o sală de spectacole de 450 locuri, betonul autocompactant fiind folosit la pereții sălii de spectacol (15x10,7 m cu o grosime de 30 cm).

- reabilitarea unui debarcader, la Lincolnshire, Marea Britanie, debarcaderul rezămând pe piloți din oțel de 1,5 m adâncime.
- folosirea betonului autocompactant la elemente prefabricate din beton în Olanda.

5.4.1. Program experimental realizat sub directa îndrumare a Departamentului de Inginerie Civilă – Universitatea "Politehnica" Timișoara

În anul 2005, Departamentul de Inginerie Civilă din cadrul UPT, împreună cu "Beton-Star" KFT, Kecskemet, Ungaria, au realizat în cadrul unui program comun de cercetare două grinzi prefabricate din beton autocompactant precomprimat, care au fost supuse unor teste. Aceste grinzi urmau a fi utilizate la structura clădirii CASCO din Satu-Mare. Grinzile din beton autocompactant au fost executate în Ungaria și au avut o lungime de 24 metri fiecare [72].

Cele două grinzi au fost așezate pe reazeme, iar apoi, pentru realizarea testelor, au fost încărcate în patru trepte prin intermediul a altor 20 de grinzi secundare, după cum urmează:

Treapta 1 de încărcare – 8 grinzi secundare care reprezintă o încărcare de:

$$8 P/2 = 8 \times 35,5/2 = 142 \text{ kN}$$

Treapta 2 de încărcare – a fost realizată prin intermediul a 5 grinzi secundare, reprezentând $5 P/2 = 88.75 \text{ kN}$ pe fiecare grindă principală.

Suma celor două trepte este $13 P/2 = 230,75 \text{ kN}$.

Treapta 3 de încărcare – a constat în aplicarea a altor 3 grinzi secundare, deci încărcarea totală pe fiecare grindă principală este: $16 P/2 = 284 \text{ kN}$.

Treapta 4 de încărcare – s-au aplicat ultimele 4 grinzi secundare, încărcarea finală devenind: $20 P/2 = 355 \text{ kN}$, pe fiecare grindă principală.

Încărcarea finală se obține adunând la 355 kN greutatea proprie a fiecărei grinzi principale, adică 139,2 kN (5,8 kN/m); deci, încărcarea totală devine 494.2 kN, ceea ce reprezintă 24,71 kN/m,

Încărcările au fost aplicate în două cicluri de încărcare-descărcare pe parcursul a două zile.

Încărcările de proiectare pentru un acoperiș sunt:

- greutatea învelitorii cu toate straturile componente: 5,4 kN/m;
- greutatea proprie a grinzii: 5,8 kN/m;
- încărcări variabile (inclusiv zăpada): 5,4 kN/m.

Total încărcări: 16,6 kN/m

Raportul dintre încărcările experimentale și cele de calcul este:

$$P_{\text{exp.}}/P_{\text{calc.}} = 24,71/16,6 = 1,49$$

La starea limită ultimă, săgeata maximă admisă (f_{ld}) este:

$$f_{ld} = \frac{5}{384} \times \frac{q l^4}{E_b^{ld} I} = 13,26 \text{ cm}$$

unde:

$$E_b^{ld} = \frac{0,8 E_b}{1 + 0,5\nu \rho} = 14190 \text{ N/mm}^2$$

Săgeata din încărcări de scurtă durată este:

$$f_{sd} = \frac{5}{384} \times \frac{q l^4}{E_b^{sd} I} = 2,38 \text{ cm}$$

unde:

$$E_b^{sd} = 0,8 E_b = 27600 \text{ N/mm}^2$$

Săgeata finală rezultă:

$$\Delta f = f_{ld} - f_{sd} = 13,96 - 2,38 = 10,88 \text{ cm}$$

$$\Delta f_u = 10,88 - 3,5 = 7,38 \text{ cm} < f_a = \frac{l}{250} = 9,6 \text{ cm}$$

unde: 3,5 cm este deformația negativă datorată efectului de precomprimare.

Săgețile experimentale măsurate au fost:

$$f_{\text{expl.}} = 8,2 \text{ cm} < f_a = \frac{l}{250} = 9,6 \text{ cm}$$



Fig. 5.15. Grinzile din beton autocompactant încărcate cu grinzile secundare

5.4.1.1. Concluzii ale încercărilor experimentale

Utilizarea betonului autocompactant la elementele prefabricate precomprimare, reprezintă o soluție fiabilă.

Cele două grinzi de 24 m deschidere au demonstrat o bună comportare la starea limită de serviciu sub încărcări statice.

5.5. Avantajele betonului autocompactant

Betonul autocompactant prezintă următoarele avantaje:

- ergonomice – reducerea zgomotului din timpul turnării betonului pe șantier și în fabricile de beton;
- viteza de turnare, rezultând o creștere a eficienței producției;
- reducerea numărului de betoniști;
- reducerea uzurii cofrajelor datorită vibrației;
- reducerea uzurii malaxoarelor datorită reducerii efortului de lunecare;
- omogenitatea betonului;
- sporește calitatea suprafețelor (nu prezintă defecte de suprafață);
- prezintă rezistențe sporite în primele zile de la turnare;
- raport apă/ciment redus (sub 0,35);
- permeabilitate redusă;
- reducerea consumului de energie electrică prin eliminarea vibrației;
- bună abilitate de pompare;
- scurtarea perioadei de execuție (îmbunătățirea productivității).

Prin aceste avantaje, se compensează costul ridicat al materialelor componente, în multe cazuri, costul produsului final putând rezulta mult mai favorabil decât în cazul betonului vibrat tradițional.

Utilizarea betonului autocompactant va conduce la îmbunătățirea calității structurilor din beton prin eliminarea unor potențiale greșeli umane din timpul turnării elementelor.

5.6. Stabilirea compoziției betonului autocompactant prin teste experimentale

5.6.1. Determinări experimentale asupra pastei de ciment din compoziția betonului autocompactant – cercetări experimentale realizate în colaborare cu LNEC, Lisabona, Portugalia

5.6.1.1. Scurte noțiuni teoretice

Comportarea betonului autocompactant în stare proaspătă poate fi asemuită din punct de vedere reologic, cu solidul Bingham cu parametrii valoarea de curgere și vâscozitatea (figura 5.16). Legea de curgere a lui Bingham descrie modul de comportare al deformațiilor unei suspensii sub acțiunea eforturilor tangențiale, prin intermediul unei constante τ (valoare de curgere) și a unei variabile ce depinde de raportul dintre efortul tangențial τ aplicat și încărcarea aplicată, γ . Această variabilă este de fapt vâscozitatea suspensiei, η . Valoarea de curgere reprezintă energia ce trebuie aplicată din exterior pentru ca suspensia să înceapă să curgă. Vâscozitatea descrie rezistența suspensiei la deformații în timpul curgerii.

Pentru descrierea comportării reologice a betonului autocompactant, sunt necesare ambele variabile: valoarea de curgere și vâscozitatea.

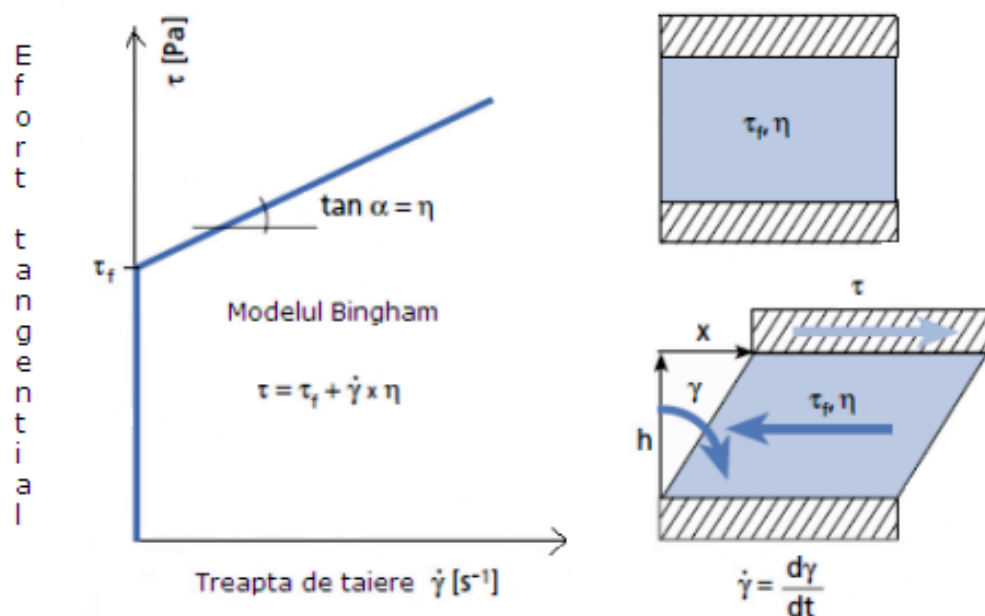


Fig. 5.16. Modelul Bingham pentru descrierea deformațiilor unei suspensii prin intermediul parametrilor τ (efort tangential) și η (vâscozitatea) [71]

Comportarea betonului este caracterizată prin efortul limită de forfecare (în Pa) și prin vâscozitatea plastică (în Pa s). Acești parametri reprezintă proprietăți intrinsece ale betonului și pot fi utilizați în calculul cu elemente finite pentru calcularea oricărei curgeri a betonului.

Următorul program experimental a fost realizat de doctorand pe parcursul unei burse tip Erasmus, cu durata de 3 luni, în Lisabona, Portugalia, la Nova University of Lisbon. Pe parcursul celor 3 luni s-a efectuat și un stagiu de 1 lună la Laboratorul Național de Inginerie Civilă din Lisabona. Aici, sub îndrumarea ing. Manuel Vieira, s-au efectuat teste de laborator pentru a observa comportarea reologică a betonului autocompactant proaspăt, folosindu-se reometrele și reomixerele din laboratorul LNEC –Portugalia, și anume: ConTec Rheomixer și ConTec Rheometer.

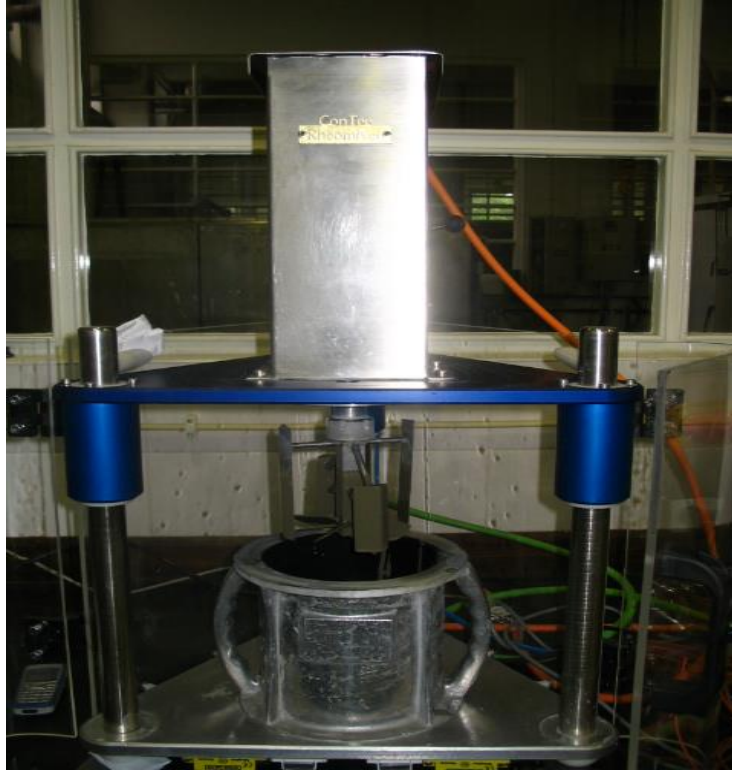


Fig. 5.17a. Reomixer



Fig. 5.17b. Reomixer

5.6. Stabilirea compoziției betonului autocompactant prin teste experimentale 119

Cu aceste aparate, se determină efortul limită de forfecare t_0 (în Pa) și vâscozitatea plastică u (în Pa s).

Proprietățile fundamentale măsurate vor sta la baza posibilității prezicerii în viitor a comportării betonului autocompactant într-o structură reală.

5.6.1.2. Teste preliminare pe pastă de ciment

Valoarea de curgere și vâscozitatea pastelor de ciment și a mortarelor se pot determina cu ajutorul așa-numitelor "teste în 2 puncte", cu ajutorul reometrelor cu rotație. Se intitulează "teste în 2 puncte" deoarece ambii parametrii pot fi stabiliți în timpul unui singur test modificând treapta de încărcare de-alungul efectuării testului.

Utilizând ConTec Rheomixer s-au efectuat teste preliminare pe șapte paste de ciment.

Compozițiile analizate, pentru un volum de pastă de 1,1 litri sunt prezentate în tabelul 5.7.

Tabelul 5.7

Compoziții paste de ciment pentru teste cu reomixerul

Compoziția	Cant. ciment I 42,5 R (g)	Apa (g)	Aditiv Glenium 30 (g)	Aditiv Glenium 30 (%)
Pasta 1	1524,93	584,86	31,41	2,0
Pasta 2	1526,05	591,92	23,59	1,5
Pasta 3	1529,05	599,02	15,75	1,0
Pasta 4	1529,87	601,86	12,61	0,8
Pasta 5	1530,7	604,71	9,46	0,6
Pasta 6	1531,53	607,56	6,31	0,4
Pasta 7	1533,19	613,27	0	0

Testele s-au efectuat prin măsurarea vâscozității pastelor de ciment care au fost amestecate în două moduri diferite:

- **1. Pasta de ciment amestecată în reomixer și apoi s-au măsurat valorile t_0 și u în reomixer.**
- **2. Pasta de ciment amestecată în malaxorul de ciment și apoi s-au măsurat valorile t_0 și u în reomixer.**

1. Pasta de ciment amestecată în reomixer și măsurarea valorilor t_0 și u

Pentru fiecare pastă de ciment a fost rulată mai întâi procedura fișierului Setup – Amestecare și Măsurare, în vederea măsurării valorilor t_0 și u . Fișierul setup este un fișier prestabilit de către utilizator, care definește sensul de rotație al paletei reomixerului precum și numărul de rotații pe minut. Utilizatorul poate folosi fișiere setup predefinite de către producătorul reomixerului, sau poate impune diverse cicluri de rotații paletei reomixerului dar și diverse intervale de timp de citire a

120 5. BETOANE AUTOCOMPACTANTE

măsurătorilor. Se setează valori individuale de lunecare, fiecare lunecare fiind aplicată pastei un timp predefinit de către utilizator, efortul de forfecare și vâscozitatea se înregistrează pe calculator pentru fiecare valoare a lunecării. Punctele obținute sunt fie unite individual sau interpretate cu ajutorul unui model reologic, în vederea obținerii curbei de curgere și a curbei de vâscozitate.

S-au efectuat măsurători pentru două fișiere setup ce au avut ciclurile de rotație ale paletelor reomixerului diferite, precum și durate diferite. Măsurătorile s-au citit la 10 și 30 de minute de la începerea preparării pastei de ciment.

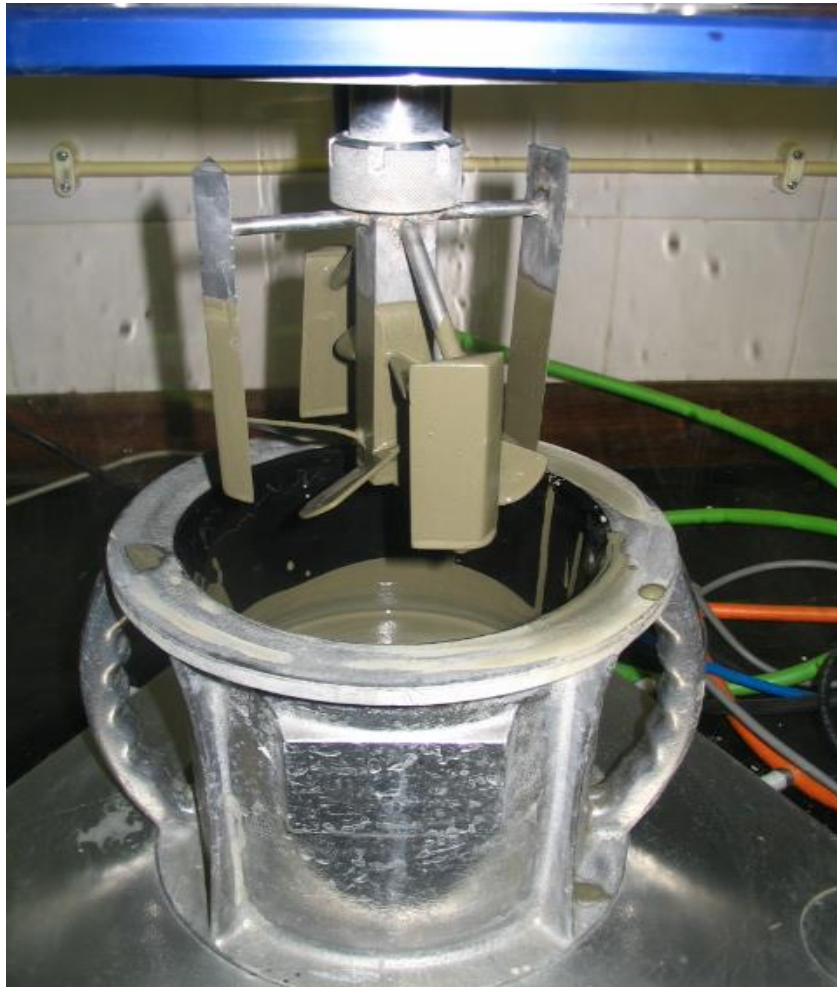


Fig. 5.18. Pasta de ciment în reomixer

5.6. Stabilirea compziției betonului autocompactant prin teste experimentale 121

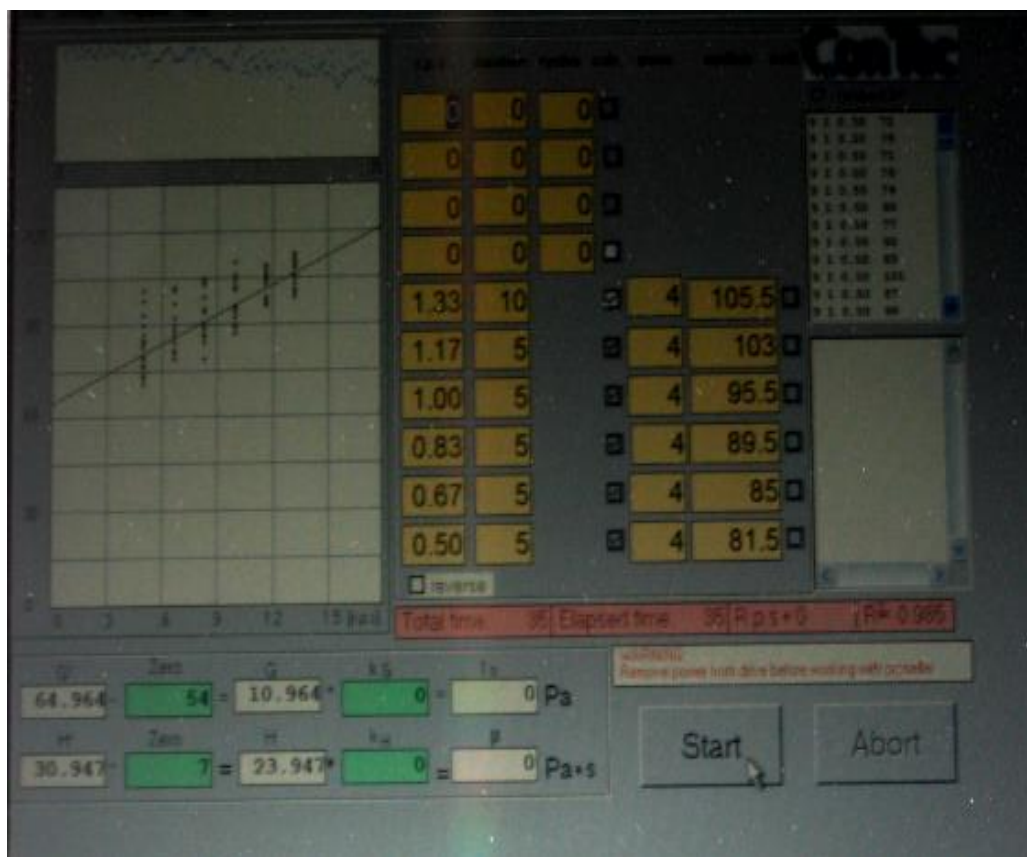


Fig. 5.19. Exemplu de afișaj rezultate la reomixer

Graficele de mai jos prezintă rezultatele măsurătorilor obținute pe primele două paste de ciment testate – măsurătorile efectuate pe cea de a treia pastă nu au fost concludente.

