

Liliana Maria NICULA



Ofelia-Cornelia CORBU

Ghid pentru proiectarea și evaluarea durabilității betoanelor rutiere cu zgură de furnal (BcR-S)



Combinatii de clase de expunere pentru îmbrăcăminți rutiere

XF4+XC4+XD3+XM2

UTPRESS

Cluj-Napoca, 2023

ISBN 978-606-737-610-4

MINISTERUL EDUCAȚIEI



UNIVERSITATEA TEHNICĂ
DIN CLUJ-NAPOCA

Liliana Maria NICULA

Ofelia-Cornelia CORBU

**GHID PENTRU PROIECTAREA ȘI EVALUAREA
DURABILITĂȚII BETOANELOR RUTIERE CU
ZGURĂ DE FURNAL (BcR-S)**



UTPRESS
Cluj - Napoca, 2023
ISBN 978-606-737-610-4

str. Memorandumului nr.28, 400114 Cluj-Napoca, România
tel. +40-264-401200, fax +40-264-592055, secretariat tel. +40+264-202209, fax +40-264-202280
<http://www.utcluj.ro/>



Editura UTPRESS
Str. Observatorului nr. 34
400775 Cluj-Napoca
Tel.: 0264 401999
e-mail: utpress@biblio.utcluj.ro
<http://biblioteca.utcluj.ro/editura>

Director : Ing. Dan COLȚEA

Recenzia : Conf.dr.ing. Gavril Hoda
 Conf.dr. ing. Attila Pușcaș
 Ș.l.dr.ing. Mihai Liviu Dragomir

Pregătire format electronic: Gabriela Groza

Copyright © 2023 Editura UTPRESS

Reproducerea integrală sau parțială a textului sau ilustrațiilor din această carte este posibilă numai cu acordul prealabil scris al editurii UTPRESS.

ISBN 978-606-737-610-4

CUVÂNT ÎNAINTE

Cartea se adresează specialiștilor din domeniul infrastructurilor de transport: masteranzi, doctoranzi, cercetători și proiectanți de specialitate pentru înțelegerea unei noi abordări a proiectării compozitului de tip beton de ciment în care materialele convenționale sunt parțial înlocuite cu subproduse ale industriei siderurgice, particularizând proiectarea pentru betoane cu zgură utilizate la realizarea îmbrăcăminților rutiere. Transformarea deșeurilor industriale în materii prime adecvate pentru utilizarea în compoziția betonului, prezintă o preocupare ecologică însemnată ale zilelor noastre și pentru generațiile viitoare.

În proiectarea oricărui beton de ciment trebuie mai întâi stabilit domeniul de aplicare urmat de alegerea materialelor a căror caracteristici și dozaje să conducă la obținerea clasei și a performanțelor dorite ale betonului.

Conținutul manuscrisului se referă la proiectarea betoanelor rutiere în compoziția cărora s-a încorporat zgură de furnal sub cele două forme de procesare, pulbere de zgură (GGBS) ca liant și zgură răcită în aer și concasată (ACBFS) ca agregat fin, conceptul reprezentând o abordare originală la nivel național.

Se identifică în carte o abordare graduală a subiectului pornind de la cercetări preliminare efectuate pe mortare de ciment cu zgură, necesare pentru a evalua Indicele de activitatea a zgurii de furnal granulate și măcinate și pentru a selecta procentele optime de substituție a materialelor naturale cu zgură de furnal.

Pe lângă proiectarea și analiza caracteristicilor intrinseci de durabilitate întâlnite în mod constant (specifice cerințelor standard), se vor întâlni determinări de laborator din alte zone de cercetare, detaliate în această carte la nivelul unui ghid, pentru o corelare și înțelegere a nano și macrocercetării.

Sunt realizate o varietate de metode experimentale moderne și performante specifice cerințelor de apreciere a durabilității betoanelor rutiere, privind rezistențele mecanice la compresiune și întindere prin încovoiere, rezistența la îngheț-dezghet, rezistența betoanelor la coroziune și la uzură mecanică.

Le suntem recunoscători tuturor celor care au acordat sprijinul științific în elaborarea și analizarea cercetărilor experimentale realizate: domnului Prof. Dr. Ing. *Iliescu Mihai*, domnului Prof. Dr. Ing. *Ardelean Ioan*-UTCN, domnului Conf. Dr. Ing. *Har Nicolae*-UBB Cluj-Napoca, doamnei Cercetător Științific gradul I, Dr. Ing. *Dumitraș Delia Georgeta*-Șef Departament Instalații de interes Național și Președinte al Consiliului Științific al Institutului Geologic al României, doamnei Cercetător Științific gradul I, Dr. *Simedru Dorina*-Șef Laborator ICIA din Cluj-Napoca, doamnei Cercetător Științific Dr. Ing. *Hegy*

Andreea-INCERC Cluj, domnului Conf. Dr. Ing. Sandu Andrei Victor UT Iași și domnului Prof. Dr. Ing. Voinițchi Constantin-Șef de laborator UT București.

Aducem mulțumirile noastre domnilor recenzori Conf. Dr. Ing. Hoda Gavril-UTCN, Conf. Dr. Ing. Pușkaș Attila -UTCN și Șef lucrări Dr. Ing. Dragomir Mihai-UTCN pentru sugestiile și aprecierile deosebit de utile transmise cu ocazia recenzării cărții.

AUTORII

Cuprins

Descrierea capitolelor	17
Actualitatea temei de cercetare	18
Scopul cercetării.....	20
1 Strategii durabile pentru selectarea și utilizarea materialelor în compoziția (BcR)	23
1.1 Lianți.....	24
1.1.1 Cimentul	24
1.1.2 Materiale cu caracteristici cementoase	28
1.1.3 Cimenturi cu zgură de furnal.....	30
1.2 Procesarea și clasificarea zgurilor de furnal.....	31
1.3 Istoricul zgurii de furnal granulate și măcinate (GGBS)	32
1.3.1 Caracteristicile zgurii de furnal granulate (GGBS).....	38
1.4 Agregatele.....	41
1.4.1 Impactul consumului de agregate asupra mediului	41
1.4.2 Tipuri de agregate	42
1.4.3 Proprietățile fizice ale agregatelor	43
1.4.4 Granulozitatea agregatelor	43
1.4.5 Forma și textura agregatelor	44
1.4.6 Absorbția agregatelor	44
1.4.7 Expansiunea termică a agregatelor	45
1.4.8 Reactivitatea alcalii-agregate (ASR)	45
1.4.9 Rezistența la îngheț-dezghet a agregatelor	46
1.5 Istoricul agregatelor concasate din zgură de furnal (ACBFS) ..	47

1.5.1	Caracteristicile agregatelor concasate din zgură de furnal	50
1.6	Apa utilizată la prepararea betoanelor	53
1.7	Aditivi pentru prepararea betoanelor	53
1.7.1	Agenții de antrenare a aerului	53
1.7.2	Adaosuri chimice reducătoare de apă	54
1.7.3	Adaosuri chimice modificatoare de priză.....	55
1.7.4	Alte adaosuri chimice.....	56
2	Caracteristicile fizico-mecanice ale betoanelor (BcR)	57
2.1	Permeabilitatea	57
2.2	Porozitatea	58
2.3	Rezistența la îngheț-dezgeț.....	60
2.4	Rezistența la compresiune și încovoiere	61
2.5	Rezistența la uzură.....	62
2.6	Rezistența la atacuri chimice	62
2.7	Reactivitatea alcalii- silice	63
3	Ipoteze de lucru/obiective în proiectarea amestecurilor de beton rutier	64
3.1	Aspecte generale de proiectare a betonului rutier	64
3.2	Proiectarea betoanelor rutiere (BcR-S)	65
4	Metodologie de lucru pentru determinările experimentale realizate în laborator.....	71
4.1	Evaluarea Indicelui de activitate la 28 de zile și stabilirea procentelor optime de substituție a materialelor naturale cu zgură de furnal	71
4.1.1	Determinarea densității reale și a suprafeței specifice pe ciment și zgură de furnal.....	71

4.1.2	Determinarea apei pentru pasta de consistență normală și a timpului de priză.....	73
4.1.3	Densitatea, absorbția apei, compactitatea și porozitatea determinate pe mortar întărit.....	73
4.1.4	Determinarea Indicelui de activitate la 28 de zile a zgurii de furnal și a rezistențelor mecanice.....	75
4.1.5	Determinarea rezistenței la îngheț-dezghet prin măsurarea variației rezistenței la compresiune	76
4.2	Proiectarea și încadrarea în clase a betoanelor rutiere (BcR-S)	
	77	
4.2.1	Densitatea aparentă pe betonul proaspăt.....	78
4.2.2	Consistența prin metoda tasării.....	78
4.2.3	Volumul de aer oclus	78
4.2.4	Rezistența la întindere prin încovoiere determinată pe prisme	79
4.2.5	Rezistența la compresiune	80
4.3	Caracteristicile materialelor componente din betonul rutier (BcR-S).....	81
4.3.1	Caracterizarea (GGBS) prin gradul de saturare în calce, compoziția mineralogică și conținutul de elemente periculoase	81
4.3.2	Caracterizarea agregatelor prin proprietățile geometrice, fizice și chimice, modul de finețe, masă volumică și coeficient de absorbție al apei.....	82
4.3.3	Reacția alcalii-silice (ASR) la agregate.....	84
4.4	Încercări nedistructive de evaluare a durabilității betonului (BcR-S) și evaluarea impermeabilității acestuia	85
4.4.1	Determinarea absorbției de apă și a densității aparente în stare de umiditate naturală	85
4.4.2	Determinarea adâncimii de penetrarea apei sub presiune	85

4.4.3	Determinarea modului de elasticitate dinamic.....	86
4.4.4	Determinarea rezistenței la îngheț-dezgheț prin măsurarea variației modului de elasticitate relativ.....	87
4.5	Rezistența la îngheț-dezgheț a (BcR)- cadrul național și european	88
4.5.1	Determinarea rezistenței la îngheț-dezgheț prin măsurarea variației rezistenței la compresiune	88
4.5.2	Determinarea rezistenței la îngheț-dezgheț prin măsurarea masei exfoliate de la suprafața betonului	89
4.5.3	Determinarea rezistenței la îngheț-dezgheț prin reducerea procentuală a modului de elasticitate dinamic.....	92
4.6	Investigații prin relaxometrie (RMN) pe probe supuse la îngheț-dezgheț.....	92
4.6.1	Determinarea distribuției relative a mărimii porilor prin tehnica de relaxometrie (RMN)	92
4.6.2	Microscopie electronică cu scanare (SEM)	95
4.6.3	Determinarea densității după imersie și fierbere, absorbția apei și proporția de pori permeabili.....	96
4.7	Rezistența la uzură a betoanelor (BcR-S).....	97
4.7.1	Determinarea rezistenței la uzură	97
4.7.2	Determinarea rezistenței la compresiune.....	98
4.8	Rezistența betonului (BcR-S) la coroziune indusă de cloruri și carbonatare.....	99
4.8.1	Testul de penetrare rapidă a clorului (RCPT).....	99
4.8.2	Determinarea coeficienților de migrație a ionilor de clor (D)	102
4.8.3	Determinarea adâncimii de carbonatare.....	102
4.8.4	Determinarea densității, absorbției de apă și a conținutului de pori permeabili al betonul întărit	103

4.8.5 Determinarea rezistenței la compresiune la vârsta de 150 de zile 104

5 Evaluarea (IA₂₈) și selectarea dozajelor de substituție cu zgură de furnal 105

5.1 Introducere 105

5.2 Ipoteze de lucru/obiective 106

5.3 Materiale și metode 107

5.3.1 Materiale 107

5.3.2 Metode 109

5.4 Rezultate 110

5.4.1 Caracteristici fizice determinate pe pulberea de zgură (GGBS) și pe pasta de ciment cu zgură 110

5.4.2 Caracteristicile fizice și mecanice determinate pe mortare întărite 112

5.5 Discuții 116

5.6 Concluzii parțiale 118

6 Proiectarea și încadrarea în clase a betoanelor (BcR-S) 120

6.1 Introducere 120

6.2 Ipoteze de lucru/obiective 121

6.3 Materiale și metode 123

6.3.1 Materiale 123

6.3.2 Metode 124

6.4 Rezultate 124

6.4.1 Proiectarea compoziției betoanelor 124

6.4.2 Rezultate pe betonul proaspăt și întărit 127

6.5 Discuții 129

6.5.1	Determinări pe betonul proaspăt și întărit: densitatea, consistența, aerul oclus, rezistențele mecanice la vârsta de 28 zile, seria întâi.....	129
6.5.2	Determinări pe betonul proaspăt și întărit: densitatea, consistența, aerul oclus, rezistențele mecanice la vârsta de 28 zile, seria a doua.....	131
6.6	Concluzii parțiale.....	133
7	Caracteristicile materialelor componente din betonul (BcR-S).....	135
7.1	Introducere.....	135
7.2	Ipoteze de lucru/obiective.....	137
7.3	Materiale și metode.....	137
7.3.1	Materiale.....	137
7.3.2	Metode.....	140
7.4	Rezultate.....	140
7.5	Discuții.....	141
7.5.1	Caracterizarea (GGBS) prin gradul de saturare în calce, compoziția oxidică, compoziția mineralogică și conținutul de elemente periculoase.....	141
7.5.2	Caracterizarea agregatelor prin proprietățile geometrice, fizice și chimice, modul de finețe, masă volumică, coeficientul de absorbție a apei și reacția alcalii-silice la agregate (ASR).....	144
7.5.3	Concluzii parțiale.....	147
8	Încercări nedistructive de evaluare a durabilității betonului (BcR-S) și evaluarea impermeabilității acestuia.....	149
8.1	Introducere.....	149
8.2	Ipoteze de lucru/obiective.....	150
8.3	Materiale și metode.....	151
8.3.1	Materiale.....	151

8.3.2	Metode.....	151
8.4	Rezultate	152
8.4.1	Densitatea, absorbția apei și permeabilitatea betonului	152
8.4.2	Rezultate obținute pe probele testate la 150 și 300 de cicluri repetate de îngheț-dezghet.....	153
8.4.3	Rezultate obținute pe probele martor menținute în apă în perioada desfășurării testului de îngheț-dezghet.....	153
8.5	Discuții	154
8.5.1	Absorbția apei și permeabilitatea betonului.....	154
8.5.2	Analiza rezultatelor obținute pe probele testate la 150 și 300 de cicluri repetate de îngheț-dezghet.....	155
8.5.3	Analiza rezultatelor obținute pe probele martor menținute în apă în perioada desfășurării testului de îngheț-dezghet	157
8.6	Concluzii parțiale	160
9	Rezistența la îngheț-dezghet a (BcR)- cadrul național și european.....	162
9.1	Introducere	162
9.2	Ipoteze de lucru/obiective.....	166
9.3	Materiale și metode	167
9.3.1	Materiale	167
9.3.2	Metode.....	167
9.4	Rezultate	168
9.4.1	Rezultate la îngheț-dezghet prin măsurarea variației rezistenței la compresiune	168
9.4.2	Rezultate la îngheț-dezghet prin măsurarea masei exfoliate de la suprafața epruvetei.....	169
9.4.3	Rezultatele rezistențelor la îngheț-dezghet determinate prin reducerea procentuală a modulului de elasticitate dinamic relativ (RDM)	169

9.5	Discuții.....	170
9.5.1	Analiza rezistențelor la îngheț-dezgheț determinate prin măsurarea variației rezistenței la compresiune, seria întâi	170
9.5.2	Analiza rezistențelor la îngheț-dezgheț determinate prin măsurarea variației rezistenței la compresiune, seria II	171
9.5.3	Analiza rezistențelor la îngheț-dezgheț determinate prin măsurarea masei exfoliate de la suprafața epruvetei	171
9.5.4	Analiza rezistențelor la îngheț-dezgheț determinate prin reducerea procentuală a modului de elasticitate dinamic relativ (RDM)	172
9.6	Concluzii parțiale	174
10	Investigații prin relaxometrie (RMN) pe probe supuse la îngheț-dezgheț.....	176
10.1	Introducere	176
10.2	Ipoteze de lucru/obiective	179
10.3	Materiale și metode.....	180
10.3.1	Materiale	180
10.3.2	Metode	180
10.4	Rezultate.....	181
10.4.1	Rezultatele distribuției relative a mărimii porilor prin tehnica de relaxometrie (RMN)	181
10.4.2	Dimensiunea porilor.....	186
10.4.3	Rezultatele densității și a conținutului de pori permeabili ale betonului întărit.....	188
10.5	Discuții.....	189
10.6	Concluzii	192
11	Rezistența la uzură a betoanelor (BcR-S).....	194
11.1	Introducere	194
11.2	Ipoteze de lucru/obiective	196

11.3	Materiale și metode.....	197
11.3.1	Materiale	197
11.3.2	Metode.....	197
11.4	Rezultate	198
11.5	Discuții.....	199
11.5.1	Determinarea rezistenței la uzură, seria întâi	199
11.5.2	Determinarea rezistenței la uzură, seria a doua.....	200
11.6	Concluzii parțiale.....	201
12	Rezistența betonului (BcR-S) la coroziune indusă de cloruri și carbonatare.....	203
12.1	Introducere.....	203
12.2	Ipoteze de lucru/obiective.....	207
12.3	Materiale și metode.....	208
12.3.1	Materiale	208
12.3.2	Metode.....	209
12.4	Rezultate.....	210
12.4.1	Analiza zgurii granulate (GGBS) și negranulate (ACBFS) prin difracție cu raze X (XRD) și microscopie optică cu lumină polarizată.....	210
12.4.2	Rezultatele testului de penetrare rapidă a clorului (RCPT) 211	
12.5	Discuții.....	212
12.5.1	Testul de penetrare rapidă a clorului (RCPT).....	212
12.5.2	Determinarea coeficienților de migrație a ionilor de clor (D) 213	
12.5.3	Determinarea adâncimii stratului de carbonatare a betonul întărit 214	
12.5.4	Determinarea densității, absorbției de apă și a conținutului de pori permeabili.....	215

12.5.5	Evoluția rezistențelor mecanice, a rezistivității betonului și a adâncimii de penetrare a ionilor de clor în beton	217
12.6	Concluzii parțiale.....	218
13	Contribuții inovative, recomandări practice pentru utilizarea BcR-S și concluzii finale	220
13.1	Contribuții inovative:.....	220
13.2	Recomandări practice pentru utilizarea BcR-S	221
13.3	Concluzii finale	222
14	REFERINȚE	225
15	LISTA FIGURILOR.....	250
16	LISTA TABELELOR	255

ABREVIERI

ACBFS	Agregate din zgură de furnal răcite în aer/ <i>Air-cooled blast furnace slag aggregates.</i>
ASR	Reacția alcalii-silice/ <i>Alkali-Silica Reaction</i>
ASTM	Societatea Americană de Testare și Materiale/ <i>American Testing and Materials Society</i>
BcR-S	Beton rutier cu zgură de furnal
CSCC	Constituent suplimentar cu caracteristici cementoase/ <i>Supplementary constituent with cementitious characteristics</i>
CSH	Silicat de calciu hidratat/ <i>Hydrated calcium silicate</i>
CH	Hidroxid de calciu/ <i>Calcium hydroxide</i>
CPMG	Denumirea metodei de investigare (RMN) după numele autorilor Carr-Purcell-Meiboom-Gill.
Edn	Modul de elasticitate dinamic/ <i>Dynamic modulus of elasticity</i>
GGBS	Zgură de furnal granulată și măcinată/ <i>Ground granulated blast-furnace slag</i>
RCC	Beton de ciment compactat prin cilindrare (RCC)/ <i>Roller-Compacted Concrete (RCC)</i>
RCPT	Testul rapid de penetrare a ionilor de clor/ <i>Rapid chloride penetration test</i>
RCWM	Materiale reciclate, coproduse sau deșeuri/ <i>Recycled materials, co-products or waste</i>
RDM	Modul de elasticitate dinamic relativ/ <i>Relative dynamic modulus of elasticity</i>
RMN	Rezonanță magnetică nucleară/ <i>Nuclear magnetic resonance</i>
S	Zgură de furnal/ <i>Blast-furnace Slag</i>
S 360	Amestec de control proiectat cu dozaj de 360 kg/m ³ ciment Portland și agregate naturale
S 414	Amestec de control proiectat cu 414 kg/m ³ ciment Portland și agregate naturale
S 54/20	Amestec proiectat cu 360 kg/m ³ ciment Portland, adaos la masa liantului de 54 kg/m ³ (GGBS) și substituție agregate naturale sort 0/4 cu 20% agregate din zgură (ACBFS)

S 54/40	Amestec proiectat cu 360 kg/m ³ ciment Portland, adaos la masa liantului de 54 kg/m ³ (GGBS) și substituție agregate naturale sort 0/4 cu 40% agregate din zgură (ACBFS)
S 54/60	Amestec proiectat cu 360 kg/m ³ ciment Portland, adaos la masa liantului de 54 kg/m ³ (GGBS) și substituție agregate naturale sort 0/4 cu 60% agregate din zgură (ACBFS)
SCM	Material cementos suplimentar/ <i>Supplementary Cementitious Material</i>
SEM	Microscopie electronică cu scanare/ <i>Scanning electron microscopy.</i>
UPV	Viteza de propagare a impulsurilor ultrasonice/ <i>Propagation velocity of the ultrasonic pulses.</i>
UPTT	Timpul de propagare a impulsurilor ultrasonice/ <i>Propagation time of ultrasonic impulse.</i>
UTCN	Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca
XRD	Difracție cu raze X/ X-ray diffraction
XRF	Flourescență cu raze X/ X-ray fluorescence

Descrierea capitolelor

Cartea este structurată în 13 capitole și cuprinde informații generale legate de actualitatea temei de cercetare, de scopul acestei cercetări, precum și un program de cercetare experimental privind durabilitatea betoanelor rutiere cu zgură de furnal (BcR-S) bazat pe standarde naționale și europene de profil.

În capitolul 1 și 2 se face o prezentare a caracteristicilor fizice și mecanice ale materialelor și betoanelor rutiere de ciment. În capitolele 3 și 4 este descrisă metodologia generală propusă, și tehnicile experimentale utilizate în programul desfășurat privitor la cerințele care definesc performanțele betonului rutier. Indicele de activitate a pulberii de zgură (GGBS), proporțiile optime de substituție a materialelor naturale cu zgură de furnal, proiectarea betoanelor (BcR-S) și caracteristicile materialelor componente sunt prezentate în capitolele 5÷7. Cercetările efectuate, rezultatele ulterioare și concluziile parțiale sunt analizate în capitolele 8÷12, iar contribuțiile inovative ale cercetării și recomandările practice pentru utilizarea betoanelor (BcR-S) sunt prezentate în capitolul 13.

Cap.5– Evaluarea (IA₂₈) și selectarea dozajelor de substituție cu zgură de furnal;

Cap.6– Proiectarea și încadrarea în clase a betoanelor rutiere (BcR-S);

Cap.7– Caracteristicile materialelor componente din betonul (BcR-S);

Cap.8– Încercări nedistructive de evaluare a durabilității betonului (BcR-S) și evaluarea impermeabilității acestuia;

Cap.9– Rezistența la îngheț-dezghet a (BcR)- cadrul național și european;

Cap.10– Investigații prin relaxometrie (RMN) pe probe supuse la îngheț-dezghet;

Cap.11– Rezistența la uzură a betoanelor (BcR-S);

Cap.12– Rezistența betonului (BcR-S) la coroziune indusă de cloruri și carbonatare;

Cap.13– Contribuții inovative, recomandări practice pentru utilizarea BcR-S și concluzii finale.

Prevederile conținute în carte oferă un concept nou la noi în țară legat de utilizarea zgurii de furnal în compoziția betoanelor rutiere. Pentru prima dată se propune încorporarea zgurii de furnal granulată și măcinată (GGBS) la dimensiunea sub 63 μm ca substituție parțială a

cimentului în compoziția betoanelor rutiere și sub formă de agregate zgură răcite în aer (ACBFS) concasat la dimensiunea de 0/4 mm ca substituție parțială a nisipului natural. Mai mult cercetarea realizată pune în evidență adăugarea zgurii (GGBS) în malaxor odată cu cimentul Portland, la prepararea betonului.

Actualitatea temei de cercetare

Potrivit cu viziunea actuală axată pe principiile dezvoltării sustenabile, descoperirea noilor compozite durabile prin adăugarea produselor secundare, precum zgura de furnal, în compoziția betonului rutier este esențială, deoarece este evidentă necesitatea reducerii utilizării materialelor prime neregenerabile (agregate naturale sau materia primă provenită din cariere pentru producerea cimentului). Materialele care pot substitui cimentul într-un amestec trebuie să aibă anumite caracteristici cementoase, respectiv hidraulice și/sau puzzolanice. Aceste materiale provin din industrie și sunt încadrate la categoria produse secundare.

Zgura de furnal rezultată din industria siderurgică este unul dintre aceste materiale, având potențialul de a fi utilizată în diferite forme și aplicații, cu o cantitate mare disponibilă la noi în țară. Interesul crescut la nivel mondial pentru acest material reprezentat și de reducerea emisiilor de dioxid de carbon pentru betonul rutier prin substituția cimentului Portland, ceea ce reprezintă o strategie conștientă pentru respectarea legislației privind emisiile de CO₂. Mai mult posibilitatea zgurii de furnal de a fi utilizată și ca substituție a agregatelor naturale va conduce la reducerea zonelor de depozitare a zgurii și prin reintroducerea acestui subprodus în circuitul economic va rezulta un proces benefic pentru ecologizarea mediului.

În acest sens, prezenta carte abordează cercetarea în detaliu a caracteristicilor fizico-mecanice ale zgurii rezultată din procesul de obținere a fontei în furnal și pune în evidență punctele tari și slabe ale acesteia atunci când este utilizată în beton pentru aplicațiile de îmbrăcămînți rutiere. Pe lângă interacțiunea zgurii de furnal cu materialele componente din betonul rutier se prezintă în cadrul lucrării tendințele identificate la nivel internațional, legate de utilizarea acestui produs ca materie primă.

Cu toate că în prezent în România ponderea îmbrăcăminților asfaltice primează reprezentând aproximativ 92.1% [1] din total de 49.873 km de drumuri modernizate [2], realizarea îmbrăcăminților din beton reprezintă o soluție alternativă favorabilă pentru anumite tipuri de drumuri: județene și comunale de categoria III÷V, drumuri de exploatare agricole, forestiere și platformele industriale, în special, pentru care predomină traficul greu și foarte greu. Deopotrivă sunt recomandate și pentru drumurile cu pantă longitudinală pronunțată, mai mare de 7%, pentru care utilizarea îmbrăcăminților asfaltice impun măsuri suplimentare de siguranța circulației [3]. Principalul motiv pentru care la noi îmbrăcămințile rutiere din beton de ciment au fost aplicate mai rar comparativ cu cele din beton asfaltic reprezintă: costurile inițiale mari de investiție, timpul îndelungat de punere în circulație și disconfortul creat de rosturi. Cu toate că, în prezent, confortul la rulare a fost îmbunătățit prin realizarea armării locale în zona rosturilor și prin imprimarea pe fața betonului proaspăt a unor striatii transversale care atenuază și reduc nivelul zgomotului generat la rulare, la noi în țară drumurile din beton de ciment sunt mai puțin viabile datorită lipsei unor echipamente performante pentru turnarea dalelor, ceea ce reprezintă un factor de risc pentru calitatea execuției. În S.U.A rețeaua de drumuri cu structură rigidă este estimată la peste (80%) din rețeaua rutieră interstatală, în Franța și Anglia (25%), în Germania (23%) din rețeaua de autostrăzi [4]. Interesul, la nivel național, de a realiza îmbrăcăminți din beton de ciment este posibil să crească în următoarea perioadă deoarece prezintă avantajul utilizării liantului din surse locale, comparativ cu bitumul care este procurat din import și deoarece ar conduce la economii rezultate din reducerea bugetului alocat la întreținere (aproximativ de 10 ori mai mic decât la structurile elastice), raportat la durata de viață. Îmbrăcămințile realizate din beton de ciment au un nivel mare de recuperare, au durabilitate ridicată la uzură, culoarea deschisă îmbunătățește vizibilitatea pe timp de noapte, căldura radiată este mai mică cu aprox. 8°C decât la asfalt [5]. Din perspectiva avantajelor menționate, alegerea ca soluție alternativă a îmbrăcăminților din beton comparativ cu cele din beton asfaltic, dar și a interesului la nivel global pentru utilizarea zgurii de furnal în infrastructura rutieră, lucrarea prezintă un concept nou, la noi în țară, legat de utilizarea unor proporții optime de zgură de furnal în compozițiile de betoane rutiere, pentru o parte din căile rutiere din România, precum drumuri cu trafic greu și foarte greu, la drumuri de clasa tehnică III÷V, drumuri județene și comunale, drumuri de

exploatare, platforme industriale, drumuri cu pantă longitudinală pronunțată și pe care se circulă cu viteză redusă.

Scopul cercetării

Scopul acestei lucrări este de a prezenta informațiile disponibile din cercetările recente la nivel național și internațional, o sistematizare a resurselor bibliografice relevante în domeniul îmbrăcăminților rutiere din beton de ciment, sustenabilitatea zgurii de furnal ca materie primă în amestecurile de beton rutier și beneficiile rezultatelor obținute în laborator prin programul experimental efectuat. În detaliu cercetarea cuprinde procesul de proiectare al betonului rutier, evaluarea principalelor caracteristici fizice și mecanice ale materialelor componente, ale betonului proaspăt și întărit și evaluarea performanțelor betoanelor rutiere cu zgură de furnal specific criteriilor de durabilitate în funcție de mediul la care este expus (rezistența la îngheț-dezgheț, rezistența la coroziune indusă din carbonatare, rezistența la coroziune indusă din cloruri și rezistența la uzură). Subiectele conexe la programul experimental efectuat, care nu au fost dezvoltate în această lucrare sunt dincolo de scopul acestei cercetări.

În ceea ce privește beneficiile rezultate lucrarea surprinde două aspecte principale legate de economia de resurse naturale aflată în strânsă legătură cu protecția mediului și de durabilitate. Primul aspect se referă la reducerea consumului de resurse naturale precum piatra de calcar extrasă din carieră, argila, minereul de fier, materiale necesare la producerea cimentului, economia de agregate naturale, eliminarea platformelor de depozitare deșeuri, reducerea generării de dioxid de carbon (CO_2) la producerea cimentului [6].



Figura 0-1. a) Componentele dezvoltării durabile [7], b) Comparații de clase de expunere pentru îmbrăcăminți rutiere

Deopotrivă, lucrarea abordează și efectul zgurii de furnal încorporată în betonul destinat îmbrăcăminților rutiere sub aspectul durabilității acestora. În esență, dezvoltarea durabilă este descrisă ca fiind alcătuită din cele trei componente legate de nevoile de mediu, sociale și economice, realizate în mod simultan, prezentate sugestiv ca în imaginea de mai jos, Fig.0-1a) [7].

În concordanță cu A.C.I.201.R-08 [8] *durabilitatea betonului este definită ca fiind proprietatea acestuia de a rezista acțiunilor climatice, chimice, solicitărilor mecanice de uzură sau oricăror altor procese de deteriorare*. Astfel spus, un beton durabil este acela care își păstrează forma inițială, caracteristicile și funcționalitatea în condițiile de mediu pentru care a fost proiectat, iar sustenabilitatea implică și factorul economic.

Aplicarea unor metode de testare eficiente ajută la proiectarea unor amestecuri durabile, capabile să reziste mediilor la care sunt expuse îmbrăcămințile rutiere. Betonul rutier afectează și este afectat de o serie de factori începând de la proiectare până la construcție, fapt pentru care sistemul rutier trebuie tratat ca sistem integrat. Acest sistem include stratul de fundare prin asigurarea drenajului și rigidității uniforme care previne fisurarea dalelor din beton, proporțiile de materii prime utilizate în amestec precum cimentul, adaosurile, agregatele și apa, procesul de fabricație, utilajele folosite la punerea în opera a betonului. Cerințele pentru îmbrăcămințile din beton rutier sunt variate, în funcție de mediul la care este expus, traficul pe care trebuie să-l suporte și de durata de viață necesară. Uneori cerințele pentru proiectarea unui amestec de beton rutier se exclud reciproc, de exemplu un raport apă/liant redus conduce la o permeabilitate redusă însă și la creșterea contracției și a riscului de fisurare, fapt pentru care arta ingineriei urmărește echilibrarea acestor cerințe [6].

Îndrumătorul de proiectare a durabilității betonului elaborat în acord cu Anexa națională de aplicare a SR EN 206-1 recomandă pentru durabilitatea betonului rutier clasa minimă D32/45a, unde cifra (3) indică tipul construcției de poduri și/sau drumuri, cifra (2) este asociată cu elementele orizontale, cifra (45) reprezintă rezistența la compresiune determinată pe cuburi cu latura de 150 mm și clasa betonului C35/45, litera (a) simbolizează faptul că în compoziția betonului este obligatorie utilizarea aditivilor antrenori de aer pentru a îmbunătăți rezistența la îngheț-dezghet [9][10]. Cerința pentru clasa betonului în funcție de rezistența la compresiune se menține în NE 014:2002 [11]. Combinațiile de clase de expunere pentru betonul rutier sunt XF4+XD3+XC4+XM2

evidențiate și în Fig.0-1b), în acord cu SR EN 206-1 [10] și NE 012-1:2007 [10], [12] unde XF4 reprezintă expunere la îngheț (F) având saturație puternică de apă cu agenți de dezghețare(4); XC4 reprezintă coroziune indusă din carbonatate, alternanță umezire–uscare; XD3 reprezintă coroziune indusă din cloruri, alternanță umezire–uscare; XM2 reprezintă solicitare intensă la uzură.