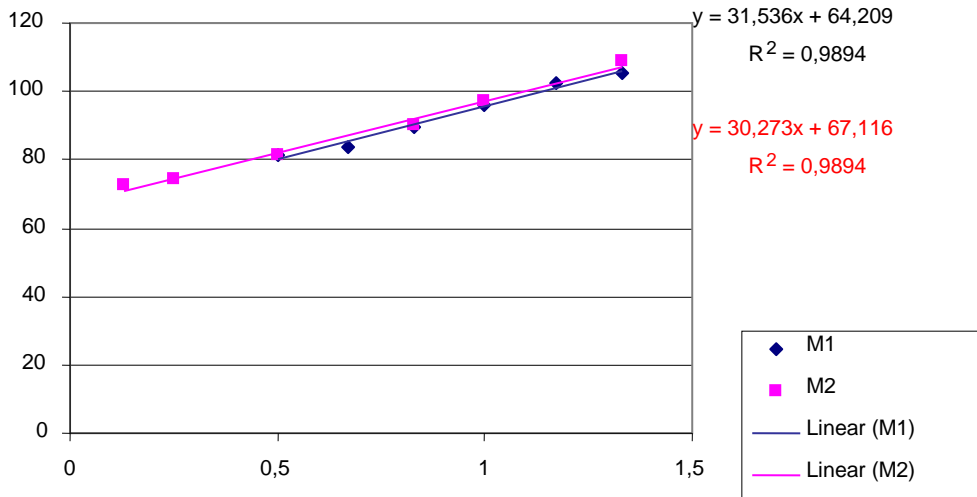


Fig. 5.20. Pasta 1- Valori măsurate cu diferite fişiere setup, la 10 minute de la prepararea pastei de ciment

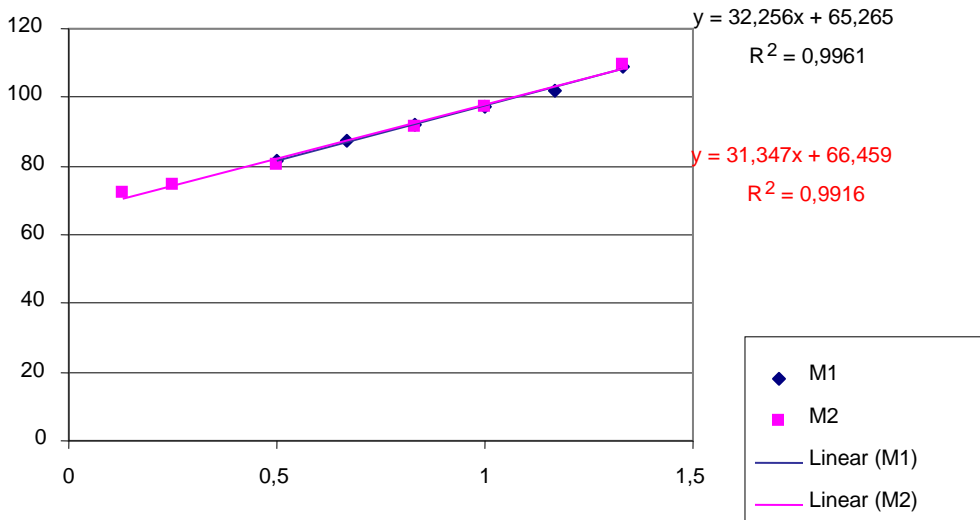


Fig. 5.21. Pasta 1- Valori măsurate cu diferite fişiere setup, la 30 minute de la prepararea pastei de ciment

5.6. Stabilirea compziției betonului autocompactant prin teste experimentale 123

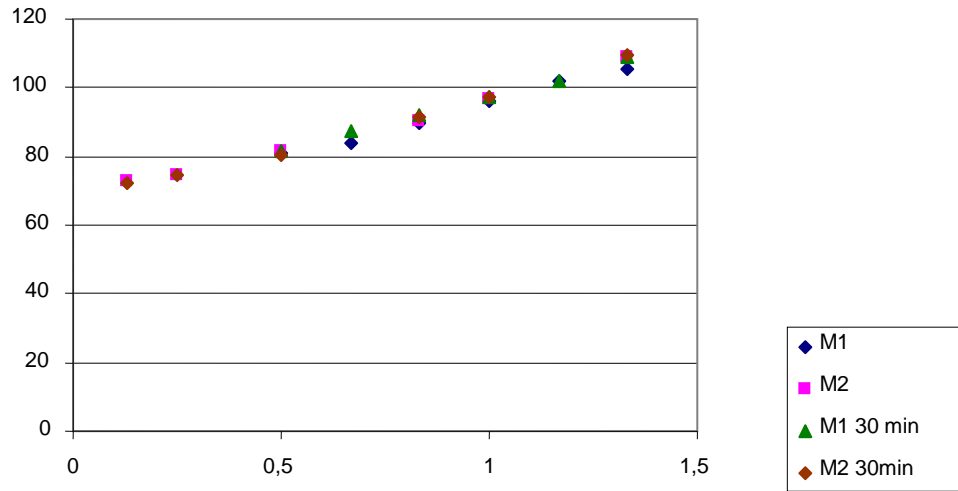


Fig. 5.22. Pasta 1 - Valori măsurate cu diferite fișiere setup, la 10 și 30 minute de la prepararea pastei de ciment

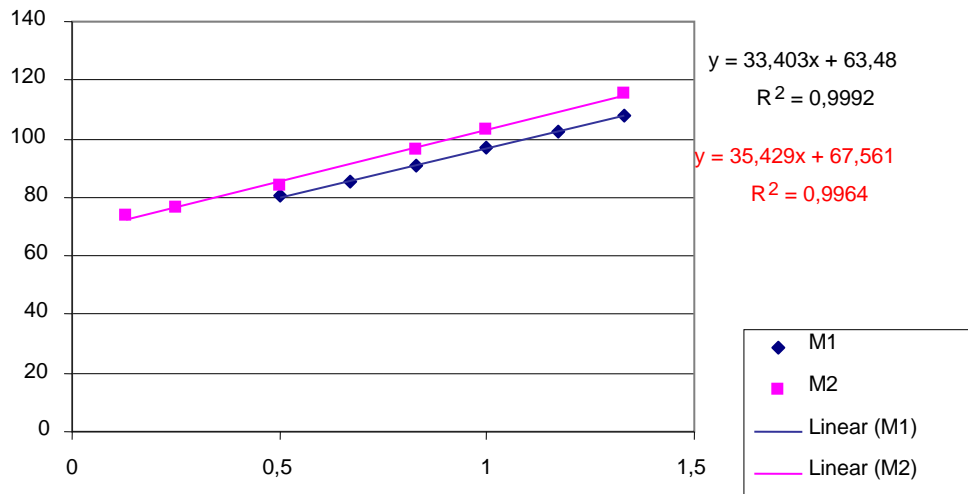


Fig. 5.23. Pasta 2- Valori măsurate cu diferite fișiere setup, la 10 minute de la prepararea pastei de ciment

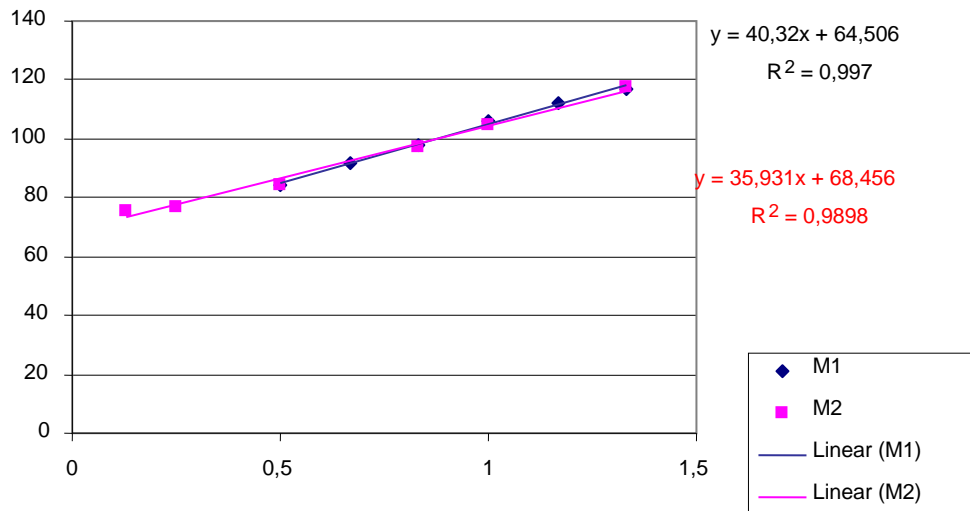


Fig. 5.24. Pasta 2- Valori măsurate cu diferite fișiere setup, la 30 minute de la prepararea pastei de ciment

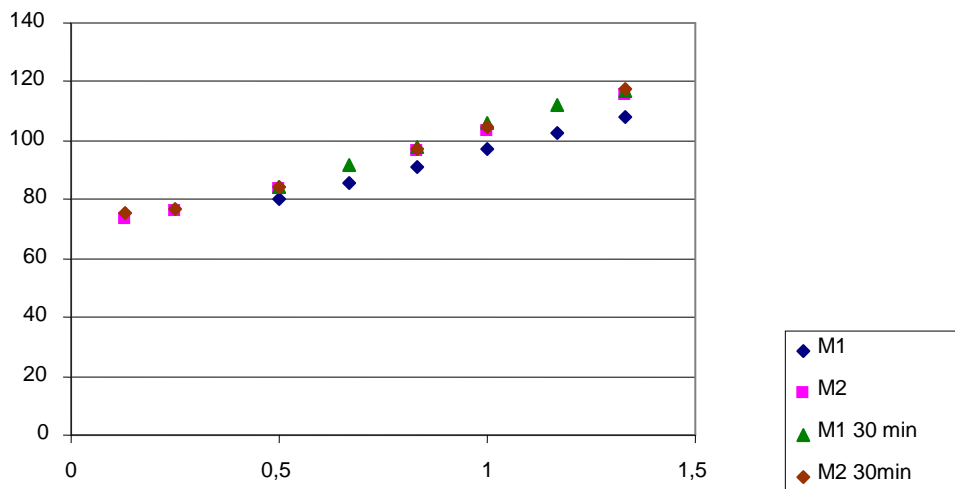


Fig. 5.25. Pasta 2- Valori măsurate cu diferite fișiere setup, la 10 și 30 minute de la prepararea pastei de ciment

La prepararea pastelor de ciment cu reomixerul, s-a observat o tendință de lipire a materialului de fundul vasului, de aceea, acest procedeu se estimează a fi necorespunzător și se recomandă prepararea pastelor de ciment în malaxor, apoi efectuarea măsurătorilor în reomixer.

2. Prepararea pastelor în malaxor, măsurarea valorilo t_0 și u în reomixer

Soluția optimă s-a dovedit a fi procedura clasică de preparare a amestecului pastei de ciment cu malaxorul, apoi introducerea lui în vasul reomixerului și efectuarea măsurărilor prin rularea diverselor fișiere setup cu cicluri de rotații ale paletei diferite.

În acest sens, s-au testat din nou cele 3 compoziții de paste de ciment prezentate în pasul 1, și în plus, testele s-au contiunat pe toate cele 7 compoziții prezentate în tabelul 5.7. De această dată pastele de ciment au fost preparate cu malaxorul după cum urmează:

- **Pasul 1:** 2/3 Apă + Ciment – se amestecă cu viteză mică în malaxor timp de 1 minut și 30 de secunde;
- **Pasul 2:** Aditivul se adaugă cu restul de apă, malaxorul face pauză de 1 minut și 30 de secunde;
- **Pasul 3:** Se pornește malaxorul cu viteză mică 1 minut;
- **Pasul 4:** Se trece la viteză mare 1 minut;
- **Pasul 5:** Pauză 1 minut;
- **Pasul 6:** Viteză mare 30 de secunde.

Pe pastele de ciment preparate s-a determinat mini – tasarea la 10, respectiv 30 de minute de la prepararea lor, și temperatura la 15, respectiv 40 de minute (Tabelul 5.8 și figurile 5.26 a și 5.26 b).

Tabelul 5.8

Temperaturi și valori obținute ale mini – tasării pe pastele de ciment

Pasta	Temp. apa (°C)	Temp. pastă (°C)		Mini-tasarea (mm)	
		la 15 minute	la 40 minute	la 10 minute	la 30 minute
Pasta 1	19,5	22,8	21,9	74 - 84 90 - 90	85 - 105 100 - 110
Pasta 2	19,2	21,7	21,2	85 - 80	98 - 105
Pasta 3	20,8	22,7	21,8	80 - 78 70 - 87	94 - 82 102 - 88
Pasta 4	19,2	22,0	21,3	71 - 79 76 - 78	93 - 82 80 - 99
Pasta 5	20,4	22,9	22,1	59 - 54 53 - 60	61 - 58 60 - 61
Pasta 6	20,4	22,6	22,0	70 - 54 60 - 57	62 - 84 70 - 70
Pasta 7	19,3	22,2	21,6	30 - 33 32 - 34	32 - 30 33 - 31

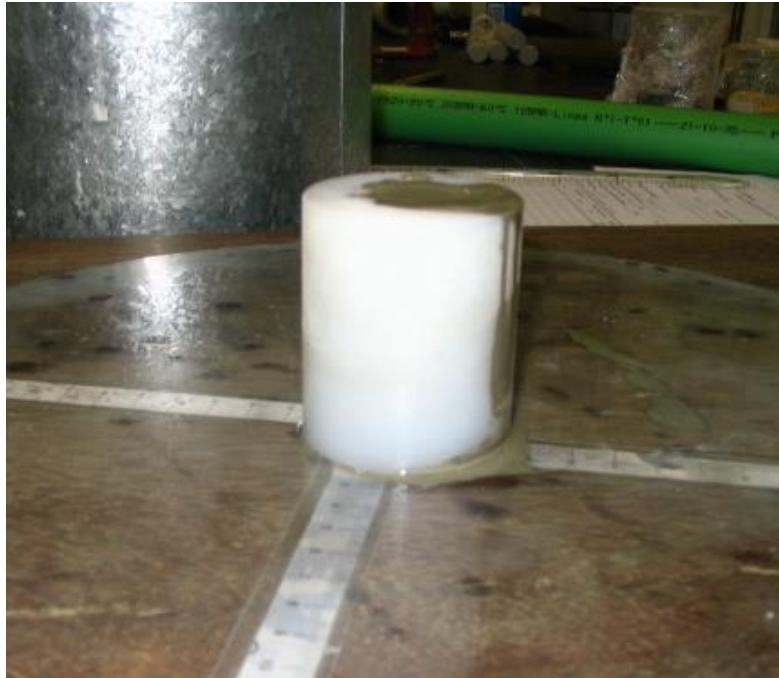


Fig. 5.26 a. Mini - tasarea



Fig. 5.26 b. Mini - tasarea

5.6. Stabilirea compziției betonului autocompactant prin teste experimentale 127

Aceleași fișiere setup pentru măsurarea valorilor t_0 și u au fost rulate la reomixer, efectuându-se măsurători la 10 și 30 de minute de la începerea preparării pastei de ciment.

Graficele de mai jos prezintă rezultatele obținute pe pastele de ciment testate.

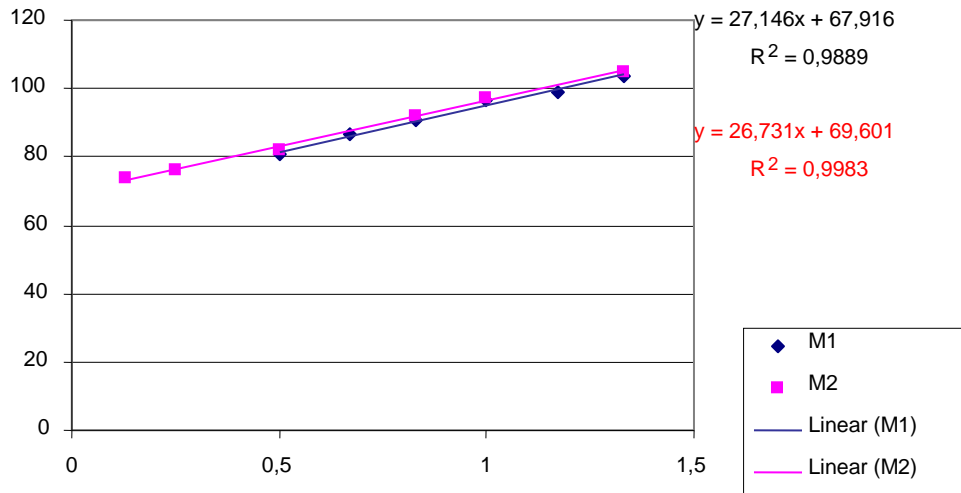


Fig. 5.27. Pasta 1 - Valori măsurate cu diferite fișiere setup, la 10 minute de la prepararea pastei de ciment

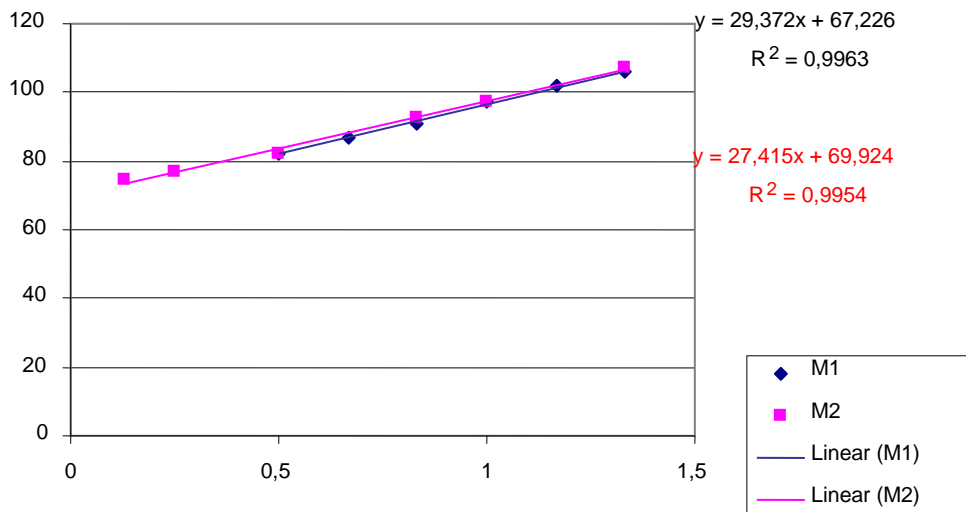


Fig. 5.28. Pasta 1 - Valori măsurate cu diferite fișiere setup, la 30 minute de la prepararea pastei de ciment

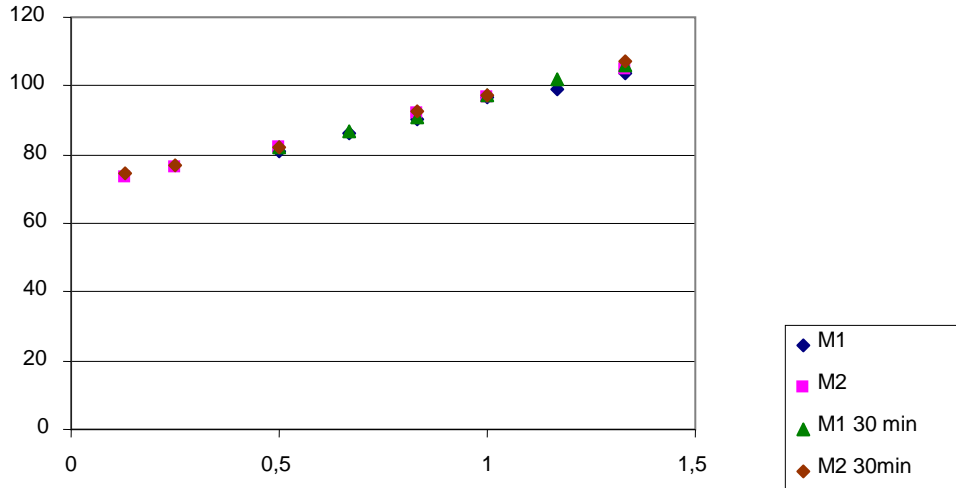


Fig. 5.29. Pasta 1 - Valori măsurate cu diferite fișiere setup, la 10 și 30 minute de la prepararea pastei de ciment