1 Strategii durabile pentru selectarea și utilizarea materialelor în compoziția (BcR)

Pentru betoanele rutiere și betoane în general, cel mai mare impact negativ asupra mediului îl reprezintă producția de ciment Portland, dat fiind amprenta mare de dioxid de carbon. O modalitate de reducere semnificativă a emisiilor de CO₂ și a consumului de energie asociat cu producția de beton rutier poate fi realizată prin găsirea soluțiilor de diminuarea cantității de ciment Portland. Clincherul de ciment Portland poate fi redus prin realizarea amestecurilor cu un ciment inferior încorporând adaosuri minerale denumite în literatura de specialitate *materiale cementoase suplimentare (SCM) s-au constituenți suplimentari cu caracteristici cementoase (CSCC)*. Longevitatea betonului rutier aflată în strânsă legătură cu sustenabilitatea acestuia presupune reducerea costurilor de întreținere pe durata ciclului de viață și reducerea impactului asupra mediului. De aceea, durabilitatea betonului este extrem de importantă pentru a evita apariția defecțiunilor premature, raportat la perioada pentru care a fost proiectat.

Un alt aspect important pentru mediu îl reprezintă maximizarea utilizării materialelor locale și a *materialelor reciclate, coproduselor industriale sau deșeurilor (RCWM)*, prin economiile rezultate din transporturi și reducerea emisiilor de dioxid de carbon. Materialele de tip (RCWM) vor genera, în timp, reducerea nevoii de utilizare a resurselor naturale ceea ce va conduce la eliminarea deșeurilor din depozite și implicit la creșterea valorii acestora prin reintroducerea lor în circuitul economic. În acest context, în prezent este cercetată la scară largă alegerea materialelor încorporate în betoanele rutiere cu scopul de a îmbunătăți durabilitatea lor, fapt pentru care se înregistrează o schimbare majoră în conceptul de construcție a îmbrăcăminților rutiere. Dozaje optime de materiale cementoase suplimentare și de adaosuri chimice, proceduri noi de testare, echipamente și tehnici de turnare îmbunătățite. Optimizarea compoziției betonului rutier presupune înțelegerea variabilelor care afectează performanța betonului rutier. În prezent *cerințele de proiectare* a unei îmbrăcăminți rutiere influențate de condițiile climatice în care este expusă, traficul și durata de viață, sunt

transferate către nevoia de a fi nu numai *durabile ci și reparabile*. Grupul de experți din activitatea de administrare a autostrăzilor din Statele Unite (FHWA) au stabilit ca nivel de performanță a betonului rutier următoarele caracteristici: o lucrabilitate corespunzătoare, utilizarea agregatelor non-reactive la alcalii-silice, contracția și dilatarea termică redusă, capacitatea de a rezista la penetrarea lichidelor, la cicluri repetate de îngheț-dezghet, la atacul substanțelor chimice aplicate pentru dezghetare, la sarcini mecanice și la uzură intensă [6].

1.1 Lianți

Betonul reprezintă un amestec de agregate cu o pastă din ciment hidraulic și apă. Materialele cementoase sunt componentele cheie ale liantului care susțin betonul compact. Inițial, pasta de ciment se află în stare plastică permițând betonului să fie amestecat, transportat, turnat, compactat și finisat. Întărirea hidraulică a cimentului se datorează în principal hidratării silicaților de calciu și aluminaților, cu un conținut de minim 50% din masa totală de oxid de calciu reactiv (CaO) și dioxid de siliciu reactiv (SiO₂). Reacțiile chimice între cimentul hidraulic și apă conduc la întărirea pastei de ciment, transformând betonul într-o masă asemănătoare rocii. Pentru a modifica comportamentul betonului proaspăt și întărit sunt utilizate materiale suplimentare cementoase denumite (SCM)-uri în literatura internațională de specialitate [6], sau adaosuri minerale cu proprietăți puzzolanice sau hidraulice latente definite în acord cu SR EN 206-1 [10].

1.1.1 Cimentul

Procesul de fabricare a cimentului constă în *măcinarea, amestecarea, și arderea* materiilor prime într-un cuptor rotativ la temperaturi de 1300÷1400°C. Materialele necesare pentru obținerea cimentului sunt calcarul, silicea, alumina sub formă de argilă, șisturi argiloase sau marnă, urmărind ca proporția dominantă să fie calcarul. La temperatură înaltă, masa formată sinterizează sub formă de oxizi de CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ și cantități mici de alte materiale, formând *clinkerul* sub formă de granule cu diametrul între 3÷25 mm [13].

1.1.1.1 Compușii minerali ai cimentului Portland

Cimentul Portland sub formă de pulbere fină, tip CEM I în acord cu SR EN 197-1 [14], este rezultat din măcinarea clincherului împreună cu un adaos de ghips pentru a regla priza cimentului. Clincherul este format din patru compuși primari: doi silicați și doi aluminați, denumiți în continuare compuși minerali hidraulici ai cimentului, care reprezintă aproximativ 90% din masa totală, Figura 1-1a) [6]. Din reacțiile chimice între oxidul de calciu (CaO) și principalele componente ale amestecului brut (Al_2O_3), (Fe_2O_3), (H_2O), (MgO), (SiO_2), (SO_3) se formează: silicatul tricalcic denumit prescurtat și alit (C_3S), silicatul dicalcic sau prescurtat belit (C_2S), aluminatul tricalcic (C_3A), feroaluminatul tetracalcic sau ferit (C_4AF) și sulfatul de calciu (CS) sub formă de ghips. Silicații reprezintă aproximativ 75% din ciment. Compusul (C_3S) contribuie la priza inițială și la rezistența inițială a betonului. Silicatul dicalcic (C_2S) se hidratează mai lent, doar după aproximativ șapte zile, dar continuă să hidrateze mai mult timp crescând ulterior rezistențele. Aluminatul tricalcic (C_3A) hidratează imediat ce ajunge în contact cu apa. Pentru a controla aluminatul-tricalcic și rata de hidratare se adaugă sulfat de calciu (CS) (ex. ghips) în cimentul Portland. Celălalt aluminat, tetra-calciul- alumino-ferrita (C_4AF) contribuie doar la pigmentarea culorii gri a cimentului și nu reacționează pentru a produce compuși de hidratare. Volumul procentual pe care îl au compușii minerali în ciment sunt prezentați în Tabelul 1-1. Finețea cimentului Portland afectează ratele de hidratare și proprietățile betonului. Cimenturile mai fine au, în general, rezistență inițială și rata de hidratare mai mare [6].

1.1.1.2 Hidratarea cimentului Portland

La hidratarea cimentului Portland au loc o serie de reacții chimice care eliberează căldură. Hidratarea începe imediat după ce cimentul Portland intră în contact cu apa. Particulele de ciment se dizolvă parțial și lent, componentele cimentului încep să reacționeze la rate diferite [6].

Compusul (C_3S) se dizolvă și reacționează cu apa mai lent decât (C_3A). În timpul inactivității, (C_3S) începe să se dizolve, rezultând în soluție ioni de calciu și ioni de hidroxil (OH^-), Figura 1-1b). Unii ioni de calciu în soluție rezultă, de asemenea, din dizolvarea (C_3A), dar (C_3S) este sursa primară. Ionii de calciu se acumulează timp de două până la patru ore. Când soluția este suprasaturată, ionii de calciu din soluție

reacționează cu (SiO₂) și apa pentru a se forma silicat de calciu hidratat (C-S-H) și hidroxid de calciu (CH) Figura 1-1c). La scurt timp după ce a început producerea de (C-S-H) și (CH), apare începutul prizei. O cantitate mare de energie termică este eliberată în aceste reacții, provocând creșterea temperaturii amestecului. Pe măsură ce hidratarea accelerează prin acumulare de (C-S-H) și (CH) are ca rezultat rigidizarea progresivă, întărirea și dezvoltarea rezistenței betonului.

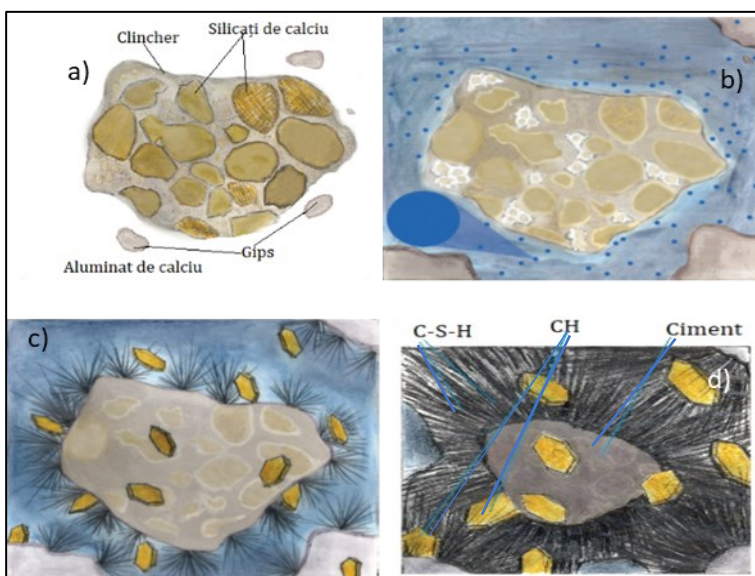


Figura 1-1. a) Compușii cimentului Portland; b) Ioni de calciu rezultați din dizolvarea cimentului; c) Formarea compușilor de hidratare (C-S-H) și (CH); d) Densificarea compușilor de hidratare [6]

Din reacțiile chimice ale cimentului hidratat rezultă schimbări de volum ai compușilor de ciment și produși noi de hidratare. Compuși de hidratare nou formați sunt constituiți din cristale de silicat de calciu hidratat (C-S-H), de hidroxid de calciu (CH), de etringită primară (C-A-S-H), monosulfat (C-A-S-H), având fiecare un volum de ocupare în pasta de ciment prezentat în Tabelul 1-1[6].

Tabelul 1-1. Conținutul procentual ai principalilor componenți ai cimentului și ai compușilor de hidratare ai cimentului [6]

Compușii cimentului	Procent [%]	Compușii de hidratare	Procent [%]
(C ₃ S) = (CaO) ₃ SiO ₂	(50÷70)%	(C-S-H)= 3CaO·2SiO ₂ ·4H ₂ O	(50÷60)%
(C ₂ S)=(CaO) ₂ SiO ₂	(10÷30)%	(CH)=Ca(OH) ₂	(20÷25)%

$(C_3A)=(CaO)_3Al_2O_3$	(3÷13)%	$(C-A-S-H)=$ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$	(15÷20)%
$(C_4AF)=$ $(CaO)_4Al_2O_3Fe_2O_3$	(5÷15)%	$(C-A-S-H)=$ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$	-
$(CS)= CaSO_4 \cdot 2H_2O$	(3÷7)%	-	-

Notă prescurtări;

(C_3S) denumit alit - silicat tricalcic ($3CaO \cdot SiO_2$);

(C_2S) denumit belit - silicat bicalcic ($2CaO \cdot SiO_2$);

(C_3A) denumit celit - aluminat tricalcic ($3CaO \cdot Al_2O_3$);

(C_4AF) denumit brownmillerit - aluminoferitul tetracalcic ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$).

Silicatul de calciu hidratat (C-S-H) se prezintă la început sub formă de gel în jurul particulelor de ciment, apoi sub formă de lamele paralele aranjate într-o structură semicristalină. Compusul (C-S-H) se formează continuu pe parcursul hidratării, din reacția cu apa mai întâi a alitului (C_3S) și a belitului (C_2S). Compusul (C-S-H) este produsul de hidratare cel mai important din pasta de ciment, contribuie major la rezistența și la permeabilitatea redusă a betonului [15]. Acesta asigură legătura între compușii (C-S-H) și agregate, ce se răspândesc și se înmulțesc treptat formând o rețea sub formă de plasă densă (Figura 1-1d). Această capacitate de a uni componentele betonului între ele se datorează structurii interne lamelare [16]. Pe parcursul hidratării, particulele de ciment din amestec sunt înlocuite de (C-S-H), iar în timp se formează alți compuși, hidroxidul de calciu (CH) și etringita (C-A-S-H) care se formează sub formă de cristale mari.

Hidroxidul de calciu (CH) rezultă din reacția silicaților cu apa atât a (C_2S) cât și (C_3S). Hidroxidul de calciu rezultat doar din reacția dintre apă și (C_2S) este în cantitate semnificativ mai mică decât cea formată din reacția cu (C_3S). Acesta formează cristale mari, hexagonale, dispuse ca lamele paralele în pasta hidratată, schematic arată ca în Figura 1-1c)[6]. Pentru a scădea ponderea cristalelor de (CH) ce ocupă un volum ridicat în pasta de ciment, dar nu influențează rezistențele mecanice [17], adăugarea (SCM)-urilor puzzolanice este benefică în pasta de ciment deoarece se poate forma (C-S-H) suplimentar. Compusul (CH) favorizează menținerea pH-ului ridicat, menține stabilitatea silicatlui de calciu hidratat (C-S-H) și protejează armătura la coroziune. Acest compus are un mare dezavantaj, acela că este ușor solubil în apă și poate fi atacat dacă betonul este expus la apă corozivă, acidă sau la apă moale cu concentrație foarte mică de săruri de calciu și de magneziu.

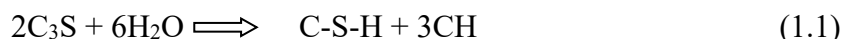
Etringita primară, notată prescurtat (C-A-S-H), apare în primele ore de la hidratare, se prezintă mai întâi sub formă de gel apoi de cristale tip ace, distribuite relativ uniform, fiind produsul principal al reacțiilor

dintre (C_3A) și sulfatul de calciu (CS) din pasta de ciment. Aceste reacții continuă, în general, în termen de 24 de ore până la epuizarea (CS). Gelul de etringită este deosebit de important deoarece realizează perioada inactivă la începutul hidratării cimentului. Acesta limitează accesul apei la particule de ciment și încetinește hidratarea acestora. Etringita are contribuție minoră la dezvoltarea rezistenței betonului proaspăt și întărit [6]. La betoanele expuse umezelii timp îndelungat cristalele de etringită se dizolvă lent și recristalizează în formațiuni ordonate denumită etringita secundară ($C-A-S-H$) care poate afecta calitatea betonului [18].

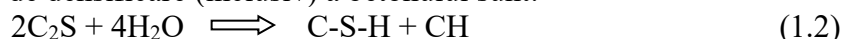
Monosulfatul ($C-A-S-H$) sub formă de cristale se formează după epuizarea sulfatului de calciu (CS) produs din reacția dintre aluminatul tricalcic (C_3A) rămas și etringită ($C-A-S-H$), având efecte reduse asupra caracteristicilor fizice ale betonului.

Reacțiile chimice care au loc în cele cinci stadii de hidratare a cimentului (stadiul de amestecare, stadiul de plasticitate, stadiul de întărire, stadiul de răcire, stadiul de densificare) sunt redate în ecuațiile chimice (1.1-1.3) [6].

Reacțiile între alit și apă, care au loc în stadiul de amestecare și plasticitate a betonului sunt:



Reacțiile între belit și apă care încep odată cu întărirea și continuă până în stadiul de densificare (inclusiv) a betonului sunt:



Reacțiile între alumiinați, sulfați și apă încep în stadiul de amestecare și continuă până în stadiul de răcire (inclusiv) a betonului sunt:



1.1.2 Materiale cu caracteristici cementoase

Materialele suplimentare cementoase (SCM) în amestec cu cimentul Portland îmbunătățesc rezistența și durabilitatea pe termen lung a betonului prin activitatea lor hidraulică sau puzzolanică. Atunci când materialele de tip (SCM) reacționează chimic cu apa se declanșează activitatea hidraulică formând compuși cementoși de hidratare. Când siliciul sau componentele aluminosilicioase reactive din (SCM)-uri reacționează cu hidroxidul de calciu (CH) aflat în soluția porilor de ciment Portland hidratat se generează activitatea puzzolană, formând silicat de calciu hidratat (CSH) și alți compuși cementoși [6]. SCM-urile utilizate în mod obișnuit la îmbrăcămințile rutiere din beton includ

cimentul din zgură specificat sub ASTM C989 [19] și SR EN 15167-1[20]), cenușă zburătoare specificată în ASTM C618 [21] și EN 450-1[22]), puzzolană naturală specificată sub ASTM C618 [21], silicea ultra fină specificată sub EN 13263-1[23].

Zgura de furnal granulată este un coprodus industrial rezultat din procesul de topire a fontei în furnal și poate fi utilizată pentru a înlocui o parte din cimentul Portland în proiectarea amestecului de beton. Atunci când zgura de furnal granulată este măcinată la o finețe adecvată se transformă în ciment hidraulic și arată ca în Figura 1-2, având denumirea prescurtată (GGBS) [6]. În 2001, producătorii de zgură granulată măcinată reprezentați de Asociația Cimentului de Zgură (SCA) [24] din Statele Unite, au solicitat Comitetului ACI 233 schimbarea terminologiei din (GGBS) în ciment de zgură (slag cement), fiind aprobat în Raportul Comitetului ACI 233 din 2003 [25]. În continuarea lucrării termenul de ciment de zgură poate fi utilizat ca sinonim pentru (GGBS).



Figura 1-2. Imagini cu procesarea zgurii de furnal și ciment de zgură (GGBS) [24]

Zgura (GGBS) reacționează lent doar în prezența apei dar devine reactivă în prezența hidroxidului de calciu (CH) aflat în soluția porilor din cimentul Portland hidratat [6].

Cenușa zburătoare rezultă ca produs secundar din arderea cărbunilor în centralele electrice formată din particulele care sunt evacuate împreună cu gazele de ardere. Compoziția și mineralogia variază cu sursa de cărbune, în funcție de cum este ars acesta și cum se răcește cenușa. Cenușa zburătoare este clasificată în acord cu ASTM C618 ca cenușă zburătoare de clasa C sau cenușă zburătoare de clasa F [21]. Sub SR EN 197-1[14] cenușa zburătoare poate fi de natura

silicioasă (cu proprietăți puzzolane) sau calcică (cu proprietăți puzzolane și hidraulice).

Silicea ultra fină provine de la reducerea cuarțului de puritate ridicată în cuptoarele cu arc electric, la producerea siliciului și a aliajelor de ferosiliciu, conține minim 85% din masă dioxid de siliciu amorf și este formată din particule foarte fine, sferice [14]. Puzzolana naturală rezultă din materiale de origine vulcanică sau roci sedimentare[6].

1.1.3 Cimenturi cu zgură de furnal

Prin amestecarea de către producători a cimentului Portland cu cenușă zburătoare, zgura de furnal, silice ultra fină, puzzolani naturali, șist calcinat și calcar în procesul de fabricare a cimentului se obține cimenturi cu adaosuri minerale. Acestea se clasifică în ciment bicomponent (cu două componente), ciment în sistem ternar (cu trei componente), s-au cimentul compozit (cu mai mult de trei componente) [6]. În SR EN 197-1[14] sunt cunoscute sub denumirea de: CEM I (ciment Portland), CEM II (ciment Portland compozit), CEM III (ciment de furnal), CEM IV (ciment puzzolanic), CEM V (ciment compozit). Cimentul Portland de tip I conține cel mai mare procent de clincher, peste 95%, iar restul reprezintă tipuri de cimenturi amestecate în diferite procente, cu alte componente, rezultând un total de 27 de produse de cimenturi uzuale. Dintre acestea există 7 tipuri de ciment amestecat care conține zgură de furnal în diferite proporții, redate în Tabelul 1-2.

Tabelul 1-2. Produse uzuale de cimenturi cu zgură de furnal [14]

Tipuri principale	Notarea celor 7 cimenturi uzuale în amestec cu zgură de furnal		Compoziția (% procent din masă)				
			Clincher	Zgură de furnal	Puzzolană	Cenușă zburătoare	Compoziție auxiliare minore
			(K)	(S)	Naturală (P) și Calcinată (Q)	Silicioasă (V)	
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	-	-	-	0-5
CEM II	Ciment Portland cu zgură	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	0-5
CEM III	Ciment de furnal	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	0-5
CEM V	Ciment compozit	CEM V/A	40-64	18-30	18-30		0-5
		CEM V/B	20-38	31-49	31-49		0-5

1.2 Procesarea și clasificarea zgurilor de furnal

Zgura de furnal se obține ca produs secundar din procesul de obținere a fontei, prin reacțiile de reducere a oxizilor de fier cu monoxidul de carbon provenit din arderea cocsului. Furnalul este alimentat în flux continuu cu oxid de fier (minereu), piatră (calcar sau dolomit) și combustibil (coacs). În cuptor se formează două produse: fontă topită care se adună la partea inferioară a cuptorului și zgura de furnal lichidă care plutește la partea superioară datorită densității mai mici (aproximativ 0.25 tone/m^3) față de cea a fontei topite (0.75 tone/m^3). Alături de minereul de fier și coacs, se introduc și fondanți pentru îndepărtarea impurităților (compuși cu sulf, aluminiu, siliciu etc.) rezultate din reacțiile în fază lichidă, cu oxidul de calciu (CaO). Din reacția între oxidul de calciu și impuritățile din minereul de fier, se formează zgură de furnal topită. Atât fonta topită cât și zgura sunt evacuate periodic din cuptor la o temperatură de aproximativ 1500°C [25]. Prin utilizarea dolomitei sau a calcarului ca agent de flux, în procesul de fabricare, din disocierea termică este pus în libertate oxidul de calciu și în proporție mai redusă oxidul de magneziu [26]. La expunerea în atmosferă a zgurii de furnal se produce hidratarea oxizilor liberi de calciu și magneziu fenomen care produce carbonatarea betonului [13].

În funcție de materialele de proveniență zgurile se pot clasifica în zguri feroase (derivate din producția de fier și oțel) și neferoase (derivate din operațiuni metalurgice de cupru, plumb-zinc, nichel și fosfor). Zgura de furnal face parte din categoria zgurilor feroase fiind coprodus al producției de fontă din minereu de fier [27] constând în esență din silicați și aluminosilicați de calciu și alte baze.

La rândul ei zgura de furnal se clasifică în funcție de condițiile de solidificare aplicate odată ce este scoasă din cuptor. Condițiile de răcire afectează eliberarea gazelor și implicit porozitatea și densitatea zgurii [24]. Sunt cunoscute patru tipuri principale de zgură de furnal [27], [28].

• **Zgură de furnal răcită în aer (ACBFS)** rezultată din solidificarea în condiții atmosferice a zgurii topite din furnal. Pentru a accelera răcirea și a facilita îndepărtarea rapidă a materialului din zona de descărcare, zgura topită este pulverizată la suprafață cu apă. Materialul răcit este transportat la o stație de concasare și sortare și apoi este procesat ca

agregat convențional. Înainte de concasare este necesar a se efectua separarea magnetică pentru a îndepărta bucățile mici din fontă brută.

- **Zgura de furnal expandată** (sau spumată). Dacă zgura topită este răcită și solidificată prin adăugarea unei cantități controlate de apă, aer sau abur, procesul de răcire și solidificare poate fi accelerat, crescând natura veziculară a zgurii rezultând un produs ușor expandat sau spumat. Zgura expandată se distinge de zgura de furnal răcită în aer prin porozitatea relativ ridicată și densitatea scăzută.

- **Zgura de furnal granulată (GBS)** este răcită și solidificată prin stingerea rapidă (aproape instantaneu) utilizând jeturi de apă sub presiune pentru vitrificare la starea sticloasă, având loc o cristalizare mică sau deloc. Acest proces are ca rezultat formarea de fragmente friabile de dimensiuni ca cele ale nisipului cu dimensiuni aproximativ de 4.75 mm. Atunci când este măcinată până la particule foarte fine de dimensiuni comparabile cu ale cimentului se transformă în zgură de furnal granulată și măcinată (**GGBS**).

- **Zgura de furnal peletizată** se obține printr-un proces de granulare combinat aer cu apă cu ajutorul unui peletizor[25]. Zgura topită este răcită și solidificată într-un tambur rotativ, rezultând formarea de pelete sferice. Prin controlul procesului de solidificare, peletele pot fi realizate mai cristalin, (benefice pentru utilizare ca agregat), sau mai vitrificate (corespunzător pentru utilizare ca ciment) [29].

1.3 Istoricul zgurii de furnal granulate și măcinate (GGBS)

Folosirea zgurii de furnal datează din anul 1774 când pentru prima dată a fost fabricat un mortar de ciment de zgură în combinație cu un var stins [25], [30]. Granularea zgurii topite în apă a început în anul 1853 în Germania, iar în anul 1862 au fost descoperite caracteristicile hidraulice latente ale zgurii de furnal granulate. Zgura de furnal în contact cu un activator în prezența apei formează o matrice cementoasă [31]. Procesul de granulare a fost îmbunătățit de Emil Lange în 1862 care a facilitat manipularea și evacuarea zgurii din cuptor. Cercetări importante din acea perioadă legate de caracteristicile zgurii de furnal au fost efectuate de către Michaelis, Prussing, Tetmayer, Prost, Feret și Green. Investigațiile acestora împreună cu ale lui Pasow, au avut un rol

important legat de utilizarea zgurii de furnal granulate ca liant hidraulic. Comercializarea zgurii de furnal utilizată ca liant a început în anul 1865 în Germania. Prima producție de ciment amestecat în care zgura de furnal a fost combinată cu cimentul Portland a fost înregistrată în Germania în 1892, iar în Statele Unite comercializarea zgurii s-a dezvoltat în perioada 1896-1905 [25],[32]. În Franța, zgura de furnal ca liant hidraulic s-a utilizat pentru prima dată la construcția sistemului de metrou din Paris începând din 1889 [25],[33]. Până în anii 1950, cimentul de zgură era folosit în principal ca materie primă pentru fabricarea cimentului Portland și mai puțin ca material cementos combinat cu cimentul Portland, varul hidratat și ghipsul anhidrit [25], [34]. De la sfârșitul anilor 1950, utilizarea separată a cimentului de zgură (GGBS) ca un constituent suplimentar cu caracteristici cementoase adăugat în malaxor împreună cu cimentul Portland a fost acceptată și în țările din Africa de Sud, Australia, Regatul Unit, Japonia, Canada și Statele Unite. În 1980 utilizarea cimentului de zgură în producția de ciment amestecat a reprezentat aproape 20% din totalul de ciment hidraulic produs în Europa [25],[32]. În 1990, Statele Unite deținea două companii care furnizau ciment cu zgură, ajungând la nouă până în anul 2000.

În prezent, majoritatea zgurii granulate (GGBS) este ambalată și etichetată ca ingredient separat, pentru a fi adăugat la instalațiile de producere a betonului. De asemenea, o parte din zgura granulată și măcinată este utilizată la realizarea amestecului de ciment hidraulic în producția de ciment, iar o parte pentru alte aplicații precum stabilizarea sterilului minier și a deșeurilor industriale [25].

Zgura de furnal granulată și măcinată (GGBS) adăugată ca material separat în producția de beton este definită în raportul Comitetului Institutului American de Beton ACI 233-03 ca un constituent suplimentar cu caracteristici cementoase (CSCS) [25].

Un proiect amplu a fost realizat în perioada 1919-1930 pentru blocarea Canalului Mării Nordului lângă IJmuiden (acesta fiind un oraș-port din provincia Olanda de Nord a Țărilor de Jos) [31]. După al doilea război mondial când aprovizionarea cu ciment Portland a fost deficitară, s-a adăugat cimentul de zgură în beton, prin procesul umed Trief, în care zgura măcinată și udată a fost introdusă în amestec ca o suspensie vâscoasă. Procesul umed Trief s-a aplicat la construcția barajului Bortles-Orgues construit pe râul Dordogne din Franța, care a implicat 660.000 m³ de beton [25],[35]. De mai bine de 60 de ani, structurile marine din Olanda au fost construite utilizând cimentul amestecat cu zgură de furnal. Structura realizată pentru bariera de la râul Scheldt de

est, proiectată pentru o durată de viață de 200 de ani, a utilizat cimentul cu zgură de furnal, selectat ca cea mai bună opțiune (imagini în Figura 1-3). Bariera de la râul Scheldt de est dintre insulele Schouwen-Duiveland și Nord-Beveland conceput pentru a proteja Olanda de inundațiile din Marea Nordului, reprezintă cea mai mare dintre cele treisprezece serii de diguri și bariere de furtuni din proiectul Delta. Prin realizarea acestei construcții, s-au luat măsuri împotriva daunelor și a pierderilor de viață din cauza inundației din Marea Nordului din 1953 [31].

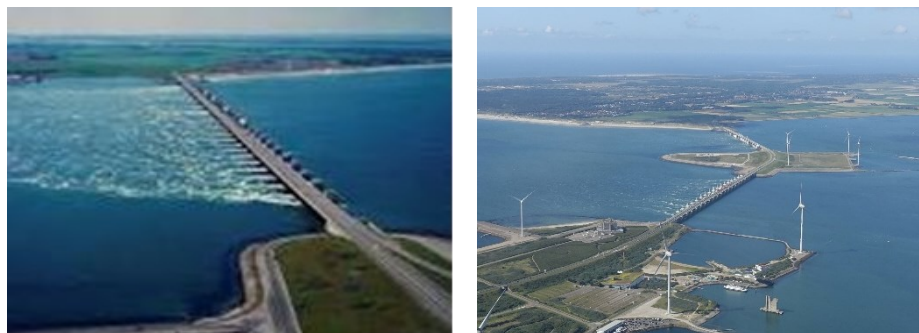


Figura 1-3. Bariera de la râul Scheldt de est, [34]

În prezent compania olandeză ENCI (Eerste Nederlandse Cement Industrie) cu sediul în Maastricht, Rotterdam și în IJmuiden produce aproximativ 2 milioane de tone de ciment amestecat cu zgură de furnal pe an. În Olanda cimentul produs conține 65% până la 75% zgură de furnal și are o cotă de piață de aproximativ 60%, fiind un material mai ecologic utilizat pentru diferite aplicații: structuri de clădiri rezidențiale, comerciale, industriale, aeroporturi, îmbrăcăminti rigide, sisteme de irigare și canalizare. Industria olandeză de ciment a efectuat o evaluare privind efectele producției de ciment asupra mediului pentru cimentul amestecat tip III/B 42,5 care conține zgură de furnal între (66-80)%, comparat cu cimentul Portland tip I 32,5 R. Studiul a arătat un consum brut de materii prime și emisii de mediu mai mici pentru cimentul cu zgură de furnal decât pentru cimentului Portland. Însă, consumul de energie necesar pentru măcinarea cimentului cu zgură a fost mai mare decât pentru măcinarea cimentului Portland. Acest consum suplimentar s-a considerat că se compensează cu cerința mai mică de energie datorată utilizării mai reduse a clincherului[31].

În Statele Unite se utilizează cimentul cu zgură în proiecte importante de infrastructură rutieră. Asociația Cimentului de Zgură (SCA) constituită în orașul Farmington Hills, comitatul Oakland, din

statul american Michigan prezintă o serie de studii de caz legate de acest domeniu de aplicare.

În anul 2014, a fost finalizată lucrarea de Reconstrucție a autostrăzii I-96 aflată în apropiere de orașul Livonia, din partea de nord-vest a comitatului Wayne, din statul american Michigan. Proiectul a cuprins 11 km de autostradă cu opt benzi, șase intersecții cu rampe de intrare-ieșire și 37 de poduri. Conform cu specificațiile tehnice stabilite de Departamentul de Transport (DOT) din Michigan a fost prevăzut în compoziția betonului la îmbrăcămintea rutieră și la poduri, peste 30% de (GGBS) în amestec cu cimentul Portland pentru atenuarea reacției alcalii-silice (ASR).



Figura 1-4. Imagini cu reconstrucția autostrăzii I-96 [36]

Amestecul realizat a îndeplinit și cerințele impuse pentru rezistențele la încovoiere și compresiune. Utilizarea cimentului cu zgură a dus la o vizibilitate sporită pe timp de noapte, datorită culorii alb-gri al betonului (Figura 1-4)[36].

În anul 2015 a fost reabilitată pista existentă cu îmbrăcăminte din asfalt, prin acoperirea cu beton de ciment, a aeroportului internațional John F. Kennedy, JFK-104.002 deținut de Autoritatea Portuară din New York și New Jersey, imagini prezentate în Figura 1-5. După frezarea grosimii de 6 cm din stratul de asfalt existent s-a așternut un strat bituminos de egalizare peste care s-a turnat îmbrăcăminte din beton de ciment în grosime de 40 cm (18 in). Specificațiile tehnice ale proiectului au impus pentru amestecul de beton o rezistență minimă la încovoiere de 4,83 MPa (700 psi) la 28 de zile, o permeabilitate redusă a clorurii (determinate prin testul rapid RCPT) și o bună rezistență la reacția alcalii-silice (ASR). Pentru a îndeplini cerințele contractuale s-a utilizat ciment amestecat Portland cu zgură de furnal de tip IS (40% zgură de furnal) în acord cu ASTM C595 [37]. Proiectul a obținut Premiul anului 2015 pentru durabilitate, oferit de (SCA)[38].



Figura 1-5. Aeroportul internațional JFK -Studiu de caz Ciment de zgură[38]

Pentru înlocuirea dalelor de beton la autostrada I-275 care traversează regiunile Wayne și Oakland, din statul Michigan, antreprenorul Toebe Construction LLC (Toebe) a ales cimentul amestecat tip IS (30 % zgură) în acord cu ASTM C 595 procurat de la LafargeHolcim (LH) MaxCem pentru a satisface, în siguranță, logistica acestui proiect care prevedea o perioadă scurtă de execuție. Porțiunea reabilitată în urmă cu 15 ani avea un sistem deficitar de goluri de aer și o reactivitate (ASR) crescută, deficiențe ce au condus la degradări în structura rutieră. Departamentul de Transporturi (DOT) din Michigan a solicitat prin proiectul din anul 2017 includerea în compoziția betonului a 30% (GGBS) datorită caracteristicilor sale excepționale (proprietăți de atenuare (ASR) și un mediu facil pentru dezvoltarea antrenării aerului), Figura 1-6. Un aspect inovator al proiectului I-275 a fost acela că cimentul de zgură s-a amestecat separat cu cimentul Portland tip I la terminalul furnizorului LafargeHolcim din Detroit [39].