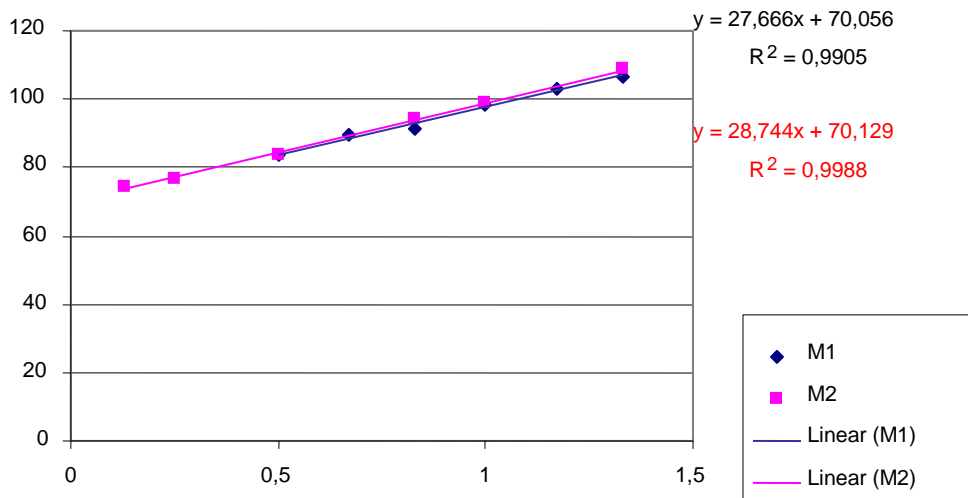


Fig. 5.30. Pasta 2 - Valori măsurate cu diferite fișiere setup, la 10 minute de la prepararea pastei de ciment

5.6. Stabilirea compziției betonului autocompactant prin teste experimentale 129

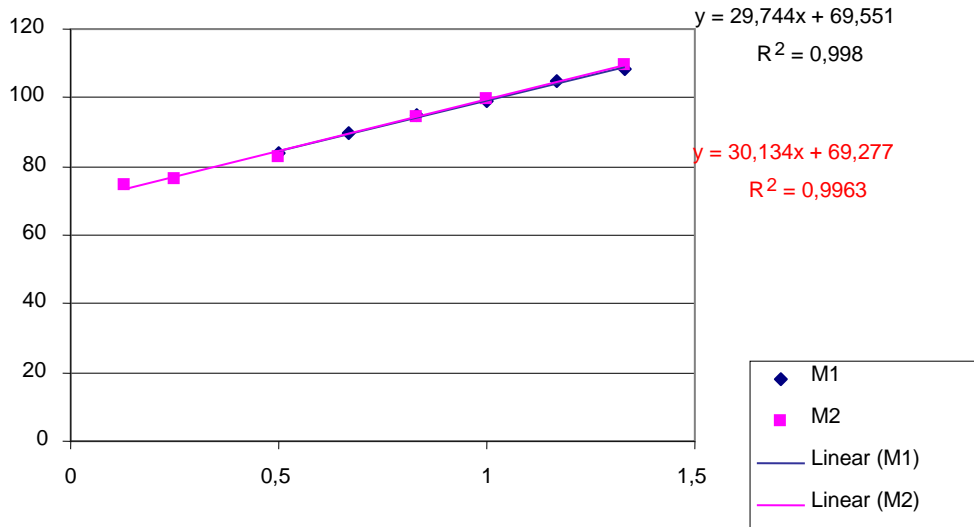


Fig. 5.31. Pasta 2 - Valori măsurate cu diferite fișiere setup, la 30 minute de la prepararea pastei de ciment

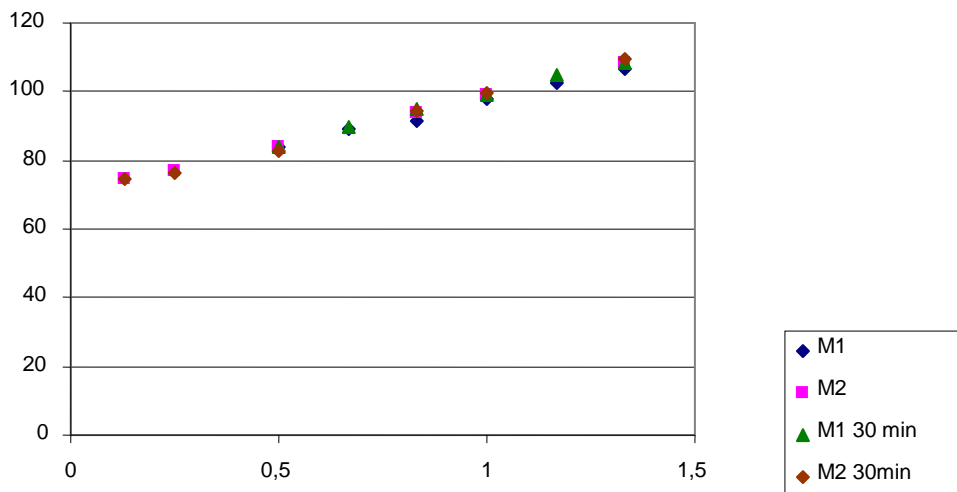


Fig. 5.32. Pasta 2 - Valori măsurate cu diferite fișiere setup, la 10 și 30 minute de la prepararea pastei de ciment

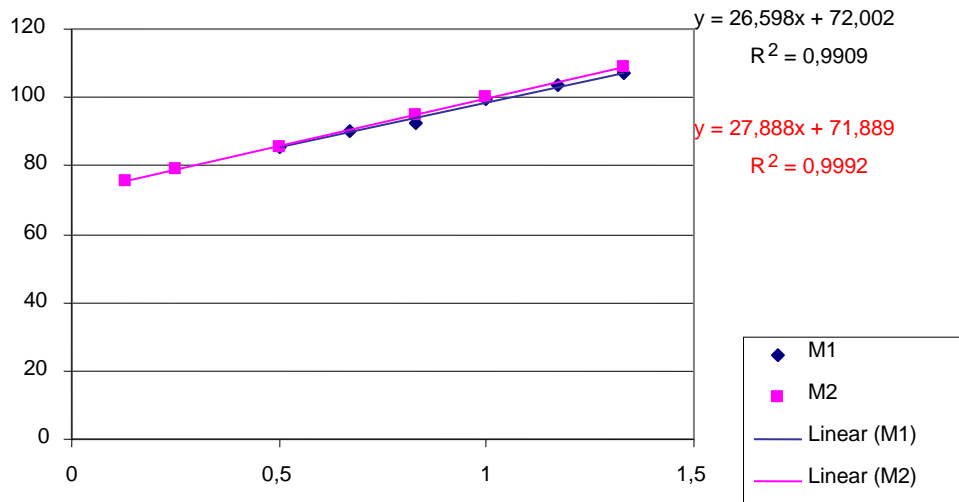


Fig. 5.33. Pasta 3 - Valori măsurate cu diferite fișiere setup, la 10 minute de la prepararea pastei de ciment

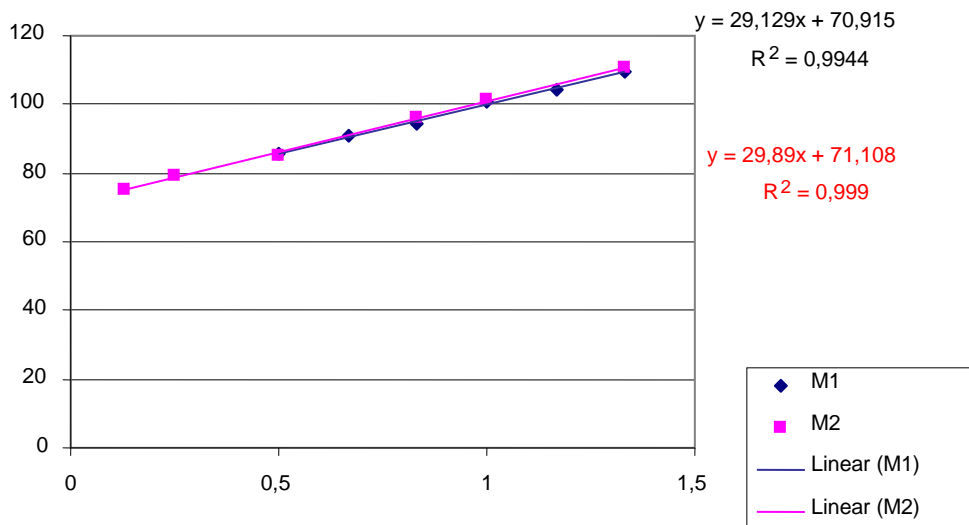


Fig. 5.34. Pasta 3 - Valori măsurate cu diferite fișiere setup, la 30 minute de la prepararea pastei de ciment

5.6. Stabilirea compziției betonului autocompactant prin teste experimentale 131

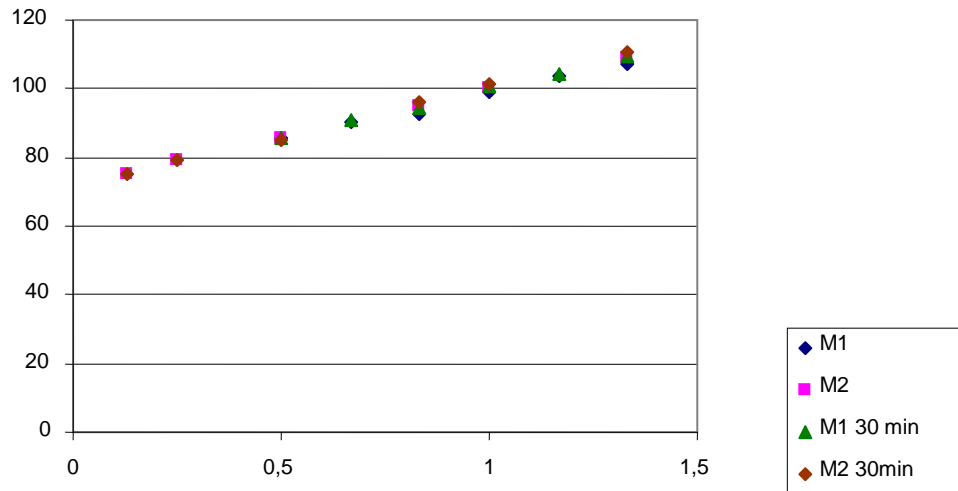


Fig. 5.35. Pasta 3- Valori măsurate cu diferite fișiere setup, la 10 și 30 minute de la prepararea pastei de ciment

Din măsurătorile realizate s-a putut demonstra că modul de alegere și setare a ciclurilor de rotație a paletelor reomixerului nu influențează valorile u și t_0 măsurate (Fig. 5.36 și 5.37).

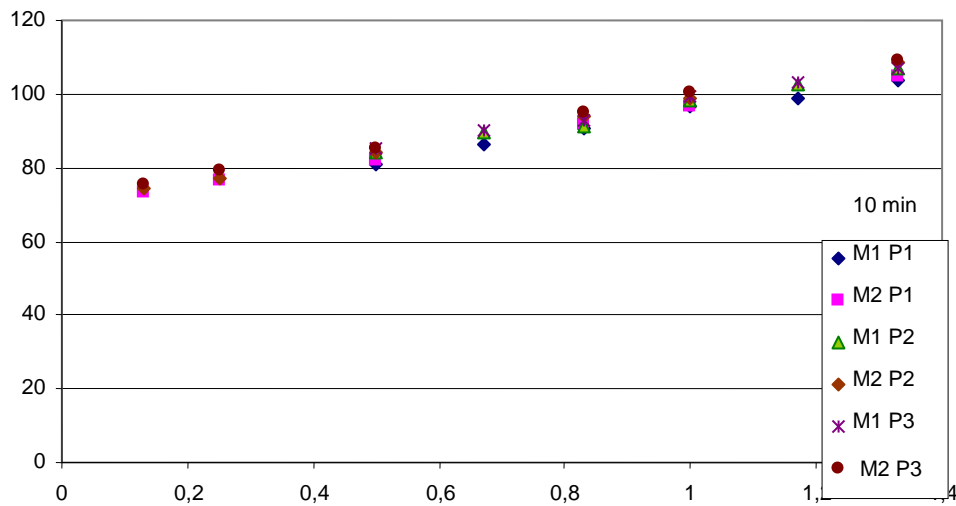


Fig. 5.36. Măsurători la 10 minute de la prepararea celor trei paste de ciment cu ambele fișiere setup

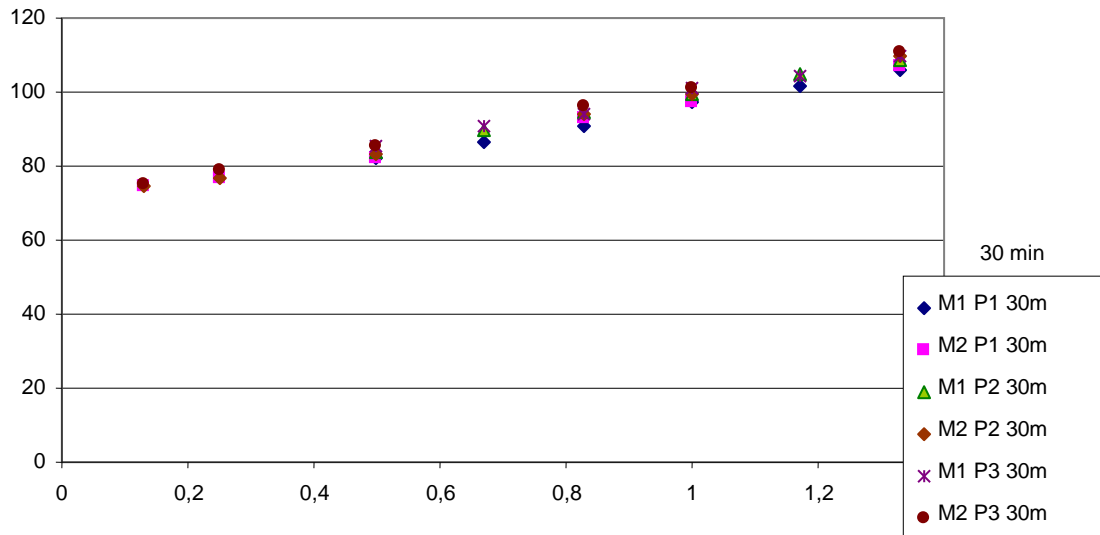


Fig. 5.37. Măsurători la 30 minute de la prepararea celor trei paste de ciment cu ambele fisiere setup

S-au cumulat și analizat rezultatele obținute în urma testelor făcute pe pastele 1, 2 și 3, paste de ciment ce au avut în compoziție 2%, 1,5% și respectiv 1% adaos de aditiv. Figura 5.38 prezintă valorile eforturilor limită de forfecare, în Pa, măsurate la 10 și 30 minute de la prepararea pastelor. Figura 5.39 prezintă valorile vâscozității plastice, în Pa s, măsurate la 10 și 30 minute de la prepararea pastelor.

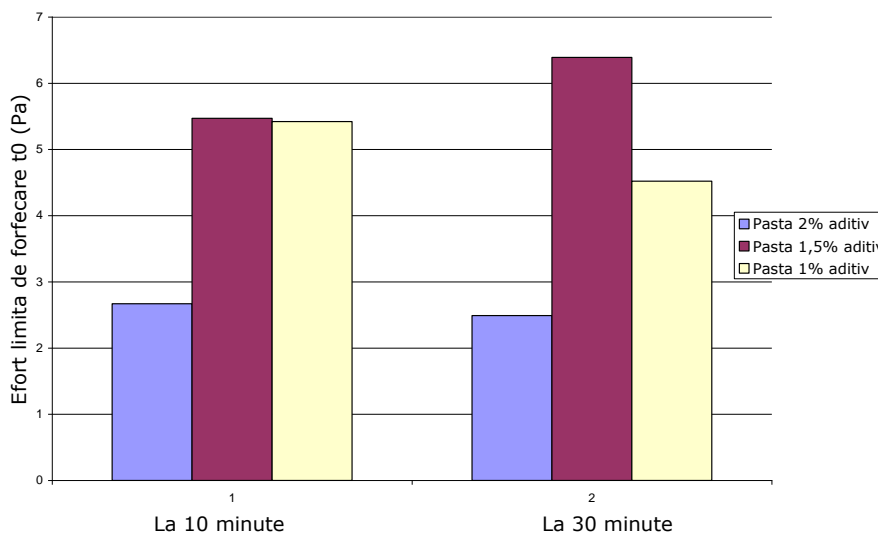


Fig. 5.38. Efort limită de forfecare

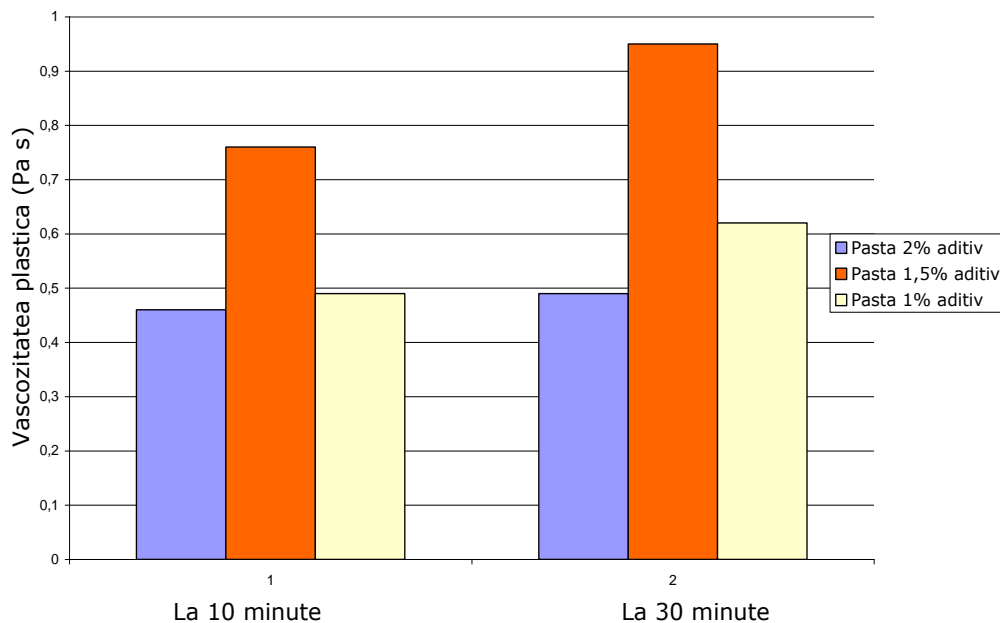


Fig. 5.39. Vâscozitatea plastică a pastelor de ciment

Se observă, cum este și firesc, că vâscozitatea pastelor crește ușor în timp și scade cu creșterea cantității de aditiv. Pe de altă parte, efortul limită de forfecare suferă o scădere ușoară în timp, precum și o creștere cu sporirea procentului de aditiv utilizat la prepararea pastei.

Rezultatele obținute pe pasta de ciment realizată cu 1,5% aditiv sunt considerate neconcludente, autorul recomandă în viitor refacerea determinărilor pe această compoziție. Teste suplimentare trebuie efectuate pentru a putea caracteriza precis comporarea reologică a pastei și a mortarelor extrase din compoziția betoanelor autocompactante, pentru a putea stabili o bună compoziție a materialelor componente.

5.7. Teste experimentale pentru stabilirea compoziției optime a unui beton autocompactant

5.7.1. Generalități

Cercetările experimentale asupra compoziției betoanelor autocompactante s-au efectuat pe o durată de doi ani în cadrul unui contract de cercetare – dezvoltare tip CEEEX, intitulat "Soluție inovativă de optimizare a microstructurii compoziției betonului autocompactant pentru realizarea performantă a elementelor prefabricate din beton - SICOBET" [73].

Partenerii implicați în contract au fost:

Tabelul 5.9

Numele organizației	Rolul organizației
ICECON S.A BUCUREȘTI	CO=Director de proiect
Universitatea Tehnică de Construcții București	P1=Partener de proiect (Partener 1)
Universitatea Tehnică Cluj-Napoca	P2= Partener de proiect (Partener 2)
"POLITEHNICA" Universitatea din Timișoara	P3= Partener de proiect (Partener 3)
DINAMIC PLUS S.R.L.	P4= Partener de proiect (Partener 4)
SITCON PRIM S.R.L.	P5= Partener de proiect (Partener 5)

5.7.2. Compoziția betoanelor

Determinările experimentale au urmărit stabilirea unor rețete de betoane autocompactante destinate realizării structurilor prefabricate. Parametrii luați în considerare s-au referit în principal la compoziția betonului. În tabelul 5.10 sunt redate cele șase compoziții analizate, care au diferit între ele prin: tipul de agregate, componența părții fine folosite și adaosul de fibre metalice.

5.7. Teste experim. pt. stabilirea compoz. optime a unui beton autocompactant 135

Tabelul 5.10

Compozițiile betoanelor

Materialul		Compoziția					
		1	2	3	4	5	6
Ciment CEM I 42,5 R, kg/m ³		405,9	352,7	483,4	484	477,2	463,8
Filer de calcar, kg/m ³		91	79	-	-	-	-
Silice ultrafină, kg/m ³		-	-	108,35	108,5	53,5	52
Cenușă de termocentrală, kg/m ³		-	-	-	-	53,5	52
Agregat fin, Kg/m ³	0/3 mm de râu	-	-	1000,1	1001,4	987,3	959,7
	0/4 mm de concasaj	839,8	729,7	-	-	-	-
Agregat grosier, kg/m ³	4/8 mm de concasaj	447,9	389,2	533,4	534,1	526,5	511,8
Superplasticizant, kg/m ³	GLENIUM ACE 30	6,1 (1,5% din ciment)	-	7,25 (1,5% din ciment)	7,3 (1,5% din ciment)	7,2 (1,5% din ciment)	7 (1,5% din ciment)
	VISCOCRE TE 20 HE	-	10,6 (3% din ciment)	-	-	-	-
Fibre de oțel, kg/m ³		-	-	-	40 (0,509 % în volum)	-	38,8 (0,494 % în volum)
Apă, kg/m ³		367,4	440,8	194,5	194,7	198,8	193,3
A/C		0,905	1,25	0,4	0,4	0,416	0,416
Total, kg		2158	2002	2327	2370	2304	2278
Obs. - Compozițiile 1 și 2 sunt realizate numai cu agregate de concasaj: filer de calcar, agregat fin 0/4 mm, agregat grosier 4/8 mm - Compozițiile 3 și 4 sunt realizate cu silice ultrafină, agregat fin de râu 0/3 mm, agregat grosier de concasaj 4/8 mm, fără și cu fibre de oțel - Compozițiile 5 și 6 sunt realizate cu silice ultrafină, cenușă de termocentrală, agregat fin de râu 0/3 mm, agregat grosier de concasaj 4/8 mm, fără și cu fibre de oțel							

Aceste tipuri de compoziții se aseamănă cu determinările experimentale recente prezentate în literatura tehnică de specialitate. Pentru a optimiza cantitatea de determinări experimentale au fost păstrate relativ constante următoarele caracteristici ale compoziției: dozajul de ciment (~480kg/m²), tipul de superplasticizant (Glenium), dozajul de agregate (0/3 și 4/8), raportul apă/ciment (~0.4).

136 5. BETOANE AUTOCOMPACTANTE

În Tabelul 5.11 sunt prezentate succint aditivii utilizați în compozițiile testate.

Tabelul 5.11

Caracteristici aditivi

Aditiv	GLENIUM ACE 30	Sika® ViscoCrete®-20H
Producător	BASF S.A.	Sika S.A.
Starea fizică	lichid	lichid
Culoare	maro	Maro deschis
Densitate la 20°C	Aprox. 1,06 ± 0,02 g/cm ³	Aprox. 1,08 g/cm ³
Conținut substanțe solide	cca 30 M-% ± 1,5	
pH	5 -7	4,3 +/- 0,5
Conținut maxim de cloruri	0,10% din masă	lipsă
Conținut maxim de alcali	8,00% din masă	lipsă
Dozaj optim recomandat	0,3 ÷ 1,0% din cantitatea de ciment	1,0 – 2,0% din cantitatea de ciment

Epruvetele au fost decofrate după două zile, au fost păstrate în apă 7 zile iar, apoi, până la încercare pe un grătar deasupra apei.

Betonul proaspăt a fost supus testelor specifice betoanelor autocompactante, și anume:

- densitatea;
- răspândirea;
- testul cu pâlnia V;
- testu cutia L.

Betonul întărit a fost testat la 28 de zile fiind stabilite următoarele caracteristici:

- densitatea aparentă pe cuburi de 150x150x150 mm;
- rezistența la compresiune pe cuburi;
- rezistența la compresiune pe prisme de 100x100x300 mm;
- rezistența la întindere din încovoiere pe prisme de 100x100x300 mm, fiind stabilită valoarea în stadiul elastic al efortului unitar:

$$f_{ct} = \frac{3Pl}{2bh^2}$$

- modulul de elasticitate la compresiune determinat prin măsurarea deformațiilor specifice pe intervalul 0,05 R_{pr} – 0,3 R_{pr}.

5.7.3. Betonul proaspăt

Rezultatele referitoare la caracteristicile betoanelor proaspete sunt prezentate în tabelul 5.12.

În figurile de mai jos se poate observa modalitatea de realizare a testelor efectuate pe betoanele autocompactante proaspete.

5.7. Teste experim. pt. stabilirea compoz. optime a unui beton autocompactant 137



Fig. 5.40. Testarea răspândirii



Fig. 5.41a. Testul Pâlniei V



Fig. 5.41b. Testul Pâlniei V



Fig. 5.42a. Testul Cutiei L

5.7. Teste experim. pt. stabilirea compoz. optime a unui beton autocompactant 139



Fig. 5.42b. Testul Cutiei L

Tabelul 5.12

Caracteristicile betoanelor proaspete

Caracteristica		Compoziția					
		1	2	3	4	5	6
Densitatea aparentă, kg/m ³		2158	2002	2327	2370	2304	2278
Lucra- bilitatea	Răspândirea, mm Min 600, Max 800	- (20)	440	500	640	680	630
	Cutia L, h1/h2 Min 0.8; Max 1	4/17 =0,235	11/11 =1	7,5/12,2 =0,615	5/12, 5 =0,40	8,3/9 =0,92	4/17 =0,23 5*
	Pâlnia V, sec. Min 6, Max 12	5		9	9	12	35**

* Fibrele au blocat trecerea betonului printre barele de armătură (3φ12)

* Încercarea s-a făcut după circa 45' de la confecționarea betonului

După cum se poate constata, nu toate betoanele se încadrează în categoria de betoane autocompactante în conformitate cu limitele maximă și minimă date în tabel. Astfel, primele două rețete realizate cu filer și agregat de concasaj 0/4 mm, nu au nici o caracteristică care să le caracterizeze drept betoane autocompactante, ele putând fi încadrate în categoria betoanelor ușoare.

Betonul având toate caracteristicile corespunzătoare unui beton autocompactant este cel cu compoziția 5 (silice ultrafină, cenușa de termocentrală, agregat 0/3 mm de râu și 4/8 mm de concasaj).

Betoanele având în compoziție fibre profilate de oțel în cantitate de cca 40 kg/m³ au proprietăți de beton autocompactant, cu excepția testului L-box la care grătarul de oțel beton (3φ12) a constituit o piedică în împrăștierea betonului; este posibil ca testul J-ring, folosit mai des în cazul betonului armat, să fi dat rezultate mai bune.

5.7.4. Betonul întărit

Caracteristicile betonului întărit sunt prezentate în tabelul 5.13. Se constată că, datorită condițiilor de păstare a epruvetelor pe perioada de întărire densitatea betonului întărit este, practic, aceeași cu cea a betonului proaspăt.

Caracteristicile betonului întărit (densitatea și rezistența la compresiune) pentru compozițiile 1 și 2 demonstrează că acest tip de material este mai aproape de un beton ușor decât de un beton greu obișnuit.

Rețetele 3-6 se caracterizează prin aceea că s-a obținut un beton autocompactant cu rezistențe foarte mari, care pot fi încadrate în clasa C50/60.

Înlocuirea a 50% silice ultrafină cu 50% cenușă de termocentrală nu a diminuat caracteristicile de rezistență și deformabilitate ale betonului studiat.

Adaosul de fibre de oțel a sporit, așa cum era de așteptat, rezistența la întindere a betonului cu circa 20% pentru betonul fără cenușă și cu 34% pentru betonul cu silice ultrafină și cenușă de termocentrală; rezultate similare au fost obținute și de alți cercetători din domeniu.

Modulul de elasticitate al betonului a rezultat foarte ridicat pentru cele trei cazuri studiate demonstrând, în ciuda unor studii anterioare, că astfel de betoane nu sunt foarte deformabile putând fi aplicate la structuri prefabricate cu deschideri mari.

Caracteristicile betoanelor întarite

Caracteristica	Compoziția					
	1	2	3	4	5	6
Densitatea aparentă	2178	1953	2341	2385	2305	2281
	2157	1967	2326	2367	2317	2287
	2172	1985	2344	2376	2311	2284
	2172	1968	2338			
Rezistența la compresiune pe cuburi [kg/m ³]	22,00	12,70	62,44	78,36	63,11	-
	21,11	12,67	64,47	74,67	64,89	58,00
	24,00	11,78	69,10	76,50	64,00	57,95
	23,67	12,38	65,40			
Rezistența la compresiune pe prisme [N/mm ²]	-	-	-	54,5	52,0	48,00
Rezistența la întindere [N/mm ²]	-	-	-	9,95	8,3	11,12
Modulul de elasticitate al betonului la compresiune, [kN/mm ²]	-	-	-	44,3	47,5	42,30

5.8. Concluzii

Principalele concluzii care se desprind din acest prim studiu sunt:

1. Betonul autocompactant se poate obține prin folosirea unui filler adecvat, nisip, agregate de concasaj și unui superplastifiant specific.
2. Cenușa de termocentrală poate înlocui o parte însemnată din fillerul necesar.
3. Adaosul de fibre metalice, într-o cantitate de 0,5-1%, conduce la un spor sensibil al rezistenței la întindere, dar și la o reducere a lucrabilității betonului.
4. Prin utilizarea unei compoziții adecvate și unui tratament corespunzător în perioada de întărire, se pot obține betoane autocompactante cu caracteristici mecanice superioare care pot fi folosite cu bune rezultate la elemente cu deschideri și solicitări importante.
5. Prin utilizarea și implementarea betoanelor autocompactante se evită echipamentele necesare vibrării betoanelor proaspete, și deci a poluării fonice produsă de acestea, ceea ce îmbunătățește considerabil mediul de lucru pe șantiere și în fabricile de prefabricate de beton.
6. Betonul autocompactant se pretează a fi utilizat în special în cazurile unde vibrarea betonului este imposibilă datorită armării dese a elementelor (căi de rulare la poduri, culee, tuneluri sau conducte, clădiri înalte).
7. Îmbunătățirea practicilor în construcții, sporirea performanței, combinate cu măsuri de protecție a muncii și sănătății lucrătorilor în construcții, fac din betonul autocompactant o soluție foarte atractivă, atât în cazul construcțiilor civile cât și a elementelor prefabricate.

142 5. BETOANE AUTOCOMPACTANTE

Bazându-ne pe toate acestea, se poate concluda: betonul autocompactant va avea un viitor strălucit.

6. BETOANE FOARTE UȘOARE REALIZATE CU AGREGATE DIN POLIURETAN RIGID

6.1. Generalități

Confortul termic în construcțiile civile, industriale și agricole este una din cerințele impuse unei exploatare raționale și eficiente. Este cunoscut faptul că din neglijarea, într-o măsură mai mică sau mai mare, a preocupărilor pentru realizarea confortului termic, multe construcții suferă. Este deci firesc ca preocupările în acest domeniu să se diversifice pentru găsirea celor mai eficiente materiale termoizolatoare.

În acest context se înscrie realizarea betoanelor foarte ușoare din deșeuri măcinate de poliuretan rigid (PUR) cu dimensiunea granulelor de 1...12mm. Densitatea acestor betoane este de 350 ... 600 kg/m³ și pot fi utilizate cu bune rezultate în structura pereților construcțiilor precum și în lucrări de remediere a confortului termic la construcții existente.

Cercetările au început prin efectuarea unor investigații asupra agregatelor din PUR și a tehnologiei optime de realizare a preconizatelor betoane foarte ușoare [115]. Au fost efectuate cercetări asupra absorbției de apă de către agregatele din PUR, rezultând că în condiții de măcinare aceasta este totală, ca urmare a numărului foarte mare de pori, situație neadmisă în obiectivul urmărit. Ca urmare, una din principalele probleme de rezolvat rămânea diminuarea la maxim a absorbției apei de către agregatele din PUR, ceea ce până la urmă s-a realizat. A rezultat că în obținerea unor rezultate dorite se impune, pe de o parte, îndepărtarea granulelor fine, sub mărimea de 3 mm, pe de altă parte, conturarea celei mai adecvate tehnologii de amestec a constituenților în condițiile folosirii unui consum minim de apă de amestec. În acest scop s-a folosit un superplastifiant.

6.1.1. Spuma poliuretanică rigidă

Spuma poliuretanică rigidă se realizează din sisteme biocomponente de materii prime (poliol și izocianat) turnate în spații deschise sau închise. Utilizarea spumei poliuretanică rigide se prestează în lucrări de izolații termice pentru temperaturi cuprinse între - 25 °C și + 90°C.

Tabel 6.1

Caracteristici fizico-mecanice ale spumei poliuretanică rigide

Rezistența la compresiune (N/mm ²)	Rezistența la întindere prin încovoiere (N/mm ²)	Conductivitatea termică (W/mk)	Masa volumică aparentă (kg/m ³)	Comportare în timp în cond. De exploatare normale (ani)
0,38	0,5	0,030	80...100	7

Deșeurile din spumă poliuretanică rigidă rezultă din produse rebutate, bavuri. Ele pot primi utilizări în sfera construcțiilor ca părți componente ale materialelor termoizolatoare compozite.

Urmărind realizarea unor betoane foarte ușoare și termorezistente, se procedează la măcinarea deșeurilor, rezultând agregate din poliuretan rigid, de dimensiuni cuprinse între 1 și 16 mm. Poliuretanul rigid are un conținut de pori deschiși de 10% din volum și o absorbție de apă de circa 5%, dar după măcinare volumul porilor deschiși crește considerabil, iar absorbția de apă este totală.

Poliuretanul rigid testat din punct de vedere al absorbției de apă, a fost măcinat la dimensiuni de 1...5 mm și 5...12 mm, prezentând o absorbție de apă de 100%. O astfel de reținere de apă nu este acceptabilă pentru obiectivul propus: beton foarte ușor termorezistent. Această concluzie va determina adoptarea de tehnologii de realizare corespunzătoare.

Analizând și granulozitatea deșeurilor a rezultat necesitatea separării granulelor sub 3 mm de cele peste 3 mm, fiind mai bine utilizate acestea din urmă. În acest fel a scăzut considerabil și absorbția de apă. Au fost efectuate cercetări cu granule din PUR de 3...5 mm și mai apoi, cu granule mai mari, de 5...12 mm.

6.2. Tehnologia de încorporare a agregatelor din PUR în masa betonului

Ținând cont de absorbția mare a apei de către agregatele din PUR, de necesitatea utilizării unui raport optim apă/ciment, a obținerii unor rezistențe mecanice acceptabile și a unor rezistențe termice corespunzătoare unui material termoizolant, au fost efectuate numeroase experimentări urmărind obținerea celei mai potrivite tehnologii de încorporare a agregatelor din PUR în masa de bază.

Principalii constituenți ai materialului compozit sunt: cimentul, agregatele din PUR, nisipul sortat și apa.

Ținând cont de particularitățile materialelor, au fost experimentate mai multe tehnologii, după cum urmează:

a) *Tehnologia de preamestec total*, cu agregate nesortate din PUR cu fracțiunea ≤ 5 mm, asemănătoare tehnologiei de preparare a betonului obișnuit: se amestecă în betonieră constituenții. Datorită absorbției mari de apă a agregatelor din PUR s-a utilizat un raport mare apă/ciment.

Amestecul în betonieră necesită, pentru o mai bună omogenizare, un timp mai mare de amestec comparativ cu betonul obișnuit.

S-au testat mai multe rețete, cu rapoartele ciment/nisip = 1...3; apă/ciment = 0,8...1,2; ciment/PUR = 2...5. În toate cazurile au rezultat amestecuri mai puțin omogene, compozitul prezentând rezistențe mecanice foarte mici la 3 și la 7 zile. Explicația constă în absorbția puternică a apei de către agregatele din PUR, comparativ cu reținerea apei pentru procesul de hidratare a cimentului folosit.

b) *Tehnologia de preamestec parțial și succesiv* a constituenților. Practic s-au experimentat două tehnologii:

b1 – Se saturează cu apă agregatele nesortate din PUR, cu fracțiunea ≤ 5 mm, apoi separat, se amestecă cimentul cu nisipul uscat și în final se amestecă toate componentele în betonieră. În baza acestei tehnologii un m³ de compozit conține:

6.2. Tehnologia de încorporare a agregatelor din PUR în masa betonului 145

Ciment	150...200 kg
Nisip	150...200 kg
Apă	130...230 kg
PUR	75...100 kg

TOTAL : 555...730 kg

Rezultatele obținute nu au fost mulțumitoare, cantitatea de apă reținută rămânând în continuare foarte mare, chiar mai mare ca în cazul tehnologiei de preamestec total.

b2 – Se folosesc agregate sortate, din PUR, cu fracțiunea $\geq 3\text{mm}$, iar pentru îmbunătățirea lucrabilității amestecului proaspăt și a reducerii consumului de apă se utilizează superplastifiant în proporție de 0,4...0,5% din cantitatea de ciment. Se folosește un raport optim apă/ciment=0,5.

Din cauza creșterii absorbției de apă, odată cu scăderea dimensiunilor agregatelor, s-a renunțat la fracțiunile sub 3 mm. Au fost utilizate fracțiunile cuprinse între 3-5 mm și 5-12 mm.



Fig. 6.1. Frațiunile de poliuretan rigid utilizate

Tehnologia propriu-zisă de preparare a betonului proaspăt, foarte ușor, diferă de cea a betonului clasic prin aceea că amestecul se efectuează în două etape:

146 6. BETOANE FOARTE UȘOARE REALIZ. CU AGREGATE DIN POLIURETAN RIGID

1) Se amestecă în betonieră nisipul sortat cu cimentul și apa de amestec tratată cu superplastifiant;

2) Se adaugă agregatele din PUR și se amestecă în betonieră timp de 4 - 5 minute, până se constată obținerea celei mai bune consistențe și omogenități a amestecului.

Această tehnologie răspunde cerințelor impuse.

Pentru 1m³ de compozit s-au utilizat:

- ciment II/A-S32,5 150 - 200kg;
- nisip silicios de râu 100 - 200kg;
- apă 75 - 100kg;
- PUR 40 - 55kg;
- Superplastifiant 0,60 - 1,00kg.

6.3. Proprietăți fizico-mecanice ale betoanelor ușoare realizate cu agregate din PUR

Au fost urmărite *rezistența la compresiune, masa volumică aparentă, conductivitatea termică* ale compozitului pe următoarele tipuri de epruvete:

- *rezistența la compresiune și densitatea aparentă* – cuburi cu dimensiunile: 100x100x100mm;
- *rezistența la întindere prin încovoiere* – prisme de 300x100x50mm;
- *conductivitatea termică* - plăci 200x200x50 mm.

Tiparele au fost astfel adaptate sau confecționate ca să răspundă cerințelor dimensionale ale epruvetelor.