Figura 1-6. Înlocuirea dalelor de beton la autostrada I-275 [39]



Figura 1-7. Extinderea platformei de staționare la aeroportul internațional St. Pete-Clearwater din regiunea Pinellas, Florida [40]

Tot în anul 2017 pentru extinderea platformei de staționare la aeroportul internațional St. Pete-Clearwater din regiunea Pinellas, Florida, s-a utilizat cimentul de zgură în amestecul de beton. Mixul de beton a atins rezistențele preconizate și lucrarea a fost finalizată la timp. Aspectul mai deschis la culoare al betonului de ciment cu zgură a creat o reflectivitate mai mare, îmbunătățind vizibilitatea, evidențiată în (Figura 1-7). Rezistențele mecanice preconizate au fost atinse și lucrările au fost finalizate la timp, fără întreruperea serviciilor aeroportuare[40].

Aeroportul Internațional Tampa (Figura 1-8) a încheiat recent (2018) Reconstrucția podului "J" cu o cale de rulare cu 300 m lungime și 217 m lățime, proiectat pentru a susține greutatea avioanelor Boeing 777 și Boeing 747. Pentru compoziția betonului s-a înlocuit cimentul obișnuit cu 30% (GGBS). Proiectul a primit premiul pentru "Performanță ridicată"[41].



Figura 1-8. Reconstrucția podului "J" Aeroportul Internațional Tampa [41]

Autostrada HWY 50 (Figura 1-9), din Comitatul Hernando situat pe coasta centrală de vest a statului american Florida, a primit în anul 2020 premiul pentru "Sustenabilitate".

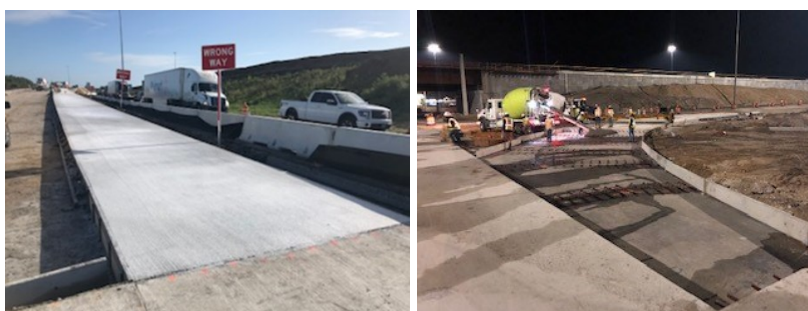


Figura 1-9. Imagini cu Autostrada HWY 50 , din Comitatul Hernando [42]

Compoziția betonului a constat dintr-un amestec 50:50 % din ciment de tip I și (GGBS), la care rezistența medie la compresiune a ajuns la valoarea de 28MPa la 5 zile. Cimentul de zgură a fost considerat un ajutor pentru punerea mai ușoară în operă prin îmbunătățirea lucrabilității, în condiții de acces dificile [42].

1.3.1 Caracteristicile zgurii de furnal granulate (GGBS)

Compoziția chimică a zgurii de furnal este determinată de cea a minereurilor, a agentului de flux (calcar și dolomită) și de impuritățile din cocs. Elementele majoritare sunt constituite din silice, calciu, aluminiu, magneziu și oxigen în procent de 95%, raportate ca oxizi cu excepția sulfurii, intervalul de valori sunt prezentate în Tabelul 1-3 [25].

Tabelul 1-3. Intervalul compoziției chimice pentru (GGBS) [25]

Constituenți chimici	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	Fe ₂ O ₃	MnO
% din masă	32÷42	7÷16	32÷45	5÷15	0.7÷2.2	0.1÷1.5	0.2÷1

Structura fizică și granulometria zgurii granulate (GBS) depinde de compoziția chimică a zgurii, de temperatura acesteia în momentul stingerii apei și de metoda de măcinare. Înainte de a fi uscată și măcinată trebuie îndepărtate reziduurile de fier metalice cu ajutorul unor magneți. Pentru a crește viteza de reacție la vârste mici de întărire (rezistența inițială) zgura trebuie să fie măcinată mai fin decât cimentul Portland. Specificațiile tehnice ale zgurii de furnal granulate sunt acoperite la noi prin SR EN 15167-1[20]. În acord cu acest standard au fost determinate caracteristicile fizice și chimice ale zguri de furnal (GGBS) utilizate în studiile experimentale efectuate și se găsesc la capitolele 5, 6 și 11.

În acord cu specificațiile ASTM C989 [19] zgura granulată și măcinată (GGBS) se clasifică în clase de rezistențe ca în Tabelul 1-4, în funcție de indiciile de activitate a zgurii (I_A) calculat la 7 și la 28 de zile cu relația din ecuația (1.4).

$$I_A = (f_{cs}/f_{cc}) \times 100, (\%), \quad (1.4)$$

În relația de mai sus (f_{cs}) reprezintă rezistența medie la compresiune (MPa) a mortarului realizat cu zgură și ciment în proporție de 50:50, iar (f_{cc}) este rezistența medie la compresiune (MPa) a mortarului realizat cu ciment Portland. Se are în vedere faptul că cimentul Portland utilizat, prin rezistența sa la compresiune, influențează testul indicelui de activitate a zgurii.

Tabelul 1-4. Clasificarea (GGBS) în funcție de indicele de activitate I_A [19]

Clasa zgurii (GGBS)	Minim (I_A) la 7 zile		Minim (I_A) la 28 zile	
	Media de la cinci epruvete	Oricare din epruvetele individuale	Media de la cinci epruvete	Oricare din epruvetele individuale
80	-	-	75	70
100	75	70	95	90
120	95	90	115	110

Activitatea hidraulică și puzzolanică a zgurii de furnal (GGBS). Când zgura granulată și măcinată este amestecată doar cu apă, inițial hidratarea este mai lentă decât cea a cimentului Portland. Regourd (1980 a, b, c)[25], [43], [44], [45] a arătat că imediat după amestecarea

(GGBS) cu apa are loc o reacție mică eliberând calciu și ioni de aluminiu în soluție. Această reacție este limitată, dacă nu sunt disponibili: hidroxidul de calciu (CH), sulfatați (SO_3) și alcalii suplimentari precum oxidul de sodiu (Na_2O), oxidul de potasiu (K_2O) eliberați prin hidratarea cimentului Portland. Hidratarea (GGBS) depinde în mare măsură de descompunerea structurii de zgură sticloasă de către hidroxilii eliberați în timpul hidratării cimentului Portland. Cercetări efectuate de Regourd (1980 a, b, c)[43],[44], [45], Vanden Bosch (1980)[46] și Roy și Idorn (1982)[47],[25] descriu hidratarea (GGBS) în combinație cu cimentul, pentru o temperatură normală, ca o reacție în două etape. Inițial în prima etapă reacția predominantă este cu hidroxidul alcalin (OH^-), iar reacția ulterioară este predominantă cu hidroxidul de calciu (CH). Similar și rata de eliberare a căldurii se produce în două etape, inițial rata de eliberare a căldurii este redusă (fază în care hidratarea (GGBS) rămâne în urma cimentului Portland) și o rată de eliberare a căldurii crescute odată ce crește solubilitatea hidroxizilor alcalini. Din reacția zgurii (GGBS) cu alcalii de potasiu și sodiu și cu hidroxidul de calciu ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) rezultă C-S-H suplimentar. Factorii principali care influențează hidratarea (GGBS) sunt : compoziția chimică și finețea de măcinare a cimentului Portland și a zgurii (GGBS), concentrația de ioni alcalini care participă la reacție, conținutul de masă vitroasă din zgură, temperatura amestecului din primele faze ale procesului de hidratare și tratarea betonului după turnare [25].

Avantajele adăugării pulberii (GGBS) la prepararea amestecului de beton rutier. Proportționarea amestecurilor de beton folosind (GGBS) și ciment Portland adăugate separat în compoziția betoanelor are două avantaje comparativ cu utilizarea cimenturilor amestecate. Mai întâi fiecare material poate avea o altă finețe de măcinare, iar pe urmă proporțiile de (GGBS) și clasa zgurii pot fi stabilite în funcție de cerințele proiectului. Cea mai semnificativă utilizare separată a zgurii (GGBS) a fost în Africa de Sud, unde proporția de zgură a fost de 50% din materialele cementoase (Wood 1981) [25], [48]. Proporția optimă de (GGBS) în amestec, raportat la rezistența cea mai mare obținută la 28 zile, a fost considerată de la 40 la 50% din masa totală a liantului (Hogan și Meusel 1981)[25], [32], (Fulton 1974) [49],[25]. Alte aspecte luate în considerare pentru stabilirea proporției și clasei de (GGBS) sunt cerințe de permeabilitate, viteza de eliberare a căldurii, timpul de început și sfârșit de priză, rezistența la sulfatați și controlul expansiunii datorate reacției alcalin silice, (ASR). La calculul volumului de liant trebuie luată în considerare diferența de greutate

specifică (densitatea relativă) mai mică la (GGBS) de la 2.85 Mg/m³ până la 2.94 Mg/m³ comparată cu greutatea specifică a cimentului apropiată de 3.15 Mg/m³ [25].

1.4 Agregatele

1.4.1 Impactul consumului de agregate asupra mediului

Pentru structurile rutiere agregatele reprezintă ponderea cea mai mare din masa și volumul materialelor utilizate atât pentru straturile de bază cât și pentru îmbrăcămințile cu lianți bituminoși sau hidraulici, fapt pentru care acestea au un impact semnificativ asupra mediului. Se estimează că la nivel mondial cererea de agregate pentru construcții este de peste 10 miliarde de tone pe an [50],[51]. Datorită consumului mare de resurse naturale există o preocupare majoră pentru utilizarea agregatelor provenite din alte surse, precum reciclarea îmbrăcăminților, coproduse secundare sau alte deșeuri de materiale. Agregatele recuperate din beton de ciment (RCA) obținute prin concasare pot fi utilizate atât în construcții civile, [52] cât și în infrastructuri rutiere pentru îmbrăcămințile rutiere sau pentru stratul de bază. O altă sursă de agregate utilizate în structurile rutiere sunt agregatele recuperate din asfalt (RAP) și agregatele concasate din zgura de furnal răcită în aer (ACBFS). Pentru aceste agregate există disponibilitate de procurare, deoarece la nivel mondial se produc în fiecare an peste 500 de milioane de tone de zgură de furnal [50], [53], însă din păcate doar o parte din acestea sunt reintroduse în circuitul economic. În anul 2000, Australia și Noua Zeelandă au produs 3,1 milioane de zgură din care 75% a fost utilizată eficient [54]. Producția totală de zgură de furnal din Japonia din anul 2017 a fost de 23,970 milioane de tone din care 19,905 zgură granulată și 4,065 zgură răcită în aer [55]. Ghidul elaborat de Asociația Australiană a zgurii privind utilizarea diferitelor tipuri de zguri în construcția de drumuri a indică faptul că zgura de furnal răcită în aer poate fi utilizată la drumuri, în stratul de bază și de fundații. De asemenea, ghidul arată că agregatele din zgură de furnal (ACBFS) pot fi utilizate și în amestecurile din beton rutier, însă este necesară o evaluare adecvată pentru a se asigura că proprietățile lor nu au efecte negative asupra betonului proaspăt și întărit [54].

1.4.2 Tipuri de agregate

Agregatele pot fi descrise după compoziție, sursă sau originea de proveniență și densitate. Compoziția lor poate fi alcătuită din minerale care sunt formate din substanțe naturale cu structură ordonată și chimie bine definită și din roci formate din amestecul unui sau mai multor minerale (ex. granit, bazalt, cuarțit, calcar, marmură). Minerale care apar în rocile utilizate pentru agregate includ silice (exemplu cuarț), silicați (exemplu feldspat) și carbonați (exemplu calcit). Cele mai frecvente agregate utilizate la betoanele rutiere provin din rocă de granit (rocă magmatică) și de calcar (rocă sedimentară formată din materiale carbonatice din scoici marine). În țară la noi, în zona transilvană, predomină dacitul (rocă vulcanică, având compoziția intermediară dintre andezit și riolit, cu un conținut ridicat de silice și un conținut scăzut de oxizi de metale alcaline) [56]. Tipurile de agregate influențează performanța betonului rutier la diferite medii de expunere și clase de trafic. De exemplu, rocile cu conținut de siliciu au rezistență bună la uzură și rugozitate. Rocile care au în compoziția lor calcite și dolomite sunt benefice în reducerea expansiunii și contracției expuse în zone cu variații de temperatură datorită coeficienților de dilatare termică scăzuți. Tipuri de roci precum șistul și rocile argiloase provoacă expansiune și fisuri în beton [6]. Sursa agregatelor poate fi din balastieră (nisipuri și pietrișuri naturale) sau din carieră (piatră concasată, cribluri de formă poliedrică obținute prin concasarea și sortare). Alte surse de agregate utilizate în compoziția betoanelor sunt agregatele artificiale de origine minerală rezultate printr-un procedeu industrial și care au suferit transformări termice sau de altă natură și agregate reciclate rezultate din materiale anorganice utilizate anterior la alte construcții. Agregatele concasate diferă de nisipul și pietrișul de râu prin formă, textură și dimensiune. Din procesul de concasare rezultă o textură aspră, cu forme unghiulare [57], acestea fiind mai puțin contaminate cu substanțe dăunătoare precum mineralele argiloase sau materii organice [6] însă îngreunează lucrabilitatea și consumă mai multă apă la preparare [58]. În funcție de densitate agregatele se clasifică în agregate curente (având masa volumică după uscare în etuvă cuprinsă între 2000 și 3000 kg/m³), agregate ușoare (având masa volumică mai mică sau

egală cu 2000 kg/m^3) și agregate grele (având masa volumică mai mare sau egală cu 3000 kg/m^3)[12].

1.4.3 Proprietățile fizice ale agregatelor

Deoarece în structura betonului agregatele pot ocupa până la 80% din volumul total este indicat includerea unui conținut maxim de agregate întrucât, în general, sunt stabile chimic și mai puțin predispuse la modificări de volum din umiditate în comparație cu pasta de ciment. Un volum de goluri minim între agregate, respectiv un amestec optim realizat printr-o proporționare corespunzătoare a agregatelor va conduce la o reducere a conținutului de ciment dar și la o lucrabilitate și finisabilitate crescută cu efecte pozitive asupra rezistențelor mecanice și durabilității betonului. Pentru realizarea unui amestec optim de agregate ar trebui să existe o gamă largă de dimensiuni ale particulelor de agregate. La proiectarea compozițiilor de betoane rutiere se ține seama de sursele disponibile și de caracteristicile fizice ale agregatelor care influențează durabilitatea betoanelor. În general, este de dorit ca agregatele să aibă următoarele calități: granulozitate corespunzătoare, suprafață cu textură aspră, absorbție de apă redusă, să aibă coeficient scăzut de expansiune termică, reactivitate scăzută la alcalii, să fie rezistente la îngheț-dezghet, să nu fie sensibile la acțiunea sării de degivrare și să fie rezistente la uzură. Proprietățile fizice și de durabilitate ale agregatelor utilizate în amestecuri de beton rutier sunt acoperite în SUA prin ASTM C33/C33 M [59] și ACI EB-06 [60] iar la noi prin SR EN 12620:2003+A1:2008 [61] și NE 014:2002 [11].

1.4.4 Granulozitatea agregatelor

Granulozitatea este o măsură a distribuției mărimii particulelor de agregat determinate din trecerea agregatului prin diferite dimensiuni de site. Limitele de notare sunt exprimate ca procentaj de trecere sau ca procentaj de reținere a materialului pe site cu dimensiuni stabilite. Agregatele sunt clasificate ca agregate fine sau grosiere după cum urmează: agregatele fine (nisipul) sunt granule care trec prin sita cu diametrul mai mic sau egal cu 4 mm și agregatele grosiere (pietriș, piatră concasată) sunt granule la care dimensiunea maximă este mai mare sau egală de 4 mm, iar dimensiunea minimă este mai mare sau egală de 2 mm. Granulele cu dimensiuni care trec prin sita de 0.063 mm reprezintă

particule fine, cantitatea lor fiind limitată în amestecurile de betoane (ex. în nisipurile naturale se pot găsi particule de argilă care au suprafața specifică foarte mare, iar în agregatul concasat praf). Proporția de agregat fin nu trebuie să depășească 45% , procent reținut între două site consecutive și modulul de finețe (FM) să fie cuprins între (2.1÷3.1) în acord cu ASTM C33/C33M [59]. Cantități mari de agregat fin conduc la creșterea conținutului de apă, crește lucrabilitatea betonului, dar scad rezistențele mecanice. Pentru agregatele grosiere se limitează în principal dimensiunea maximă a agregatului în funcție de grosimea dalei și de performanța echipamentelor de punere în operă a betonului [6].

1.4.5 Forma și textura agregatelor

Forma particulelor de agregate are influență asupra performanțelor betonului, forme angulare duc la rezistență mai mare la încovoiere și în zona rosturilor datorită interblocării dintre agregate, particulele plate sau alungite reduc lucrabilitatea datorită interferenței agregatelor din betonul proaspăt.

Textura agregatelor conduce la rezistențe mai mari dacă prezintă o suprafață aspră și sunt prelucrate prin concasare datorită unor legături mai bune cu pasta de ciment [6].

1.4.6 Absorbția agregatelor

Absorbția agregatelor influențează variabilitatea necesității apei de amestec la prepararea betonului. În funcție de retenția apei în particulele de agregate sunt identificate patru condiții de umiditate, relevate în Figura 1-10, raportat la cantitatea de apă din porii permeabili și de pe suprafața particulelor. Se definesc următoarele stări ale agregatelor: agregate în starea 1, saturate cu suprafață umedă (porii sunt umpluți cu apă și la suprafață au apă liberă), agregate în starea 2 (SSD), saturate cu apă și suprafață uscată (porii sunt umpluți cu apă dar fără apă liberă la suprafață), agregate în starea 3 uscate în aer cu suprafață uscată (porii permeabili nu sunt umpluți complet cu apă), agregate în starea 4, uscate în etuvă până la masă constantă (nu conțin apă în pori sau pe suprafață) [60].

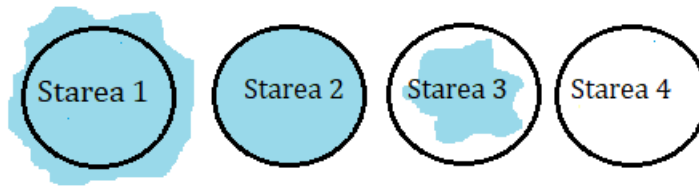


Figura 1-10. Condițiile de umiditate ale agregatelor[6]

Valorile absorbției la cele mai multe agregate variază de la 0.2 la 4% din masa agregatului uscat, însă poate ajunge și până la 20% la agregate ușoare sau reciclate. Conținutul de umiditate al agregatelor recomandat la momentul preparării betoanelor este starea 2, saturate cu suprafața uscată (SSD) [13] deoarece aceasta este starea la care ajung agregatele uscate la momentul prizei betonului. Folosind agregate cu valori ridicate ale absorbției pot rezulta variații mari ale calității betonului datorită dificultății de a controla conținutul de umiditate al agregatelor. Pe de altă parte, agregatele cu umiditatea mai mică decât cea determinată pentru starea (SSD) vor absorbi apa din pasta de ciment, reducând lucrabilitatea, grăbind rigidizarea betonului și implicit reducerea gradului de hidratare[6].

1.4.7 Expansiunea termică a agregatelor

Expansiunea termică a agregatelor, se identifică prin modificarea volumului sau a lungimii, din cauza schimbărilor de temperatură. De obicei, o creștere a temperaturii va duce la extindere iar o scădere a temperaturii la contracția betonului. Calcarul și marmura au cel mai favorabil coeficient termic de expansiune (CTE) cu valori mai reduse comparative cu alte roci [6]. Însă, atunci când betonul este expus la temperaturi variabile iar coeficientul (CTE) al agregatelor grosiere diferă cu mai mult de 5.5×10^{-6} pe 1°C comparat cu cel al pastei de ciment poate rezulta o întrerupere a legăturii dintre particulele de agregat și pasta de ciment iar durabilitatea betonului expus la îngheț-dezgheț poate fi afectată [13].

1.4.8 Reactivitatea alcalii-agregate (ASR)

Reactivitatea alcalii-agregate (ASR) poate să apară din reacțiile chimice între agregat și pasta de ciment, respectiv din constituenții activi

ai silicei din agregat și alcaliile din ciment. Mineralele silicioase din agregat pot fi atacate de către hidroxizii alcalini derivați din alcaliile Na_2O și K_2O aflate în ciment. Din această reacție rezultă un gel de silicat alcalin care alterează marginile particulelor de agregat. Gelul format este înglobat în pasta de ciment prin absorbția apei având capacitatea de umflare, ce creează o presiune internă care duce la expansiune, fisurare și dezintegrarea pastei de ciment [13], imagine în Figura 1-11.a)[62]. Pentru testarea reacției (ASR) a agregatelor se poate utiliza procedura ASTM C1260 [63], iar la noi SR 5440:2009 [64].

1.4.9 Rezistența la îngheț-dezgeț a agregatelor

Rezistența scăzută la îngheț-dezgeț a agregatelor grosiere poate produce deteriorarea îmbrăcăminților din beton. Apa pătrunde în fisurile agregatelor și pe măsură ce îngheață se dilată și produce fisurarea în betonul de ciment, imagine în Figura 1-11.b)[6]. Un alt fenomen întâlnit reprezintă desprinderea agregatelor de la suprafața betonului lăsând o adâncime superficială care, în cazul suprafețelor reduse nu afectează, în general, durata de viață a betonului, fiind doar inestetice [6], imagine în Figura 1-11.c), [65]. Degradarea agregatelor se produce și din acțiunea sărurilor de degivrare. În prezența sărurilor se destabilizează structura cristalină a agregatelor care amplifică deteriorarea betonului împreună cu fenomenul de îngheț-dezgeț. O caracteristică importantă care trebuie asigurată pentru îmbrăcămințile rutiere se referă la rezistență adecvată la derapaj, din uzura produsă de pneurile autovehiculelor. Utilizarea unui agregat grosier dur crește rezistența la uzură [6], [66]. Tipul de agregat și rezistența la compresiune a betonului influențează rezistența la uzură.

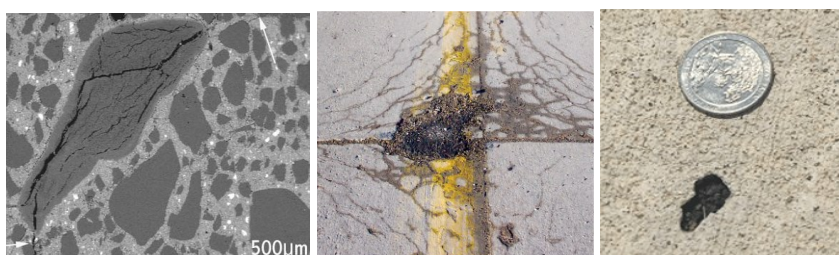


Figura 1-11. a) Reacția alcalii-silice (ASR); b) Deteriorarea din îngheț-dezgeț; c) Desprinderea agregatelor din suprafața betonului[6], [62], [65]

1.5 Istoricul agregatelor concasate din zgură de furnal (ACBFS)

Începând cu anul 1930, zgura de furnal răcită în aer (ACBFS) a fost utilizată ca agregat concasat grosier pentru compoziția betoanelor rutiere, în statele Michigan Pennsylvania, New York, Indiana și Ohio. După 1940 și până în anul 1970 statul Michigan, a utilizat intens agregatele tip (ACBFS) în construcțiile de autostrăzi [27].

La noi în țară, caracteristicile agregatelor din zgură de furnal utilizate pentru betoane sunt acoperite de standardul SR EN 12620+A1:2008, Agregate pentru beton [61], standard adoptat din anul 2003. În Japonia cercetările privind aplicabilitatea agregatelor din zgură de furnal au început în anul 1974, iar în anul 1997 agregatele grosiere și agregatele fine din zgură de furnal au fost integrate în standardul JIS A 5011 Agregate de zgură pentru beton [67], [68]. Ghidul Japonez pentru utilizarea agregatelor din zgură de furnal pentru structuri din betoane recomandă utilizarea agregatelor fine amestecate cu agregatele fine naturale la un raport cuprins între (20÷60)% [69].

În 2006 Jim Grove și Fatih Bektas [70] au publicat un studiu de cercetare legat de cauzele degradărilor timpurii apărute la o serie de îmbrăcămînți rutiere realizate cu amestec de agregate grosiere din zgură de furnal sau cu agregate din calcar. Îmbrăcămînțile rutiere analizate au fost executate înainte sau după anul 1990, în diferite orașe din sud-estul statului Michigan (SUA). Acestea au arătat o performanță mai scăzută și o frecvență mai mare de intervenții pentru reparații și reabilitări comparativ cu îmbrăcămînțile rutiere realizate cu agregate naturale, indicând un cost mai mare al ciclului de viață raportat la durata de exploatare.



Figura 1-12. a) Degradare la șase ani de exploatare; b) Deteriorare după douăzeci și unu de ani de exploatare [71]

Prin studiul realizat nu s-a reușit să fie stabilită o relație între starea identificată în teren (Figura 1-12) și informațiile legate de construcția dalelor din beton, fapt pentru care preocuparea a fost legată de factorii care au produs mecanismele de deteriorare. A fost analizată influența tipului de agregate grosiere utilizate (calcar sau zgură de furnal), posibilele mecanisme expansive datorate reactivității alcalii-silice a agregatelor (ASR), atacului sulfatic (formarea etringitei secundare) și distribuția sistemului de pori din betonul întărit care generează fenomenul de îngheț-dezghet. Studiul s-a efectuat prin observații efectuate în teren și pe probe extrase de la doisprezece proiecte care au prezentat deteriorări timpurii la îmbrăcăminte.

În funcție de tipul de agregate utilizate, s-au observat la unele îmbrăcăminti realizate cu agregate de calcar deteriorări mai reduse comparat cu cele realizate cu agregate grosiere din zgură de furnal, dar ulterior au fost efectuate constatări și inverse. Prin urmare s-a stabilit că tipul de agregate grosiere nu a fost în mod specific cauza degradării dalelor din beton. Analizele probelor au indicat utilizarea agregatului uscat în momentul amestecării în aproape fiecare probă care a conținut zgură de furnal. Acest lucru afectează calitatea betonului atât sub aspectul porozității, cât și a rezistențelor, deoarece în momentul amestecării agregatul uscat absoarbe apa, din zona particulelor de

ciment, reducând apa necesară pentru hidratarea extinsă și perturbând sistemul de antrenare a aerului. Reacția (ASR) a fost identificată în majoritatea probelor, cauza identificată a fost nisipul reactiv, disponibil în zona Detroit. Nu a fost posibil să se stabilească dacă fisurarea îmbrăcăminților în zona rosturilor a fost cauzată de expansiunea din reacția (ASR) sau din îngheț-dezgheț sau din combinația celor două. Protecția betonului la îngheț-dezgheț este asigurată printr-un sistem adecvat de distribuție a microporilor care permit un spațiu suplimentar pentru forțele expansive atunci când apa din pori înghețată și își mărește volumul. Acest sistem de pori trebuie să fie distribuit uniform în tot betonul și să conțină bule de dimensiuni mici situate la o distanță adecvată. Sistemul de distribuție a porilor a fost analizat pe baza factorului de distanțare și s-a constatat că la mai mult din trei sferturi din probele analizate fisurile au fost provocate de fenomenul de îngheț-dezgheț. Distribuția neuniformă a bulelor de aer din interiorul betonului poate fi asociată cu o insuficientă amestecare la preparare sau vibrație la punerea în operă. Au fost identificate zone cu prezență scăzută a golurilor de aer sau zone cu aglomerări a bulelor de aer. Aglomerarea bulelor de aer din interiorul betonului a fost asociată cu utilizarea aditivilor de antrenare a aerului, pe bază de rășini sintetice. Acestea sunt mai puțin solubile decât aditivii antrenori de aer pe bază de rășini naturale. În situația utilizării agregatelor uscate, apa din pasta de ciment se deplasează către agregatul absorbant, rășinile sintetice sunt acumulate la suprafața agregatului pe măsură ce apa este absorbită rezultând o grupare a bulelor de aer în jurul agregatelor [72]. Analiza petrografică a indicat la unele probe un raport apă-ciment ridicat de peste 0.5 și în majoritatea probelor cantități excesive de etringită. Raportul apă-ciment crescut a condus la reducerea rezistenței la îngheț-dezgheț. De asemenea și etringita secundară, care în mod normal este produsă ca reacție din procesul de hidratare a cimentului, atunci când se dezvoltă lent în timp și în cantități excesive afectează negativ sistemul de pori deoarece poate umple o parte din spațiul acestora.

Concluziile studiului au arătat că mecanismele multiple de deteriorare a dalelor de beton, în zonele de rosturi sau de apariție a fisurilor din dale, pot fi înlăturate prin reducerea factorilor care le generează. Un raport apă-ciment scăzut, agregate non-reactive la alcalii, utilizarea SCM-urilor pentru atenuarea reacției (ASR), umezirea

stocurilor de agregate pentru a preveni absorbția apei la prepararea betonului, utilizarea aditivilor antrenori de aer pe bază de rășini naturale pentru a nu perturba sistemul de distribuție a aerului pot conduce la realizarea unui beton durabil.

1.5.1 Caracteristicile agregatelor concasate din zgură de furnal

În timpul transportului de la furnal la instalațiile de granulare, aproximativ 30% din zgura lichidă se solidifică în oalele tip vagonet care se descarcă în spații de depozitare prin batere cu ajutorul unor macarale (sonete) Figura 1-13a).



Figura 1-13. a) Solidificarea zgurii în aer, b) Concasarea zgurii negranulate la oțelăria din Galați (sursa imaginilor -de la producător)

Zgura de furnal solidificată are o structură cristalină în care moleculele prezintă un aranjament spațial regulat. Pulverizarea cu apă a zgurii în perioada de răcire face ca zgura să cristalizeze și să crape, facilitând excavarea din zona depozitată [73].

După răcire, prin procesul de concasare și sortare se obțin agregatele, ca în Figura 1-13b), având o formă unghiulară și aproximativ cubică, utilizate în construcții pentru diferite aplicații: infrastructuri rutiere, rambleuri, îmbrăcămînți din betoane cu lianți hidraulici sau bituminoși. Modul în care caracteristicile chimice și fizice ale agregatelor grosiere de tip (ACBFS) diferă de agregatele naturale sunt prezentate în *Ghidul celor mai bune practici pentru utilizarea zgurii de furnal răcite în aer ca agregat grosier în îmbrăcămînțile din beton*, elaborat pentru Administrația Federală de Autostrăzi, Washington prin Raportul nr. FHWA-HIF-12-009 [27]. În comparație cu agregatele naturale, agregatele din zgură au principalele caracteristici diferite: greutate specifică mai mică, porozitate și absorbție de apă mai mare, angularitate crescută [71]. Caracteristicile și proprietățile agregatelor grosiere din zgură de furnal

răcită în aer (ACBFS), trebuie luate în considerare în etapele de proiectare, de punere în operă și de exploatare pentru a evalua și estima performanțele îmbrăcăminților pe termen lung, dar și pentru a gestiona riscurile care îl prezintă acest tip de agregate [27], [74].

Compoziția chimică: Compoziția chimică a agregatele de tip (ACBFS) este alcătuită din aproximativ 95% oxizii de calciu (CaO), siliciu (SiO₂), aluminiu (Al₂O₃) și magneziu (MgO), iar restul, de 5%, constă în sulf, mangan, fier, titan, fluor, sodiu și potasiu, [75]. În funcție de compoziția materiei prime, temperatura de fuziune și viteza de răcire a zgurii, se formează o varietate de minerale (melilita, wollastonita, oldhamita, silicat dicalcic, rankinită, merwinită, anortită, monticelită, spinel, periclază, olivină, sticlă). Cel mai răspândit mineral găsit în (ACBFS) este melilita, care este o soluție solidă între mineralele izomorfe gehlenită (2CaO · MgO · 2SiO₂) și akermanită (2CaO · Al₂O₃ · SiO₂) [27].

Caracteristicile chimice ale agregatelor tip (ACBFS) care afectează amestecul de beton rutier: Din punct de vedere al caracteristicilor chimice, constituenții care afectează stabilitatea volumetrică a zgurii de furnal provin din dezintegrarea fierului și a silicatului dicalcic. Lipsa de soliditate a fierului poate fi îngrijorătoare dacă se utilizează agregate din zgură stocată, oxizii de fier parțial reduși din zgură se oxidează și apare reacția expansivă determinând dezintegrarea particulelor (ACBFS). Soliditatea particulelor de tip (ACBSF) poate fi slăbită datorită unei inversiuni de fază de la forma beta la forma gama în timpul răcirii, inversarea de fază este finalizată în câteva zile pe măsură ce zgura se răcește și nu ar trebui să mai aibă influență asupra stabilității volumetrică, [76]. Reacția expansivă și dezintegrarea particulelor (ACBFS) pot să apară atunci când conținutul de oxid feros din zgură este peste 3% și cel puțin 1% de sulf total (S) [54]. Potențialul dizolvării excesive a sulfurii de calciu trebuie redus la minimum prin limitarea conținutului total de sulf la maxim la 2,0 % și procentul maxim de sulfați solubili în acid la max. 0,5 % [77]. Sulfura de calciu (CaS) (denumită frecvent ca oldhamită) rezultă ca urmare a reacției sulfurului din combustibilul de coals cu calciul din dolomitul sau din calcarul utilizat ca agent de flux. Sulfura de calciu este solubilă în mediul cu pH ridicat prezent în beton, aceasta poate duce la formarea etringitei secundare în apropierea golurilor de aer antrenat. Etringita secundară afectează

performanța îmbrăcăminților din beton expuse la alternanțe de uscat-umed [27], [78].