Turnarea în tipare a compozitului (beton foarte ușor) s-a realizat fără utilizarea compactării prin vibrare.

Au fost confecționate 24 variante de epruvete, realizate numai din PUR monolit (Fig.6.2), din PUR măcinat, din PUR și ciment (Fig. 6.3), din PUR și beton (Fig.6.4), și din BCA (Fig.6.5). Epruvetele au fost ținute în condiții de laborator, cele pe bază de ciment fiind supuse experimentărilor la vârsta de 28 zile.



Fig.6.2. Epruvete PUR monolit

6.3. Proprietăți fiz.-mec. ale betoanelor ușoare realizate cu agregate din PUR 147



Fig.6.3. Epruvete PUR și ciment



Fig.6.4. Epruvete PUR și beton

148 6. BETOANE FOARTE UȘOARE REALIZ. CU AGREGATE DIN POLIURETAN RIGID



Fig.6.5. Epruvete BCA

Epruvetele diferă între ele prin compoziție determinată de ponderea constituenților reflectată în cantitățile de ciment, de PUR, de mărimea granulelor (agregatelor) din PUR, de cantitatea optimă de apă de amestec, de cantitatea și granulozitatea nisipului și de superplastifiant, prezentate în Tabelul 6.2.

Tabel 6.2

Tabel centralizator compoziții

Nr. crt.	Nr. epruv.	Mărime PUR mm	$\frac{C}{PUR}$	$\frac{A}{C}$	%SP	$\frac{C}{N}$	Obs.
1	5	3 ... 5	3/1	0,72			Fără nisip
2	6	3 ... 5	2/1	0,6	0,4		Fără nisip
3	7	3 ... 5	3/1	0,6	0,4		Fără nisip
4	8	3 ... 5	2,4/1	0,6	0,4	2,4/1	
5	9	3 ... 5	3,6/1	0,6	0,4	3,6/1	
6	11	3 ... 5	3,6/1	0,5	0,5	1,5/1	
7	12	3 ... 5	3/1	0,5	0,5	1,5/1	
8	13	3 ... 5	3/1	0,5	0,5	1/1	
9	14	3 ... 5	4,5/1	0,5	0,5	1/1	
10	15	3 ... 5	4,5/1	0,5	0,5	2/1	
11	17	3 ... 5	6/1	0,5	0,5	1/1	Dedusă din 14
12	18	3 ... 5	6/1	0,5	0,5	2/1	Dedusă din 15
13	19	5 ... 12	3,6/1	0,6	0,5	3/1	Dedusă din 9
14	20	5 ... 12	4,5/1	0,5	0,5	1/1	Dedusă din 14
15	21	5 ... 12	4,5/1	0,5	0,5	2/1	Dedusă din 15
16	22	5 ... 12	6/1	0,5	0,5	1/1	Dedusă din 17
17	23	5 ... 12	6/1	0,5	0,5	2/1	Dedusă din 18

Obs. PUR = agregate din poliuretan rigid; C = ciment; A = apă; SP = superplastifiant; N = nisip

6.3. Proprietăți fiz.-mec. ale betoanelor ușoare realizate cu agregate din PUR 149

Pe baza încercărilor tehnologice preliminare, au fost utilizate două grupe de agregate PUR: agregate PUR având dimensiunile de 3...5 mm și 5...12 mm, rapoarte C/PUR cuprinse între 2/1 și 6/1, rapoarte C/N cuprinse între 1/1 și 3,6/1, precum și cantități optime de apă în relație cu prezența superplastifiantului.

În plus au mai fost efectuate încercări de reper pe probe din BCA, din PUR, și din agregate din PUR.

6.3.1. Rezistența la compresiune

Rezistența la compresiune (f_c) s-a determinat pe cuburi (Fig.6.6) conform normativelor în vigoare la data efectuării cercetării (STAS 1275-89).



Fig. 6.6. Cuburi pentru testul la compresiune

S-au considerat ca și mărimi de reper rezistența la compresiune a PUR rigid ($0,5 \text{ N/mm}^2$) și a produsului BCA (5 N/mm^2).

Ruperea cuburilor a pus în evidență o consecință a conlucrării între structura mai rigidă a betonului și structura ușor deformabilă-poroasă a agregatelor din PUR. Astfel, din urmărirea relației dintre eforturile unitare de compresiune și deformațiile specifice, sunt puse în evidență valori mai mari ale acestora din urmă explicate prin autocompactarea "agregatelor" din PUR. Proba testată la compresiune fiind considerabil umflată în zona de mijloc.

Rezistențele cele mai mari, între 5 și 8 N/mm^2 , sunt date de epruvetele Nr. 15, 20, 21, 22, și 23 cu deformații moderate la rupere cuprinse între $7,3...4,7 \text{ mm/m}$.

150 6. BETOANE FOARTE UȘOARE REALIZ. CU AGREGATE DIN POLIURETAN RIGID

Cele mai bune valori, mai sus menționate, corespund unor particularități de structură și anume: epruvetele 15 au agregate cuprinse între 3...5 mm, dar cu rezultate inferioare epruvetei 21 realizată în aceleași condiții dar cu agregate cuprinse între 5...12 mm. În același raport de asemănare se găsesc și epruvetele 14, 17 și 18 cu agregate cuprinse între 3...5 mm cu rezultate inferioare epruvetelor 20, 22, 23 realizate în aceleași condiții, dar cu agregate cuprinse între 5...12 mm. Analiza detaliată a rezistențelor la compresiune este prezentată în diagrama din figura 6.8.



Fig.6.7. Rezistența la compresiune

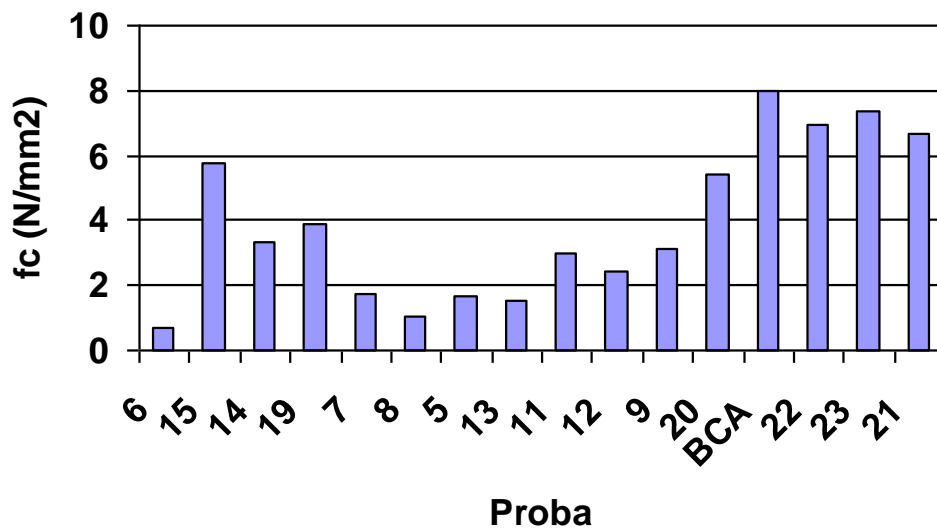


Fig.6.8. Rezistența la compresiune centrică

6.3.2. Masa volumică

Densitatea aparentă s-a determinat conform STAS 2414-91.

Rezultatele pe ansamblu confirmă reușita în realizarea unor betoane foarte ușoare cu densitatea cuprinsă între cea a PUR rigid și cea a BCA.

Rezultatele cele mai bune sunt date de epruveta Nr.15, 20, 21 și 22 cu densități cuprinse între 400...600 Kg/m³.

6.3.3. Rezistența la întindere prin încovoiere

Determinarea rezistenței la întindere (f_{ct}) prin încovoiere s-a efectuat conform STAS 1275-89.

Cum însă, rezistența la întindere nu este o caracteristică mecanică foarte importantă pentru aceste betoane ușoare, și cum rezultatele practice cele mai bune sunt date de epruvetele Nr.15, 20, 21 și 22 și 23 care se situează între 0,3...0,7N/mm², rezultatele se consideră bune, chiar foarte bune în cazul epruvetei Nr.23 unde f_{ct} este mai mare comparativ cu cea rezultată pentru PUR rigid.

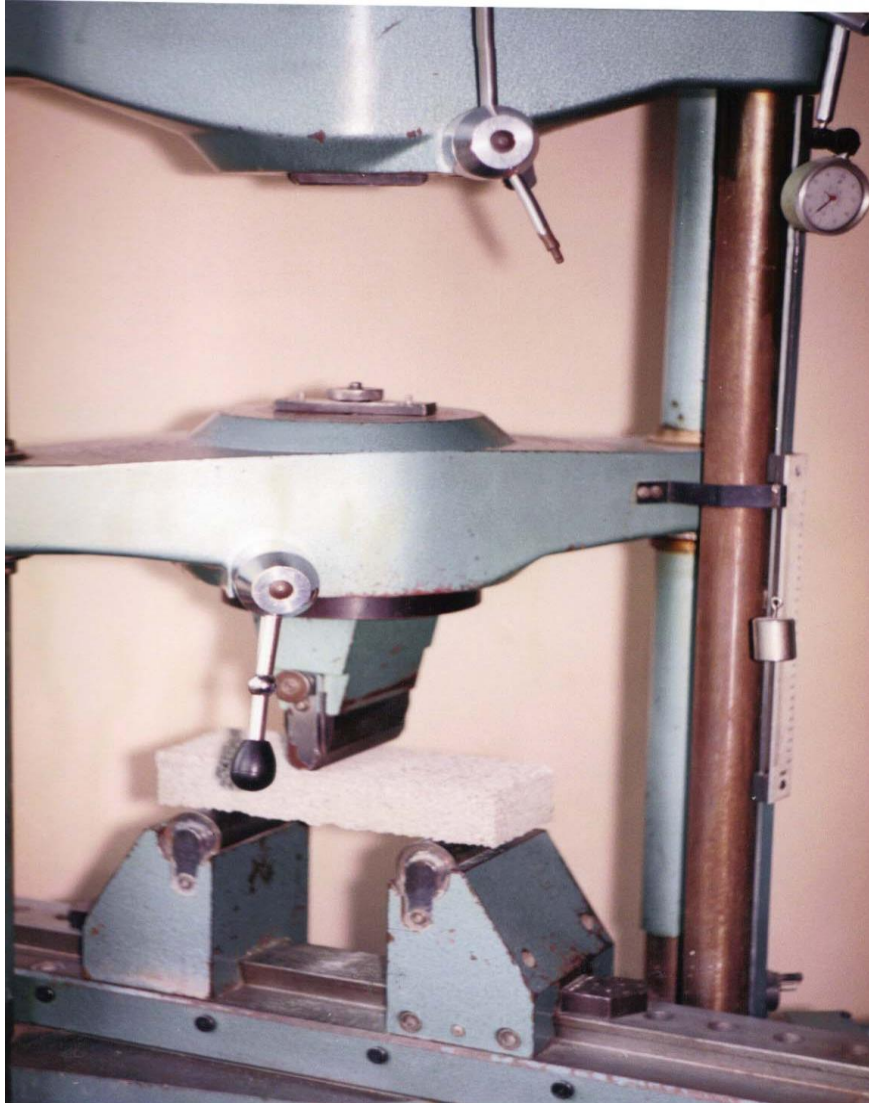


Fig. 6.9. Rezistența la întindere prin încovoiere

6.3.4. Conductivitatea termică

Una din cele mai importante caracteristici fizice ale betonului foarte ușor, realizat cu agregate din PUR, este conductivitatea termică (λ).

Conductibilitatea termică s-a determinat cu verificatorul de transmitere a căldurii (Dr. Bock), probele fiind confecționate sub formă de plăci.

Principiul de funcționare al aparatului este bazat pe metoda plăcilor care presupune introducerea probelor între două plăci plate cu temperaturi diferite ($\Delta t \approx 10^\circ\text{C}$). Placa de încălzire este cea cu temperatura mai ridicată și este menținută

6.3. Proprietăți fiz.-mec. ale betoanelor ușoare realizate cu agregate din PUR 153

la o temperatură constantă prin aducția energiei electrice. Placa de răcire își menține temperatura constantă prin evacuarea căldurii. Fluxul de căldură este dirijat prin materialul de încercat datorită protecției cu care este prevăzută placa de încălzire.

După introducerea probei între plăcile aparatului este necesar un timp de pornire la care se adaugă 0,5 ore pentru încălzirea lichidului termostatic.

La terminarea stadiului de pornire se fac citiri la fiecare 1/2 oră; se citesc: timpul Z, poziția contorului E, temperatura lichidului la intrarea și ieșirea din placa de izolație termică (t_{w1} și t_{w2}) și din placa de răcire (t_{k1} și t_{k2}). Sunt necesare minimum 5 citiri. Grosimea probei se stabilește prin măsurare cu ajutorul celor 4 micrometre cu care este prevăzut aparatul.

Rezistența transmișibilității termice W a celulei de măsurare s-a considerat ca fiind egală cu $1,3 \times 10^{-3}$. Valoarea constantei treptelor de sarcină k_i se determină funcție de randament, astfel pentru treapta de randament 7, $k=1085$, iar pentru treapta de randament 3, $k=229,8$.

Se determină gradientul total de temperatură și intensitatea fluxului termic:

$$\Delta t = t_w - t_k \quad (6.1)$$

$$q = \frac{\sum \Delta E}{\sum \Delta Z} k_i \quad (6.2)$$

Conductibilitatea termică λ se determină cu ajutorul formulei de mai jos:

$$\lambda = \frac{qD}{\Delta t - qW} \text{ (Kcal/mh}^0\text{C)} \quad (6.3)$$

rezistența la transfer termic se calculează cu formula:

$$R = \frac{D}{b \times \lambda} \text{ (m}^2\text{h}^0\text{C/Kcal)} \quad (6.4)$$

În formulele anterioare:

- Δt - gradientul total de temperatură;
- q - intensitatea fluxului termic;
- D - grosimea probei;
- W - rezistența transmișibilității termice a celulei; $W=1,3 \times 10^{-3}$
- b - constantă, $b=1,1$.

Din determinările efectuate pe probele cu agregate din poliuretan rigid, rezultă că probele realizate folosindu-se rețeta OC au $\lambda=0,130 \text{ Kcal/mh}^0\text{C}$, valoare comparabilă cu conductibilitatea termică a BCA-ului cu o densitate de 300 kg/m^3 ($\lambda=0,146 \text{ Kcal/mh}^0\text{C}$).

La început, au fost efectuate încercări pe epruvete din PUR rigid și BCA pentru determinarea valorilor de reper. Tabelul 6.3 prezintă măsurătorile pe epruvete și distribuirea lor între cele două valori de reper, plăci PUR și BCA, respectiv $0,035 \text{ Kcal/hm}^0\text{C}$ și $0,146 \text{ Kcal/hm}^0\text{C}$.

Conductibilitatea termică și rezistența termică

Nr. crt	Tip epruv	Proba	λ (Kcal / mh°C)	λ_{med} (Kcal / mh°C)	R (m ² h°C / Kcal)	R _{med} (m ² h°C / Kcal)
1	1	1a	0,035	0,035	1,196	1,195
2		1b	0,035		1,195	
3	2	2a	0,040	0,041	0,711	0,632
4		2b	0,042		0,552	
5	3	3a	0,039	0,040	0,583	0,516
6		3b	0,041		0,450	
7	4	4a	0,037	0,038	0,597	0,525
8		4b	0,040		0,454	
9	5	BCA	0,137	0,146	0,338	0,322
10		BCA	0,155		0,306	
11	6	5a	0,097	0,096	0,515	0,515
12		5b	0,096		0,516	
13	7	6a	0,073	0,066	0,679	0,748
14		6b	0,068		0,721	
15		6c	0,058		0,846	
16	8	7a	0,090	0,081	0,573	0,626
17		7b	0,080		0,625	
18		7c	0,074		0,679	
19	9	8a	0,080	0,085	0,614	0,584
20		8b	0,093		0,543	
21		8c	0,084		0,595	
22	10	9a	0,099	0,103	0,484	0,465
23		9b	0,098		0,487	
24		9c	0,114		0,425	
25	11	10 cutie	0,169	0,153	1,053	1,061 *
26		10'cutie	0,137		1,069	
27	12	11a	0,106	0,101	0,457	0,484
28		11b	0,097		0,501	
29		11c	0,100		0,493	
30	13	12a	0,119	0,102	0,428	0,506
31		12b	0,094		0,546	
32		12 c	0,093		0,543	
33	14	13a	0,090	0,097	0,576	0,533
34		13b	0,094		0,549	
35		13c	0,107		0,475	
36	15	14a	0,075	0,078	0,636	0,619
37		14b	0,075		0,639	
38		14c	0,084		0,582	

6.3. Proprietăți fiz.-mec. ale betoanelor ușoare realizate cu agregate din PUR 155

Tabel 6.3 (continuare)

Conductibilitatea termică și rezistența termică

Nr. crt	Tip epruv	Proba	λ (Kcal / mh°C)	λ_{med} (Kcal / mh°C)	R (m ² h°C / Kcal)	R _{med} (m ² h°C / Kcal)
39	16	15a	0,081	0,074	0,598	0,659
40		15b	0,067		0,732	
41		15c	0,075		0,648	
42	17	16 placa beton	0,291	0,291	0,048	0,048
43	18	17a	0,119	0,116	0,420	0,430
44		17b	0,122		0,404	
45		17c	0,107		0,467	
46	19	18a	0,119	0,111	0,414	0,443
47		18b	0,104		0,472	
48		18c	0,111		0,444	
49	20	19a	0,079	0,080	0,661	0,650
50		19b	0,074		0,703	
51		19c	0,088		0,458	
52	21	20a	0,114	0,113	0,456	0,455
53		20b	0,105		0,491	
54		20c	0,122		0,419	
55	22	21a	0,158	0,143	0,319	0,353
56		21b	0,143		0,353	
57		21c	0,129		0,389	
58	23	22a	0,126	0,125	0,398	0,409
59		22b	0,129		0,391	
60		22c	0,121		0,439	
61	24	23a	0,168	0,141	0,303	0,369
62		23b	0,136		0,388	
63		23c	0,127		0,416	

* Valorile sunt calculate ținând cont de fiecare strat ce intră în componența probei 10, folosind formula:

$$R_i = \frac{h_i}{b_i \times \lambda_i} \quad (6.5)$$

unde:

h_i - înălțimea stratului [m];

$b_i = 1,1$ constantă;

λ_i - conductivitatea termică a fiecărui strat $\left[\frac{kcal}{hm^0C} \right]$.

Măsurătorile pe epruvetele Nr. 2, 3 și 4 se referă la caracteristicile fizice ale agregatelor din deșeuri de PUR măcinate nesortate și sortate, sortate cu granule ≤ 3

156 6. BETOANE FOARTE UȘOARE REALIZ. CU AGREGATE DIN POLIURETAN RIGID

mm și granule > 3 mm, ale căror valori (0,038...0,041) sunt apropiate de valoarea de reper pentru placa din PUR.

Cercetările au început prin efectuarea unor investigații asupra agregatelor din PUR și a tehnologiei optime de realizare a preconizatelor betoane foarte ușoare. Au fost efectuate cercetări asupra absorbției de apă de către agregatele din PUR, rezultând că în aceste condiții de măcinare aceasta este totală, ca urmare a numărului foarte mare de pori, situație neadmisă în obiectivul urmărit. Ca urmare, una dintre principalele probleme de rezolvat rămânea diminuarea la maxim a absorbției de apă de către agregatele din PUR, ceea ce s-a realizat în modul prezentat în detaliu în paragraful 6.2. "Tehnologia de încorporare a agregatelor din PUR în masa betonului". A rezultat că, pentru obținerea unor rezultate satisfăcătoare, se impune, pe de o parte, îndepărtarea granulelor fine sub 3 mm, pe de altă parte, conturarea celei mai adecvate tehnologii de amestec a constituenților în condițiile folosirii unui dozaj minim de apă de amestecare. În acest scop s-a folosit un superplastifiant.

Tehnologia de preparare a betonului proaspăt diferă de cea a betonului clasic prin aceea că amestecul se realizează în două etape: la început se amestecă în betonieră nisipul sortat cu cimentul și apa de amestecare tratată cu superplastifiant, apoi, în etapa a doua, se adaugă agregatele din PUR și se amestecă în betonieră timp de 4 – 5 minute, până se observă formarea unui amestec omogen și a unei consistențe dorite.

În ansamblu, cercetările asupra conductivității termice și rezistenței termice, pun în evidență faptul că toate probele din beton foarte ușor, realizate cu agregate din PUR, se încadrează între cele două repere, placa PUR și placa BCA. Se constată că probele realizate cu agregate de mărime 3...5 mm sunt mai eficiente din punct de vedere al conductivității termice comparativ cu cele realizate cu agregate de mărime 5...12 mm. În schimb ultimele dau satisfacție mai mare din punct de vedere al celorlalte caracteristici fizico-mecanice.

6.4. Concluzii

Cercetările au început prin efectuarea unor investigații asupra agregatelor din PUR și a tehnologiei optime de realizare a preconizatelor betoane foarte ușoare. Au fost efectuate cercetări asupra absorbției de apă de către agregatele din PUR, rezultând că în aceste condiții de măcinare aceasta este totală, ca urmare a numărului foarte mare de pori, situație neadmisă în obiectivul urmărit. Ca urmare, una dintre principalele probleme de rezolvat rămânea diminuarea la maxim a absorbției de apă de către agregatele din PUR, ceea ce s-a realizat în modul prezentat în detaliu în paragraful 6.2. "Tehnologia de încorporare a agregatelor din PUR în masa betonului". A rezultat că, pentru obținerea unor rezultate satisfăcătoare, se impune pe de o parte, îndepărtarea granulelor fine sub 3 mm, pe de altă parte, conturarea celei mai adecvate tehnologii de amestec a constituenților în condițiile folosirii unui dozaj minim de apă de amestecare. În acest scop s-a folosit un superplastifiant.

Tehnologia de preparare a betonului proaspăt diferă de cea a betonului clasic prin aceea că amestecul se realizează în două etape: la început se amestecă în betonieră nisipul sortat cu cimentul și apa de amestecare tratată cu superplastifiant, apoi, în etapa a doua, se adaugă agregatele din PUR și se amestecă în betonieră timp de 4 – 5 minute, până se observă formarea unui amestec omogen și a unei consistențe dorite.

În ansamblu, cercetările asupra conductivității termice și rezistenței termice, pun în evidență faptul că toate probele din beton foarte ușor, realizate cu agregate din PUR, se încadrează între cele două repere, placa PUR și placa BCA. Se constată că probele realizate cu agregate de mărime 3...5 mm sunt mai eficiente din punct de vedere al conductivității termice comparativ cu cele realizate cu agregate de mărime 5...12 mm. În schimb ultimele dau satisfacție mai mare din punct de vedere al celorlalte caracteristici fizico-mecanice. Ca urmare se recomandă continuarea cercetărilor privind găsirea celei mai eficiente granulometriei, practic un amestec studiat între fracțiunile de 3...5 mm și 5...12 mm.

Încercările asupra plăcilor din PUR și BCA sunt considerate ca date de reper, cele două materiale fiind bine cunoscute. Este știut că BCA este un bun material de construcții, cu rezistențe termice ridicate, ce satisface exigențele de confort termic. Practic rezultatele prezentelor cercetări se situează între cele două repere, deci rezultate foarte bune.

Pentru definirea în totalitate a caracteristicilor noului material se recomandă continuarea cercetărilor pentru determinarea: rezistenței la foc, ascensiunea capilară a apei, absorbția umidității din aer, contracția și umflarea, comportarea în timp și redactarea unor instrucțiuni provizorii de aplicare a noului material.

7. CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE

Pe baza studiilor teoretice, determinărilor experimentale precum și a propunerilor de aplicare, se pot stabili concluziile tezei de doctorat, prezentate în continuare.

Reducerea efectului contracției la uscare a betoanelor, fisurarea, posibilitatea realizării mai rapide și cu personal mai puțin calificat a unor structuri noi din beton, reducerea consumului de energie electrică și a nivelului de poluare fonică de pe șantiere, prin eliminarea vibrării betonului, utilizarea deșeurilor industriale în noi materiale de construcții, reprezintă o problemă actuală a specialiștilor din domeniu, datorită costurilor și procedurilor tehnice de fabricare și întreținere a structurilor din beton.

Pentru România toate aceste aspecte reprezintă preocupări majore în contextul general de membru al Uniunii Europene.

Teza de doctorat a avut ca și obiectiv principal îmbunătățirea și dezvoltarea unor betoane speciale și cu precădere, s-a focalizat pe betoane cu contracții reduse, betoane autocompactante și betoane foarte ușoare realizate cu poliuretan rigid.

Preocuparea teoretică a constat în identificarea principiilor de evaluare a eforturilor provocate de contracție în diferite tipuri de elemente structurale; pe această bază se pot stabili dimensiunile elementelor, astfel încât să nu se dezvolte fisuri provocate de contracția betonului.

Teza contribuie la dezvoltarea metodelor de măsurare a contracției la uscare a betonului și la identificarea influenței diferiților tipuri și procente de aditivi asupra contracției la uscare a betonului.

Studiul și cercetările experimentale asupra unor betoane cu contracții reduse, au fost realizate pe betoane având în compoziție următorii aditivi reducători ai contracției la uscare: Eclipse, SR 2 și FM40. Compozițiile de betoane cercetate au luat în considerare aceleași procente de aditiv (1,5%, 2,0% și 2,3%), contracțiile la uscare măsurate fiind efectuate pe perioade lungi de timp (198 de zile). S-a obținut o reducere a contracției la uscare a betonului cu până la 50% față de betonul obișnuit.

Acest lucru contribuie decisiv la durabilitatea și sustenabilitatea structurilor din beton, prin reducerea costului de reparații și întreținere, prin sporirea rezistențelor la compresiune a betoanelor realizate cu aditivi reducători ai contracției, precum și prin posibilitatea eliminării aditivilor antrenori de aer sau reducători de apă din compoziția betoanelor. Prin utilizarea acestor betoane se vor obține suprafețe finale de elemente mai netede.

Ca și dezavantaj al acestor betoane se poate menționa costul inițial sporit al materialelor componente, și anume al aditivului, dar acest dezavantaj se pierde în timp prin sporirea durabilității.

Analiza comportamentului din punct de vedere reologic al pastelor de ciment, ce stau la baza realizării betoanelor autocompactante, reprezintă o direcție de cercetare de domeniul pioneratului în țara noastră. Pe baza înțelegerii comportamentului reologic al pastei de ciment, s-a trecut apoi la realizarea unui beton autocompactant de înaltă rezistență (C50/60). Pentru aceasta, a fost necesară realizarea aparatului de testare în stare proaspătă a acestor betoane,

ținând cont de specificațiile existente la nivel mondial. De menționat că, la ora actuală, normativele și codurile de practică pentru betoane în vigoare la noi în țară, nu fac nici o referire asupra acestui tip de betoane. Aceste betoane se dovedesc a fi eficiente la realizarea căilor de rulare la poduri, culee, tuneluri sau conducte, clădiri înalte, în special în cazurile unde vibrarea betonului este imposibilă datorită armării dese a elementelor.

Prin utilizarea cenușei de termocentrală pentru înlocuirea unei părți de filer din compoziția betoanelor autocompactante, acest tip de betoane se pot încadra în categoria materialelor "prietenoase cu mediul", în România existând mari cantități nefolosite din acest tip de deșeu industrial.

Testele experimentale efectuate asupra betoanelor autocompactante pot sta la baza stabilirii unor direcții principale de optimizare a compozițiilor acestor betoane.

Betonul autocompactant se dovedește a fi o soluție atractivă când se iau în considerare următorii factori: protecția muncii și sănătatea muncitorilor din domeniul construcțiilor, sporirea performanței, micșorarea timpului de execuție și îmbunătățirea practicilor în construcții.

Prin utilizarea și implementarea betoanelor autocompactante ce nu necesită vibrare și prezintă o tendință de segregare mică, se îngustează domeniul restricțiilor de proiectare și execuție a structurilor din beton armat, obținându-se noi tipuri de structuri ce vor prezenta o combinație mult mai rațională a oțelului cu betonul.

Costul ridicat al materialelor din compoziție, cât și a faptului că este necesar un control de calitate sporit asupra betonului și a agregatelor constituie un dezavantaj major al betoanelor autocompactante.

Cercetările asupra realizării unor betoane foarte ușoare realizate cu deșeuri de poliuretan rigid au dus la stabilirea procedurii de amestecare a acestor betoane, și a tehnologiei de amestecare a acestor deșeuri. Determinările experimentale asupra acestor betoane au avut ca și scop obținerea unor noi betoane termoizolatoare, obiectiv atins și dovedit prin caracteristicile de conductivitate termică și rezistență termică a acestora.

Rezultatele experimentale obținute pe cele trei tipuri de betoane studiate în cadrul tezei de doctorat sunt în concordanță cu cele prezentate în lucrări de specialitate din țară și străinătate.

Se propune, pe viitor testarea influenței asupra reducerii contracției betoanelor întărite a altor aditivi apăruți pe piața specifică și stabilirea celei mai eficiente compoziții luând în considerare raportul cost produs final/efect de reducere a contracțiilor. De asemenea, se propune testarea celor trei aditivi studiați pe alte tipuri de betoane (betoane cu agregate ușoare, beton celular autoclavizat, betoane autocompactante etc), sau înlocuirea în compozițiile analizate a unei cantități din masa cimentului cu pudră de silice sau cenușă de termocentrală.

Un studiu bibliografic și experimental asupra contracțiilor betoanelor autocompactante poate constitui o principală direcție de cercetare postdoctorală.

160 7. CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE

Asupra betoanelor foarte ușoare realizate cu agregate din poliuretan rigid se propune continuarea cercetărilor pentru determinarea: rezistenței la foc, ascensiunea capilară a apei, absorbția umidității din aer, contracția și umflarea, comportarea în timp, precum și redactarea unor instrucțiuni provizorii de aplicare a noului material.

CONTRIBUȚII PERSONALE:

1. Sistematizarea datelor din literatura de specialitate privind betoanele speciale.

2. Dezvoltarea unei propuneri originale de apreciere a efectului contracțiilor asupra mai multor elemente din beton armat, cum ar fi: elemente supuse la întindere centrică; elemente (pereți structurali) legați solitar cu fundațiile; dale ale îmbrăcămintșilor rutiere; pereți structurali sprijiniți pe reazeme discontinue.

3. Propunerea de introducere în calculul de estimare teoretică a contracțiilor la uscare a betonului a doi coeficienți: Ω - **contracția caracteristică** și γ - **indice de fisurare**.

4. Urmărirea dezvoltării a contracției libere la uscare pe timp îndelungat (85 -90 de zile).a unui total de 9 compoziții de betoane realizate cu aditiv reducători ai contracției.

5. Stabilirea celui mai competitiv aditiv reducător al contracției la uscare a betoanelor existent pe piața de produse specifice din țară, precum și stabilirea dozajului optim de utilizare pentru a obține o reducere a contracției de până la 50% față de cea a betonului obișnuit.

6. Stabilirea și efectuarea de teste de vîscozitate a pastei de ciment din interiorul betoanelor autocompactante analizate.

7. Realizarea aparaturii de efectuare a determinărilor caracteristice asupra betoanelor autocompactante.

8. Obținerea unui beton autocompactant competitiv.

9. Obținerea de materiale noi de construcții bazate pe deșeuri poliuretanic rigide, cu viitoare posibile utilizări la termoizolații.

10. Inițierea și realizarea unui program vast de creare a unor noi materiale de construcții bazate atât pe utilizarea aditivilor reducători ai contracției, cât și pe obținerea de betoane autocompactante.

Valorificarea rezultatelor s-a făcut prin:

- publicarea a 10 lucrări în volumele unor manifestări științifice naționale și internaționale;
- participarea în colectivul de cercetare la 7 Granturi (cu tema în domeniu) derulate în intervalul 2000-2008, dintre care la 2 am fost director;
- obținerea unui atestat de efectuare a unui stagiu de cercetare cu durata de 1 lună, în domeniul tezei de doctorat de la LNEC Lisabona, Portugalia
- obținerea unei burse tip Erasmus pentru doctoranzi în cadrul Nova University of Lisbon, Portugalia, cu durata de 3 luni.

BIBLIOGRAFIE

- [1] C.AVRAM, C.BOB, "Noi tipuri de betoane speciale", Editura Tehnică, București, 1980
- [2] Dan Sorin, *Contribuții la stabilirea capacității portante a structurilor din beton armat având diferite durate de exploatare*, Teza de doctorat, Timișoara 1999
- [3] I. Buchman, *Betoane de ultra înalte performanțe*, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 1999
- [4] Buchman I., *Réalisation des mortiers a hautes résistances par l'utilisation d'un adjuvant superplastifiant et d'une fumée de silice*, Zilele Academice Timișene, Simpozion "Materiale și elemente compozite pentru construcții", Timișoara, 1995
- [5] Buchman I., *Betoane din pudre reactive*, Zilele Academice Timișene, Simpozion "Materiale, elemente și structuri compozite / compuse pentru construcții", Timișoara, 1999
- [6] Avram C., Filimon I., Bob C., Buchman I., *Îndrumător pentru folosirea betonului armat cu fibre de oțel*, Bul. Construcțiilor (ICCPDC-INCERC), Vol. 3, București, 1977, p. 120-127
- [7] Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, *Concrete in the Service of Mankind, Concrete for Environment Enhancement and Protection*, Scotland, UK, 1996
- [8] Zilele Academice Timișene, Ediția a VIII-a, simpozion, *Materiale, elemente și structuri compozite pentru construcții - prezent și perspective*, Timișoara, 2003
- [9] N. Mihail – *Tehnologia betoanelor ușoare, 1962*
- [10] Ionescu, I., Ispas, T. -*Proprietățile și tehnologia betoanelor*, Editura Tehnică, București, 1997
- [11] I. Ionescu, T. Ispas, A. Popescu, *Betoane de înaltă performanță*, Editura Tehnică, București, 1999
- [12] I.CADAR, și alții, "Beton armat", Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 1999
- [13] Conference organized by the Hungarian Group of fib, *Fiber Reinforced Concrete – from research to practice*, Budapest, 1999
- [14] Grant ANSTI tip S NR.6153/2000, tema B19 , *Betoane speciale pentru reabilitarea construcțiilor*, director de proiect prep. drd. ing. **L. Iureș**
- [15] Grant CNCIS tip At NR.55330/2003, tema 7 , *Betoane cu contracții reduse realizate cu aditivi speciali*, director de proiect prep. drd. ing. **L. Iureș**
- [16] C. Bob, I. Buchman, E. Jebeleanu, ș.a., *Materiale de construcții*, curs, vol. I, vol. II, Timișoara, 1995
- [17] L. J. Vicat , *A Practical and Scientific Treatise on Calcareous Mortars and Cements, Artificial and Natural*, Translation by J.J. Smith, American Concrete Institute, SP-52,1976
- [18] Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, *Concrete in the Service of Mankind, Concrete for Environment Enhancement and Protection*, Scotland, UK, 1996
- [19] Jebelean, E., *Contribuții la realizarea betoanelor și mortarelor cu aditivi superplastifianți*, Teză de doctorat, Universitatea "Politehnica" Timișoara, 1991

- [20] Bob, C., Jebelean, E. , *Contribuții la stabilirea compoziției betoanelor cu aditivi superplastifianți*, Revista Materiale de Construcții nr. 2, București, 1992
- [21] *** -Superplasticizers in Concrete, vol I, II, Proceedings of an Internațional Symposium Ottawa, Canada, 1978
- [22] *** -Development in the Use of Superplasticizers, Publication ACI, Detroit, 1981
- [23] Jebelean, E. , *Utilizarea eficientă a superplastifianților în tehnologia betonului*, Simpozion. "Zilele Academice Timișene", Timișoara, 2001
- [24] Incorporating Advanced Cement Based Materials, *Cement and Concrete Research, An International Journal*, Vol. 29, No.1, 1999
- [25] Buletinul Construcțiilor, vol. 8 – 9, București, 1999
- [26] **L. Iureș**, C. Bob, C. Badea – *Use of Shrinkage Reducing Admixtures in Concretes*, Conferința Națională Tehnico – Științifică "Tehnologii moderne pentru mileniul III", Oradea, 2008
- [27] *Targeted Research Action – Environmentally Friendly Construction Technologies, 3rd Annual Workshop Technical Contributions*, Lisabona, Portugalia, 1999
- [28] Ribeiro A. B., Carrajola A., Goncalves A., *Effectiveness of Shrinkage-Reducing Admixture on Different Concrete Mixtures*, Supplementary Papers of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Berlin, Germania, 2003, pag. 229 – 309
- [29] Bentz D. P., Jensenm O. M., Geiker M., *On the Mitigation of Early Age Cracking, Self – Desiccation and Its Importance in Concrete Technology*, Lund, Suedia, 2002, pag. 195-204
- [30] Sutaria C. P., *Reducing Shrinkage of Concrete Through the Use of Admixtures*, Teza de doctorat, Universitatea Wisconsin-Milwaukee, Wisconsin, SUA, pag. 195
- [31] Gilbert R. I., *Shrinkage Cracking and Deflection – Serviceability of Concrete Structure*, Electronic Journal of Structural Engineering, EJSI International, Vol. 1, 22 Mai, 2005, pag. 2 -14
- [32] Mokarem D. W., *Development of Concrete Shrinkage Performance Specifications*, Teza de doctorat, Institutul Politehnic și Universitatea de stat Virginia, Blacksburg, Virginia, SUA, 2002, pag. 236-238
- [33] Japan Concrete Institute (JCI), *Autogenous Shrinkage of Concrete*, Proceedings of the International Workshop Organized by JCI, Hiroshima, Japonia, E & FN Books, London and New York, 1998, pag. 409-411
- [34] Aitcin P. C., *The Art and Science of Durable High-Performance Concrete*, Supplementary Papers of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Berlin, Germania, 2003, pag. 69 – 89
- [35] Holt E., *Very Early Autogenous Shrinkage: Governed by Chemical Shrinkage or Self-Dessication?*, Self-Desiccation, and Its Importance in Concrete Technology, Lund, Suedia, 2002, pag. 1 - 26
- [36] Holt E., *Early Age Autogenous Shrinkage of Concrete*, teza de doctorat, Departamentul de Inginerie Civilă și Mediu, Universitatea Washington, Washington, SUA, 2001, pag. 209-210
- [37] Mehta P. K., Monteiro P. J. M., *Concrete: Structure, Properties and Materials*, Second Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1993, pag. 548
- [38] Neville A. M., *Properties of Concrete*, Editia a 4 - a, Longman Group Limited, Anglia, 1995