Caracteristicile fizice ale agregatelor tip (ACBFS) care afectează amestecul de beton rutier: Proprietățile fizice ale agregatele tip (ACBFS) sunt influențate de procedeul de solidificare. Agregatele fine au densitatea similară cu nisipul natural iar agregatele grosiere au densitatea cu 20% mai mică decât agregatele naturale ceea ce poate afecta proporționarea amestecului de beton [28]. Agregatele grosiere au textura de suprafață unghiulară, variată de la dur și veziculară (poroasă) până la sticlos (neted) cu fragmentări concoidale [79]. Absorbția apei este mai mare, poate ajunge până la 8% la agregatele din zgură comparat cu agregatele naturale la care limita superioară este de 4%. Capacitatea mai mare de absorbție este legată de natura poroasă a particulelor mai mari de (ACBFS), dar și de alți factori, cum este suprafață specifică și rezistență mai mare la îndepărtarea apei reținute în golurile de la suprafața superficială. Institutul American de Beton ACI 213R-03 [80] recomandă saturația agregatului poros și umectarea adecvată a stocurilor de agregare, precum cele de tip (ACBFS), pentru a minimiza absorbția de apă din pasta de ciment care conduce la contracția timpurie și reduce rezistența la îngheț-dezghet. Datorită capacității de absorbție crescută a agregatelor tip (ACBFS), la preparare nu trebuie să fie utilizate mai uscate decât starea cu suprafață saturată uscată (SSD) pentru a preveni o lucrabilitate redusă, rigidizare rapidă, încetinirea hidratării cimentului și apariția fisurilor de contracție în beton. Utilizarea aditivului reducător de apă și un aditiv antrenor de aer pe bază de rășini naturale poate ajuta la realizarea unei lucrabilități corespunzătoare și a unui sistem de distribuție a aerului adecvat. Un conținut de aer oclus va fi stabilit în funcție de clasa de expunere și dimensiunea maximă a agregatelor între 5÷7%. De asemenea, agregatele grosiere tip (ACBFS) au o rezistență mai mică la uzură, coeficientul Los Angeles este mai mare la agregatele din zgură cu limite între (35-45)% comparativ cu agregatele naturale la care valorile sunt cuprinse între (15-45)%. Folosirea agregatului grosier tip (ACBFS) este recomandat doar pentru îmbrăcămințile realizate din beton simplu cu obligativitatea armării rosturilor transversale pentru a prelua transferul de sarcină între dalele adiacente, [27]. Caracteristicile fizice și chimice ale agregatelor concasate din zgură de furnal (ACBS) utilizate în programul

experimental realizat, determinate în acord cu SR EN 12620 se găsesc în capitolele 5,6 și 11 ale acestei lucrări.

1.6 Apa utilizată la prepararea betoanelor

Apa de amestecare la prepararea betonului constă din apa liberă de pe suprafața agregatelor și apa adăugată. Este de dorit să se utilizeze apă potabilă (potrivită consumului uman) sau cea utilizată la spălarea stațiilor de betoane, iar în cantități mici se poate utiliza și apă reciclată. Apa nepotabilă și apa reciclată trebuie testată pentru ca să nu conțină impurități care pot afecta negativ rezistența și timpul de priză a betonului. Specificațiile tehnice pentru apa utilizată la prepararea betoanelor sunt în acord cu SR EN 1008:2003 [81]. Densitatea apei trebuie testată sau monitorizată cu un hidrometru. Limitele chimice recomandate pentru apa de amestecare se referă la conținutul de: clorură, sulfat, alcalii și părți solide. Amestecurile de beton trebuie să conțină suficientă pastă de ciment pentru a acoperi suprafața agregatelor și pentru a face amestecul lucrabil. Însă prea multă apă reduce durabilitatea betonului pe termen lung. Conținutul de apă trebuie ajustat în funcție de starea reală de umiditate a agregatelor [6].

1.7 Aditivi pentru prepararea betoanelor

Adaosurile chimice, cunoscute sub denumirea de aditivi, sunt materiale adăugate în timpul amestecării betonului pentru modificarea proprietăților betonului, precum conținutul de aer, necesarul de apă și timpul de priză. Eficacitatea unui adaos depinde de mai mulți factori, proprietățile materialelor cementoase, ale apei, ale agregatelor, proporțiile materialelor din beton, timpul și intensitatea de amestecare, temperatura mediului ambiant.

1.7.1 Agenții de antrenare a aerului

Agentii de antrenare a aerului sunt cei mai frecvenți aditivi utilizați în amestecul de beton în scopul de a obține o distribuție uniformă a bulelor de aer prin pasta de ciment. Atunci când apa îngheață și își mărește volumul golurile de aer antrenat au rol de *supapă de presiune*. O antrenare adecvată a aerului va conduce la îmbunătățirea rezistențelor la îngheț-dezgeț, rezistenței la exfoliere a betonului și va

tinde să îmbunătățească lucrabilitatea betonului, reducând necesarul de apă, segregarea (manifestată prin separarea pastei de ciment din amestec sau tendința particulelor grosiere de a se separa spre exterior sau de a se scufunda) și mustirea betonului (manifestată prin ridicarea la suprafață a unei părți de apă din amestec) [6]. Conținutul de aer oclus din betonul proaspăt se măsoară prin teste precum ASTM C231, iar la noi în acord cu SR EN 12350-7 [82]. Mecanismul agenților de antrenare a aerului (AEA) este de stabilizare a milioanele de bule mici de aer în beton prin acțiunea de amestecare a materialelor la prepararea betonului. În timpul amestecării moleculele (AEA) sunt atrase la un capăt de apă și la celălalt capăt de aer realizând reducerea tensiunii superficiale dintre interfața aer-apă, Figura 1-14a). Sistemul bulelor de aer este influențat de dozajul aditivului, impurități de carbon din materialele suplimentare cementoase sau agregate și combinații cu alte adaosuri chimice. De exemplu, în amestec cu adaosuri de reducere a cantității de apă vor rezulta bule de aer cu dimensiuni mai mari. De aici apar și efectele secundare, pentru fiecare 1% aer antrenat, betonul va pierde aproximativ 5% din rezistența la compresiune [6]. În acord cu SR EN 206-1 [10] bulele de aer antrenat au dimensiuni între (10÷300) μm.

1.7.2 Adaosuri chimice reducătoare de apă

Adaosuri chimice reducătoare de apă sunt adăugate în compozițiile de beton pentru a reduce cantitatea de apă din amestec în condițiile de menținere a lucrabilității betonului în domeniul plastic., având specificațiile tehnice în acord cu SR EN 934-2 [83]. Aditivii reducători de apă (WR) influențează indirect rezistența betonului. Rezistența la 28 de zile poate crește cu 10% la un beton cu adaos reducător de apă (WR) comparativ cu un beton fără un astfel de adaos, în condițiile de menținere a conținutului de ciment, de aer antrenat și de tasare.

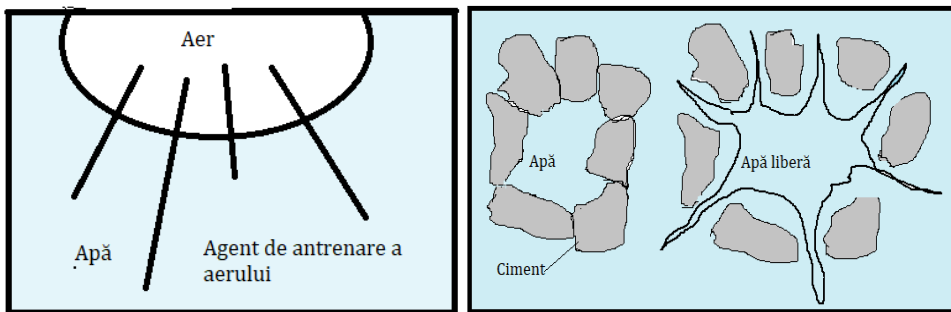


Figura 1-14. a) Mecanismul agenților de aer antrenat (AEA); b) Mecanismul aditivilor reducători de apă (WR) [6]

Generația nouă de aditivi puternic reducători de apă (superplastifianți) de tipul F sau G, în acord cu ASTM C494 [84] sunt pe bază de policarboxilații (rezultați din copolimeri sintetizați din monomeri) și se pot ajusta pentru anumite aplicații și diferite setări a timpului de priză. Mecanismul de funcționare a aditivilor reducători de apă este dispersia, prezentat în Figura 1-14b) [6].

Particulele de ciment în contact cu apa se lipesc între ele formând un lanț care înconjoară apa. Polimerii se atașează pe suprafața particulelor de ciment și le separă, astfel că apa prinsă este eliberată și pusă la dispoziție pentru hidratare. În unele cazuri s-au înregistrat efecte secundare ale utilizării aditivului pe bază de policarboxilați precum creșterea aerului antrenat. Aditivii reducători de apă de tipul D, E și G (clasificare în acord cu ASTM C494) afectează comportamentul de setare a prizei betonului. Utilizarea aditivilor reducători de apă, în exces, pot întârzia sau împiedica priza betonului.

1.7.3 Adaosuri chimice modificatoare de priză

Adaosurile chimice modificatoare de priză sunt folosite pentru a controla, respectiv a întârzia sau accelera timpul de priză și pentru dezvoltarea rezistenței inițiale în funcție de temperatura mediului (cald sau rece), pentru a controla ciclurile de producție, să permită distanțe de transport mai lungi, pentru a realiza mai rapid o construcție sau pentru a compensa câștigul de rezistență dezvoltat mai lent în cazul betoanelor realizate cu materiale cementoase suplimentare. Mecanismul aditivilor de întârziere a prizei constă în acoperirea particulelor de ciment pentru a împiedica sau încetini hidratarea, însă după un timp stratul de protecție slăbește și se reia hidratarea. Efecte secundare raportate la

aditivii întârziatori de priză: pot acționa ca reducători de apă, pot crește conținutul de aer antrenat, pot crește riscul de apariție a fisurilor din contracție, pot interfera cu perioada de tăiere a rosturilor, reduc dezvoltarea rezistenței la vârste mici și pot crește riscul de mustire a betonului. Nu toți aditivii întârziatori de priză au fost eficienți în extinderea timpului de turnare și menținerea consistenței în cazul unor temperaturi ridicate [6], [85]. Aditivii acceleratori de priză care conțin clorură de calciu accelerează preferențial fazele de hidratare a silicaților mai întâi alitul (C₃S) și belitul (C₂S) urmate de celelalte faze.

1.7.4 Alte adaosuri chimice

În compoziția betoanelor pot fi utilizate și alte adaosuri chimice în scopul atenuării reacției alcalii-silice (ASR), pentru reducerea contracției și cu rol de inhibitori de coroziune.

2 Caracteristicile fizico-mecanice ale betoanelor (BcR)

2.1 Permeabilitatea

Permeabilitatea reprezintă capacitatea lichidelor de a pătrunde în betonul întărit. Aceasta este o caracteristică diferită de porozitate care măsoară volumul porilor din beton. Permeabilitatea are o importanță semnificativă pentru durabilitate, deoarece printr-o serie de mecanisme, permite transportul și pătrunderea în beton a substanțelor chimice dăunătoare betonului. Expansiune apei rezultată din îngheț permite levigarea hidroxidului de calciu Ca(OH)_2 și a transportului ionilor dizolvați. Pătrunderea sărurilor în beton determină reacții cu compuși de hidratare a cimentului și formează compuși expansivi precum oxiclorigura de calciu (CaOCl_2). Sărurile cristalizează la expunerea repetată a suprafeței umed-uscată sau exercită presiune osmotică în timpul ciclurilor de îngheț-dezghet. Pătrunderea alcaliilor, în soluție, conduc la reacțiile alcaline ale agregatelor, iar pătrunderea sulfatilor atacă compușii aluminosi. Pătrunderea dioxidului de carbon va reduce valoarea pH-ului ca urmare a scăderii alcalinității determinând coroziunea din carbonatare, iar penetrabilitatea ionilor de clor în beton în prezența oxigenului și a umidității va conduce la coroziunea barelor de armătură.

Factorii principali care afectează permeabilitatea sunt porozitatea crescută și calitatea slabă a zonei interfaciale între pasta de ciment și agregate. O porozitate redusă cu un conținut mic de pori conectați conduce la o permeabilitate redusă [6]. Raportul apă-ciment scăzut, compactarea, tratarea adecvată a betonului proaspăt, utilizarea unor proporții optime de materiale cementoase suplimentare conduc, de asemenea, la o permeabilitate scăzută. Toate acestea arată că rezistența betonului nu reprezintă singurul indice pentru permeabilitatea betonului.

2.2 Porozitatea

La prepararea betonului prin amestecarea componentelor, particulele de ciment sunt împrăștiate în volumul total de materiale, iar în contact cu apa au loc reacții între mineralele componente și soluția ce se formează în jurul particulelor de ciment. Dispersarea cât mai uniformă a particulelor de ciment este îmbunătățită de superplastifiantii utilizați, [86]. Spațiile libere umplute cu apă în pasta de ciment proaspătă sau a spațiilor rezultate din reacția particulelor de ciment din timpul stadiilor de hidratare a pastei de ciment reprezintă fracțiunea din volumul total neocupat de materie solidă și este cunoscută sub denumirea de porozitate. Porozitatea se exprimă prin raportarea volumului de pori la volumul total al materialului studiat. Pasta de ciment întărită aflată în stadiu de răcire este constituită din hidrații diferiților compuși sub formă de gel, din cristale de hidroxid de calciu Ca(OH)_2 , alți componenți minori, ciment nehidratat și spații libere rămase din procesul de hidratare. O cantitate suficientă de apă de amestecare și tratarea betonului în aer umed pe o perioadă cât mai lungă, conduc la creșterea gradului de hidratare [87]. Continuarea reacțiilor și dezvoltarea produșilor de hidratare în stadiul de densificare au ca rezultat o masă rezistentă și solidă. În acest stadiu se iau două măsuri care contribuie la asigurarea performanțelor îmbrăcăminților rutiere pe termen lung. Este important să fie menținută protecția îmbrăcăminții cu peliculă antievaporantă minim 72 de ore pentru a reduce pierderea de umiditate din beton și este interzisă circulația traficului sau a echipamentelor pentru construcții pe o perioadă cuprinsă între (10÷25) de zile stabilită în funcție de tipul de ciment utilizat și în funcție de temperatura atmosferică. Procesul de densificare va continua atâta timp cât cimentul își continuă hidratarea. Reducerea excesivă a cantității de apă poate să crească cantitatea de ciment nehidratat. În practica de zi cu zi se constată că prin scăderea cantității de apă, respectiv a raportului A/C rezistențele mecanice cresc. Cimentul rămas nehidratat în procesul de densificare nu slăbește rezistența betonului, deoarece gelul înconjoară particulele de ciment nehidratat în mai multe straturi subțiri [87], [88]. În primul stadiu de hidratare predomină porii capilari, însă pe măsură ce hidratarea progresează, volumul porilor capilari scade și crește volumul porilor din gel. Porii capilari, formează un sistem interconectat răspândit neregulat prin toată masa pastei [13], [87] cu dimensiunea de la 50 nm și până la 5 μm [89]. Porozitatea gelului reprezintă aproximativ 28% din masa acestuia și conține o cantitate

considerabilă de apă, [13]. Dimensiunile porilor de gel (intra și inter C-S-H) sunt mult mai mici decât ale porilor capilari, între (aprox. $1 \div 50$ nm) și de ceea sunt denumiți ca și micropori. Spațiile cu dimensiuni mai mari de $10 \mu\text{m}$ fiind considerate aer antrenat, [89] distribuit uniform pentru a susține pierderea redusă a rezistenței în timpul ciclurilor de îngheț-dezgeț. Porii de gel absorb apă chiar și la valori foarte scăzute ale umidității mediului ambiant [13],[86] datorită proprietății higroscopice a pastei de ciment și prezenței porilor submicroscopici.

Apa reținută în cimentul hidratat se prezintă sub trei categorii. Apă liberă (apa reținută în capilare) și apa combinată chimic și fizic (cu care se formează compușii de hidratare). Pe lângă cele două categorii cunoscute este prezentă și cea de a treia, denumită apă de gel, care la rândul ei poate fi sub formă de apă absorbită (reținută datorită forțelor superficiale ale particulelor de gel) și sub formă de apă zeolitică sau interstițială (reținută între suprafețele plane ale cristalelor formate). Nanostructura C-S-H a făcut obiectul multor cercetări și au fost sugerate modele care diferă de la coloidal la inter-strat-gel. Primul model propus de Powers și Brownyard în 1947, descrie structura C-S-H ca model coloidal în care rezistența gelului este atribuită în principal forțelor lui Van der Waals care contribuie la legătura intermoleculară și de coeziunea dată de legăturile chimice [15], [88]. Structura probabilă a silicaților de calciu hidratați C-S-H a fost prezentată în anul 1968 de către Feldman și Sereda [15], [90].

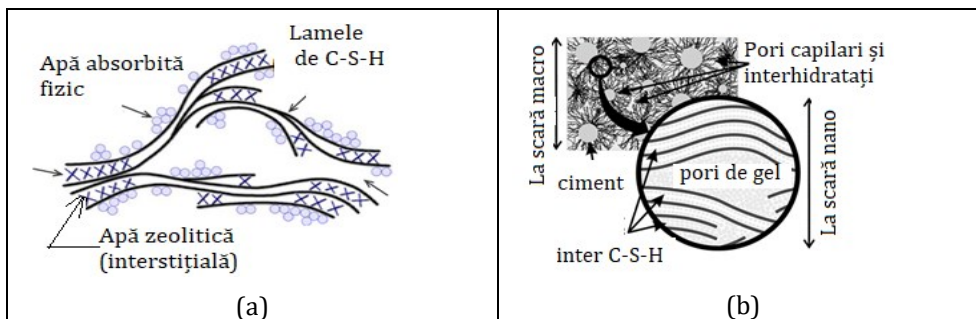


Figura 2-1. Structura C-S-H: a) modelul Sierra[91]; b) modelul Radoslaw [92]

În anul 1984, Sierra [91], [93] aduce completări, considerând coeziunea dintre materiale ca fiind o textură de natură solidă, prin legături de tip sudură între lamele sau legături între particule, coeziunea fiind asigurată prin structurarea apei dintre lamelele de

hidrosilicați, ca în Figura 2-1a). Conectivitatea rețelei inter-strat-gel, a porilor interhidratați și a golurilor capilare este arătată în anul 2014 de către Radoslaw și colab. ca în Figura 2-1b) [92].

Factorii de care depinde rezistența pastei de ciment întărite sunt porozitatea și compoziția acesteia, care în perioada de întărire este compusă din particule nehidratate, produse de hidratare formate de silicați hidroxizi de calciu și aluminați de calciu hidratați care participă în mod diferit la dezvoltarea rezistențelor mecanice, care au fost descrise în această lucrare la subcapitolul 1.1.3 Hidratarea cimentului Portland.

2.3 Rezistența la îngheț-dezghet

Datorită ciclurilor repetate de îngheț-dezghet se produc în betonul rutier o serie de degradări: deteriorarea din îngheț, atacul chimic al sărurilor, fisurarea (D-cracking) și dezintegrarea agregatelor (pop-out). Deteriorarea din îngheț a pastei de ciment se datorează expansiunii apei din porii capilari, provocând fisuri adânci în beton pe măsură ce apa îngheață. Produsele chimice de dezghetare agravează degradările din îngheț și produc fisuri, exfoliere și dezintegrare, prin desprinderea agregatelor de la suprafață. Dacă agenții de dezghetare sunt higroscopici vor absorbi apa din atmosferă la temperatura mediului ambiant și vor crește saturația betonului la contactul cu aceștia. Acest lucru este deosebit de vizibil la rosturi, zone în care soluțiile de dezghetare tind să se localizeze declanșând deteriorarea dalelor. Agenții chimici de dezghetare la care predomină clorura de magneziu ($MgCl_2$) sau clorura de calciu ($CaCl_2$) conduc la reacții cu hidroxidul de calciu ($Ca(OH)_2$) formând compuși expansivi, precum oxiclorigura [6], [94]. Expansiunea produsă din oxiclorigura poate fi de trei ori mai mare decât expansiunea rezultată din înghețul apei, mecanism de degradare mai puțin cercetat până în prezent. Degradările apar mai întâi în zona rosturilor sub forme de *umbre*, iar în timp apar fisuri, betonul se fărâmițează și se dezintegrează, ca în Figura 2-2a). Soluțiile de dezghetare utilizate cu scopul de prevenire, înainte de declanșarea unui eveniment cu precipitații sunt cele mai periculoase deoarece rămân la concentrația maximă până ce se diluează datorită precipitațiilor. Tot din utilizarea sărurilor de degivrare se produce fenomenul de exfoliere (sau scalare la suprafață), degradări ca în Figura 2-2b).

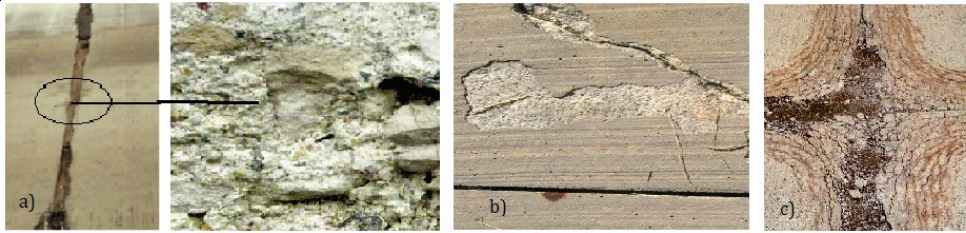


Figura 2-2. a) Deteriorarea betonului la rosturi; b) Exfolierea; c) Fisurarea sub forma de "D-cracking"

Un alt tip de degradare din fenomenul de îngheț-dezghet îl reprezintă apariția fisurărilor sub formă de (D) în zona rosturilor ca în Figura 2-2.c). Aceste tipuri de fisuri apar atunci când agregatele utilizate permit cu ușurință absorbția apei, creșterea saturației și dificultatea de uscare a lor datorită tensiunilor de la suprafață din porii pereților (ex. agregate calcaroase sau din zgură de furnal). Pentru a întârzia acest tip de degradare se recomandă reducerea dimensiunii la maxim a acestor tipuri de agregate.

Rezistența betonului la îngheț poate fi îmbunătățită prin asigurarea unui sistem de distribuție a golurilor de aer uniform care să permită extinderii volumului de apă înghețată. Execuția unui sistem de drenaj pentru evacuarea apei de la baza îmbrăcămînții rutiere poate preveni saturația critică a betonului. Însă raportul apă-ciment (A/C) și includerea SCM-urilor pot contribui la încetinirea penetrării lichidelor în beton și ca urmare a degradărilor din îngheț-dezghet [6].

2.4 Rezistența la compresiune și încovoiere

Cele mai frecvente solicitări la îmbrăcămînțile rutiere sunt din încovoiere, acestea introduc solicitări de compresiune la partea superioară și solicitări de tracțiune/întindere la partea inferioară a dalei din beton. Cu toate că rezistența la încovoiere reprezintă doar aproximativ 10% din rezistența la compresiune majoritatea defecțiunilor din dale se datorează efortului din încovoiere. Ca urmare rezistența la încovoiere (denumită și modul de rupere) este utilizată pentru stabilirea clasei betonului rutier și în proiectare pentru a dimensiona grosimea dalei în funcție de încărcările din trafic. Un alt parametru decisiv pentru betonul rutier este rezistența la oboseală sau capacitatea betonului de a rezista la încărcări și descărcări repetate.

Solicitarea la oboseală repetată va conduce mai întâi la microfisuri care apoi se propagă cu fiecare ciclu de încărcare-descărcare spre macrofisuri. Transmiterea fisurilor se realizează cel mai repede prin golurile de aer din matricea betonului. Conținutul de aer din beton poate să aibă dimensiuni mari, rezultat din compactare insuficientă sau poate să fie pori capilari rămași după evaporarea apei în exces din pasta de ciment. Conținutul de aer din beton și implicit rezistența betonului mai este influențat de rata de hidratare a cimentului. Hidratarea începe odată ce cimentul intră în contact cu apa și încetează atunci când apa devine insuficientă în matricea de beton, perioadă în care și rezistența betonului crește. Ca urmare stabilirea cantității de apă este foarte importantă, pe de o parte scăderea raportului apă-ciment (A/C) conduce la creștere a rezistențelor mecanice, pe de altă parte este necesară o cantitate suficientă de apă pentru a hidrata cât mai multe particule de ciment [6].

2.5 Rezistența la uzură

Rezistența la uzură reprezintă capacitatea betonului de a rezista la uzura suprafeței produsă de anvelopele vehiculelor. Suprafața îmbrăcăminții trebuie să-și mențină o textură adecvată pentru controlul vehiculului la derapaj. Pentru a obține o rezistență corespunzătoare la uzură, betonul trebuie să aibă o rezistență ridicată la compresiune, să conțină agregate grosiere dure și rezistente la fragmentare, să fie asigurată o finisare adecvată a suprafeței și condiții de întărire corespunzătoare. Prezența agregatelor fine prin combinare cu produsele chimice de degivrare crește acțiunea de frecare dintre anvelope și îmbrăcămintea rutieră și scade rezistența la uzură [8], [66].

2.6 Rezistența la atacuri chimice

Cele mai des întâlnite forme de coroziune chimică sunt levigarea compușilor de hidratare a cimentului și acțiunea pe care o exercită sulfații din sol sau din apă. Cantitățile excesive de sulfați din sol sau din apă, după o anumită perioadă, atacă și distrug structura îmbrăcăminții din beton. Solurile pot conține alcalii, sulfații de magneziu și de calciu, iar apa subterană din aceste soluri devine o soluție sulfatică. Sărurile solide nu atacă betonul, dar când sunt în soluție ele pot reacționa cu pasta de ciment întărit [13]. Sulfații deteriorează betonul din reacția cu Ca(OH)_2 și cu aluminatul tricalcic (C_3A) din pasta de ciment întărită.

Infiltrarea și depunerea sărurilor duc la expansiunea betonului, rezultând crăpături și dezintegrări ale structurii. Datorită depunerilor de sare atacul sulfaților este mai sever pentru betonul expus la cicluri repetate de umed-uscăt decât dacă ar fi expus continuu într-un mediu umed. Măsurile preventive atacului sulfatic sunt de reducere a permeabilității și alegerea unui ciment rezistent la acțiunea sulfaților, unul dintre acestea fiind și cimentul Portland cu zgură de furnal [6].

2.7 Reactivitatea alcalii- silice

Între constituenții activi ai silicei din agregate și alcaliile din ciment pot rezulta reacții chimice. Aceste reacții apar atunci când compușii de silice din agregat devin solubili într-un mediu cu conținut ridicat de alcalii din soluția de pori, fiind facilitate de umiditatea mediului. Reacțiile chimice încep cu atacul asupra mineralelor silicioase din agregat de către hidroxizii alcalini derivați din alcalii, oxidul de sodiu (Na_2O) și oxidul de potasiu (K_2O) aflate în ciment. În timp, produsul de dizolvare se combină cu calciul și formează un silicat alcalin gelatinos [6] care produce alterarea marginilor particulelor de agregat și are o capacitate practic nelimitată de umflare deoarece poate absorbi apa din betonul umed. Gelul format la care se face referire sub formă de (ASR) este înglobat în pasta de ciment ce îl înconjoară formând o presiune internă rezultând expansiunea și dezintegrarea pastei de ciment [13]. Pentru a se forma gelul (ASR) trebuie să existe simultan trei condiții: forme reactive de silice în agregat, conținut ridicat de alcalii din soluția de pori și umiditate suficientă. Ca urmare printr-o bună proiectare și selectare adecvată a materialelor se poate evita reacția (ASR). Pentru a controla reacția (ASR) se recomandă utilizarea agregatelor non-reactive și a unui dozaj optim de materiale cementoase suplimentare, preferabil cu un conținut scăzut de calciu precum: cenușa zburătoare (din clasa F), zgura de furnal granulată și măcinată și puzzolanele naturale. Reacția (ASR) este rară, poate dura câțiva ani pentru a se dezvolta, însă este extrem de dăunătoare deoarece nu există nici o modalitate de a o atenua decât respingerea utilizării agregatelor reactive [6].

3 Ipoteze de lucru/obiective în proiectarea amestecurilor de beton rutier

3.1 Aspecte generale de proiectare a betonului rutier

Proiectare amestecului de beton reprezintă procesul de stabilire a parametrilor compoziției, calculul proporțiilor materialelor componente, efectuarea încercărilor preliminare urmată de recalcularea componentelor în funcție de rezultatele obținute la încercările preliminare, pentru ca ulterior, compozitul să răspundă simultan unui anumit număr de cerințe direct legate de protecția mediului, durabilitate și economie.

Principalii factori care asigură durabilitatea betonului rutier sunt: lucrabilitatea adecvată, utilizarea agregatelor stabile, contracție limitată, rezistențe mecanice peste cele minime admise, capacitatea de a rezista la îngheț-dezghet, la atacuri chimice și la uzură din factorii de mediu generați în condițiile de exploatare. Înainte de proiectarea compozițiilor de beton rutier este necesară testarea materialelor componente pentru a elimina riscurile de incertitudine [6], legate de caracteristicile acestora.

Consistența (măsură a lucrabilității): Lucrabilitatea amestecului de beton este proprietatea care determină capacitatea de amestecare, punere în operă și compactarea corespunzătoare, permițând finisarea unui produs fără segregare.

Rezistența: Aceasta este una dintre cele mai importante caracteristici ale unui amestec de beton și cea mai cunoscută proprietate a betonului. Este măsurată folosind rezistența la compresiune, după ce betonul a atins vârsta de 28 de zile după turnare. În cazul de betoanelor rutiere rezistența caracteristică față de care se stabilește clasa betonului este rezistența la întindere prin încovoiere.

Raportul apă-ciment sau apă-liant: Raportul A/C sau A/L pentru un amestec de beton este definit ca relația dintre greutatea apei și a cimentului, respectiv greutatea liantului. Această caracteristică are o relație invers proporțională cu rezistența amestecului.

Durabilitatea: Un amestec de beton bine proiectat și în conformitate cu cerințele de expunere severe nu va prezenta niciun semn de degradare pe o durată lungă de exploatare.

Densitatea: O densitate mare conferă proprietăți bune de durabilitate (impermeabilitate, rezistență la îngheț-dezghet, rezistența la

uzură, rezistență la penetrarea clorurilor, rezistență din coroziune datorată carbonatării).

Eliberarea de căldură: Alegerea cimentului potrivit pentru cantitățile de beton cu aplicabilitate precisă se face luându-se în considerare degajarea căldurii sub reacția chimică din timpul hidratării cimentului, fără a se produce fisuri sau contracții.

Înainte de punerea în opera a unui beton rutier care să corespundă unor cerințe date este esențial să fie testate serii de probe în laborator. Trebuie stabilit un raport apă/ciment (A/C) corespunzător clasei prescrise de beton.

Proporționarea unui amestec de beton se face prin calcul, dată de testarea diferitelor amestecuri în timp. Proporțiile de materiale din beton sunt exprimate pe baza masei materialelor pe unitatea de volum, unitatea de măsură fiind metru cub. Proporționarea prin calcul a materialelor se poate realiza utilizând metoda procentului de goluri și metoda volumului absolut. Într-o rețetă de beton volumul de agregate este mai mare decât al pastei de ciment, agregatele fiind mai stabile chimic și dimensional decât pasta de ciment care poate influența apariția fisurilor din contracții ale betonului.

Metoda procentului de goluri presupune că necesarul de pasta dintr-un amestec să fie stabilit în funcție de volumul de goluri al amestecului total de agregate [6]. Un supliment de pastă de ciment este necesară pentru separarea particulelor de agregate și obținerea lucrabilității stabilite. Cercetările legate de proiectarea compozițiilor de beton arată că volumul de pastă de ciment trebuie să fie cuprins de la 1.5 până la 1.75 ori mai mare decât volumul de goluri al amestecului total de agregate.

Metoda volumului absolut admite că volumul betonului compactat este egal cu suma volumelor absolute ale tuturor componentelor luând în considerare valoarea densității absolute pentru fiecare material utilizat în amestec (agregate, liant, apă) [6].

3.2 Proiectarea betoanelor rutiere (BcR-S)

Pentru proiectarea compozițiilor de betoane rutiere cu adaos de zgură de furnal s-a adoptat metodologia prevăzută în NE 014:2002 [11] pentru compozițiile fără zgură și CD 147 :2002 Normativ pentru execuția betoanelor rutiere cu adaos de cenușă de termocentrală [95] pentru compozițiile cu zgură de furnal. Pentru calculul cantităților de materiale

s-a utilizat metoda volumului absolut. Condițiile de referință pentru caracteristicile betonului rutier au fost stabilite pentru îmbrăcămînți rutiere realizate într-un singur strat realizate în sistem de cofraje fixe, în acord cu NE 014:2002, Normativ pentru executarea îmbrăcămînților rutiere din beton de ciment în sistem de cofraje fixe și glisante [11].

Clasele de betoane rutiere stabilite în acord cu NE 014:2002 conform Tabelului 3-1.

Tabelul 3-1. Clase de betoane rutiere în funcție de clasa de trafic pentru îmbrăcămînți realizată într-un singur strat [11]

Denumirea lucrărilor	Clasa de trafic (Număr de osii standard cu sarcina de 115kN/zi)				
	Foarte Greu 550...1500	Greu 150..550	Mediu 50..150	Usor 20..50	Foarte usor sub 20
Drum de interes național, județean și local, străzi	BcR 5.0	BcR 5.0	BcR 4.5	BcR 4.0	BcR 4.0
Ranforsarea sistemelor rutiere existente la drumuri	BcR 5.0	BcR 5.0	BcR 4.5	BcR 4.0	BcR 4.0
Drumuri de exploatare	BcR 5.0	BcR 5.0	BcR 4.5	BcR 4.0	BcR 4.0
Drumuri și platforme industriale	BcR 4.5	BcR 4.5	BcR 4.0	BcR 4.0	BcR 4.0

Caracteristicile betonului proaspăt destinat punerii în operă, în sistem de cofraje fixe, sunt specificate în Tabelul 3-2.

Tabelul 3-2. Caracteristicile betonului proaspăt pentru punerea în operă în sistem de cofraje fixe. [11]

Caracteristica betonului	Valoare	Metoda de încercare
Consistența prin metoda tasării (mm)	30±10	SR EN 12350-2
Grad de compactare	1.15.....1.35	SR EN 12350-2
Densitate aparentă (kg/m ³)	2400±40	SR EN 12350-6
Conținut de aer oclus (%)	3.5±0.5	SR EN 12350-7

Caracteristicile betonului întărit destinat punerii în operă în sistem de cofraje fixe, sunt specificate în Tabelul 3-3.