- [39] Bentz D. P., Jensen O. M., Hansen K. K., Olesen J. F., Stang H., Haecker C. J., *Influence of Cement Particle-Size Distribution on Early Age Autogenous Strains and Stresses in Cement-Based Materials*, Journal of American Ceramic Society, Vol. 84, 2001, pag. 129 – 135
- [40] Troxell G. D., Raphael J. M., Davis R. E., *Long Time Creep and Shrinkage Tests on Plain and Reinforced Concrete*, Proceedings of ASTM, Vol. 58, 1958, pag. 1101 – 1120
- [41] Lura P., Breugel K., Maruyama I., *Autogenous and Drying Shrinkage of High Strength Lightweight Aggregate Concrete at Early Ages – The Effect of Specimen Size*, Delft University of Technology, Olanda și Tokyo University, Japonia, 2001, pag. 8
- [42] Berke N. S., Li L., Hicks M. C., Bae J., *Improving Concrete Performance with Shrinkage - Reducing Admixtures*, Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, ACI SP-217, Berlin, Germania, 2003, pag. 37 – 50
- [43] Tarun R. N., Yoon – moon C., Rudolph N. Klaus, *Reducing Shrinkage Cracking of Structural Concrete Through the Use of Admixtures*, Departamentul de Inginerie Civilă și Mecanică, University of Wisconsin – Milwaukee, SUA, martie 2006
- [44] Xiao-Qian Q., Tao M., Shu-Lin Z, Min-Hui F., Kuang-Liang Q., *Influence of Shrinkage Redue Agent on Early Autogenous Shrinkage of Concrete*, dep. De Inginerie Civila, Zzhejiang University, Hangzhou, R.P. China, Key Engineering Materials Vols 302-303, 2006, pag. 211-217
- [45] Man Y. H., Robert L. L., *Theoretical Prediction of Drying Shrinkage of Concrete*, Journal of Materials in Civil Engineering, noiembrie, 1995, pag. 204 – 207
- [46] Swapnil D., Darwin D., Browning J., *Evaluating Free Shrinkage of Concrete for Control of Cracking in Bridge Decks*, Structural Engineering and Engineering Materials SM Report No. 89, ian. 2007
- [47] Technical Bulletin TB – 1000, Eclipse Shrinkage Reducing Admixture, Grace Construction Products
- [48] Fișa tehnică a aditivului SR 2, SIKA ROMANIA SRL
- [49] Agreement tehnic 015 – 07/0061 – 2002, Influența aditivului superplastifiant FM 40 asupra betoanelor în stare proaspătă și întărită, produs de HEIDELBERGER BAUCHEMIE GmbH – Germania;
- [50] **L. Iures**, C. Bob, *Comparative Study Over Some Concretes Shrinkage Reducing Admixtures*, Zilele Academice Timișene, Ediția a IX-a, simpozion, *Materiale, elemente și structuri compozite pentru construcții – prezent și perspective*, Timișoara, 2005
- [51] C. Bob, *Unele considerații privind influența calității materialelor asupra durabilității construcțiilor*, A XII-a Conferință de Betoane, Iași, octombrie, 1984
- [52] R. Gettu, M. A. Martin, A. Aguado, L. Agullo, *An Experimental Study of Concretes Incorporating a Shrinkage Reducing Admixture*, Report C3117/3, Barcelona, Spania, 1999
- [53] M. G. Richardson, *Design of Concrete Bridges for Material Durability*, draft 30/11/98, UCD Industry Centre, Belfield, Dublin, martie, 1999
- [54] H. Sipple, *Damaged Precast Floor – Cracks in the Screed or in the Precast Floor Slab?*, Concrete Solutions 53. BetonTage, Neu-Ulm, Germany, februarie, 2009
- [55] B. Hillemeier, *The Largest Monolithic Slab in the World, Crack-free and Without Joints*, Concrete Solutions 53. BetonTage, Neu-Ulm, Germany, februarie, 2009

- [56] C. Tigges, *State-of-the-Art Concretes at the Precast Plant – Motivation, Design, Realization*, Concrete Solutions 53. BetonTage, Neu-Ulm, Germany, februarie, 2009, pag.92
- [57] Okamura H., Maekawa K., Ozawa K., *High-Performance Concrete*, Gihodo Publishing, 1993
- [58] Okamura H. and Ozawa K., *Self-compactable high performance concrete*, International Workshop on High Performance Concrete, American Concrete Institute; Detroit. 1994, pp 31-44
- [59] Masahiro Ouchi-Kochi, Makoto Hibino-Nagaoka: *Development, applications and investigations of Self-Compacting Concrete*, Japan, 2000
- [60] Masahiro Ouchi, Sada-Aki Nakamura, Thomas Osterberg, Sven-Erik Hallberg, Myint Lwin, *Applications of self-compacting concrete in Japan, Europe and The United States*, ISHPC, 2003
- [61] M. Ouchi, M. Hibino, *Development, Applications and Investigations of Self-Compacting Concrete*, Kochi University of Technology, Japan, Nagaoka University of Technology Japan, 2003
- [62] H. Okamura, M. Ouchi, *Self-Compacting Concrete*, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 1, 5-15, April 2003, Japan Concrete Institute
- [63] *European Guidelines for Self Compacting Concrete*, EN 12350-1: 1999 E , May 2004
- [64] Timo Wustholz, *Fresh properties of self-compacting concrete (SCC)*, Otto-Graf-Journal, Vol.14, 2003
- [65] Stefan Kordts, Hrost Grube: *Controlling the workability properties of Self-Compacting Concrete used as ready-mixed concrete*, Dusseldorf, Germany, 2006
- [66] Orjan Peterson: *SCC-Final Report of Task 2- Workability*, Swedish Cement & Concrete Research Institute, 1999
- [67] Precast, Prestressed Concrete Institute, *Interim Guidelines for the Use of Self- Consolidating Concrete in Precast*, Prestressed Concrete Institute Member Plants, TR-6-03
- [68] Japan Society of Civil Engineers: Concrete Library 93, *High-fluidity Concrete Construction Guideline*, 1999
- [68] SCC Brite EuRam Contract No.BRPR-CT96-0366, Rev. No. 6, 2000
- [69] Billberg P., Osterberg T., *Self-Compacting Concrete, Technique of use*, CBI report 2:2002, Stockholm 2002 (in Swedish)
- [70] Ouchi M., Hibino M., Ozawa K. and Okamura H., *A rational mix-design method for mortar in self-compacting concrete*, Proceedings of Sixth South-East Asia Pacific Conference of Structural Engineering and Construction. Taipei, Taiwan, 1998
- [71] S. Kordts, W. Breit, *Assesment of the Fresh Concrete Properties of Self Compacting Concrete*, Dusseldorf, science-direct internet, pag. 115
- [72] * * * - *Testing beams from SCC at UNIBECK Kft – Kecskemét* (Ungaria), July 2005
- [73] CNCSIS/MEC, Contract no 96/2006, "Innovative solutions for optimization of microstructure composition of self-compacting concrete for performant realization of precast concrete elements", partnership with ICECON Bucharest, "Politehnica" University of Timisoara, Technical University of Construction Bucharest, University of Cluj – Napoca
- [74] Corneliu Bob, C. Badea, S. Dan, *Self-Compacting Concrete in Precast Elements Industry*, Buletinul Institutului Politehnic,Iasi, Tomul LI (LV) Fasc.5, 2002
- [75] European Standard CEN, Brussel, 1999

166 BIBLIOGRAFIE

- [76] Julietta Domsa, Liana Terec, Henriette Szilagyi, Andreea Mircea, *Self compacting Concrete - Advantages and Characteristics*, Academic Days of Timisoara, 2006
- [77] Shikoku Island Concrete Research Association: Report by Self-Compacting Concrete Research Committee, "Self-Compacting Concrete in Shikoku Island" 2000 to 2002, 2002
- [78] Bernabeu and Laborde, *SCC Production System for Civil Engineering*, Final Report of Task 8.3, Brite EuRam Contract No. BRPR-CT96-0366
- [79] Nawa T., Izumi T., and Edamatsu Y., *State-of -the-art report on materials and design of self-compacting concrete*, Proceedings of International Workshop on Self-compacting Concrete, August 1998; Kochi University of Technology, Japan
- [80] Nakajima, Y., Nakazono, A., Mori, S., *High Strength Self-Compacting Colored Concrete for Ritto Bridge Substructure (New Meishin Expressway)*, Proceedings of the first fib Congress 2002, pp.137-146. October, 2002
- [81] Taniguchi, H., Tanaguchi, K., Uechi, H., Akizuki, S., *Fabrication of Prestressed Concrete Composite Girders by Self-Compacting Concrete using Fly Ash*, Technical Report of Sumitomo Construction Co., Vol.120, 2002
- [82] Domone P., Chai H. and Jin J., *Optimum mix proportioning of self-compacting concrete*, Proceedings of International Conference on Innovation in Concrete Structures: Design and Construction, Dundee, September 1999, Thomas Telford; London. pp 277-285
- [83] Billberg, P., *Self-compacting concrete for civil engineering structures - the Swedish Experience*, Report no 2:99, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1999
- [84] Su N., Hsu K.-C. and Chai H.-W., *A simple mix design method for self-compacting concrete*, Cement and Concrete Research, 31, (2001) pp 1799-1807
- [85] Gomes P.C.C, Gettu R., Agullo L., Bernard C., *Mixture proportioning of high strength, Self-Compacting Concrete: Performance and Quality of concrete structures*, Third CANMET/ACI Intl Conf. (Recefi, Brazil), 2002, 12p
- [86] Bennenk, H, W., J. Van Schiindel: *The mix design of SCC, suitable for the precast concrete industry*, Proceedings of the BIBM Congress, 2002 Istanbul, Turkey
- [87] Billberg, P., *Mix design model for SCC (the blocking criteria)*, Proceedings of the first North American conference on the design and use of SCC, Chicago 2002
- [88] Klaus Holschemacher, Yvette Klug, *A Database for the Evaluation of Hardened Properties of SCC*, LACER No. 7, 2002
- [89] NE 012-1:2007 *Cod de practică pentru executarea lucrărilor din beton, beton armat și beton precomprimat. Partea 1-a - Producerea betonului*
- [90] SR EN 934-2:2003 *Aditivi pentru beton, mortar și pasta. Partea 2: Aditivi pentru beton. Definiții, condiții, conformitate, marcare și etichetare*
- [91] SR EN 1008: 2003 *Apa de preparare pentru beton - Specificații pentru prelevare, încercare și evaluare a aptitudinii de utilizare a apei, inclusiv a apelor recuperate din procese ale industriei de beton, ca apă de preparare pentru beton*
- [92] ENV 1992-1-1 Eurocod 2 *Realizarea structurilor din beton, Reguli generale și reguli de construcție*
- [93] ENV 13670-1 *Executarea structurilor din beton - Reguli obișnuite*
- [94] SR EN 197-1: 2002 *Ciment - Partea 1: Compoziție, specificații și criterii de conformitate ale cimenturilor uzuale*

- [95] SR EN 12350-1: 2003 *Încercare pe beton proaspăt. Partea 1: Eșantionare*
- [96] SR EN 12350-2: 2003 *Încercare pe beton proaspăt. Partea 2: Încercare de tasare*
- [97] SR EN 12350-3: 2003 *Încercare pe beton proaspăt. Partea 3: Încercare Vebe*
- [98] SR EN 12350-4: 2002 *Încercare pe beton proaspăt. Partea 4: Grad de compactare*
- [99] SR EN 12350-5 :2002 *Încercare pe beton proaspăt. Partea 5: Încercare cu masa de răspândire*
- [100] SR EN 12350-6: 2002 *Încercare pe beton proaspăt. Partea 6: Densitate*
- [101] SR EN 12350-7: 2003 *Încercare pe beton proaspăt. Partea 7: Conținut de aer. Metode prin presiune*
- [102] SR EN 12390-1:2002 *Încercare pe beton întărit. Partea 1: Formă, dimensiuni și alte condiții pentru epruvete și tipare*
- [103] SR EN 12620:2003 *Agregate pentru beton*
- [104] SR EN 12878 :2005 *Pigmenți pentru colorarea materialelor de construcție pe bază de ciment și/sau var. Specificații și metode de încercare*
- [105] SR EN 13055-1:2003 *Agregate ușoare. Partea 1: Agregate ușoare pentru betoane, mortare și paste de ciment*
- [106] SR EN 13263-1:2005 *Silice ultrafină pentru beton – Partea 1: Definiții, condiții și criterii de conformitate*
- [107] SR EN 13263-2:2005 *Silice ultrafină pentru beton – Partea 2: Evaluarea conformității*
- [108] SR ENV 13670-1:2006 *Execuția structurilor de beton – Partea 1: Condiții comune*
- [109] EN 13369 *Reguli de bază pentru produsele din beton prefabricat*
- [110] EN 14889 *Fibre pentru beton*
- [111] A. Materschlager, K. Bergmeister – *Fiber Added Concrete, Viena, Austria, 1998*
- [112] SR EN 206 – 1/2000 *Beton – partea 1, Specificații, performanțe, fabricare și conformitate*
- [113] SR EN 1992: 2006 *Proiectarea structurilor de beton*
- [114] R. Troli, A. Borosi, S. Collepardi, G. Fazio, M. Collepardi, S. Monosi, *Self-Compacting, Curing, Compressing Concrete, 6th International Congress, Global Construction, Ultimate Concrete Opportunities, Dundee, UK, 5-7 July 2005*
- [115] *Agreement tehnic 001-03/111-1997 "Spumă poliuretanică bicomponentă rigidă pentru semicochilii". Titular : "S.C. SPUMOTIM S.A." Timișoara*
- [116] STAS 5912-89 *Determinarea conductivității termice*
- [117] C. Bob, I. Buchman, E. Jebelean, C. Badea – *Utilizarea deșeurilor industriale re folosibile în domeniul construcțiilor, Cluj-Napoca, SELC , 2000*
- [118] Stas 2833 – 80, *Încercări pe betoane – Determinarea contracției axiale a betonului întărit*
- [119] A. Abdelrazaq, K. J. Kim, J. Ho Kim, *Brief on the Construction Planning of the Burj Dubai Project, Dubai, UAE, , 17th Congress of IABSE, Chicago, 2008, pag. 186-187*
- [120] W. Baker, S. Korista, D. Rankin, *Trump International Hotel and Tower, Chicago, 17th Congress of IABSE, Chicago, 2008, pag. 182-183*

- [121] **L. Iureș**, C. Bob – *“Preliminary Tests Regarding Self-Compacting Concretes Viscosity”* – Simpozion Internațional Tinerii și Cercetarea Multidisciplinară, ed. a IX-a, Timișoara, 2007
- [122] **L. Iureș**, C. Badea, C. Bob, I. Buchman, E. Jebelean, S. Dan – *“Self-compacting Concretes For Precast Elements”*, Conferința Universității Oradea, Construcții și Instalații Hidroedilitare, Editura Universității din Oradea, 2007
- [123] **L. Iureș**, C. Bob, C. Badea, I. Buchman, E. Jebelean – *“Tests Regarding the Realization of Self-Compacting Concretes”*, Zilele Academice Timișene, Composite Materials, Elements and Structures for Construction, 2007
- [124] **L. Iureș**, C. Bob, I. Buchman, C. Badea – *“Shrinkage Control in Concrete”*, Buletinul Științific al Universității “Politehnica” din Timișoara, 2007
- [125] I. Cadar, I. Buchman, D. Popescu, **L. Iureș** – *“Tehnologia și proprietăți fizico – mecanice ale betoanelor foarte ușoare realizate cu agregate din poliuretan rigid”*, Simpozion Zilele Academice Timișene, Ediția a VII-a, Timișoara, 2001
- [126] **L. Iureș** – *“Betoane cu contracții reduse”*, Simpozion Zilele Academice Timișene, Ediția a VIII-a, Timișoara, 2003
- [127] E. Jebelean, **L. Iureș** – *“Influența unor aditivi asupra proprietăților betoanelor”*, Simpozion Zilele Academice Timișene, Ediția a VIII-a, Timișoara, 2003
- [128] D. P. Georgescu – *“Îndrumător de proiectare a durabilității betonului în conformitate cu anexa națională de aplicare a SR EN 206-1. Clase de durabilitate”*, 2001
- [129] C. Bob, A. Leidal, **L. Iureș**, I. Buchman, E. Jebelean, S. Dan, C. Badea, L. Bob – *“Aspects Regarding the Use of Self-Compacting Concretes”*, International Conference On Sustainability in Science Engineering, Timișoara 2009

ANEXA

BETOANE FOARTE UȘOARE REALIZATE CU AGREGATE DIN POLIURETAN RIGID

Determinarea conductivității termice (λ) și
a rezistenței la transfer termic (R)

Proba	Timp Z [h, min]	E	tw ₁ [° C]	tw ₂ [° C]	tk ₁ [° C]	tk ₂ [° C]	h _{med} [mm]	W	q	k	λ [Kcal/ mh ⁰ C]	λ _{med} [Kcal/ mh ⁰ C]	R [m ² h ⁰ C/ Kcal]	R _{med} [m ² h ⁰ C/ Kcal]
OA ₁	11:25	183,422	25,2	25,0	19,4	19,6	50,75	1,3x10 ⁻³	21,26	1085	0,163	0,145	0,283	0,348
	11:55	183,439	26,1	26,0	19,6	19,7								
OA ₂	12:25	183,445	26,2	26,1	19,6	19,7	51,37	1,3x10 ⁻³	23,89	229,8	0,171	0,145	0,273	0,348
	12:55	183,451	26,1	26,0	19,7	19,7								
OA ₃	13:25	183,456	26,1	26,0	19,7	19,7	54,50	1,3x10 ⁻³	22,06	229,8	0,119	0,145	0,416	0,348
	ΔT= 0,5	ΔE=0,0098	Δt=6,23											
OA ₄	13:50	183,488	26,6	26,5	19,6	19,7	54,75	1,3x10 ⁻³	23,66	229,8	0,130	0,145	0,421	0,348
	14:20	183,566	26,6	26,5	19,7	19,8								
OA ₁	14:50	183,625	27,2	27,0	19,7	19,7	54,75	1,3x10 ⁻³	23,66	229,8	0,130	0,145	0,421	0,348
	15:20	183,664	27,3	27,2	19,8	19,8								
OA ₂	15:50	183,698	27,3	27,2	19,8	19,8	54,75	1,3x10 ⁻³	23,66	229,8	0,130	0,145	0,421	0,348
	ΔT= 0,5	ΔE=0,0525	Δt=7,19											
OA ₃	9:10	183,850	30,0	29,8	19,8	19,7	54,50	1,3x10 ⁻³	22,06	229,8	0,119	0,145	0,416	0,348
	9:40	183,918	30,0	29,9	19,8	19,8								
OA ₄	10:10	183,960	29,9	29,9	19,9	19,8	54,50	1,3x10 ⁻³	22,06	229,8	0,119	0,145	0,416	0,348
	10:40	184,003	30,0	29,9	19,9	19,8								
OA ₁	11:10	184,041	30,0	29,9	19,9	19,8	54,50	1,3x10 ⁻³	22,06	229,8	0,119	0,145	0,416	0,348
	ΔT= 0,5	ΔE=0,0480	Δt=10,10											
OA ₂	11:30	184,100	29,9	29,9	19,9	19,8	54,75	1,3x10 ⁻³	23,66	229,8	0,130	0,145	0,421	0,348
	12:00	184,171	30,0	29,9	19,9	19,8								
OA ₃	12:30	184,221	30,0	29,9	19,9	19,8	54,75	1,3x10 ⁻³	23,66	229,8	0,130	0,145	0,421	0,348
	13:00	184,267	30,0	29,9	20,0	19,9								
OA ₄	13:30	184,306	30,0	29,9	20,0	19,9	54,75	1,3x10 ⁻³	23,66	229,8	0,130	0,145	0,421	0,348
	ΔT= 0,5	ΔE=0,0515	Δt=9,99											

Proba	Timp Z [h, min]	E	tw ₁ [° C]	tw ₂ [° C]	tk ₁ [° C]	tk ₂ [° C]	h _{med} [mm]	W	q	k	λ [Kcal/ mh ⁰ C]	λ _{med} [Kcal/ mh ⁰ C]	R [m ² h ⁰ C/ Kcal]	R _{med} [m ² h ⁰ C/ Kcal]
OB ₁	11:25	184,449	30,0	29,9	20,0	19,9	51,00	1,3x10 ⁻³	30,56	229,8	0,153		0,303	
	11:55	184,531	30,0	29,9	20,0	19,9								
	12:25	184,596	30,0	29,9	20,0	19,9								
	12:55	184,657	30,0	29,9	20,0	19,9								
	13:25	184,715	30,0	29,9	20,0	19,9								
ΔT= 0,5	ΔE=0,0665	Δt=10,17												
OB ₂	13:50	185,232	30,0	29,9	20,0	19,9	50,25	1,3x10 ⁻³	24,58	229,8	0,124		0,368	
	14:20	185,283	30,05	29,9	20,5	19,9								
	14:50	185,340	30,05	29,9	20,5	19,9								
	15:20	185,392	30,05	29,9	20,5	19,9								
	15:50	185,446	30,05	29,9	20,5	19,9								
ΔT= 0,5	ΔE=0,0535	Δt=9,99												
OB ₃	9:10	185,567	31,0	29,9	19,9	19,8	51,50	1,3x10 ⁻³	25,64	229,8	0,130	0,141	0,360	0,333
	9:40	185,645	30,05	29,9	20,0	19,9								
	10:10	185,721	30,1	30,0	20,0	19,9								
	10:40	185,784	30,1	29,9	20,0	19,9								
	11:10	185,849	30,1	29,9	20,0	19,9								
ΔT= 0,5	ΔE=0,0558	Δt=10,15												
OB ₄	11:30	185,972	30,0	29,9	20,0	19,9	52,37	1,3x10 ⁻³	29,41	229,8	0,158		0,301	
	12:00	186,045	31,0	30,0	20,3	20,1								
	12:30	186,104	28,6	28,7	20,1	19,9								
	13:00	186,165	29,9	29,8	20,2	19,9								
	13:30	186,228	30,0	29,9	20,0	19,9								
ΔT= 0,5	ΔE=0,0640	Δt=9,74												