Tabelul 3-3. Caracteristicile betonului întărit, [11]

Caracteristicile betonului rutier	Clasa betonului rutier		
	BcR5.0	BcR4.5	BcR4.0
Rezistența caracteristică la încovoiere la 28 zile pe prime de 150x150x600 mm (MPa)	5.5	4.9	4.4
Rezistența la compresiune la 28 zile pe cuburi cu latura de 150 mm (MPa)	50	44	39
Gradul de gelivitate al betonului determinat conform, SR 3518:2009	G100	G100	G100

Dozajele de ciment, aditivi și raportul de apă-ciment, vor respecta limitele din Tabelul 3-4.

Tabelul 3-4. Limite stabilite pentru dozajul de ciment, raport apă/ciment și aditivi, [11]

Materiale	Clasa betonului rutier		
	BcR5.0	BcR4.5	BcR4.0
CEM I 42.5R(kg/m ³)	350	330-350	330-340
Raport Apă/Ciment, max.	0.45 pentru betoane cu granulozitate continuă		
Aditivi plastifianți și aditivi antrenori de aer	% din masa cimentului conform specificațiilor tehnice de produs		

Sorturile agregatelor naturale pentru îmbrăcămînți realizate într-un singur strat sunt indicate în Tabelul 3-5.

Tabelul 3-5. Sorturile agregatelor utilizate pentru un singur strat, [11]

Îmbrăcămînți executate	Natura agregatului	Sorturile agregatelor	Granulozitatea agregatului total
Într-un strat	Nisip natural	0-4	0-25
	Agregat din zgură concasat	0-4	
	Pietriș concasat	4-8	
	Criblură	8-16 și 16-25	

Limitele zonei de granulozitate a agregatului total au fost stabilite în acord cu NE 014 :2002 pentru agregate cu granulozitate continuă și cu dimensiuni cuprinse între 0÷25 mm. Limitele pentru dimensiunile sitelor intermediare prevăzute în SR EN 933-1:2012 [96] au rezultat din interpolare.

La proiectarea compoziției de beton rutiere s-au parcurs următorii pași:

Pasul 1: Pentru clasa de beton rutier aleasă corelat cu domeniul de aplicabilitate, ca în Tabelul 3-1, se alege dozajul de ciment din Tabelul 3-4 și raportul apă/ciment caracteristic clasei de beton. Cu aceste valori se calculează cantitatea de apă totală (A') în care a fost inclusă și cantitatea de aditivi cu următoarea relație de calcul :

$$A' = C \left(\frac{A}{C}\right)_R \text{ (l/m}^3\text{)} \quad (3.1)$$

Pasul 2: Cantitatea de pulbere de zgură (S) se calculează cu relația (3.2), unde raportul zgură-ciment (S/C) s-a limitat la 0.15, similar cu CD 147 :2002.

$$S = C \frac{S}{C} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3.2)$$

Pasul 3: În calculul raportului (A/L) se ține seama și de indicele de activitate al zgurii de furnal la 28 de zile :

$$\frac{A}{L} = \left(\frac{A}{C}\right)_R \left(1 + I_A^{28} \frac{S}{C}\right) \quad (3.3)$$

Unde :

$(A/C)_R$ – reprezintă raportul apă-ciment al amestecului de referință stabilit inițial.

(A/L) – raportul apă-liant al amestecului de ciment (C) cu pulbere de zgură (S);

I_A^{28} – este indicele de activitate la 28 zile al pulberii de zgură (S) al cărei relație de calcul este raportul între rezistența la compresiune a mortarului cu proporția de 50:50 zgură-ciment (f_{cs}) și rezistența la compresiune a mortarului de referință (f_{cc}):

$$I_A = (f_{cs}/f_{cc}) \times 100, (\%),$$

Pasul 4: Dozajul de aditivi (Ad) se calculează ca procent din masa cimentului/liantului, limitat la dozajul maxim admis în prescripțiile tehnice date de producător. În rețetă, dozajul se stabilește prin încercări preliminare pentru a obține valori corespunzătoare pentru consistență și volum de aer oclus, ca în Tabelul 3-4. În funcție de tipul și dozajul de aditiv superplastifiant utilizat la betoane cu cimenturi cu adaosuri minerale, cum este în cazul zgurii, în condiții de menținere a dozajului de ciment și de lucrabilitate, se poate reduce cantitatea de apă de preparare cu 12÷30% comparativ cu compoziția martor a betonului fără superplastifianți,[91].

Pasul 5: Cantitatea de agregate în stare uscată (Ag) se calculează cu ecuația (3.4) pentru amestecul de referință și cu ecuația (3.5) pentru amestecul cu pulbere de zgură (S).

$$A_g = \rho_{ag} \left(1000 - \frac{C}{\rho_c} - A' - \%aer \times 100 \right), (\text{kg/m}^3) \quad (3.4)$$

$$A_g = \rho_{ag} \left(1000 - \frac{C}{\rho_c} - \frac{S}{\rho_s} - A' - \%aer \times 100 \right), (\text{kg/m}^3) \quad (3.5)$$

ρ_{ag} – este densitatea aparentă a agregatelor;

ρ_c – este densitatea aparentă a cimentului ;

ρ_s – este densitatea aparentă a pulberii de zgură ;

$\%aer$ – este volumul de aer oclus;

Pasul 6: Se adoptă proporțiile dintre diferite sorturi de agregate, astfel încât să se asigure o curbă granulometrică în limitele de granulozitate indicate în NE 014 :2002, cu interpolare pentru dimensiunile sitelor intermediare stabilite în SR EN 933-1:2012.

Pasul 7: Se calculează densitatea amestecului proaspăt (ρ_b) corespunzătoare compoziției inițiale, și pentru amestecul cu pulbere de zgură utilizând relațiile de calcul.

$$\rho_b = C + A' + Ag + Ad (\text{kg/m}^3) \quad (3.6)$$

$$\rho_b = C + S + A' + Ag + Ad (\text{kg/m}^3) \quad (3.7)$$

Pasul 8 : Se determină umiditatea agregatelor (W) cu relația (3.8), se calculează apa din agregate și se recalculează cantitățile de agregate umede ($A_{g \text{ umede}}$) cu relația (3.9). În cazul în care nu se utilizează agregate în stare uscată cantitatea de apă adăugată în amestec va fi diminuată cu cantitatea de apă existentă în agregate.

$$W = \left(\frac{m_u - m}{m_u} \right) \times 100 (\%) \quad (3.8)$$

$$A_{g \text{ umed}} = A_{g \text{ uscat}} \left(1 + \frac{W}{100} \right) (\text{kg/m}^3) \quad (3.9)$$

Pasul 9: Pentru stabilirea compoziției de bază necesară încercărilor preliminare se prepară un volum de beton de cel puțin 1,5 ori volumul epruvetelor utilizate. Se introduce treptat apa, mai întâi 2/3 din apa de preparare amestecată cu aditivii, pe urmă se adaugă treptat apă până la obținerea lucrabilității dorite determinându-se astfel apa utilizată în amestec. Durata de amestecare este de minim 75", socotită din momentul introducerii tuturor materialelor componente. Pentru menținerea unei lucrabilități constante, la dozaje de ciment ce depășesc 350 kg/m³ se mărește cantitatea de apă din beton cu 1 l apă la fiecare 10 kg de ciment [91].

Pasul 10: Se determinat densitatea betonului proaspăt cu ecuația (3.10):

$$\rho_b = \frac{m_1 - m}{V} (\text{kg/m}^3) \quad (3.10)$$

m_1 – masa recipientului umplut cu beton (kg)

m –masa recipientului gol (kg)

V - volumul recipientului (m³)

Pasul 11: Dacă se constată că există diferență mai mare de 20 kg/m³, între densitatea compoziției inițiale și densitatea betonului preparat conform cu C22-92 [97], se recalculază cantitatea de liant și cantitatea de agregate cu relațiile:

$$L = \frac{A}{\frac{A}{L}} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (3.11)$$

$$A_g = \frac{\rho_{bi} - \rho_{bp}}{v} - A - C - S, \quad (\text{kg/m}^3) \quad (3.12)$$

Pasul 12: Pentru verificarea rezistențelor mecanice se prepară șarje de beton de câte 60 de l din care se confecționează 3 epruvete prismatice de 150x150x600mm pentru încercările mecanice și 6 epruvete cubice de 150x150x150 mm pentru gelivitate. La vârsta de 28 de zile epruvetele prismatice se încearcă la întindere prin încovoiere și fragmentele de prisme rămase se încearcă la compresiune. Rezistența medie la compresiune obținută la încercările preliminare (f_c^1), se corectează (f_{cor}) ținând seama de rezistența efectivă a cimentului (f_{cim}^{ef}) aplicând relația (3.13).

$$f_{cor} = c x f_c^1 ; c = (1.15 \times \text{clasa cimentului}) / f_{cim}^{ef} \quad (3.13)$$

Pentru interpretarea rezultatelor se compară rezultatele rezistențelor la compresiune corectate și rezistențelor la întindere cu valorile indicate în Tabelul (3-3) și se consideră corespunzătoare dacă sunt mai mari sau cel puțin egale.

4 Metodologie de lucru pentru determinările experimentale realizate în laborator

În această lucrare metodele experimentale, caracteristicile materialelor și ale betoanelor preparate s-au raportat *la staturile, standardele și normativele în vigoare la data demarării programului experimental, în anul 2018*. Au existat și excepții, precum STASUL 2414:1991 care este inactiv și nu este actualizat pentru determinarea compactității, a absorbției apei și a porozității betonului întărit.

Pentru a evalua Indicele de activitate la 28 zile a zgurii de furnal granulate și măcinate (GGBS) pentru a optimiza substituțiile de materiale naturale cu zgură de furnal în compoziția betoanelor rutiere s-au realizat mai întâi cercetări pe compoziții de mortare de ciment cu zgură de furnal utilizând tehnicile experimentale prezentate în subcapitolul 4.1. În subcapitolul 4.2-4.3 sunt prezentate tehnicile de testare utilizate pentru a proiecta compozițiile de betoane rutiere și pentru a testa principalele caracteristici fizice și chimice ale materialelor. Metodele experimentale utilizate pentru a evalua în timp rezistența la compresiune, permeabilitate, rezistența la îngheț-dezghet, porozitatea, rezistența la uzură, modul în care betonul rutier este afectat de coroziunea inițiată de clor și de carbonatare sunt descrise în subcapitolele 4.4÷4.8.

4.1 Evaluarea Indicelui de activitate la 28 de zile și stabilirea procentelor optime de substituție a materialelor naturale cu zgură de furnal

4.1.1 Determinarea densității reale și a suprafeței specifice pe ciment și zgură de furnal

Suprafața specifică a unei pulberi este direct proporțională cu finețea de măcinare și reprezintă totalitatea suprafețelor laterale ale granulelor dintr-un gram de material. Suprafața specifică s-a determinat prin permeabilitatea aerului (metoda Blaine), în acord cu SR EN 196 - 6 [98], imagini din timpul testului sunt prezentate în Figura 4.1. Între suprafața laterală a granulelor materialului și timpul necesar unui flux

de aer să străbată materialul respectiv, se stabilește o relația (4.1) din care rezultă suprafața specifică a pulberii.

$$S = \frac{K\sqrt{n^3}}{\rho} \frac{\sqrt{t_c}}{(1-n)\sqrt{\eta}}, \quad (4.1)$$

S- suprafața specifică [cm²/g],

K- constanța aparatului pentru pulberea standard,

$$k = \frac{S_s \rho_s (1-n) \sqrt{\eta}}{\sqrt{n^3} \sqrt{t_s}} \quad (4.2)$$

S_s- suprafața specifică pentru pulberea standard (cuarț), 5100 (cm²/g),

n- porozitatea pulberii, n=0,5,

t_c- timpul în care uleiul din manometru coboară de la diviziunea 70 la diviziunea 15,

ρ- densitatea pulberii, (g/cm³),

ρ_s- densitatea pulberii standard, 2.63 (g/cm³),

η- vâscozitatea aerului în funcție de temperatura camerei, 0,001818 la temperatura de 22°C.

Densitatea reală a pulberii s-a determinat utilizând metoda picnometrului [99]. Au fost introduse 5 g de pulbere în picnometru cu un volum de 25 cm³. S-a deschis robinetul de la biuretă și s-a lăsat să se scurgă lichidul (benzină) peste pulberea aflată în picnometru. S-a închis robinetul și s-a agitat picnometrul astfel încât bulele de aer aflate între granulele de pulbere să fie eliminate. S-a continuat determinarea până când lichidul a înregistrat în picnometru nivelul gradat de 25 cm³. S-a calculat cu relația (4.3) diferența dintre volumul picnometrului și volumul de lichid scurs citit pe biuretă, iar rezultatul reprezintă volumul real al cantității de 5 g de pulbere.

$$\rho = \frac{m}{V_b - V_s} \quad (4.3)$$

ρ - densitatea pulberii (g/cm³),

m- 5g, masa pulberii,

V_b-25 cm³, volumul biuretei,

V_s- volumul de lichid scurs din biuretă,



Figura 4-1. Imagini din laboratorul UTCN cu determinarea suprafeței specifice a pulberii de zgură

4.1.2 Determinarea apei pentru pasta de consistență normală și a timpului de priză

Determinarea apei pentru consistența normală s-a efectuat prin încercări, măsurând adâncimea de pătrundere a sondei Tetmayer în pasta de ciment introdusă în inelul aparatului Vicat. S-a amestecat 300 g de liant (ciment Portland pentru primul amestec și 80% ciment cu 20% zgură pentru al doilea amestec) cu cantități de apă variind între 70 și 100 cm³. Pasta rezultată s-a introdus în inelul aparatului Vicat, peste care s-a lăsat să cadă liber sonda Tetmayer. Pasta de ciment va avea consistența normală dacă sonda pătrunde în pastă, dar se oprește la 5-7 mm deasupra bazei inelului. La fiecare amestec s-a continuat experimentul pentru a determina timpul de priză cu aparatul Vicat, însă sonda Tetmayer a fost înlocuită cu acul (montat în sistemul glisant al aparatului). Pentru a înregistra începutul prizei s-a măsurat intervalul de timp scurs din momentul netezirii pastei de ciment în aparatul Vicat și momentul în care acul Vicat s-a oprit cu 2 mm deasupra plăcii de sticlă așezată în partea inferioară a inelului tronconic. Sfârșitul prizei s-a determinat pe inelul întors cu baza în sus și s-a marcat de momentul în care acul Vicat a pătruns mai puțin de 1 mm în pasta de ciment și a lăsat urmă vizibilă în aceasta [99].

4.1.3 Densitatea, absorbția apei, compactitatea și porozitatea determinate pe mortar întărit

Densitatea aparentă a mortarului întărit a rezultat din calcul, aplicând relația (4.4), din raportul între masa epruvetei în stare naturală și volumul aparent al unui fragment de prismă rezultat după încercarea la întindere din încovoiere, metoda de încercare în acord cu SR EN 1015-11:2002/A1:2007 [100]. Fragmentele de prismă au fost tăiate cu discul la capătul rupt înainte de efectuarea măsurărilor.

$$\rho = \frac{m}{V_a} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (4.4)$$

m – masa epruvetei în stare naturală (g),

V_a - volumul aparent calculat cu lungimea laturilor măsurate (m³).

Absorbția apei (W_i) s-a determinat prin metoda imersării, conform STAS 2414-91 [101]. Epruvetele cu umiditatea naturală au fost cântărite și apoi menținute în etuvă la (105+ 5)°C până au atins o masă constantă (m_u). Epruvetele uscate s-au imersat în apă la o temperatură de (20±20°C) și s-au cântărit după fiecare 24 h de absorbție a apei până la masă constantă (m_s). Absorbția de apă s-a determinat cu relația (4.5).

$$W_i = \frac{m_s - m_u}{m_u} \times 100 \text{ (%) } \quad (4.5)$$

m_s – masa epruvetei saturate (g),

m_u – masa epruvetei uscate (g),

Compactitatea, definită ca fiind gradul de umplere a volumului aparent cu material solid, s-a determinat procentual din raportul între densitatea aparentă în stare de umiditate naturală și densitatea reală a mortarului întărit în acord cu STAS 2414-91, cu relația de calcul (4.6). Densitatea reală a mortarului s-a determinat pe mortarul mojarat, utilizând metoda picnometrului.

$$C = \frac{\rho_a}{\rho} \times 100 \text{ (%) } \quad (4.6)$$

C - compactitatea mortarului (%),

ρ - densitatea reală a mortarului întărit (g/cm³),

ρ_a - densitatea aparentă a mortarului întărit (g/cm³)

Porozitatea totală (P) care conține volumul porilor capilari (deschiși) și porilor de gel (închiși care nu comunică cu exteriorul) s-a determinat cu relația (4.7) în funcție de compactitatea (C) a mortarului întărit, conform STAS 2414-91[101].

$$P = \left(1 - \frac{C}{100}\right) \times 100 \text{ (%) } \quad (4.7)$$

4.1.4 Determinarea Indicelui de activitate la 28 de zile a zgurii de furnal și a rezistențelor mecanice.

Pentru prepararea mortarelor s-au introdus materialele în malaxor în ordinea următoare: apa și liantul care s-au omogenizat la viteză mică de 30 sec, apoi s-a adăugat treptat agregatul (în 30 sec) și s-a amestecat timp de 30 sec cu viteză mare, s-a lăsat în repaus 1 min și 30 sec și apoi s-a amestecat cu viteză mare 60 sec. Mortarul obținut s-a introdus în tipare în două straturi, după fiecare strat s-a compactat pe masa vibrantă la 60 de șocuri și s-a netezit fața mortarului în tipare. Mortarele preparate și turnate în matrițe s-au păstrat până la 7 zile în cutia de aer umed (temperatură de $20 \pm 4^\circ\text{C}$ și umiditate de peste 90%) și apoi 21 de zile în aer cu umiditatea de 65%. Încercarea la întindere prin încovoiere și la compresiune la 7 zile și 28 zile s-a realizat în acord cu SR EN 1015-11:2002/A1:2007 [100].

Rezistența la încovoiere s-a obținut prin raportarea momentului maxim încovoiator la modulul de rezistență al secțiunii.



Figura 4-2. Imagini din laboratorul UTCN cu determinarea rezistenței la întindere din încovoiere pe mortare cu zgură

După fixarea prisme de $40 \times 40 \times 160$ mm în aparat, ca în Figura 4-2, s-a aplicat o sarcină, fără șocuri, cu o viteză uniformă în intervalul de $10 \div 50$ N/s pentru ca rupura să se producă într-o perioadă de $30 \div 90$ s. După ce s-a înregistrat sarcina maximă aplicată (în newtoni) s-a calculat rezistența la întindere prin încovoiere cu formula (4.8).

$$f_{cf} = \frac{2}{3} \frac{Fl}{bd^2} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (4.8)$$

F - sarcina maximă aplicată epruvetei (N),
 l - distanța dintre axele rolelor suport (100 mm),
 b - lățimea epruvetei (40 mm)
 d - grosimea epruvetei (40 mm)

Jumătățile de prismă rămase după determinarea rezistenței la încovoiere s-au încercat la compresiune cu presa hidraulică din Figura 4-3. Prismele au fost așezate perpendicular pe direcția de turnare, datorită posibilității de segregare a mortarului. Rezistența la compresiune se definește ca fiind efortul unitar normal (σ) la care elementul își pierde capacitatea portantă. Se aplică o sarcină fără șocuri, care crește progresiv, cu o rată cuprinsă în intervalul 50÷500 N/s astfel încât ruptura să se producă într-o perioadă cuprinsă între 30÷90 s. Cu sarcina maximă înregistrată (în newtoni), se calculează rezistența la compresiune cu relația de calcul (4.9), [100].

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (4.9)$$

F - sarcina maximă aplicată epruvetei (N),
A - aria secțiunii (mm^2).



Figura 4-3. Presa hidraulică utilizată pentru determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere (din laboratorul UTCN)

Cunoscând rezistențele la compresiune a mortarului standard și ale unui amestec de mortar cu 50% zgură granulată de furnal măcinată și 50% ciment de încercat se poate determina Indicele de activitate la 28 zile (IA28) a zgurii de furnal granulate și măcinate (GGBS) în acord cu SR EN 15167-1[20] pe epruvete din mortar de ciment. Această procedură a fost descrisă și la subcap. 1.3.1 în acord cu specificațiile ASTM C989 [19].

4.1.5 Determinarea rezistenței la îngheț-dezgeț prin măsurarea variației rezistenței la compresiune

Încercările la 150 de cicluri repetate de îngheț-dezgeț s-au efectuat pe fragmente de prisme de 40x40x160 mm, în acord cu SR

3518 :2009 [102], cu imagini din perioada testării în Figura 4-4. După vârsta de 28 de zile și înainte cu 4 zile de începerea testului probele s-au introdus în baia cu apă la temperatura de $(20\pm 5^{\circ}\text{C})$ pentru saturare. Apa s-a adăugat treptat la interval de 24 ore pe $1/4$ din înălțimea epruvetelor timp de 3 zile, iar după 3 zile s-a completat cu apă până la un nivel de 20 mm peste înălțimea epruvetelor. Epruvetele acoperite complet cu apă s-au menținut astfel timp de 24 h după care epruvetele martor s-au păstrat în continuare sub apă iar cele destinate ciclurilor de îngheț-dezghet s-au introdus în camera termostatică. Camera termostatică a fost setată să mențină temperatura pentru un ciclu de îngheț de $(-17\pm 2^{\circ}\text{C})$ timp de 4h, iar pentru un ciclu de dezghet până la $(20\pm 2^{\circ}\text{C})$ timp de 4h și umiditate RH 95%. Ca rezistență la îngheț-dezghet se consideră numărul maxim de cicluri succesive pe care epruvetele din beton poate să le suporte, fără să sufere o reducere a rezistenței la compresiune mai mare de 25 % față de cea a epruvetelor martor, menținute în apă, calculate cu relația (4.10) [102].

$$\eta = \frac{f_{cm} - f_c}{f_{cm}} \times 100 \quad (\%) \quad (4.10)$$

η - pierderea de rezistență la compresiune (%),

f_{cm} - rezistența la compresiune a epruvetelor martor (MPa)

f_c - rezistența la compresiune după n de cicluri de îngheț-dezghet [MPa]



Figura 4-4. Determinarea rezistențelor pe mortare de ciment din zgură (imagini efectuate în timpul testului în laboratorul UTCN)

4.2 Proiectarea și încadrarea în clase a betoanelor rutiere (BcR-S)

În cadrul programului experimentat s-au turnat două serii de betoane. A doua serie s-a turnat pentru a continua testele de rezistență

la îngheț-dezgeț, uzură mecanică și carbonatare, specifice evaluării de durabilitate a betoanelor rutiere, însă a urmărit și optimizarea rețetelor proiectate prin îmbunătățirea lucrabilității și a conținutului de aer oclus.

Pe amestecul proaspăt s-a determinat densitatea aparentă conform cu SR EN 12350-6:2009 [103], consistența conform cu SR EN 12350-2:2009 [104] și procentul de aer oclus determinat conform SR EN 12350-7:2009 [82].

4.2.1 Densitatea aparentă pe betonul proaspăt

Densitatea aparentă a betonului proaspăt s-a calculat cu relația (3.10) din cap. 3, ca raport între masa betonului proaspăt și volumul probei în stare compactată, în acord cu SR EN 12350-6:2009 [103]. În prima serie de beton turnat s-a determinat pe cuburi cu latura de 150 mm, iar în a doua serie de turnare s-a realizat pe probe turnate în tipare de 150x150x600 mm.

4.2.2 Consistența prin metoda tasării

Determinarea consistenței betonului s-a efectuat în conformitate cu SR EN 12350-2:2009 [104], prin măsurarea tasării betonului turnat în prealabil într-un tipar metalic cu formă tronconică, față de înălțimea inițială. Betonul necesită să fie îndesat cu ajutorul unei rigle din metal în trei staturi egale în forma tronconică a tiparului care are următoarele dimensiuni: diametrul de 20 cm la baza, 10 cm la partea superioară și 30 cm înălțime. După umplerea formei se așteaptă un minut și se ridică forma care se așază alături și se măsoară tasarea betonului. Tasarea se determină într-un interval de maximum 10 minute de la prepararea betonului.

4.2.3 Volumul de aer oclus

Pentru a determina conținutul de aer oclus s-a aplicat metoda volumetrică cu presiune în acord cu SR EN 12350-7:2009 [82]. Proba de beton introdusă în recipientul cilindric al aparatului cu presiune se compactează prin vibrare, se înlătură surplusul de beton cu rigla metalică, se fixează capacul etanș cu robinetele menținute deschise. Prin unul din cele două robinete se introduce apă până când prin celălalt

robinet curge un jet de apă fără bule de aer, apoi se închid robinetele. Vasul se bate cu ciocanul pentru a elimina aerul din beton, se deschid robinetele și se introduce din nou apă până când aceasta iese din celălalt robinet și nu mai iese nici o bulă de aer, după care se închid robinetele. Se ridică presiunea aerului în camera de presiune până la 2 bari și se acționează supapa pentru a realiza legătura între camera de presiune și vasul cilindric. Conținutul de aer oclus din beton se citește direct pe cadranul manometrului .

4.2.4 Rezistența la întindere prin încovoiere determinată pe prisme

Probele turnate în tipare au fost păstrate în aer (24±2) ore după care au fost decofrate și conservate în apă la temperatură de (20±2°C) până la data încercării, conform cu SR EN 12390-2:2009 [105].

Rezistența la întindere din încovoiere pe prismele de 100x100x550 mm și de 150x150x600 mm realizate în prima serie de turnare s-a determinat pe presa automată prin aplicarea a două forțe egale și simetrice, amplasate pe treimea deschiderii dintre cele două reazeme circulare pe care se sprijină prisma. În a doua serie de turnare rezistența la încovoiere s-a determinat pe prisme de 150x150x600 mm. Rezistența la încovoiere a betonului rutier s-a calculat considerându-se comportarea elastică a zonei întinse până la rupere, cu ecuația (4.11), în acord cu SR EN 12390-5:2009 [106]. Jumătățile de prismă cu lungimea de 550 mm s-au încercat cu presa manuală prin aplicarea a unei forțe centrice în mijlocul deschiderii, iar rezultatul s-a calculat cu ecuația (4.12), imagini cu determinarea rezistenței la întindere în Figura 4-5.

$$f_{cf} = \frac{Fxl}{d_1 x d_2^2}, \text{ N/mm}^2 \quad (4.11):$$

$$f_{cf} = \frac{2}{3} \frac{Fxl}{d_1 x d_2^2}, \text{ N/mm}^2 \quad (4.12):$$

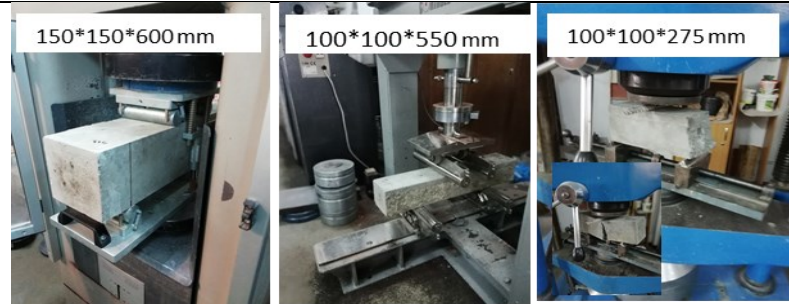


Figura 4-5. Determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere (imagini din timpul încercărilor a rezistenței la întindere din laboratorul UTCN)

În care:

f_{cf} - rezistența medie la întindere prin încovoiere, MPa;

F- forța de rupere, citită la presă, în N;

l- distanța dintre reazeme (150 mm pentru jumătățile de prisme, 300 mm pentru prismele cu lungimea de 550 mm și 450 mm pentru prismele de 600 mm);

d_1, d_2 - dimensiunile secțiunii transversale (100 mm la prismele de 550 mm lungime și 150 mm la cele de 660 mm);

4.2.5 Rezistența la compresiune

Pe epruvetele încercate s-a aplicat forța, uniform și continuu, cu viteză constantă de creștere a sarcinii de 0.5 MPa/s pentru compresiune și de 0.05 MPa/s pentru întindere prin încovoiere. Pentru încercările mecanice s-a folosit presă digitală hidraulică de tipul Advantest 9, de 300tf. Formula de calcul pentru rezistența la compresiune este ecuația (4.13), în acord cu SR EN 12390-3:2009/AC:2011 [107].

$$f_c = \frac{F}{A_c}, \text{ (MPa)} \quad (4.13):$$

f_c - rezistența medie la compresiune, (MPa);

F- valoarea maximă a forței de rupere, citită la presă, în (N);

A_c - aria secțiunii de referință, pe care a acționat forța de compresiune, mm²;

După încercarea epruvetelor s-a calculat media între valorile care nu diferă mai mult de 20% față de valoarea medie.

Rezistența medie la compresiune obținută ($f_{c,beton}^{28}$) pentru fiecare compoziție din seria întâi de turnare, rezultată în urma încercărilor efectuate pe cuburi cu latura de 150 mm s-a corectat ținând seama de rezistența normată a cimentului CEM I 42.5R și de rezistența efectivă la compresiune a cimentului la vârsta de 28 de zile, utilizând ecuația (4.14) conform cu C22:1992 [97].

$$f_{c,cor}^{28} = \frac{f_{cim,normat}^{28}}{f_{cim,efectiv}^{28}} \times f_{c,beton}^{28} \quad (4.14)$$

Rezistența medie la compresiune f_{cm}^{28} pe cuburi cu secțiunea de 150 x150 mm din seria a doua de turnare, s-a corectat în funcție de rezistența efectivă a cimentului aplicând ecuația (4.15) în funcție de rezistența efectivă a cimentului Portland la 28 de zile determinată în cap.4.1 ($f_{c,efectiv}$ a cimentului) și de clasa cimentului utilizat. Rezultatele s-au calculat ca medie aritmetică a epruvetelor încercate.

$$f_{corectat} = f_c^{28} \frac{1.15 \times clasa \text{ cim}}{f_{cim \text{ efectiv}}} \quad (4.15)$$

4.3 Caracteristicile materialelor componente din betonul rutier (BcR-S)

4.3.1 Caracterizarea (GGBS) prin gradul de saturare în calce, compoziția mineralogică și conținutul de elemente periculoase

Ponderea oxidului de calciu liber s-a calculat sub formă modulară din compoziția oxidică prezentată în raportul de încercări cu ref. [108]. Gradul de saturare în calce (CaO) a fost calculat folosind formula lui Kühl, formulă de calcul utilizată și în studiul experimental [109].

$$S_k = \frac{CaO}{2.8\%SiO_2 + 1.1\%Al_2O_3 + 0.7\%Fe_2O_3} \quad (4.16).$$

Conținutul de aluminat tricalcic s-a calculat cu ecuația lui Bogue [14]:

$$C_3A = 2.65A - 1.692F \quad (4.17)$$

Unde A reprezintă procentul de oxid de aluminiu (Al_2O_3) și F reprezintă procentul de oxid de fier (Fe_2O_3)

Difracția de raze X a permis determinarea compoziției mineralogice a fazei cristalizate și procente ale acestora, prezente în zgura granulată și măcinată (GGBS) la dimensiunea sub $63 \mu m$. Măsurătorile au fost realizate în laboratorul de mineralogie al Institutului Geologic al României. A fost folosit un difractometru de raze X de tip Bruker D8 ADVANCE, montaj theta - 2theta, cu anticatod de cupru ($\lambda = 1.54060$), cu o viteză de scanare de $0.02^\circ 2\theta$ pe secundă, un timp de 2s pe pas, o tensiune de funcționare de 40 kV pentru un curent de 30 mA și un sistem de fante de 1/0.1/1 cu o fanta de recepție de 0.6 mm, parametrii utilizați pentru măsurători geometrice în θ - 2θ .

Pentru identificarea elementelor periculoase din zgura de furnal granulată s-a efectuat testul de levigabilitate în laboratorul de protecție a mediului Wessling România din Târgul Mureș. Procedura de lucru a fost în acord cu SR EN 12457-2:2003 [110], SR EN 12457-4:2003 [111], SR EN 16192:2012 [112], SR EN ISO 10523:2012 [113], SR EN ISO 11885:2009 [114]. Rezultatele obținute au fost comparate cu limitele stabilite în Tabelul 2.2 din Ordinul nr. 95-2005 [115] care transpune Decizia Consiliului 2003/33/CE de stabilire a criteriilor și procedurilor pentru acceptarea deșeurilor la depozite în acord cu Directiva CE/31/1999 [116].

4.3.2 Caracterizarea agregatelor prin proprietățile geometrice, fizice și chimice, modul de finețe, masă volumică și coeficient de absorbție al apei

Caracteristicile agregatelor naturale și artificiale au fost testate de către producător în acord cu procedurile din referințele normative menționate în standardele SR EN 12620:2003/12620+A1:2008 [61], SR EN 12343:2003/12343+A1:2008 [117] și standardul național SR 667:2001 [118].

Modulul de finețe (Mf) reprezintă un indicator pentru clasificarea agregatelor în funcție de dimensiunea granulelor. În cadrul experimentului s-a determinat modulul de finețe pentru agregatele (0/4mm), calculat ca sumă a procentelor totale reținute pe seria de site, în acord cu ACI-EB-E1-07 [60]. În funcție de valorile obținute s-au

încadrat agregatele la nisipuri cu granule mari între (2.4÷4.0), nisipurile cu granule medii între (1.5÷2.8) și nisipuri cu granule fine între (0.6÷2.1) în acord cu SR EN 12620:2003/12620+A1:2008 [61].

Masa volumică s-a calculat în funcție de conținutul de umiditate al porilor permeabili și impermeabili, din raportul masă/volum, prin metoda cu picnometru, potrivit cu SR EN 1097-6: 2013 [119]. Probele de încercat (1000 g) s-au imersat timp de (24 ±0,5h) într-un picnometru umplut cu apă la (22 ±3°C) și menținut în baia de apă pe perioada imersării. După imersare s-a umplut picnometrul cu apă în exces, s-a cântărit înregistrând masa (M_2). Materialul s-a golit pe o tavă, s-a umplut din nou picnometrul cu apă și s-a cântărit înregistrând masa (M_3). Agregatele din tavă s-au expus la un curent de aer pentru pierderea umidității de suprafață și uscare până când nu s-a mai observat umezeală pe suprafața acestora și până când agregatele nu au mai aderat unele de altele. Agregatul fin s-a introdus și compactat într-un tipar conic. Agregatul se află în starea (SSD) dacă după retragerea tiparului materialul se prăbușește. S-a cântărit și s-a înregistrat masa (M_1) a agregatului aflat în starea (SSD). S-au uscat agregatele în etuvă la temperatura de (110±5°C) până la masă constantă și s-a înregistrat masa (M_4) [119].

$$\text{Masa volumică absolută: } \rho_a = \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} (\text{Mg/m}^3); \quad (4.18)$$

Masa volumică absolută reprezintă raportul dintre masa agregatului uscat în etuvă și volumul pe care acesta îl ocupă în apă inclusiv porii închiși, fără să conțină porii deschiși:

$$\text{Masa volumică reală (uscată în etuvă): } \rho_{rd} = \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}, (\text{Mg/m}^3) \quad (4.19)$$

Masa volumică reală determinată prin uscare în etuvă reprezintă raportul dintre masa agregatului uscat și volumul particulelor de agregate inclusiv porii închiși și cei deschiși,

$$\text{Masa volumică reală pe suprafața (SSD): } \rho_{ssd} = \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}, (\text{Mg/m}^3) \quad (4.20)$$

Masa volumică reală determinată pe suprafața uscată saturată, (SSD) reprezintă raportul dintre masa agregatului inclusiv masa apei prezentă

în porii deschiși și volumul pe care acesta îl ocupă în apă inclusiv porii închiși și cei deschiși,

$$\text{Coeficientul de absorbție a apei: } WA_{24} = \frac{100x(M_1 - M_4)}{M_4}, (\%); \quad (4.21).$$

M_1 , masa în aer a agregatelor saturate și uscate superficial, în grame (SSD);
 M_2 , masa picnometrului conținând eșantionul de agregate saturate, în grame ;
 M_3 , masa picnometrului umplut numai cu apă, în grame ;
 M_4 , masa în aer a probei de încercat uscată în etuvă, în grame ;

4.3.3 Reacția alcalii-silice (ASR) la agregate

În cazul betoanelor care vin în contact permanent sau alternativ cu apa, sau cu mediul umed apare necesitatea verificării alcalii-agregate în scopul evaluării reactivității și nocivității potențiale a agregatelor, ce conțin forme ale bioxidului de siliciu (SiO_2) de joasă cristalizare, cu alcaliile din ciment. Pentru verificarea reacției alcalii-agregate din zgură de furnal (ACBFS) concasată la dimensiunea 0/4 mm s-a utilizat metoda chimică în acord cu SR 5440:2009 [64], încercarea a fost efectuată în laboratorul de materiale de construcții București LMC-UTCB [120]. Reactivitatea potențială a agregatelor se apreciază în funcție de intensitatea unei reacții ce se produce timp de 24 h la 80 °C între o soluție normală de hidroxid de sodiu (NaOH) și agregatul de încercat mărunțit la dimensiuni cuprinse între 0,125...0,250 mm și se exprimă în funcție de:

Reducerea concentrației soluției de hidroxid de sodiu (R_c), astfel;

$$R_c = \frac{f(V_3 - V_2) \cdot 1000}{V_1} \quad [\text{mmol/dm}^3] \quad (4.22)$$

R_c reducerea concentrației soluției de hidroxid de sodiu, în mmol/dm³;
 F factorul soluției de acid clorhidric 0,05 n utilizat la titrare;
 V_2 volumul de acid clorhidric 0,05 n utilizat la titrarea probei de analizat, în ml;
 V_3 volumul soluției diluate, luate pentru determinare, în ml (20 ml);

Bioxidul de siliciu dizolvat (S_c) s-a calculat cu relația;

$$S_c = \frac{(A_1 - A_2) \cdot 1000 \cdot 1000}{5 \cdot 60,06} \quad [\text{mmol SiO}_2/\text{dm}^3] \quad (4.23)$$

S_c concentrația de bioxid de siliciu dizolvat, în mmol/dm³;
 A_1 cantitatea de bioxid de siliciu în g găsită în 100 cm³ de soluție diluată,
 A_2 cantitatea de bioxid de siliciu, în g, găsită în 100 cm³ soluție martor diluată
 60,06 masa moleculară a bioxidului de siliciu, în g.

Rezultatele obținute prin metoda chimică (R_c și S_c , exprimate în mmol/l) se înscriu pe o diagrama împărțită în patru zone: A, B, C și D. Agregatele din zona A sunt nereactive, ele se pot recomanda pentru utilizare. Agregatele din zona B sunt, în general, nereactive însă, în cazul prezentei în agregat a carbonaților de calciu, de magneziu și de fier precum și a silicaților de magneziu care pot denatura valorile R_c și S_c , este necesară verificarea reactivității agregatului pe bare de mortar. Agregatele din zona C, deși sunt caracterizate printr-o reactivitate potențială pronunțată, pot uneori da expansiuni neînsemnate pe bare de mortar. Din această cauză, pentru stabilirea nocivității lor, sunt necesare încercări pe bare de mortar atât pe agregatul ca atare, cât și pe mai multe amestecuri ale acestuia cu agregat inert, (cuarțos), în proporție: 5 %...50 % agregat de cercetat și 95 %...50 % agregat inert. Agregatul se consideră nociv, cu excepția cazului în care barele de mortar confecționate cu agregatul ca atare sau cu oricare dintre amestecurile menționate mai sus, prezintă expansiuni sub limită. Agregatele din zonă D se consideră nocive. Posibilitatea utilizării lor trebuie verificată prin încercări pe bare de mortar [64].

4.4 Încercări nedistructive de evaluare a durabilității betonului (BcR-S) și evaluarea impermeabilității acestuia

4.4.1 Determinarea absorbției de apă și a densității aparente în stare de umiditate naturală

Absorbția de apă (w_i) și densitatea aparentă (ρ_a) în stare de umiditate naturală, la vârsta de 90 de zile s-a determinat pe cuburi cu latura de 100 mm cu procedura descrisă la subcapitolul 4.1.3, în conformitate cu STASUL 2414:1991[101].

4.4.2 Determinarea adâncimii de penetrarea apei sub presiune

Adâncimea de penetrare a apei sub presiune s-a determinat la vârsta de 90 zile pe cuburi cu latura de 200 mm în conformitate cu SR EN 12390-8:2009 [121]. Epruvetele s-au păstrat în aer la temperatura de

($20 \pm 2^\circ\text{C}$) și la o umiditate de ($65 \pm 5\%$) până la vârsta de încercare. Condițiile de mediu pentru testarea permeabilității s-au desfășurat la o temperatură de ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) și la o umiditate de ($65 \pm 5\%$). Adâncimea de pătrundere a apei a fost măsurată perpendicular pe direcția de turnare. Înainte de încercare s-a îndepărtat stratul superficial de la suprafața probelor prin periere și s-au cântărit, (m_1). Epruvetele au fost plasate în echipamentul de testare la care s-a aplicat o presiune a apei de 800 kPa pentru ($72 \pm 2\text{h}$), imagini din timpul testului sunt prezentate în Figura 4-6. La finalul testului s-a îndepărtat excesul de apă, probele s-au cântărit și au fost înregistrate diferențele între cântărirea inițială (m_1) și cea finală (m_2). Verificarea adâncimii de pătrundere a apei sub presiune (H) s-a efectuat prin măsurarea acesteia cu șublerul, după ce probele au fost despicate. Pentru interpretarea rezultatelor s-au selectat valorile maxime obținute din măsurarea adâncimii de penetrare a apei pe 3 epruvete, testate la fiecare amestec [121].



Figura 4-6. Determinarea adâncimii de penetrare a apei sub presiune (imagini din timpul testului din laboratorul UTCN)

4.4.3 Determinarea modului de elasticitate dinamic

Metoda în acord cu SR EN 12504-4:2004 [122] presupune măsurarea timpului de propagare a impulsurilor ultrasonice în beton, de la un emițător la un receptor. Emițătorul produce impulsuri alcătuite din oscilații neamortizate cu frecvență joasă ($40 \div 100$) KHz, aplicate cu un palpator emițător, care se propagă în beton și ajung la un receptor de ultrasunete care le transformă în impulsuri electrice. Aparatul electronic măsoară timpul necesar impulsului să parcurgă distanța măsurată. Betonoscopul utilizat (marca Controls) din Figura 4-7, a fost etalonat înainte de utilizare. Palpatorii au fost aplicați pe fețele opuse ale epruvetei cubice cu latura de 150 mm. Ulterior, folosind viteza de

propagare s-a calculat modulul de elasticitate dinamic al betonului cu relația (4.24) [122].

$$E_{dn} = \frac{\rho}{g} V^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (4.24)$$

în care, E_{dn} este modulul de elasticitate dinamic (MPa), ρ densitatea betonului întărit (kg/m^3), V este vitezei de propagare a impulsurilor ultrasonice în beton UPV (Km/s), ν este coeficientul lui Poisson având valoarea 0,25 pentru betoane păstrate în aer și 0.28 pentru probe păstrate în apă, g este accelerația gravitațională $9,82 \text{ m/s}^2$.



Figura 4-7. Măsurarea timpului de propagare a impulsurilor ultrasonice în beton (imagini din laboratorul UTCN)

4.4.4 Determinarea rezistenței la îngheț-dezghet prin măsurarea variației modulului de elasticitate relativ

Metoda determină modulul de elasticitate dinamic relativ (RDM) definit ca fiind pătratul raportului dintre timpul de propagare a impulsurilor ultrasonice inițial și după n cicluri, calculat cu formula (4.25), în acord cu CEN /TR 15177:2006 [123].

$$RDM_n = \left(\frac{t_0}{t_n} \right)^2 \times 100 \quad (4.25)$$

Reducerea modulului de elasticitate dinamic relativ (RDM) este calculat cu relația (4.26). În acord cu SR-3518:2009[102] este permisă o reducerea (RDM) de maxim de 15%.

$$\text{Reducerea } (RDM)_n = \frac{100 - (RDM)_n}{100} \times 100 \quad (4.26)$$

Performanța betonului poate fi apreciată prin factorul de durabilitate (D_f) cu relația :

$$D_f = \frac{n}{3} \left[\frac{E_{dn}}{E_{d0}} \right] \quad (4.27)$$

În relațiile de mai sus, t_0 și t_n este timpul de propagare a ultrasunetelor inițial și după n cicluri (μs), $(RDM)_n$ modulul de elasticitate dinamic relativ după n cicluri de îngheț-dezghet, E_{d0} și E_{dn} modulul de elasticitate dinamic la începutul și după n cicluri de îngheț-dezghet, (MPa).

Valoarea (D_f) obținută, după n cicluri repetate de îngheț-dezghet, poate fi o indicație probabilă pentru interpretare: un factor mai mic decât 40 înseamnă că betonul este nesatisfăcător, intervalul cuprins între 40 și 60 caracterizează betonul cu performanțe îndoielnice, iar o valoare peste 60 indică probabilitatea unei comportări satisfăcătoare a betonului, evaluare descrisă în lucrarea Proprietățile betonului a lui A.M. Neville [13].

4.5 Rezistența la îngheț-dezghet a (BCR)- cadrul național și european

4.5.1 Determinarea rezistenței la îngheț-dezghet prin măsurarea variației rezistenței la compresiune

Rezistențele la îngheț-dezghet ale amestecurilor de beton, turnate în seria întâi, au fost determinate pe 12 epruvete cu latura de 150 mm (6 epruvete încercate la 150 de cicluri și 6 epruvete încercate la 300 de cicluri repetate de îngheț-dezghet), în conformitate cu standardul național SR-3518:2009 [102], metodă descrisă la pct.4.1.5.

Pentru amestecurile realizate în seria a doua încercate la 150 de cicluri repetate de îngheț-dezghet, s-au turnat 6 epruvete cubice cu latura de 150 mm din care trei epruvete martor și 3 epruvete pentru plasarea în camera termostatică. Menținerea, conservarea și testarea probelor a fost în acord cu SR-3518:2009 [102]. Până la vârsta de 7 zile, epruvetele au fost menținute în apă, iar pe urmă s-au păstrat în aer la temperatura de $(20 \pm 2^\circ\text{C})$ și la o umiditate de $(65 \pm 5\%)$. Înainte cu 4 zile de începerea testului (la vârsta de 150 zile) probele s-au introdus în baia cu apă la temperatura de $(20 \pm 5^\circ\text{C})$ pentru saturare. Epruvetele martor s-au păstrat, în continuare în apă până la vârsta de 200 zile iar cele destinate ciclurilor de îngheț-dezghet s-au introdus în camera termostatică. Camera termostatică a fost setată până la temperatura de

($-17\pm 2^{\circ}\text{C}$) pentru un ciclu de 4h de îngheț și până la ($20\pm 2^{\circ}\text{C}$) pentru ciclu de 4h de dezgheț, procedură prezentată la paragraful 4.1.5.

4.5.2 Determinarea rezistenței la îngheț-dezgheț prin măsurarea masei exfoliate de la suprafața betonului

Pierderea de material de la suprafața betonului întărit după 56 de cicluri repetate de îngheț-dezgheț, definită în formă prescurtată exfolierea sau scalarea la suprafața betonului, în prezența agenților de dezghețare s-a determinat prin metoda alternativă "slab test" prevăzută în SR CEN/TS 12390-9:2009 [124]. Metoda de referință prevede ca testarea să înceapă la vârsta de 31 de zile, iar metoda alternativă permite ca vârsta betonului să fie diferită de 31 de zile. Metoda de măsurare a masei exfoliate de la suprafața epruvetei este apreciată ca cea mai severă metodă de testare a rezistenței la îngheț, iar rezultatele pot fi interpretate cu ajutorul standardului suedez SS 13 72 44 care utilizează metoda Borås [125]. Pentru fiecare amestec, turnat în seria întâi, s-au tăiat 4 fâșii de beton de $150\times 150\times 50$ mm din fragmentele de cuburi cu latura de 200 mm. Epruvetele au fost conservate în camera climatică la o umiditate de ($65\pm 5\%$) și temperatura de ($20\pm 2^{\circ}\text{C}$) până la efectuarea testului. Pe toate suprafețele epruvetei cu excepția suprafeței de încercare s-a lipit mai întâi o folie de cauciuc de 3 mm, apoi s-a aplicat un cordon de adeziv silionic între cauciuc și suprafața din beton. S-a efectuat un test pentru verificarea etanșeității foliei de cauciuc prin turnarea pe suprafața de încercat a unei cantități de 67 ml de apă deionizată și menținută timp de 72 h. Rata de evaporare a apei a fost măsurată într-un vas umplut cu apă cu suprafața de 225 cm^2 . După 7 zile a rezultat o rată de evaporare de 44,59 g. După efectuarea testului de etanșeitate toate suprafețele epruvetei, exceptând suprafața de încercat, au fost izolate termic cu polistiren de ($20\pm 1\text{ mm}$). Cu 15 minute înainte de introducerea în camera termostatică pe suprafața de încercat s-au turnat 67 ml, în grosime de 3 mm, constând în 97% apă potabilă și 3% clorură de sodiu NaCl din masa totală. Apoi epruvetele s-au introdus în camera termostatică marca Controls, Figura 4-8.a), au fost acoperite cu o folie de polietilenă și s-au încercat la cicluri repetate de îngheț-dezgheț. Durata unui ciclu de îngheț-dezgheț a fost setat la 24 h, din care intervalul

pentru ciclul de dezgheț între (7÷9h) și intervalul pentru ciclul de îngheț între (15÷17h), la un interval de temperatură între (-22 și +22°C).

Variația temperaturii înregistrată în perioada unui ciclu de îngheț-dezgheț la centrul suprafeței de încercare este prezentată sub formă de grafic în Figura 1.b) și separat pe intervale de temperatura astfel:

- Răcirea de la +22°C la -4°C s-a realizat pe parcursul a 4.5 h;
- Înghețarea de la -3°C la -15°C s-a realizat pe parcursul a 7.5 h;
- Temperatură de menținere între (-15 ÷ -18°C) o perioadă de 4 h;
- Dezghețarea de la -3°C la -15°C s-a realizat pe parcursul a 3 h;
- Încălzirea de la de la -1°C la +22°C s-a realizat pe parcursul a 5 h;

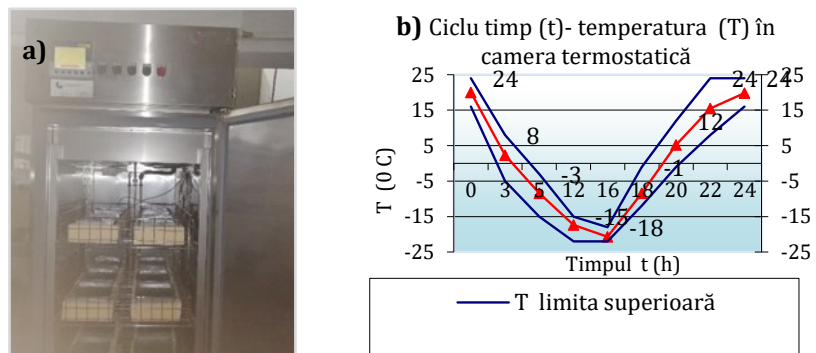


Figura 4-8. a) Camera termostatică din laboratorul UTCN; b) Ciclu timp (t) - temperatura (T), măsurat la centrul suprafeței de încercare al unei epruvete

Rezistența la îngheț-dezgheț a fost evaluată prin măsurarea masei exfoliate de pe suprafața epruvetei după 7, 14, 28 și 56 de cicluri de îngheț- dezgheț. La sfârșitul fiecare faze de dezgheț s-a colectat într-o hârtie de filtru materialul exfoliat de pe suprafața de încercată și s-a adăugat un nou mediu de încercare pe suprafața expusă la îngheț-dezgheț în camera climatizată. Materialul exfoliat și filtrul folosit s-au uscat până la masă constantă la (110±10°C) și apoi s-au cântărit [124] , imagini din timpul testului în Figura 4-9.



Figura 4-9. Colectarea materialului exfoliat, cântărirea masei uscate în etuvă, înlocuirea mediului de încercare existent cu unul nou, cu 3% clorură de sodiu NaCl)

Masa totală de material uscat exfoliat după (n) cicluri de îngheț-dezgheț s-a calculat cu ecuația:

$$m_{s,n} = m_{s, \text{înainte}} + (m_{v+s+f} - m_{v+f}) \quad (4.28)$$

Valoarea cumulată S_n de material exfoliat, după (n) cicluri de îngheț-dezgheț în kg/m² se exprimă cu ecuația:

$$S_n = \frac{m_{s,n}}{A} \times 10^3 \quad (4.29)$$

$m_{s,n}$ - masa totală a materialului exfoliat și uscat după (n) cicluri de îngheț- dezgheț, valoare rotunjită la cel mai apropiat 0,1 g ;

$m_{s, \text{înainte}}$ - masa totală a materialului uscat exfoliat de la ciclurile anterioare, g ;

$m_{v(+f)}$ - masa vasului gol și a filtrului utilizat, valoare rotunjită la cel mai apropiat 0,1 g ;

$A=0,021025$ m² aria totală a suprafeței, măsurată între șirurile de cordoane de etanșare rotunjită la cel mai apropiat 100 mm².

Criteriile de acceptare utilizate pentru testarea la îngheț-dezgheț cu agenți de dezghețare în acest experiment au fost cele din standardul suedez SS 13 72 44 (metoda Borås)[125], metodă prezentată în studiul legat de durabilitatea betoanelor efectuat de către A. Shpak [126], și utilizat de către D.J. Niedźwiedzka în experimentul cu Ref. [127]. Prin metoda Borås se determină masa medie exfoliată la 28 de zile (m_{28}), la 56 de zile (m_{56}) și, opțional, la 112 zile (m_{112}) la care limitele admise sunt redate în Tabelul 4-1.

Tabelul 4-1. Criteriu de acceptare a rezistenței la îngheț, testul prin exfoliere [125]

Rezistența la exfoliere	Cerințe
Foarte bun	$m_{56} < 0.10 \text{ kg / m}^2$
Bun	$m_{56} < 0.20 \text{ kg / m}^2$
	sau $m_{56} < 0.50 \text{ kg / m}^2$ și $m_{56} / m_{28} < 2$
	sau $m_{112} < 0.50 \text{ kg / m}^2$
Acceptabil	$m_{56} < 1.00 \text{ kg / m}^2$ și $m_{56} / m_{28} < 2$ sau $m_{112} < 1.00 \text{ kg / m}^2$
Neacceptabil	$m_{56} \geq 1.00 \text{ kg / m}^2$ și $m_{56} / m_{28} \geq 2$ sau $m_{112} \geq 1.00 \text{ kg / m}^2$

4.5.3 Determinarea rezistenței la îngheț-dezghet prin reducerea procentuală a modulului de elasticitate dinamic

În acord cu Raportul Tehnic CEN/TR 15177:2006 [123], s-a determinat prin metoda alternativă "slab test", rezistența la îngheț-dezghet ca modul dinamic de elasticitate relativ. Măsurătorile s-au efectuat pe fâșii de beton de dimensiune 150x150x50 mm înainte de testul de îngheț, la 28 de cicluri de îngheț-dezghet și după 56 de cicluri de îngheț-dezghet. Metoda se bazează pe măsurarea timpului de propagare a impulsurilor ultrasonice (UPTT) între 2 traductori în acord cu SR EN 12504-4 [122]. Reducerea procentuală a modulului de elasticitate dinamic (RDM) s-a determinat pentru fiecare amestec ca și la pct.4.3.3. Metoda CEN/TR 15177:2006 nu prezintă un prag valoric pentru criteriul de acceptare al modului de elasticitate dinamic relativ. Metoda GB/T 50082-2009 utilizată în China limitează pierderea (RDM) până la 60% [126], [128] iar pentru metoda utilizată în Rusia, GOST 10060-2012 [126], [129] variația modulului (RDM) trebuie să fie mai mică decât 25%. Deoarece procedura de testare diferă de la o metodă la alta, pentru cazul de față criteriul de acceptare s-a bazat pe conceptul de performanță echivalentă a amestecurilor cu zgură de furnal comparate cu amestecurile de referință realizate cu materiale convenționale.

4.6 Investigații prin relaxometrie (RMN) pe probe supuse la îngheț-dezghet

4.6.1 Determinarea distribuției relative a mărimii porilor prin tehnica de relaxometrie (RMN)

Tehnicile de relaxometrie (RMN) sunt complet ne-invazive și permit investigarea probelor de ciment fără o preparare prealabilă specială [86], [130]–[135]. Acestea au fost utilizate cu succes în ultimii ani atât pentru extragerea de informații despre structura poroasă a materialelor pe baza de ciment cât și despre evoluția apei aflate în interiorul porilor, în timpul procesului de hidratare. În relaxometria (RMN) a materialelor pe bază de ciment poate fi monitorizat atât timpul de relaxare longitudinală cât și cel de relaxare transversală [86], [130]–[135]. Deoarece măsurătorile de relaxare longitudinală sunt mai lente și greu de aplicat sistemelor care evoluează în timpul procesului de măsurare, pentru multe aplicații este de preferat măsurarea timpului de

relaxare transversală. În cazul măsurătorilor de relaxare transversală este însă important să ținem seama de efectele pe care difuzia în gradienti interni le-ar putea avea asupra acurateții măsurătorilor, de aceea este de preferat ca acestea să se efectueze în câmpuri magnetice joase și cu secvențe de impulsuri care să minimizeze aceste efecte [86], [130], [134].

O tehnică des utilizată în aplicațiile (RMN) pe ciment este cea cunoscută sub numele de tehnica Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) [136]. Această tehnică permite măsurarea rapidă și robustă a ratei de relaxare transversală ($1/T_2$) a spinilor nucleari, iar dacă intervalul de timp dintre impulsurile de radiofrecvență este scurt, se poate neglija și influența gradientilor interni. În aceste condiții, între rata de relaxare transversală și raportul suprafață-volum (S/V) al porilor există relația de legătură, [86], [130], [133]–[135]:

$$\frac{1}{T_2} = \varepsilon \frac{S}{V}. \quad (4.30)$$

În ecuația de mai sus, (ε) reprezintă relaxivitatea suprafeței, o constantă care depinde de interacțiunea moleculelor cu suprafața, de intensitatea câmpului magnetic în care se efectuează experimentul (RMN) și de conținutul de impurități magnetice al suprafeței porilor. Să notăm că în relația (4.30) am neglijat contribuția fazei volumice la fenomenul de relaxare nucleară, aceasta deoarece timpul de relaxare respectiv este mult mai lung decât cel indus de suprafață. Bazându-ne pe ecuația (4.30) putem stabili o proporționalitate directă între timpul de relaxare și dimensiunea porilor. Această proporționalitate ne permite aflarea distribuției dimensiunilor porilor dacă se cunoaște distribuția timpilor de relaxare și relaxivitatea suprafeței. Chiar dacă relaxivitatea suprafeței nu este cunoscută, în lipsa unei calibrări prealabile, se pot obține informații despre distribuția relativă a mărimii porilor. Această distribuție poate fi extrasă din seria de ecouri (CPMG) dacă se aplică acestei serii o transformată Laplace numerică [136], [137].

În lucrarea de față, pentru a evidenția efectul ciclurilor îngheț-dezgheț asupra distribuției relative a dimensiunilor porilor, probele au fost investigate prin relaxometrie (RMN) după finalizarea a 300 de cicluri de îngheț-dezgheț și ajunse la vârsta de 150 zile. Perioada de testare din programul experimental s-a extins față de prevederile din normativul național NE014-2002 [11] de la 100 până la 300 de cicluri de îngheț-

dezgheț, similar cu numărul de cicluri de îngheț-dezgheț prevăzute în standardul ASTM C666/C666M-03 [138]. O expunere în laborator a probelor de betoane la un număr extins de cicluri repetate de îngheț-dezgheț poate să simuleze cât mai apropiat daunele provocate de fenomenul de îngheț-dezgheț în betoanele expuse la intemperii din mediu real, așa cum s-a experimentat și în lucrarea [139] unde probele s-au testat în laborator până la 1000 de cicluri de îngheț-dezgheț. În lucrarea de față, rezistențele la îngheț-dezgheț s-au determinat prin metoda pierderilor de rezistențe la compresiune, conform cu SR 3518:2009.



Figura 4-10. Epruvete martor menținute în apă și epruvete menținute la îngheț-dezgheț (imagini din laboratorul UTCN)

Imagini din perioada de testarea la îngheț-dezgheț sunt prezentate în Figura 4-10, iar procedura tehnică de lucru a fost descrisă la capitolul 4.1.5.

Măsurătorile (RMN) au fost efectuate, în laboratorul Facultății de Mecanică din cadrul UTCN, cu un instrument de câmpuri joase de tipul MinispecMQ20 (Bruker, Germania) folosind tehnica (CPMG), Figura 4-11a),b). Înainte de fiecare măsurătoare probele au fost aduse în echilibru termic cu temperatura de 35°C. Au fost înregistrate un număr de 2000 ecouri de spin în fiecare experiment iar timpul dintre două ecouri a fost menținut la 0.1 ms pentru a diminua efectele gradientilor interni asupra măsurătorilor. Distribuțiile timpilor de relaxare s-au extras din seriile (CPMG) utilizând metoda de inversare Laplace numerică [136].

Din cuburile cu latura de 150 mm, intacte, menținute în camera termostatică și a cuburilor martor, menținute în apă în această perioadă, s-a extras o epruvetă cilindrică pentru fiecare amestec cu lungimea de 20 mm și diametru de 9,5 mm, Figura 4-11d)÷h). Pentru a elimina erorile de interpretare, masa eşantioanelor extrase din cuburi a fost aceeași la fiecare amestec de 1.06 g. Prelevarea eşantioanelor pentru testare a fost

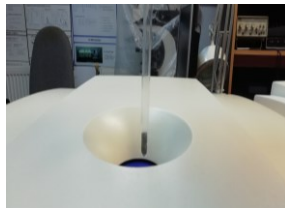
posibilă la aceste dimensiuni reduse deoarece proporția de agregate de dimensiune maximă (25 mm) are un volum relativ redus din volumul total de agregate. Probele au fost uscate în etuvă la temperatura de $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ timp de 24 de ore pentru eliminarea apei din pori. Apoi au fost introduse în tuburi (RMN) de 10 mm care s-au sigilat pentru a împiedica schimbul molecular cu apă din aerul atmosferic. După măsurarea probelor uscate, acestea au fost uscate din nou și apoi imersate în apă timp de 48 de ore, la temperatura de $22\pm 2^{\circ}\text{C}$. După acest interval eșantioanele au fost ușor tamponate cu hârtie de filtru, apoi introduse în tuburile (RMN) și sigilate. Al treilea set de măsurători s-a efectuat pe probe saturate cu ciclohexan, după aceeași procedură ca și în cazul probelor saturate cu apă. Saturarea cu ciclohexan s-a realizat pentru o mai bună evidențiere a porilor inter-C-S-H și capilari, așa cum s-a demonstrat în lucrarea [130]. Să notăm că porii intra-C-S-H sunt evidențiați de prezența moleculelor de apă care nu pot fi îndepărtate fără o distrugere a materialului.

4.6.2 Microscopie electronică cu scanare (SEM)

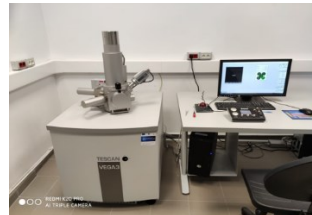
Imaginile SEM sunt utile pentru identificarea porilor capilari sau componentelor de hidratare cu structuri mari (cristale de etringită sau CH), dar nu sunt utilizate pentru componentele cu structură lamelară și dimensiuni mici ale porilor, cum ar fi C-S-H. Un avantaj al acestei metode constă în posibilitatea de a vizualiza proba, atât macroscopic (la un câmp vizual de 1 mm), cât și microscopic (la câmpuri vizuale cu dimensiuni submicrometrice) și urmărirea anumitor aspecte specifice fiecărei rețete, cum ar fi prezența sau absența unor anumite cristale sau a unor materiale amorfe, dimensiunea cristalelor, dimensiunea porilor capilari și a fisurilor submicrometrice.



a)



b)



c)

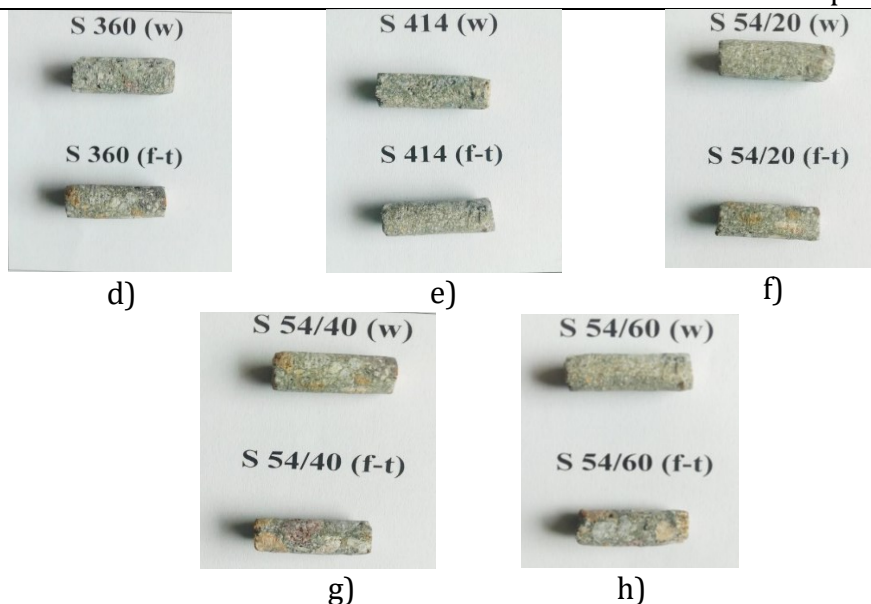


Figura 4-11. a), b) Echipamentul MinispecMQ20 pentru măsurători RMN; c) Echipamentul VEGA3 SBU cu Bruker Quantax EDS pentru măsurători SEM; d)-h) Probe pregătite pentru măsurare (RMN)

Măsurătorile SEM au fost efectuate în Laboratorul de analize de mediu, Filiala ICIA Cluj-Napoca, folosind un microscop electronic VEGA3 SBU cu un spectrometru de dispersie energetică Quantax EDS de la Bruker, ilustrat în Figura 4-11c).

4.6.3 Determinarea densității după imersie și fierbere, absorbția apei și proporția de pori permeabili

Densitatea după imersie și fierbere, absorbția apei și conținutul de pori permeabili s-au obținut în acord cu ASTM C 642-2006 [140], metodă utilizată și în studiul efectuat în lucrarea [141]. Epruvetele cubice cu latura de 71 mm (realizate în prima serie de turnare) saturate în apă cu suprafața saturată uscată au fost cântărite în aer (b) și apoi s-au uscat în etuvă la 100-110° C până când a fost atinsă o masă constantă (a). Eșantioanele au fost plasate într-un recipient adecvat, acoperit cu apă de la robinet și s-au fiert timp de 5 ore. Apoi, s-au lăsat să se răcească la temperatura camerei (22±2°C). Umiditatea de la suprafață a fost îndepărtată cu un prosop și a fost determinată masa probelor imersate și fierte (c), măsurată în aer. Masa (d), după imersie și fierbere a fost măsurată în apă cu balanța hidrostatică. Absorbția după imersie (m_1) și absorbția după imersie și fierbere (m_2) s-au calculat cu ecuațiile

$$m_1 = \left[\frac{b-a}{a} \right] \times 100 (\%) \quad (4.31)$$

și

$$m_2 = \left[\frac{c-a}{a} \right] \times 100 (\%) \quad (4.32)$$

Densitatea în grămadă în stare uscată ρ_1 și densitatea după saturare și fierbere ρ_2 au fost calculate cu ecuațiile

$$\rho_1 = \left[\frac{a}{c-d} \right] \times \rho_w \quad (\%) \quad (4.33)$$

și

$$\rho_2 = \left[\frac{a}{a-d} \right] \times \rho_w \quad (\%) \quad (4.34)$$

iar pentru densitatea apei ρ_w s-a utilizat valoarea de 0.998 g/cm³. Proporia porilor permeabili se pot calcula cu una ecuațiile:

$$P_0 = [(\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2)] \times 100 (\%) \quad (4.35)$$

$$\text{sau} \quad P_0 = \left[\frac{c-a}{c-d} \right] \times 100 (\%) \quad (4.36)$$

conform cu ASTM C 642-2006 [140]. În lucrare s-a aplicat ec. (4.35).