Proba	Timp Z [h, min]	E	tw ₁ [° C]	tw ₂ [° C]	tk ₁ [° C]	tk ₂ [° C]	h _{med} [mm]	W	q	k	λ [Kcal/ mh ⁰ C]	λ _{med} [Kcal/ mh ⁰ C]	R [m ² h ⁰ C/ Kcal]	R _{med} [m ² h ⁰ C/ Kcal]
OC ₁	11:25	186,367	30,0	29,9	19,8	19,8	54,00	1,3x10 ⁻³	25,27	229,8	0,135	0,130	0,363	0,376
	11:55	186,415	30,0	29,9	19,8	19,8								
	12:25	186,460	30,0	29,9	19,8	19,8								
	12:55	186,505	30,0	29,9	19,8	19,8								
	13:25	186,587	30,0	29,9	19,8	19,8								
ΔT= 0,5	ΔE=0,055	Δt=10,14												
OC ₂	13:50	186,600	30,0	29,9	19,8	19,8	52,00	1,3x10 ⁻³	29,41	229,8	0,151	0,130	0,313	0,376
	14:20	186,674	30,0	29,9	19,8	19,8								
	14:50	186,738	30,0	29,9	19,8	19,8								
	15:20	186,806	30,0	29,9	19,8	19,8								
	15:50	186,856	30,0	29,9	19,8	19,8								
ΔT= 0,5	ΔE=0,064	Δt=10,14												
OC ₃	9:10	186,966	30,1	29,9	19,8	19,8	53,00	1,3x10 ⁻³	22,06	229,8	0,115	0,130	0,418	0,376
	9:40	187,022	30,0	29,9	19,8	19,8								
	10:10	187,069	30,0	29,9	19,8	19,8								
	10:40	187,114	30,0	29,9	19,8	19,8								
	11:10	187,159	30,0	29,9	19,8	19,8								
ΔT= 0,5	ΔE=0,048	Δt=10,12												
OC ₄	11:30	187,385	30,0	29,9	19,6	19,7	54,00	1,3x10 ⁻³	22,52	229,8	0,119	0,130	0,412	0,376
	12:00	187,441	30,0	29,9	19,7	19,8								
	12:30	187,492	30,0	29,9	19,8	19,7								
	13:00	187,538	30,0	29,9	19,8	19,7								
	13:30	187,581	30,0	29,9	19,8	19,8								
ΔT= 0,5	ΔE=0,049	Δt=10,17												

Proba	Timp Z [h, min]	E	tw ₁ [°C]	tw ₂ [°C]	tk ₁ [°C]	tk ₂ [°C]	h _{med} [mm]	W	q	k	λ [Kcal/ mh°C]	λ _{med} [Kcal/ mh°C]	R [m ² h°C/ Kcal]	R _{med} [m ² h°C/ Kcal]
OD ₁	11:25	187,868	30,0	29,9	19,6	19,7	58,00	1,3x10 ⁻³	37,22	229,8	0,212	0,198	0,248	0,261
	11:55	187,948	30,0	29,9	19,7	19,8								
OD ₁	12:25	188,032	30,0	29,9	19,8	19,7	58,00	1,3x10 ⁻³	37,22	229,8	0,212	0,198	0,248	0,261
	12:55	188,116	30,0	29,9	19,8	19,7								
OD ₁	13:25	188,195	30,0	29,9	19,8	19,8	58,00	1,3x10 ⁻³	37,22	229,8	0,212	0,198	0,248	0,261
	ΔT= 0,5	ΔE=0,081	Δt=10,21											
OD ₂	13:50	188,354	30,0	29,9	19,7	19,8	56,00	1,3x10 ⁻³	30,79	229,8	0,170	0,198	0,299	0,261
	14:20	188,439	30,0	29,9	19,8	19,8								
OD ₂	14:50	188,518	30,0	29,9	19,8	19,8	56,00	1,3x10 ⁻³	30,79	229,8	0,170	0,198	0,299	0,261
	15:20	188,564	30,0	29,9	19,8	19,8								
OD ₂	15:50	188,624	30,0	29,9	19,8	19,8	56,00	1,3x10 ⁻³	30,79	229,8	0,170	0,198	0,299	0,261
	ΔT= 0,5	ΔE=0,079	Δt=10,15											
OD ₃	9:10	188,948	30,0	29,9	19,8	19,8	56,00	1,3x10 ⁻³	36,30	229,8	0,201	0,198	0,253	0,261
	9:40	189,037	30,0	29,9	19,8	19,8								
OD ₃	10:10	189,109	30,0	29,9	19,8	19,8	56,00	1,3x10 ⁻³	36,30	229,8	0,201	0,198	0,253	0,261
	10:40	189,174	30,0	29,9	19,9	19,8								
OD ₃	11:10	189,266	30,0	29,9	19,9	19,8	56,00	1,3x10 ⁻³	36,30	229,8	0,201	0,198	0,253	0,261
	ΔT= 0,5	ΔE=0,079	Δt=10,12											
OD ₄	11:30	189,834	28,6	28,5	19,4	19,6	57,00	1,3x10 ⁻³	34,01	229,8	0,211	0,198	0,245	0,261
	12:00	189,908	28,7	28,6	19,5	19,6								
OD ₄	12:30	189,992	29,0	28,8	19,6	19,6	57,00	1,3x10 ⁻³	34,01	229,8	0,211	0,198	0,245	0,261
	13:00	190,060	28,8	28,7	19,6	19,6								
OD ₄	13:30	190,132	29,0	28,9	19,6	19,6	57,00	1,3x10 ⁻³	34,01	229,8	0,211	0,198	0,245	0,261
	ΔT= 0,5	ΔE=0,074	Δt=9,19											

Proba	Timp Z [h, min]	E	tw ₁ [° C]	tw ₂ [° C]	tk ₁ [° C]	tk ₂ [° C]	h _{med} [mm]	W	q	k	λ [Kcal/ mh ⁰ C]	λ _{med} [Kcal/ mh ⁰ C]	R [m ² h ⁰ C/ Kcal]	R _{med} [m ² h ⁰ C/ Kcal]	
0,75E ₁	11:25	194,046	30,0	30,0	19,6	19,7	55,00	1,3x10 ⁻³	22,52	229,8	0,118		0,403		
	11:55	194,099	30,0	30,0	19,7	19,7									
	12:25	194,147	30,0	30,0	19,7	19,7									
	12:55	194,195	30,0	30,0	19,7	19,7									
	13:25	194,242	30,0	30,0	19,7	19,7									
	ΔT= 0,5	ΔE=0,049	Δt=10,47												
0,75E ₂	13:50	190,756	30,0	29,9	19,5	19,6	54,50	1,3x10 ⁻³	23,76	229,8	0,131		0,395		
	14:20	190,828	30,0	29,9	19,6	19,6									
	14:50	190,888	30,0	29,9	19,6	19,6									
	15:20	190,933	29,9	29,9	19,6	19,6									
	15:50	190,983	29,9	29,9	19,6	19,6									
	ΔT= 0,5	ΔE=0,0517	Δt=10,34												
0,75E ₃	9:10	196,579	30,1	30,0	19,9	19,8	56,50	1,3x10 ⁻³	22,26	229,8	0,124	0,127	0,414	0,397	
	9:40	196,640	30,1	30,0	19,9	19,8									
	10:10	196,681	30,1	30,0	19,9	19,8									
	10:40	196,729	30,1	30,0	19,9	19,8									
	11:10	196,773	30,1	30,0	19,9	19,8									
	ΔT= 0,5	ΔE=0,0485	Δt=10,14												
0,75E ₄	11:30	199,470	30,1	30,0	19,8	19,8	56,75	1,3x10 ⁻³	30,10	229,8	0,135		0,379		
	12:00	199,558	30,1	30,0	19,8	19,8									
	12:30	199,620	30,1	30,0	19,9	19,9									
	13:00	199,678	30,1	30,0	19,9	19,9									
	13:30	199,732	30,1	30,0	20,0	19,9									
	ΔT= 0,5	ΔE=0,0655	Δt=10,17												

Proba	Timp Z [h, min]	E	tw ₁ [° C]	tw ₂ [° C]	tk ₁ [° C]	tk ₂ [° C]	h _{med} [mm]	W	q	k	λ [Kcal/ mh ⁰ C]	λ _{med} [Kcal/ mh ⁰ C]	R [m ² h ⁰ C/ Kcal]	R _{med} [m ² h ⁰ C/ Kcal]
0,75F ₁	11:25	191,349	30,0	29,9	19,5	19,6	54,50	1,3x10 ⁻³	31,25	229,8	0,165		0,300	
	11:55	191,426	30,0	29,9	19,6	19,6								
	12:25	191,502	30,0	29,9	19,6	19,6								
	12:55	191,579	30,1	29,9	19,6	19,6								
	13:25	191,621	29,9	29,9	19,7	19,6								
ΔT= 0,5	ΔE=0,068	Δt=10,35												
0,75F ₂	13:50	194,440	30,0	30,0	19,6	19,6	54,00	1,3x10 ⁻³	38,14	229,8	0,196		0,250	
	14:20	194,520	30,1	30,0	19,7	19,7								
	14:50	194,600	30,1	30,0	19,7	19,7								
	15:20	194,691	30,1	30,0	19,8	19,7								
	15:50	194,772	30,1	30,0	19,8	19,7								
ΔT= 0,5	ΔE=0,083	Δt=10,55												
0,75F ₃	9:10	197,077	30,1	30,0	20,1	19,9	53,00	1,3x10 ⁻³	41,8	229,8	0,220	0,195	0,219	0,255
	9:40	197,166	30,1	30,0	20,1	19,9								
	10:10	197,258	30,1	30,0	20,1	19,9								
	10:40	197,345	30,1	30,0	20,1	19,9								
	11:10	197,441	30,1	30,0	20,1	19,9								
ΔT= 0,5	ΔE=0,091	Δt=10,08												
0,75F ₄	11:30	199,914	30,1	30,0	20,0	19,9	55,00	1,3x10 ⁻³	40,07	229,8	0,199		0,251	
	12:00	199,995	30,2	30,0	20,1	19,9								
	12:30	200,090	30,2	30,0	20,1	19,9								
	13:00	200,175	30,1	30,0	20,1	19,9								
	13:30	200,268	30,1	30,0	20,1	19,9								
ΔT= 0,5	ΔE=0,0872	Δt=10,07												

Proba	Timp Z [h, min]	E	tw ₁ [° C]	tw ₂ [° C]	tk ₁ [° C]	tk ₂ [° C]	h _{med} [mm]	W	q	k	λ [Kcal/ mh ⁰ C]	λ _{med} [Kcal/ mh ⁰ C]	R [m ² h ⁰ C/ Kcal]	R _{med} [m ² h ⁰ C/ Kcal]	
0,75G ₁	11:25	191,972	30,0	29,9	19,4	19,5	55,00	1,3x10 ⁻³	31,11	229,8	0,163		0,306		
	11:55	192,054	30,0	29,9	19,4	19,5									
	12:25	192,136	30,0	29,9	19,4	19,5									
	12:55	192,183	30,0	29,9	19,4	19,5									
	13:25	192,243	30,0	29,9	19,4	19,5									
	ΔT= 0,5	ΔE=0,067	Δt=10,49												
0,75G ₂	13:50	194,982	30,0	30,0	19,6	19,7	56,00	1,3x10 ⁻³	33,09	229,8	0,188		0,270		
	14:20	195,060	30,1	30,0	19,7	19,7									
	14:50	195,140	30,1	30,0	19,8	19,8									
	15:20	195,204	30,1	30,0	19,8	19,8									
	15:50	195,271	30,1	30,0	19,9	19,8									
	ΔT= 0,5	ΔE=0,072	Δt=10,27												
0,75G ₃	9:10	197,640	30,1	29,9	19,9	19,9	56,50	1,3x10 ⁻³	29,41	229,8	0,164	0,170	0,313	0,296	
	9:40	197,723	30,1	30,0	19,9	19,9									
	10:10	197,789	30,1	30,0	20,0	19,9									
	10:40	197,838	30,1	30,0	20,0	19,9									
	11:10	197,896	30,1	30,0	20,0	19,9									
	ΔT= 0,5	ΔE=0,064	Δt=10,11												
0,75G ₄	11:30	200,344	30,1	30,0	20,0	19,9	53,50	1,3x10 ⁻³	29,64	229,8	0,166		0,298		
	12:00	200,428	30,1	30,0	20,0	19,9									
	12:30	200,488	30,1	30,0	20,1	19,9									
	13:00	200,542	30,1	30,0	20,1	19,9									
	13:30	200,602	30,1	30,0	20,1	19,9									
	ΔT= 0,5	ΔE=0,0645	Δt=10,10												

Proba	Timp Z [h, min]	E	tw ₁ [° C]	tw ₂ [° C]	tk ₁ [° C]	tk ₂ [° C]	h _{med} [mm]	W	q	k	λ [Kcal/ mh ⁰ C]	λ _{med} [Kcal/ mh ⁰ C]	R [m ² h ⁰ C/ Kcal]	R _{med} [m ² h ⁰ C/ Kcal]		
0,75H ₁	11:25	192,410	30,0	29,9	19,4	19,5	56,75	1,3x10 ⁻³	36,53	229,8	0,199	0,193	0,259	0,274		
	11:55	192,490	30,0	29,9	19,4	19,5										
	12:25	192,571	30,0	29,9	19,5	19,5										
	12:55	192,648	30,0	29,9	19,5	19,5										
	13:25	192,728	30,0	29,9	19,5	19,6										
	ΔT= 0,5	ΔE=0,0795	Δt=10,45													
0,75H ₂	13:50	195,350	30,1	30,0	19,8	19,8	58,00	1,3x10 ⁻³	28,95	229,8	0,171	0,193	0,308		0,274	
	14:20	195,425	30,1	30,0	19,9	19,8										
	14:50	195,492	30,1	30,0	19,9	19,8										
	15:20	195,541	30,1	30,0	19,9	19,8										
	15:50	195,603	30,1	30,0	19,9	19,8										
	ΔT= 0,5	ΔE=0,063	Δt=10,20													
0,75H ₃	9:10	198,136	30,0	29,9	19,8	19,8	58,50	1,3x10 ⁻³	34,24	229,8	0,197	0,193	0,269	0,274		
	9:40	198,220	30,1	30,0	19,9	19,8										
	10:10	198,298	30,1	30,0	19,9	19,8										
	10:40	198,365	30,1	30,0	19,9	19,8										
	11:10	198,434	30,1	30,0	19,9	19,8										
	ΔT= 0,5	ΔE=0,0745	Δt=10,18													
0,75H ₄	11:30	200,727	30,0	30,0	19,9	19,8	59,00	1,3x10 ⁻³	35,25	229,8	0,206	0,193	0,260		0,274	
	12:00	200,810	30,1	29,9	19,8	19,8										
	12:30	200,894	30,1	30,0	19,8	19,8										
	13:00	200,959	30,1	29,9	19,9	19,8										
	13:30	201,034	30,0	29,9	19,9	19,8										
	ΔT= 0,5	ΔE=0,0767	Δt=10,11													

Proba	Timp Z [h, min]	E	tw ₁ [° C]	tw ₂ [° C]	tk ₁ [° C]	tk ₂ [° C]	h _{med} [mm]	W	q	k	λ [Kcal/ mh ⁰ C]	λ _{med} [Kcal/ mh ⁰ C]	R [m ² h ⁰ C/ Kcal]	R _{med} [m ² h ⁰ C/ Kcal]	
1,5K ₁	11:25	192,810	30,0	29,9	19,4	19,5	58,50	1,3x10 ⁻³	41,13	229,8	0,232	0,210	0,229	0,247	
	11:55	192,896	30,0	29,9	19,4	19,5									
	12:25	192,987	30,0	29,9	19,5	19,5									
	12:55	193,078	30,0	29,9	19,5	19,5									
	13:25	193,168	30,0	29,9	19,5	19,6									
	ΔT= 0,5	ΔE=0,0895	Δt=10,42												
1,5K ₂	13:50	195,792	30,0	30,0	19,8	19,8	55,50	1,3x10 ⁻³	36,07	229,8	0,198	0,210	0,255	0,247	
	14:20	195,875	30,0	30,0	19,9	19,8									
	14:50	195,966	30,1	30,0	19,9	19,8									
	15:20	196,039	30,1	30,0	19,9	19,8									
	15:50	196,106	30,1	30,0	19,9	19,8									
	ΔT= 0,5	ΔE=0,0785	Δt=10,16												
1,5K ₃	9:10	198,700	30,1	30,0	20,0	19,9	56,50	1,3x10 ⁻³	36,76	229,8	0,207	0,210	0,248	0,247	
	9:40	198,784	30,1	30,0	20,1	19,9									
	10:10	198,868	30,1	30,0	20,1	19,9									
	10:40	198,946	30,1	30,0	20,1	19,9									
	11:10	199,023	30,1	30,0	20,1	19,9									
	ΔT= 0,5	ΔE=0,080	Δt=10,05												
1,5K ₄	11:30	201,790	30,1	30,0	19,8	19,8	58,00	1,3x10 ⁻³	35,48	229,8	0,204	0,210	0,258	0,247	
	12:00	201,880	30,1	30,0	19,9	19,9									
	12:30	201,960	30,1	30,0	20,0	19,9									
	13:00	202,031	30,1	30,0	20,1	19,9									
	13:30	202,099	30,1	30,0	20,1	20,0									
	ΔT= 0,5	ΔE=0,0772	Δt=10,10												

Proba	Timp Z [h, min]	E	tw ₁ [° C]	tw ₂ [° C]	tk ₁ [° C]	tk ₂ [° C]	h _{med} [mm]	W	q	k	λ [Kcal/ mh ⁰ C]	λ _{med} [Kcal/ mh ⁰ C]	R [m ² h ⁰ C/ Kcal]	R _{med} [m ² h ⁰ C/ Kcal]	
1,5L ₁	11:25	193,476	30,0	29,9	19,5	19,6	56,50	1,3x10 ⁻³	23,99	229,8	0,131	0,132	0,392	0,383	
	11:55	193,535	30,0	29,9	19,5	19,6									
	12:25	193,585	30,0	29,9	19,5	19,6									
	12:55	193,638	30,0	29,9	19,6	19,6									
	13:25	193,685	30,0	29,9	19,6	19,6									
	ΔT= 0,5	ΔE=0,0522	Δt=10,38												
1,5L ₂	13:50	196,190	30,0	30,0	19,8	19,7	53,50	1,3x10 ⁻³	24,13	229,8	0,124	0,132	0,383	0,383	
	14:20	196,262	30,1	30,0	19,9	19,8									
	14:50	196,314	30,1	30,0	19,9	19,8									
	15:20	196,358	30,1	30,0	19,9	19,8									
	15:50	196,400	30,0	30,0	19,9	19,8									
	ΔT= 0,5	ΔE=0,0525	Δt=10,19												
1,5L ₃	9:10	199,050	30,1	30,0	20,1	19,9	55,50	1,3x10 ⁻³	25,96	229,8	0,143	0,132	0,352	0,383	
	9:40	199,140	30,1	30,0	20,1	19,9									
	10:10	199,193	30,2	30,1	20,1	20,0									
	10:40	199,237	30,3	30,2	20,2	20,0									
	11:10	199,276	30,3	30,2	20,2	20,0									
	ΔT= 0,5	ΔE=0,0565	Δt=10,04												
1,5L ₄	11:30	201,119	30,1	30,0	19,8	19,8	57,00	1,3x10 ⁻³	23,07	229,8	0,130	0,132	0,398	0,383	
	12:00	201,189	30,1	30,0	19,9	19,9									
	12:30	201,240	30,1	30,0	20,0	19,9									
	13:00	201,282	30,1	30,0	20,0	19,9									
	13:30	201,320	30,1	30,0	20,0	19,9									
	ΔT= 0,5	ΔE=0,0502	Δt=10,13												