Figura 4-12. Cântărirea hidrostică a cuburilor cu latura de 71 mm (imagini din laboratorul UTCN)

4.7 Rezistența la uzură a betoanelor (BcR-S)

4.7.1 Determinarea rezistenței la uzură

Rezistența la uzură s-a încercat pe discul abraziv a aparatului Böhme, marca Matest prezentat în Figura 4-13, în acord cu standardul SR EN 1338:2004/AC:2006 [142]. La vârsta de 100 de zile un set de 3

epruvete pentru fiecare amestec, turnat în seria întâi, cu dimensiunea de 71 mm au fost scoase din apă și pregătite pentru încercarea la uzură. Epruvetele s-au uscat până la masă constantă la o temperatură de $(105 \pm 5^\circ\text{C})$ și s-au cântărit. Pe pista de încercare s-a împrăștiat 20 g material abraziv standard, epruveta s-a fixat în dispozitiv cu fața de încercat pusă pe disc și s-a aplicat central o forță de $(294 \pm 3\text{N})$. Fiecare epruvetă s-a încercat timp de 16 cicluri, un ciclu constând din 22 rotații. După fiecare ciclu s-a curățat discul, s-a înlocuit materialul abraziv și fața de contact s-a rotit progresiv la 90° . La sfârșitul testului probele s-au cântărit din nou. Uzura s-a calculat după 16 cicluri ca medie a volumului pierdut ΔV , ca în ecuația (4.37), rezultatele s-au încadrat apoi în clase de rezistență la uzură ca în Tabelul 4.2.

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} \quad (4.37)$$

Unde ΔV (mm^3) reprezintă pierderea de volum după 16 cicluri, Δm (g) reprezintă pierderea de masă după 16 cicluri, iar ρ (g/mm^3) reprezintă densitatea epruvetei [142]. Testul la uzură a fost repetat pe alte trei seturi de epruvete la vârsta de 150 zile cu aceeași procedură.

Tabelul 4-2. Clasele de rezistență la uzură [142]

Clasă	Marcare	Condiții
1	F	Nici o performanță măsurată
3	H	≤ 20000 $\text{mm}^3/5000 \text{ mm}^2$
4	I	≤ 18000 $\text{mm}^3/5000 \text{ mm}^2$



Figura 4-13. Aparatura Böhme (Imagine din laboratorul UTCN)

Similar, pentru fiecare amestec proiectat în seria doua, s-au confecționat 3 epruvete cubice de $(71 \pm 1,5)$ mm, turnate în același timp și conservate în aceleași condiții descrise la subcapitolul 4.5.1, până la vârsta de încercare de 200 de zile.

4.7.2 Determinarea rezistenței la compresiune

Rezistența la compresiune s-a determinat în conformitate cu SR EN 12390-3:2009/AC:2011 [107] prin procedura descrisă la cap.4.2.5.

4.8 Rezistența betonului (BcR-S) la coroziune indusă de cloruri și carbonatare

4.8.1 Testul de penetrare rapidă a clorului (RCPT)

Pentru testul (RCPT) s-au utilizat probe de beton realizate în seria a doua. După turnare epruvetele cilindrice cu diametrul de 100 mm și lungime de 200 mm s-au acoperit cu folie din polietilenă, s-au menținut în aer 24 h la temperatura de $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ și umiditatea relativă de cca. 40%, după care s-au decofrat și s-au scufundat în apă la temperatura de $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$. Perioada de conservare a epruvetelor în apă a fost extinsă de la 28 zile până la vârsta de testare de 150 de zile cu scopul observării evoluției caracteristicilor de durabilitate a betonului (rezistențe mecanice și rezistențe la agresiunea chimică) datorate continuării hidratării în timp a particulelor de zgură. Aceste caracteristici se evidențiază doar după o perioadă mai lungă de conservare, cum ar fi minim 90 de zile. Fiind cunoscut că zgura de furnal este caracterizată de un ritm de hidratare mai lent și o căldură de hidratare mai redusă comparativ cu cimentul Portland [143]–[147]. Înainte cu două zile de testare, epruvetele cilindrice cu diametrul de 100 mm s-au scos din apă, și din fiecare specimen s-a tăiat o fâșie de 50 ± 3 mm grosime din partea superioară a epruvetei pentru a simula stratul de acoperire al armăturii. Pe zona laterală a probelor s-a aplicat un epoxid impermeabil la apă, iar fețele circulare superioare și inferioare au fost lăsate libere. După uscarea produsului epoxidic probele s-au menținut în folie de polietilenă până la începerea testului pentru a împiedica evaporarea apei. Pregătirea probelor pentru testul (RCPT) s-a efectuat într-un mediu de vid uscat timp de 3 h, după care probele au fost acoperite cu apă fiartă și răcită la temperatura camerei. Recipientul cu probele imersate s-a vidat menținând astfel probele timp de 20 h pentru saturare completă. Pregătirea probelor a respectat specificațiile în acord cu ASTM C1202 [148], cu excepția faptului că vidarea recipientului s-a efectuat cu un aparat obișnuit, în lipsa aparatului de saturație în vid dotat cu desicator, pompă cu vacuum și manometru. Sarcina electrică trecută prin eșantionul din beton în timp de 6 ore, Q (exprimată în Coulombs), s-a măsurat cu aparatul marca Controls, model 58-E0052 pentru determinarea rezistenței betonului la penetrarea ionilor de clor, aplicând

o diferență de potențial de 60 V între capetele epruvetei, Figura 4-14 și Figura 4-15.

Tabelul 4-3. Interpretare a rezultatelor [148]

Încărcătura electrică trecută [Coulombi],	Penetrabilitatea ionilor de clor
>4000	Ridicată
2000- 4000	Moderată
1000-2000	Scăzută
100-1000	Foarte scăzută

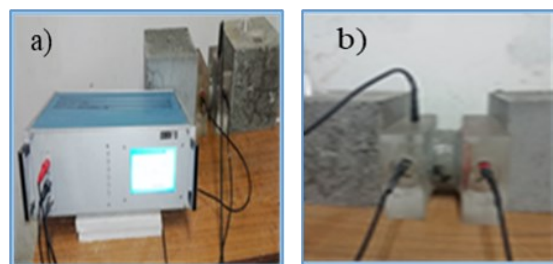


Figura 4-14. a) și b): Imagini din timpul testului (RCPT) din laboratorul UTCN

Capetele probei s-au fixat în cele două celule de testare după care s-a impermeabilizat zona dintre probă și latura de testare în care s-au introdus soluții electrolitice, într-o parte soluție de clorură de sodiu, NaCl, 3%, iar în cealaltă soluție de 0.3% hidroxid de sodiu, NaOH, în diluție cu apă distilată. Celula care conține 3,0% NaCl s-a conectat la polul negativ (catod), iar celula care conține 0,3% NaOH s-a conectat la polul pozitiv (anod). Temperatura aerului din jurul probelor s-a menținut în intervalul (20±0.5°C), iar senzorul de temperatură care a monitorizat soluția s-a plasat în celula cu clorura de sodiu. Standardul ASTM C1202 [148], oferă o corelație la 6 h între sarcina electrică trecută prin probă și penetrabilitatea ionilor de clor printr-o probă cu diametrul de 95 mm și înălțimea de 50 mm prezentată în Tabelul 4-3.

Evaluarea rezistenței betonului la penetrarea ionilor de clor determinată prin procedura ASTM C1202 poate fi susținută prin determinarea rezistivității betonului. Julio-Betancourt și Hooton [149] au recomandat calcularea rezistivității electrice a betonului la 1 minut după începutul testului pentru a evita influența temperaturii asupra mobilității ionilor de clor. M. T. Bassuoni [150] a observat că la 30 de minute gradientul maxim de temperatură nu a depășit 6°C, rezultând valori comparabile ale rezistivității electrice. În lucrarea de față diferența de temperatură înregistrată de la 1 minut la 30 minute a fost de până la 3°C, ceea ce a permis calculul rezistivității electrice a betonului la 30 minute, cu ecuația (4.38).

$$\rho = \frac{VA}{Il} \tag{4.38}$$

100

unde:

- ρ - Rezistivitatea (Ωm) la 30 minute
- V- Tensiunea aplicată (V)
- A- Aria transversal a probei (m^2)
- I- Intensitatea curentului (A) la 30 minute
- L- Grosimea probei (m)

Încălzirea electrică a soluției are ca rezultat creșterea mobilității ionilor în soluția de pori. Pentru a evita acest efect, a fost înregistrată trecerea sarcinii electrice la 30 min și extrapolată liniar pentru a estima sarcina de trecere la 6h. Rezistivitatea electrică a betonului a fost utilizată pentru a stabili viteza de coroziune a armăturii Cr ($\mu\text{m Fe/yr}$), calculată cu ecuația (4.39), [1,47,72] și clasificată ca în Tabelul 4-4, [151], [152].

Tabelul 4-4. Viteza de coroziune caracteristice din măsurători (LPR), [150]

Clasificarea coroziunii	C_r^a ($\mu\text{m Fe/year}$)
Pasivă/foarte scăzută	Până la 2
Scăzută/ moderată	2 la 6
Moderată/Ridicată	6 la 12
Foarte ridicată	>12



Figura 4-15. Sarcina înregistrată (Q) la 6 h, a) S 54/20, b) S 54/60 (imagini înregistrate cu aparatul marca Controls din laboratorul UTCN)

$$C_r = \frac{1000}{\rho_{\text{beton}}} \quad (4.39)$$

unde:

- Cr - Viteza coroziunii ($\mu\text{m Fe/yr}$)
- ρ_{beton} - Rezistivitatea betonului (Ωm)
- LPR -Rezistența liniară de polarizare
- ^aPierdere de secțiune a armăturii din legea Faraday,

4.8.2 Determinarea coeficienților de migrație a ionilor de clor (D)

Imediat după finalizarea testului (RCPT), în mod similar cu testele efectuate de M.T.Bassouni și colab. [150] pe aceleași probe s-a determinat coeficientul de migrație a ionilor de clor prin metoda colorimetrică, în acord cu Testul NT Build 492 [153]. Fâșiile din beton de 50 mm grosime au fost despicate axial și pulverizate cu soluție de azotat de argint (AgNO_3), $0,1 \text{ mol/dm}^3$ (0.1M) formând după 15 minute un precipitat gri deschis, de clorură de argint la suprafața epruvetei. Precipitația de culoare gri deschis a azotatului de argint s-a format în partea feței în care au fost prezenți ioni de clor. Adâncimea de penetrare a clorului (x_d) pentru fiecare probă reprezintă valoarea medie a șapte măsurători efectuate în poziții diferite de-a lungul lățimii eșantionului. Coeficienții de migrație a ionilor de clor (D) au fost calculați cu ecuația Nerst-Planck (4.40) [150]:

$$D = \frac{0,0239(273 + T)L}{(V - 2)t} (x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{V - 2}}) \quad (4.40)$$

unde:

D- Coeficient de migrație aflat în stare de non-echilibru ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)

V-Tensiunea aplicată (V)

T-Valoarea medie între temperatura inițială și finală din soluția anolitică, NaCl ($^{\circ}\text{C}$)

L- Grosimea probei (mm)

4.8.3 Determinarea adâncimii de carbonatare

Adâncimea stratului de carbonatare de pe suprafața betonului întărit s-a determinat la vârsta de 28, 56 și 150 zile, în acord cu standardul SR CR 12793:2002 [154]. Încercările s-au efectuat pe fragmente de epruvete cu secțiunea de $150 \times 150 \text{ mm}$, obținute din prisme cu lungimea de 600 mm după încercarea la întindere prin încovoiere la vârsta de 28 zile, rezultate din seria a doua de turnare. După 28 de zile de întărire în apă, fragmentele de prismă rămase (unul de $\sim 150 \text{ mm}$ și unul $\sim 300 \text{ mm}$) au fost plasate până la vârsta de 150 zile în camera climatică în condiții de umiditate de $(65 \pm 5\%)$, de temperatură de $(20 \pm 2^{\circ}\text{C})$ și nivel normal de dioxid de carbon. Pentru a verifica ventilarea aerului din camera climatică s-a evaluat rata medie de evaporarea apei

la 7 zile de pe suprafața liberă a unui pahar de 30 mm, rezultatul a fost de 44.59 g. Până la vârsta de 56 de zile epruvetele au fost imersate în apă timp de 6 ore după fiecare 7 zile, în acord cu condițiile climatice aferente clasei de expunere (XC3/XC4), într-un mediu ambiant cu alternanță umiditate-uscăre. Imersarea în apă timp de 6 ore s-a repetat și înainte de testul efectuat la vârsta de 150 zile. Primul test de carbonatare s-a efectuat la 28 de zile imediat după testul de întindere prin încovoiere. La 56 de zile și 150 de zile s-a despiciat câte o fâșie de cca. 50 mm pentru fiecare amestec realizat și s-a pulverizat pe fața proaspăt despiciată soluția de 1% fenolftaleină în 70% alcool etilic. Adâncimea carbonatării d_k (mm), s-a determinat prin măsurarea distanței de la suprafața exterioară a betonului la marginea regiunii colorate în roșu-purpuriu [152].

4.8.4 Determinarea densității, absorbției de apă și a conținutului de pori permeabili al betonul întărit

Pe fragmentele cilindrice rămase după tăierea fâșiilor cilindrice cu diametrul de 100 mm, utilizate la testul (RCPT), s-a determinat la vârsta de 150 de zile densitatea și conținutul de pori permeabili. Densitatea aparentă, ρ_a , s-a determinat prin măsurarea volumului de apă dislocuit, în acord cu metoda de referință din EN 12390-7: 2002 [155]. După cântărirea în stare de umiditate naturală (m) epruvetele s-au menținut în apă până la saturate completă. Epruvetele saturate s-au cântărit mai întâi în aer (m_a) iar etrierul s-a cântărit gol în apă (m_{st}). S-a plasat fiecare epruvetă în etrier și s-a scufundat în apă până când eșantionul scufundat și nivelul apei de pe etrier a fost același cu cel măsurat fără epruvetă, s-a înregistrat masa (m_w) din cântărirea hidrostatică.

$$\rho_a = \frac{m}{V_a} = \frac{m}{m_a - [(m_{st} + m_w) - m_{st}]} \rho_w \quad (4.41)$$

Aici, (m) este masa epruvetei în stare de umiditate naturală în grame și (V_a) este volumul aparent al epruvetei, în cm^3 ;

Densitatea după imersie și fierbere, absorbția apei și conținutul de pori permeabili s-au obținut în acord cu ASTM C 642-2006 [140], metodele de lucru au fost descrise la paragraful 4.6.3.

4.8.5 Determinarea rezistenței la compresiune la vârsta de 150 de zile

Determinarea rezistenței la compresiune, conform cu SR EN 12390-3:2009/AC:2011 [107], s-a realizat pe un fragmente de prismă cu dimensiunea de 150x150x300 mm rezultate după efectuarea testului de întindere prin încovoiere la vârsta de 28 de zile. Conservarea epruvetelor după 28 de zile s-a realizat în camera climatică.

5 Evaluarea (IA₂₈) și selectarea dozajelor de substituție cu zgură de furnal

5.1 Introducere

Cercetările realizate în cadrul acestei lucrări reprezintă un prim pas în dezvoltarea unor betoane rutiere *eco-friendly* utilizând constituenți suplimentari cu caracteristici cementoase (CSCC) de tip zgură granulată și măcinată (GGBS) și agregate din zgură concasată (ACBFS), procurate din surse locale. Cercetările efectuate de către O. Corbu și colab. [156] pe mortare de ciment, folosind cantități reduse de materiale, cu scopul de a determina nivelul activității puzzolanice a deșeurilor din sticlă pulverulentă au constituit un model de referință pentru începutul acestui program experimental. Studiul efectuat de S.K. Rao și colab. [157] a arătat că înlocuirea cimentului cu 6% (GGBS) a redus rezistența la compresiune și rezistența la întindere din încovoiere la vârsta de 3 zile, dar a existat o îmbunătățire continuă și semnificativă a rezistențelor rezultate la 7, 28 și 90 de zile.

Zgura granulată conține în mod normal mai mult decât 95% sticlă care după măcinare se transformă în pulbere fină sub 63 μm și poate fi utilizată ca material suplimentar cementos în locul clinkerului iar prin amestecare cu cimentul, activator principal al zgurii, prezintă activitate hidraulică latentă și unele caracteristici puzzolanice din reacția cu portlanditul [158].

Determinarea rezistenței la îngheț-dezgheț este o componentă importantă din succesiunea cerințelor care trebuie îndeplinite pentru asigurarea durabilității, [159]. Forma, dimensiunile, distribuția orientarea și volumul porilor influențează proprietățile betonului cum ar fi permeabilitatea și gelivitatea. Durabilitatea betonului și reducerea pierderii de rezistență din îngheț-dezgheț este susținută de porii de dimensiuni mici (microporii sau porii de gel), distribuții uniforme în toată masa mortarului și de reducerea porilor capilari de dimensiuni mari. Cu cât volumul porilor din mortar este mai mic cu atât absorbția apei și porozitatea este mai mică, [160] și implicit celelalte caracteristici precum compactitatea, rezistențele la compresiune au valori mai mari.

Scopul principal al programului general experimental al cercetării a urmărit proiectarea unor amestecuri noi de betoane de ciment cu zgură

de furnal utilizate în domeniul infrastructurilor rutiere care să fie durabile și să asigure un management eficient al subproduselor secundare industriale. Depozitarea subproduselor industriale și producerea cimentului Portland este nocivă pentru mediul înconjurător. La producerea unei tone de ciment se degajă în atmosferă cca. o tonă de dioxid de carbon, [161].

5.2 Ipoteze de lucru/obiective

Cercetările preliminare efectuate pe mortare de ciment cu zgură, s-au realizat în scopul de a evalua indicele de activitate la 28 de zile (IA_{28}) a zgurii granulate și măcinate (GGBS) și de a selecta cât mai eficient dozajele de zgură utilizată pentru a substitui materialele naturale precum cimentul și nisipul 0/4 mm din compoziția rețetelor de betoane rutiere.

Necesarul de materiale reduse din compoziția mortarelor de ciment au facilitat obținerea unor rezultate rapide pentru cele mai importante caracteristici fizice și mecanice ale betoanelor rutiere. S-a analizat efectul zgurii de furnal utilizată în diferite dozaje de substituție a cimentului și a nisipului 0/4 mm asupra proprietăților fizice (densitate, absorbția apei, porozitate, compactitate) și a proprietăților mecanice (rezistențe la compresiune și la întindere). Mai mult mortarele de ciment, în compoziția cărora s-a încorporat zgură de furnal, s-au încercat și la 150 de cicluri repetate de îngheț-dezghet, rezistență care reprezintă o caracteristică esențială pentru durabilitatea betoanelor rutiere. Au fost puse în evidență valorile obținute pentru suprafața specifică și densitatea reală a zgurii granulate și măcinate (GGBS) utilizată ca liant, comparativ cu a cimentului Portland și densitatea zgurii negranulate răcită la temperatura aerului (ACBFS) utilizată ca și agregat concasat la dimensiunea 0/4 mm comparativ cu a nisipului natural. Toate aceste caracteristici determinate pe mortare au impact asupra betoanelor rutiere aflate în stare proaspătă și întărită. În stare proaspătă influențează reologia, caracteristicile de întărire, lucrabilitatea și ușurința finisării, iar în stare întărită sunt influențate caracteristicile mecanice și a celor de durabilitate [162].

În această etapă s-au proiectat trei grupe de compoziții de mortar în care mai întâi s-a substituit, în diferite proporții, cimentul cu pulberea de (GGBS), în a doua grupă a fost substituit doar agregatul natural cu agregat din zgură concasată (ACBFS) și în a treia grupă pulberea de zgură (GGBS) s-a adăugat la masa cimentului, iar agregatul natural a fost

substituit cu agregat artificial din zgură. Cantitățile și procentele de materiale utilizate în compoziția amestecurilor realizate sunt prezentate în Tabelul 5-1.

Tabelul 5-1. Cantitățile și procentele de materiale utilizate în compoziția amestecurilor de mortare

Materiale						
Denumire amestec	CEM I (g)	(GGBS) (g)	AN 0/4 mm (g)	(ACBFS) 0/4 mm (g)	Apa (cm ³)	Ad (cm ³)
1.Mc	450±2		1350±5		225± 1	
Grupa I: Substituție CEM I cu 10%, 20%, 30%,40%,50%,60% (GGBS)						
2.G1	405±2	45	1350±5		225± 1	
3.G1	360±2	90	1350±5		225± 1	
4.G1	315±2	135	1350±5		225± 1	
5.G1	270±2	180	1350±5		225± 1	
6.G1	225±2	225	1350±5		225± 1	
7.G1	180±2	270	1350±5		225± 1	
Grupa II: Substituție AN cu 20%, 40%, 60%,80%(ACBFS)						
8.G2	450±2		1080±5	270±5	225± 1	
9.G2	450±2		810±5	540±5	225± 1	
10.G2	450±2		540±5	810±5	225± 1	
11.G2	450±2		270±5	1080±5	225± 1	
Grupa III: Adaos 15%(GGBS) ,substituție AN cu 20%,40%,60%,80%(ACBFS), 1.2% Ad						
12.G3	450±2	67.5	1080±5	270±5	190± 1	5.4
13.G3	450±2	67.5	810±5	540±5	205± 1	5.4
14.G3	450±2	67.5	540±5	810±5	210± 1	5.4
15.G3	450±2	67.5	270±5	1080±5	215± 1	5.4

5.3 Materiale și metode

5.3.1 Materiale

Pentru mortarul de control (Mc) au fost utilizate următoarele materiale convenționale: cimentul Portland de tip CEM I 42,5R procurat de la HOLCIM România S.A, fabrica din Aleșd și nisipul natural de dimensiunea 0/4 mm s-a procurat de la balastiera Beclănuț din jud. Bistrița-Năsăud. Performanțele cimentului Portland CEM I 42,5R procurat de la firma S.C.HOLCIM România S.A, declarate de furnizor sunt în acord cu SR EN 197-1:2011 [14] din Tabelul 5-2.

Tabelul 5-2. Caracteristicile cimentului CEM I 42.5R

Caracteristicile cimentului	Performanța cimentului
-----------------------------	------------------------

Clincher-K (% din masă) Componente auxiliare	95÷100 0÷5
Timp inițial de priză, (minute)	Min.60
Stabilitate /expansiune, (mm)	Max.3
Rezistența la compresiune inițială, (MPa)	Min.24
Rezistența la compresiune standard, (MPa)	Min.46
Pierderea de calcinare, (%)	Max.5
Reziduu insolubil, (%)	Max.5
Conținutul de sulfați (sub formă de SO ₃), (%)	Max.4
Conținutul de cloruri, (%),	Max.0,1

Zgura de furnal granulată la dimensiune 0/10 mm și agregatul din zgură concasat la dimensiunea 0/4 mm au fost procurate de la Combinatul siderurgic din Galați. Caracteristicile zgurii granulată au fost testate de către producător în acord cu cerințele stabilite prin SR EN 15167-1:2007 [20] și SR 648 :2002 [163]. Compoziția oxidică a zgurii granulată produsă de compania Liberty este redată în Tabelul 5-3.

Tabelul 5-3. Analiza oxidică a zgurii granulată (GGBS)

(GGBS)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
(%)	36.70	9.50	0.23	8.70	42.00	0.55	0.28	0.53

Suma oxizilor prezenți în zgura granulată permit stabilirea indicelui de bazicitate, în funcție de care zgurile se împart în trei grupe: acide – când predomină oxizii de SiO₂, P₂O₅, bazice – când predomină oxizii de CaO, MgO, FeO, MnO, amfoterice – când predomină Al₂O₃. Din punctul de vedere al indicelui de bazicitate zgura granulată analizată se încadrează în categoria zgurilor bazice, având oxizi bazici în procent de 51.48%. În acord cu SR EN 15167:1-2007 [20], zgură de furnal granulată s-a analizat după sistemul CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO. Cerințele standardului [20] impun ca suma maselor de CaO+ MgO+ SiO₂ să fie mai mare de 2/3 și raportul de masă (CaO+MgO)/(SiO₂)>1, condiții care au fost îndeplinite.

Agregatele din zgură concasate la dimensiunea 0/4 mm au fost obținute prin procesul de răcire lentă, solidificate în aer liber și procesate mecanic în instalații de concasare, urmat de procesul de sortare. Caracteristicile esențiale ale agregatului natural și artificial, sortul 0/4 mm, au specificații tehnice în acord cu SR EN 12620/12620+A1 :2008 [61] și SR EN 13242/13242+A1:2008 [117].

Aditivul superplastifiant tip MasterReheobuild 572, a fost procurat de la distribuitorul din România al companiei BASF, având instrucțiuni de utilizare a dozajului cuprins în intervalul (0.4÷2)% din masa cimentului și caracteristici în acord cu SR EN 934:2 [83].

Materialele au fost amestecate cu apă potabilă preluată de la rețeaua de alimentare a orașului Cluj-Napoca a cărei caracteristici sunt în acord cu cerințele SR EN 1008 [81].

Granulozitatea și conținutul de particule fine pentru agregatele din zgură au fost determinate în laboratorul de construcții de materiale, din cadrul UTCN. De asemenea s-a determinat și densitatea agregatelor în stare îndesată obținându-se valorile indicate în Tabelul 5-4.

Tabelul 5-4. Densitatea în stare îndesată a nisipului natural și a agregatului din zgură (ACBFS)

Denumirea materialului	Unitatea de măsură (UM)	Valoarea
Densitatea în stare îndesată a agregate naturale (AN) cu dimensiunea de 0/4mm	Kg/m ³	1767
Densitatea în stare îndesată a agregatelor concasate din zgură negranulată (ACBFS) cu dimensiunea de 0/4mm	Kg/m ³	1697

5.3.2 Metode

Pe pulberea de ciment și de zgură granulată și măcinată s-a determinat densitatea reală și suprafața specifică. În cadrul experimentului a fost investigat, cu ajutorul sondei Tetmayer, necesarul de apă pentru obținerea unei paste de consistență normală pentru două compoziții de mortar. Prima pastă s-a realizat doar cu ciment CEM I 42.5R și în a doua pastă de ciment s-a substituit cimentul Portland cu 20% (GGBS). Experimentul a continuat pe cele două tipuri de pastă de ciment cu determinarea începutului și sfârșitului de priză.

Pentru determinarea caracteristicilor fizice (densitate, absorbția de apă, compactitate, porozitate) și a caracteristicilor mecanice (rezistență la compresiune, rezistență la întindere și rezistență la îngheț-dezghet) ale mortarelor de ciment, s-au confecționat șase epruvete prismatice la fiecare compoziție cu dimensiuni de 40x40x160 mm, care au fost conservate conform cu SR EN 1015-11+A1:2007 [100]. Încercările pentru determinarea rezistenței la compresiune și întindere prin încovoiere s-au efectuat la 7 și 28 de zile a căror valoare s-a calculat ca medie a rezultatelor obținute de la trei epruvete pentru fiecare

amestec. Proprietățile fizice ale mortarelor întărite (densitate aparentă, absorbție a apei, compactitate și porozitate) s-au efectuat la vârsta de 28 de zile pe fragmente de prisme în acord cu procedura din SR EN 1015-10:2002/A1:2007 [164] și STASUL 2414:1991 [101].

Rezistențele medii la compresiune obținute pe mortarul (Mc) și pe mortarul realizat cu 50:50 ciment-zgură (6.G1) au permis determinarea indicelui de activitate la 28 de zile de zgură (GGBS) în acord cu SR EN 15167-1:2007 [20].

Evoluția procesului de deteriorare la 150 de cicluri de îngheț-dezghet, la vârsta de 90 zile, s-a determinat utilizând metoda distructivă în acord cu SR 3518:2009 [102], din pierderea de rezistență la compresiune a epruvetelor încercate la îngheț-dezghet comparate cu epruvetele martor.

Prepararea, conservarea și testarea probelor s-a efectuat în laboratorul de materiale al Universității Tehnice din Cluj-Napoca, Facultatea de construcții utilizând metodele și procedurile descrise la subcap. 4.1.

5.4 Rezultate

5.4.1 Caracteristici fizice determinate pe pulberea de zgură (GGBS) și pe pasta de ciment cu zgură

Pentru compoziția mortarelor din grupa întâi măcinarea zgurii granulate (GGBS) la dimensiunea de sub $63\ \mu\text{m}$ s-a efectuat în laboratorul de materiale de construcții, cu mașina Micro-Deval cu bile din oțel, iar pentru compoziția mortarelor din grupa a treia s-a utilizat zgură măcinată la fabrica de ciment Aleșd din județul Bihor. Așa cum se poate observa în Tabelul 5-5 au rezultat valori diferite pentru densitatea absolută și suprafața specifică obținute pentru zgura măcinată (GGBS), provenită din același lot, indicând faptul că finețea de măcinare a zgurii a fost influențată de echipamentul de măcinare. De asemenea, se poate observa că suprafața specifică a cimentului a înregistrat o valoare mai mică decât la zgura (GGBS). Finețea de măcinare mai mare a liantului determină creșterea cantității de apă pentru atingerea unui anumit nivel de lucrabilitate a mortarului. Însă reducerea cantității de apă poate fi realizată prin utilizarea unui superplastifiant. Cu cât cimentul este mai fin, cu atât este nevoie de o cantitate mai mare de superplastifiant [165]. Utilizarea superplastifianților contribuie la o mai bună dispersie a

particulelor de ciment în faza de amestec a materialelor pe bază de ciment [166].

Tabelul 5-5. Rezultatele experimentale obținute pentru densitatea reală și suprafața specifică a pulberii de ciment și de zgură

Caracteristica materialului	UM	Ciment (CEM I) 42.5R	(GGBS) măcinată M. Deval	(GGBS) măcinată Aleșd
Masa pulberii , m	g	5	5	5
Volumul de lichid scurs din biureta , Vs	cm ³	23.32	23	23.20
Volumul pulberii Vp=25-Vs	cm ³	1.8	2	1.8
Densitatea pulberii testate ρ	g/cm ³	2.98	2.5	2.77
Volumul celulei de permeabilitate Vcp	cm ³	2	2	2
Masa de pulbere testată m _z = ρ _z V _{cp} (1-n)	g	2.77	2.5	2.77
Masa de pulbere standard (cuart) m _s = ρ _s V _{cp} (1-n)	g	2.63	2.63	2.63
Timpul de revenire la pulberea standard (cuart)	s	111	87.50	76.30
Constanta aparatului, K	-	76.98	86.47	92.58
Timpul de revenire la pulberea testată, t	s	106	64	108.40
Suprafața specifică	cm ² /g	4385	4576	5770

În Tabelul 5-6 s-au înregistrat rezultatele obținute pentru necesarul de apă la o pastă de consistență normală, începutul și sfârșitul de priză al pastei. Pentru nivelul de substituție de 20% a cimentului cu (GGBS) necesarul de apă pentru obținerea unei paste de consistență normală a fost același ca pentru pasta de referință realizată cu (CEM I). Începutul prizei la pasta de ciment cu 20% (GGBS) a înregistrat un decalaj de 31 de minute comparat cu cel înregistrat la pasta cu cimentul de referință, dar sfârșitul prizei la cele două amestecuri de pastă de ciment a înregistrat durate de timp apropiate.

Tabelul 5-6. Determinarea apei pentru consistența normală și timpul de priză pe pasta de ciment

Cantitate liant (g)	Adâncimea sondei (mm)	Apa (ml)	Început de priză (h ^{min})	Sfârșit de priză (h ^{min})
300 g(CEM I 42.5R)	7	90	1 ¹⁹	2 ⁵⁵
240 g (CEM I)+ 60 g (GGBS)	7	90	1 ⁵⁰	2 ⁵⁰

5.4.2 Caracteristicile fizice și mecanice determinate pe mortare întărite

Valorile obținute pentru caracteristicile fizice ale mortarelor întărite sunt prezentate în Tabelul 5-7.

Tabelul 5-7. Caracteristicile fizice ale mortarelor de ciment întărite

Denumire amestec	Densitatea aparentă (g/cm ³)	Compactitate (%)	Porozitate (%)	Absorbția apei (%)
1.Mc	2.110	92.95	7.05	6.37
2.G1	2.090	90.48	9.52	6.79
3.G1	2.110	88.66	11.34	6.95
4.G1	2.090	87.82	12.18	7.32
5.G1	2.070	86.97	13.03	7.23
6.G1	1.940	83.98	16.02	7.43
7.G1	1.920	83.12	16.88	8.15
8.G2	2.193	94.94	5.06	3.32
9.G2	2.216	93.07	6.93	4.28
10.G2	2.192	92.10	7.90	3.83
11.G2	2.218	88.72	11.28	7.26
12.G3	2.263	95.08	4.92	3.69
13.G3	2.390	94.80	5.20	3.73
14.G3	2.332	93.28	6.72	3.89
15.G3	2.192	93.97	6.03	4.01

Variația densității amestecurilor de mortar cu diferite procente de (GGBS) și (ACBFS) la vârsta de 28 de zile este prezentată în Figura 5-1. Densitatea mortarului de control este de 2110 kg/m³. Din analiza variației densității la cele trei grupe de mortar se observă că în amestecurile din grupa G1, densitatea descrește odată cu creșterea cantității de (GGBS) și este mai mică comparativ cu densitatea mortarului de control. La toate amestecurile din grupa G2 și G3 densitatea aparentă este mai mare decât densitatea mortarului de control.

Porozitatea și absorbția apei au tendințe similare de creștere, pentru toate amestecurile cu zgură, odată cu mărirea cantității de (GGBS) și de (ACBFS), ca în Figura 5-2. Porozitatea mai mare din amestecurile G1 se datorează numărului mare de pori care absorb mai multă apă [167]. În amestecurile din grupa G2 variația porozității și absorbției de apă sunt sub valoarea mortarului de control până la un nivel (de 40%), după care sunt peste valoarea de control.

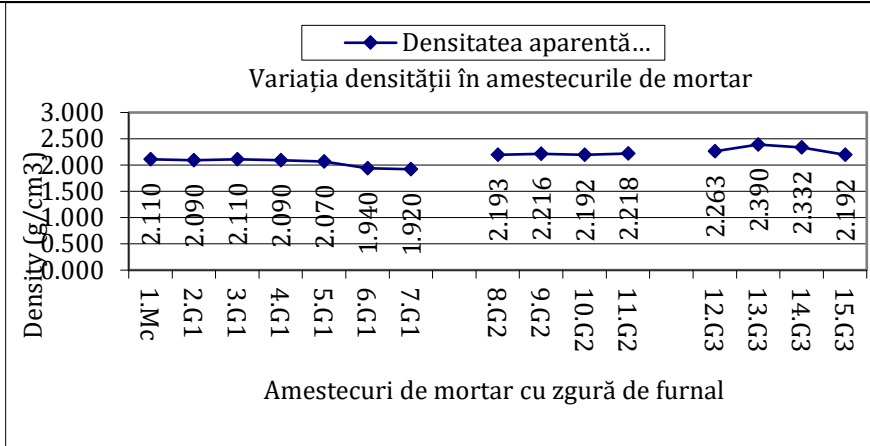


Figura 5-1. Variația densității aparente (ρ) în amestecurile de mortar

Atât absorbția apei cât și porozitatea înregistrează valori mai scăzute în amestecurile din grupa G3, comparativ cu mortarele din grupa G1 și comparativ cu rezultatele obținute la mortarul de control Mc.

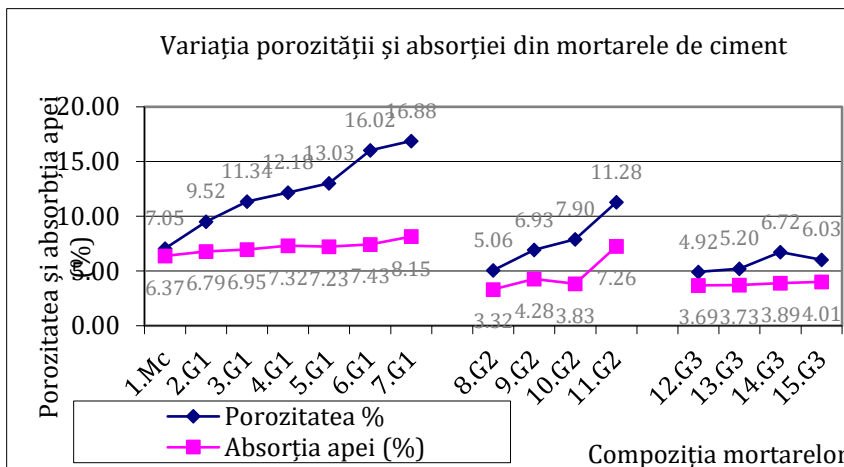


Figura 5-2. Variația porozității și absorbției de apă în amestecurile de mortar

Valoarea indicelui de activitate la 28 zile (I_A^{28}) al zgurii (GGBS) a rezultat de 64%, calculat ca raport între rezistența la compresiune a unui amestec de mortar cu 50%(GGBS):50% ciment Portland și rezistența la compresiune a mortarului cu 100% ciment Portland.

Rezultatele mecanice obținute pentru rezistențele la întindere prin încovoiere, la compresiune și pentru pierderile de rezistențe la compresiune la 150 de cicluri de îngheț-dezgeț sunt prezentate în Tabelul 5-8.

Tabelul 5-8. Rezistențele mecanice și pierderile de rezistențe la compresiune (η) după 150 de cicluri de îngheț-dezghet

Mix	f_c 7 zile (MPa)	f_c 28 zile (MPa)	f_{cf} 7 zile (MPa)	f_{cf} 28 zile (MPa)	f_c 90 zile, martor (MPa)	f_c 150 cicluri I-D (MPa)	η 150 cicluri I-D (MPa)
1.Mc	34.48	51.55	3.71	4.19	43.33	39.75	9.01
2.G1	31.71	52.07	3.15	3.89	53.51	48.08	11.29
3.G1	27.4	43.99	2.98	3.49	45.36	43.53	4.20
4.G1	27.29	43.91	3.21	3.52	44.81	42.53	5.36
5.G1	22.29	38.1	2.99	3.31	37.61	28.16	33.56
6.G1	18.06	33.14	2.49	2.84	33.88	24.94	36.02
7.G1	14.07	26.94	1.92	2.22	28.12	21.36	31.63
8.G2	33.17	46.51	3.09	4.65	49.99	45.74	8.50
9.G2	34.51	49.71	2.72	4.6	54.16	48.16	11.08
10.G2	37.08	53.1	3.1	4.61	58.57	53.55	8.57
11.G2	40.78	57.21	3.13	4.78	57.33	51.35	10.43
12.G3	63.97	71.59	5.62	5.84	78.93	76.22	3.44
13.G3	62.06	72.23	6.03	6.67	78.59	45.30	4.19
14.G3	63.57	75.92	5.8	6.68	79.67	75.66	5.05
15.G3	63.96	70.19	5.85	6.05	79.55	78.54	1.27

Se observă că evoluția rezistențelor la compresiune (Fig. 5-3) și la întindere prin încovoiere (Fig. 5-4) este similară. O creștere a nivelului de substituție cu (GGBS) în grupa G1 a condus la descreșterea compactității și implicit a rezistențelor mecanice.

Cele mai bune rezultate și peste nivelul mortarului de control, s-au obținut pentru compozițiile din grupa G3, prin combinarea zgurii măcinate (GGBS) ca adaos de 15 % la masa cimentului, substituția agregatelor naturale cu diferite procente de agregate de zgură concasată (ACBFS) și utilizarea aditivului superplastifiant. Utilizarea superplastifiantului a permis reducerea cantității de apă, care împreună cu adaosul de pulbere de zgură (GGBS) au avut un efect pozitiv asupra omogenității mortarelor din grupa G3. Omogenitatea pastei de ciment prezintă aceleași proprietăți în întreg volumul de material datorită distribuției uniforme a dimensiunilor porilor capilari [165].

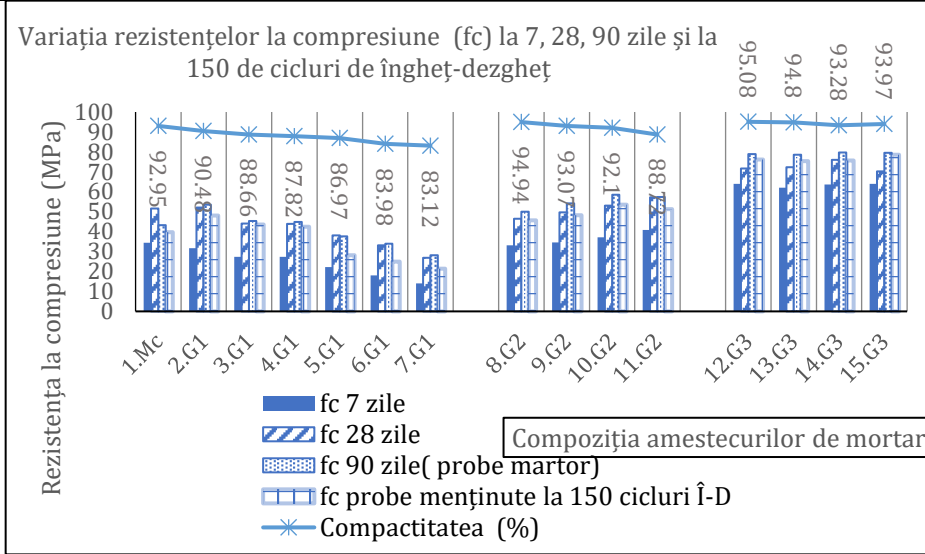


Figura 5-3. Variația rezistențelor la compresiune și a compactității în amestecurile de mortar

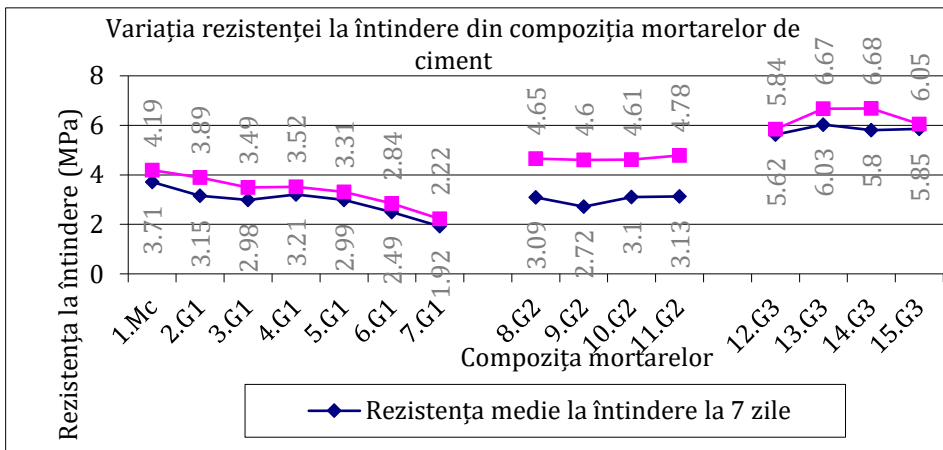


Figura 5-4. Variația rezistenței la întindere din încovoiere în amestecurile de mortar

Creșterea rezistențelor mecanice la amestecurile din grupa G3 se datorează finității de măcinare mai mare a pulberii de zgură decât a cimentului [168]-[170].

Efectul ciclului de îngheț-dezgheț asupra celor trei grupe de amestecuri de mortar de ciment sunt prezentate în Figura 5-5. Se observă și de această dată că cele mai mici pierderi de rezistențe la compresiune din îngheț-dezgheț sunt obținute pentru grupa G3.

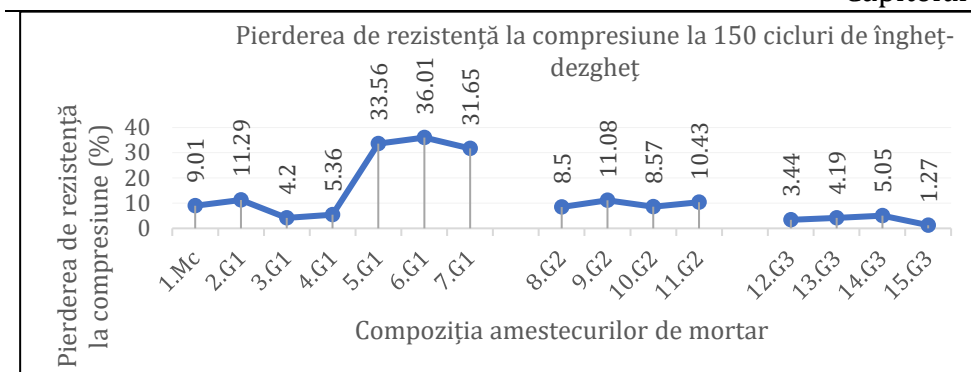


Figura 5-5. Pierdere rezistenței la compresiune la 150 de cicluri de îngheț-dezghet în amestecurile de mortar

5.5 Discuții

Principiul de bază al evoluției calității mortarelor realizate este legat de interdependența dintre proprietățile fizice și mecanice care din acest punct de vedere trebuie să respecte următoarele: o porozitate redusă conduce la o absorbție a apei reduse, respectiv la o densitate mare în amestecurile de mortar. Toate cele menționate trebuie să inducă rezistențe mecanice mari sau invers.

Din evoluția valorilor rezultate pentru caracteristicile fizice și mecanice testate, observăm pentru grupa G1 că porozitatea și absorbția apei crește odată cu creșterea substituției de ciment cu zgură măcinată (GGBS), în timp ce densitatea mortarelor se reduce. Descreșterea densității mortarelor este influențată și de greutatea specifică mai mică, a zgurii măcinate decât a cimentului Portland. Deși finețea de măcinare a zgurii (GGBS) a fost sensibil mai mare decât a cimentului, $4576 \text{ cm}^2/\text{g}$ față de $4385 \text{ cm}^2/\text{g}$, se observă că rezistențele la compresiune scad odată cu creșterea nivelului de substituție cu (GGBS).

Finețea de măcinare a zgurii (GGBS) influențează Indicele de activitate la 28 de zile (IA_{28}). Valoarea rezultată de 64% a încadrat pulberea de zgură (GGBS) utilizată în acest experiment sub clasa minimă de rezistență 80, în acord cu clasificarea din standardul ASTM C989 [19]. Acest standard stabilește trei clase de rezistență (80, 100, 120) pentru pulberea de zgură (GGBS) în funcție de raportul între rezistența medie la compresiune a mortarului realizat cu zgură și ciment în proporție de 50:50 și de rezistența medie la compresiune a mortarului realizat cu ciment Portland.

Cea mai mare pierdere a rezistenței la compresiune după 150 de cicluri de îngheț-dezghet se observă la amestecurile care conțin peste 40% zgură măcinată (GGBS), fiind peste valoarea admisă de 25 % în acord cu SR 3518.:2009[102]. Ca urmare, odată cu creșterea porozității din amestecurile proiectate, deteriorarea mortarului în urma ciclurilor de îngheț-dezghet este mai mare.

În amestecurile din grupa G2 în care s-au substituit agregatele naturale (AN) cu diferite procente de agregate concasate din zgură (ACBFS) se observă că evoluția rezistențelor la compresiune și încovoiere au valori apropiate de amestecul de control. Aceste rezultate se justifică prin faptul că suprafața aspră a agregatelor concasate din zgură formează legături mai bune cu pasta de ciment, însă reduce lucrabilitatea, în concordanță cu literatura de specialitate [6]. O lucrabilitate scăzută conduce la creșterea porozității odată cu creșterea procentului de substituție a agregatelor naturale cu agregate artificiale, confirmate de rezultatele din acest experiment.

În amestecurile din grupa G3 în care s-a adus aport constant de 15% zgură măcinată (GGBS), s-au substituit agregatele naturale (AN) cu diferite procente de agregate concasate din zgură (ACBFS) și s-a utilizat aditiv superplastifiant (Ad), se observă o creștere semnificativă a rezistențelor mecanice față de amestecul martor. De asemenea, se confirmă principiul care stă la baza evoluției calității amestecurilor pe bază de ciment, scăderea porozității și a absorbției de apă a amestecurilor conduce la creșterea densității și a rezistențelor mecanice.

Zgura granulată și măcinată (GGBS) reprezintă, conform standard SR-EN 206:2002+A1:2017 [10] un adaos de tip II cu proprietăți hidraulice latente dar care poate să prezinte reacții puzzolanice din reacția cu hidroxidul de calciu. Creșterea semnificativă a rezistențelor mecanice pentru amestecurile din grupa G3 se datorează, în principal, a adaosului de zgură măcinată (GGBS) cu suprafața specifică ($5770 \text{ cm}^2/\text{g}$) mai mare decât a cimentului [167]. Această observație este susținută de rezultatele obținute pentru amestecurile din grupa G2 care arată că influența agregatului nu aduce creșteri asupra rezistențelor mecanice. Adaosurile minerale cu proprietăți puzzolanice au capacitatea de a reacționa cu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ în prezența apei. Viteza de reacție fiind dată de caracteristicile intrinseci, cum ar fi suprafața specifică, compoziția chimică și conținutul de fază activă. Pulberea de zgură (GGBS) cu suprafața specifică mai mare a contribuit la o umplere mai bună a porilor din compozițiile de mortar din grupa G3, arătat și studiul [167]. Utilizarea aditivului superplastifiant a îmbunătățit lucrabilitatea

mortarului la amestecurile din grupa G3 ceea ce a condus la reducerea raportul apă-ciment. Această îmbunătățire a gradului de lucrabilitate se datorează (pe lângă utilizarea aditivului) și a unei dispersii mai bune a particulelor de (GGBS) decât a cimentului și agregatului fin din amestecul mortarului, iar reducerea raportului apă/ciment justifică creșterea rezistențelor mecanice [13].

Astfel utilizarea agregatelor din zgură de furnal, prin substituția materialelor naturale precum cimentul Portland și nisipul natural poate reduce impactul asupra mediului înconjurător prin reducerea amprentei de CO₂ și poate micșora consumul uriaș de resurse naturale folosite în industria construcțiilor [168]. Mai mult decât atât, utilizarea (GGBS) ca adaos la masa cimentului îmbunătățește lucrabilitatea [171] și durabilitatea proprietăților betonului [172]–[174].

5.6 Concluzii parțiale

Din cercetarea experimentală efectuată pe mortare de ciment cu zgură de furnal au rezultat următoarele concluzii:

- Evoluția rezistențelor mecanice mai mici la vârste timpurii dar dezvoltate în timp la nivelul celor de referință realizate cu ciment Portland s-a confirmat și în acest experiment prin rezultatele obținute pe compozițiile de mortar cu zgură realizate. Mortarul de referință a obținut rezistența la compresiune la 7 zile 67% din rezistența la 28 de zile, iar mortarul cu zgură a obținut rezistențe la compresiune mai mici, cuprinse între (52÷62)% din (f_{c28}), fiind în descreștere odată cu creșterea nivelului de substituție a cimentului cu pulbere de zgură (GGBS). Dar, s-a observat că la vârsta de 90 de zile compozițiile de mortare cu nivel de substituție a cimentului până în 30% cu pulbere de zgură, au obținut rezistențe mecanice peste valoarea rezistenței obținute la compoziția mortar. Aceste rezultate se justifică prin faptul că pulberea de zgură (GGBS) are o reacție de hidratare mai lentă și o rată de eliberare a căldurii mai scăzută decât a cimentului Portland, fiind indicat ca pentru compozițiile care conțin zgură granulată și măcinată, încercările să se efectueze la 90 de zile.
- Suprafața specifică a pulberii de zgură a fost influențată de performanța echipamentului de măcinare înregistrând valoarea de 5770 cm²/g pentru zgura măcinată la fabrica de ciment din Aleșd și de 4576 cm²/g pentru zgura măcinată în laboratorul UTCN. Suprafața specifică a pulberii de zgură influențează direct proporțional (I_{A28}), o finețe mai

mare a pulberii de zgură conduce la creșterea indicelui de activitate a cesteia.

- Începutul de priză determinat pe pasta de ciment cu 20% substituție de (GGBS) a condus la o decalare de 31 min. în comparație cu pasta de ciment de referință realizată cu ciment Portland. Acest decalaj de timp facilitează o distanță de transport mai mare și prelungirea timpului pentru procesul de punere în operă a betonului rutier.
- Pentru mortarele din grupa G3 în care s-au combinat cele două forme de zgură de furnal, 15% adaos de (GGBS) la masa cimentului, substituție de agregate naturale în procente de 20%, 40%, 60%, 80% de agregate din zgură (ACBFS) s-au obținut cele mai bune rezultate. Se observă că rezistența la compresiune la 28 de zile a crescut cu procentul de 47.27% la mortarul în care s-a substituit nisipul natural cu 60% cu agregat din zgură (ACBFS). Așa cum era de așteptat porozitatea și pierderile de rezistențe la compresiune după 150 de cicluri de îngheț-dezgheț au scăzut, respectiv rezistența la îngheț-dezgheț a crescut comparând rezultatele cu cele ale amestecului martor.
- Cercetările realizate pe mortare de ciment cu zgură de furnal justifică selectarea proporțiilor de materiale pentru rețetele de betoane rutiere arătând că utilizarea unor procente optime de substituție a materialelor naturale cu zgură de furnal pot conduce la performanțe echivalente cu amestecul de referință. Rezultatele cercetărilor din acest capitol au fost publicate sub formă de articole științifice în lucrările [175]-[177].

6 Proiectarea și încadrarea în clase a betoanelor (BcR-S)

6.1 Introducere

Utilizarea zgurii de furnal granulată și măcinată în amestecurile de beton este susținută de economisirea energiei, reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră și de consumul redus de materii prime naturale [25], [178], [179]. În proiectarea betoanelor rutiere cu zgură de furnal s-a ținut seama de rezultatele obținute în cap. 5, la cele mai reprezentative amestecuri de mortar de ciment cu zgură de furnal și de rezultatele obținute de alți cercetători în studii similare. Arash Aghaeipour și Morteza Madhkhan [178] a investigat efectele zgurii de furnal granulată (GGBS) pentru procente de substituție de 20%, 40% și 60%, privind absorbția apei, permeabilitatea și rezistența la îngheț-dezghet în betonul de ciment compactat cu cilindri compactori (RCC), cu aplicații în infrastructuri rutiere. Rezultatele au arătat o reducere a absorbției apei, dar și a rezistențelor mecanice în betoanele cu conținut de (GGBS) comparativ cu cele fără zgură. Adâncimea de pătrunderea apei sub presiune a fost mai redusă până la nivelul de substituție de 40% după care a fost mai mare decât la amestecul de control. Cele mai mici pierderi de rezistențe după 300 de cicluri de îngheț-dezghet s-au înregistrat la amestecul cu 60% substituție de (GGBS) mai redusă decât la amestecul de control [178]. Tarek U. et al. a studiat posibilitatea utilizării în amestecul de beton a agregatului grosier din zgură de furnal și agregate reciclate din cărămidă. Rezultatele experimentale au arătat că agregatele de zgură (ACBFS) absorb mai puțină apă și au rezistențe la compresiune mai bune în comparație cu agregatele rezultate din cărămidă [180]. Buletinul ACI-EB-EI-06 [60] caracterizează agregatele din zgură de furnal (ACBFS) din punct de vedere a durabilității astfel: cu un număr mare de goluri interne neconectate între ele care formează o structură puternică de agregat cu o greutate specifică relativ scăzută. Agregatele de tip (ACBFS) nu sunt afectate de reacția cu alcalii, nu conțin argilă, șisturi, compuși organici sau alte substanțe care sunt nocive și restricționate de obicei de specificațiile pentru agregatele naturale. Buletinul [60] specifică că utilizarea agregatelor de zgură de furnal

împreună cu un aditiv de antrenare a aerului pot îmbunătăți lucrabilitatea și durabilitatea betoanelor expuse la îngheț-dezghet.

6.2 Ipoteze de lucru/obiective

Din programul experimental efectuat pe mortare de ciment au fost selectate procentele de substituție a materialelor naturale cu zgură de furnal până în limita la care caracteristicilor fizice și mecanice au înregistrat cele mai bune rezultate.

În prima serie de turnare a betoanelor rutiere s-a realizat un număr total de cinci amestecuri.

Primele două amestecuri de control au fost realizate cu ciment Portland tip CEM I 42,5R și cu agregate naturale (AN), iar în următoarele trei amestecuri s-a încorporat zgură de furnal granulată și măcinată sub $63 \mu\text{m}$ (GGBS) și agregate din zgură concasate (ACBFS) la dimensiunea de 0/4 mm în diferite proporții. Pentru identificarea compozițiilor și a cantităților de materiale s-au utilizat notațiile de mai jos:

S 360, amestec de control cu 360 kg/m^3 ciment Portland și (AN);

S 414, amestec de control cu 414 kg/m^3 ciment Portland și (AN);

S 54/20, $360 \text{ kg/m}^3(\text{ciment}) + 54 \text{ kg/m}^3(\text{GGBS}) + 20\% (\text{ACBFS}) + 80\% (\text{AN})$;

S 54/40, $360 \text{ kg/m}^3(\text{ciment}) + 54 \text{ kg/m}^3(\text{GGBS}) + 40\% (\text{ACBFS}) + 60\% (\text{AN})$;

S 54/60, $360 \text{ kg/m}^3(\text{ciment}) + 54 \text{ kg/m}^3(\text{GGBS}) + 60\% (\text{ACBFS}) + 40\% (\text{AN})$;

În comparație cu amestecul de control S 360 zgura de furnal (GGBS) s-a adăugat la masa cimentului în procent de 15%, iar în comparație cu amestecul de control S 414 zgura de furnal (GGBS) a substituit cimentul în procent de 13 %. Zgura de furnal granulată și măcinată (GGBS) a fost adăugată în malaxor la prepararea betonului, împreună cu cimentul Portland, cu rol de constituent suplimentar cu caracteristici cementoase (CSCC) definit astfel în ACI 233R-03 [25] și lucrarea [156]. Nisipul natural (NA) a fost substituit cu agregate din zgură concasată (ACBFS) cu dimensiunea de 0/4 mm, în procent de 20%, 40% și 60%.

A doua serie de betoane rutiere s-a realizat cu aceleași proporții de materiale convenționale și artificiale menționate mai sus. Față de prima serie de amestecuri de beton, s-a urmărit îmbunătățirea lucrabilității, creșterea volumului de aer oclus, încadrarea betonului rutier în clase și continuarea cercetării legat de principalele caracteristici de durabilitate ale betoanelor rutiere cu zgură de furnal (îngheț-dezghet, coroziune și uzură mecanică).

Betonul de ciment rutier cu zgură (**BcR-S**) s-a notat specificând clasa de rezistență la încovoiere a betonului și sufixul **S**, care reprezintă prescurtarea pentru zgura de furnal în acord cu SR EN 197-1 [14].

Proiectarea amestecurilor s-a realizat în acord cu normativul național NE 014:2002 [11], urmărind următoarele criterii:

- îmbrăcăminte realizată într-un singur strat, în sistem de cofraje fixe încadrate în clasa BcR 5,0 corespunzătoare utilizării unui trafic greu și foarte greu;
- dozaj minim de ciment 350 kg/ m³, raportul A/C max. 0.45, cu aditivi plastifianți și antrenori de aer;
- consistența minim 20 mm, densitatea aparentă (2400±40) kg/m³, conținutul de aer oclus minim 3%, în acord cu cerințele specificate în tabelul 3-1, 3-2 și 3-4 din cap.3, NE 014:2002 [11].

Se remarcă unele diferențe între cerințele normativului național NE 014:2002 și normelor altor state, privind cerințele pentru conținutul de aer oclus stabilit în funcție de dimensiunea maximă a agregatului. Ca exemplu Institutul American de Beton ACI 211.1 a stabilit procentul de aer oclus între (5÷6)% pentru dimensiunea maximă a agregatului de 25 mm și clase de expuneri de la moderate la severe [6], în timp ce în NE 014:2002 are valori prevăzute în intervalul (3÷4)%.

Încadrarea în CLASE a betoanelor rutiere s-a efectuat pe baza criteriului rezistenței la încovoiere (f_{cf}), care reprezintă principala caracteristică mecanică a betoanelor rutiere și a rezistenței la compresiune determinate la vârsta de 28, cu valori limită admise în NE 014:2002 [11] și normativul C22:1992 [97], indicate în Tabelul 6-1.

Tabelul 6-1. Condiții de referință minime la proiectarea betonului rutier [11], [97]

Caracteristicile betonului rutier	Rezistența caracteristică la încovoiere la 28 zile pe prisme de 150x150x600 mm (MPa), NE 014:2002	Rezistența caracteristică la încovoiere la 28 zile pe prisme de 100x100x550 mm (MPa), C22:92	Rezistența la compresiune la 28 zile pe cuburi cu latura de 150 mm (MPa), NE 014:2002
Clasa betonului rutier BcR 5.0	5.5	6.3	50
Clasa betonului rutier BcR 4.5	4.9	5.7	44

Analizând condițiile minime prevăzute la proiectarea betoanelor rutiere se observă că rezistența la întindere prin încovoiere determinată la

vârsta de 28 de zile are o valoare de minim 4.9 MPa pentru betoanele de clasa BcR 4.5 și de minim 5.5 MPa pentru clasa BcR 5.0.

La proiectarea rețetelor de betoane rutiere cu zgură de furnal s-a ținut seama de metodologia de calcul din normativul CD147:2002 [95] pentru execuția betoanelor rutiere cu adaos de cenușă de termocentrală și de NE 014:2002 [11] pentru compoziția betoanelor rutiere fără zgură de furnal. Pe de altă parte s-a urmărit a se realiza o corelație cu cerințele de rezistență și de durabilitate stabilite în SR EN 206-1:2002+A1:2017 [10]. Combinațiile de clase de expunere pentru betonul rutier, conform SR EN 206-1, sunt: XF4 (expunere la îngheț F având saturație puternică de apă cu agenți de dezghețare, nivel de umiditate 4), XC4 (expunere la coroziune indusă din carbonat C, alternanță umezire-uscare, nivel de umiditate 4), XD3 (coroziune indusă din cloruri, sare pentru dezgheț D, alternanță umezire-uscare nivel de umiditate 3) și XM2 (expunere la solicitarea mecanică M, nivel 2 de agresivitate intensă de uzură).

6.3 Materiale și metode

6.3.1 Materiale

Pentru compoziția betoanelor rutiere s-a menținut sursa de materiale (ciment, nisip natural, apă și aditivi), a căror caracteristici fizice și mecanice sunt descrise în cap.5.

În compoziția betoanelor rutiere s-a adăugat zgură de furnal granulată și măcinată la fabrica de ciment din Aleșd, jud. Bihor pentru care s-a obținut o suprafață specifică de 5770 cm²/g (în amestecurile turnate în seria întâi) și zgură granulată și măcinată la compania Mutsumi Chemical Industries din orașul Roman, jud. Neamț, pentru care s-a obținut o suprafață specifică de 3775 cm²/g (în amestecurile turnate în seria a doua). Suprafața specifică, determinată în laboratorul UTCN, pentru cimentul Portland, tip CEM I 42.5R, procurat de la HOLCIM România S.A, a înregistrat valoarea de 4385 cm²/g.

Zgura de furnal granulată și agregate concasate din zgură negranulată (ACBFS) la dimensiunea 0/4 mm, au fost furnizate de Combinatul siderurgic din Galați.

Nisipul natural de dimensiunea 0/4 mm a fost procurat de la balastiera Beclănuț din jud. Bistrița-Năsăud. Agregatul grosier concasat (pietrișul) de dimensiunea 4/8 mm provine de la stația de betoane SC Smith Rotrans din Cluj-Napoca, iar agregatele grosiere concasate

(cribluri) de dimensiunea 8/16 mm și 16/25 mm provin de la SC Grandemar Cluj, Cariera Bologna. Agregatele naturale utilizate sunt în acord cu standarde de produs SR EN 13242/13242+A1:2008 [117], SR EN 12620/12620+A1:2008 [61] și SR 667:2001 [118].

6.3.2 Metode

Proiectarea compozițiilor de beton rutier s-a realizat utilizând metoda volumului absolut descrisă la cap.3. La compoziția betonului de referință S 414 s-a efectuat un studiu preliminar prin turnare a trei epruvete cubice de 150 mm, pe un amestec informativ necesar verificării caracteristicilor fizice și mecanice în stare proaspătă și întărită. Ulterior s-au realizat în seria întâi cinci compoziții de beton rutier pentru care s-au confecționat la fiecare amestec 3 epruvete prismatice de 100x100x550 mm, 3 epruvete prismatice de 150x150x600 mm și 3 epruvete cubice de 150x150x150 mm. Probele au fost păstrate în tipare (24±2) ore după care au fost conservate în apă la temperatură de (20±2°C) până la data încercării, la vârsta de 28 de zile, conform cu SR EN 12390-2:2009 [105]. Similar pentru fiecare amestec s-au turnat și betoanele din seria a doua, 3 epruvete prismatice de 150x150x600 mm și 3 epruvete cubice de 150x150x150 mm.

După turnarea betonului s-au efectuat încercările pe betonul proaspăt (densitatea, consistența și aerul oclus). Testele au continuat pe betonul întărit cu rezistențele mecanice la vârsta de 28 de zile determinate pe prisme de 600x150x150 mm. Procedurile tehnice de testare se găsesc descrise la subcap. 4.2.

6.4 Rezultate

6.4.1 Proiectarea compoziției betoanelor

Granulozitatea agregatului total a fost adoptată de 0/25 mm pentru realizarea unei îmbrăcăminți într-un singur strat cu rol de uzură, sorturile agregatelor selectate au fost descrise în cap.3 în acord cu NE014:2002[11]. Agregatele uscate în etuvă s-au cernut, cantitățile rămase de pe fiecare sită s-au cântărit și s-a calculat trecerile prin site, rezultând valorile din Tabelul 6-2. Amestecul total de agregate s-au realizat prin combinarea a 32% din sortul 0/4 mm, 18% din sortul 4/8 mm, 25% sortul din 8/16 mm și 25% din sortul 16/25 mm.

Tabelul 6-2. Valorile trecerilor prin site în urma cernerii sorturilor

Agregate	Treceri în % prin sita								
	0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	25
AN_0/4	5.32	19.12	46.56	71.56	87.01	98.45	100.00	100.00	100.00
ACBFS_0/4	4.85	15.00	32.97	55.11	78.34	98.23	100.00	100.00	100.00
AC_4/8	0.18	0.95	0.95	1.01	1.13	3.78	85.95	100.00	100.00
AC_8/16	0.02	0.16	0.16	0.16	0.16	0.17	2.6	94.80	100.00
AC_16/25	0.09	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	6.34	100.00

Curba granulometrică a agregatului total, a urmărit înscrierea în limitele de granulozitate admise în NE 014: 2002 [11]. Limitele pentru dimensiunile sitelor intermediare, prevăzute în SR EN 933-1:2012 [96] au rezultat prin interpolate, ca în Tabelul 6-3.

Tabelul 6-3. Granulozitatea agregatelor pentru amestecul total

Amestec	Treceri în % prin sita								
	0.125	0.25	0.5	1	2	4	8	16	25
S 360	1,76	6.35	15.14	23.15	28.11	32.25	48.15	75,29	100.00
S 414	1,76	6.35	15.14	23.15	28.11	32.25	48.15	75,29	100.00
S 54/20	1.75	6.09	14.27	22.09	27.56	32.24	48.15	75.29	100.00
S 54/40	1.75	5.83	13.40	21.04	27.00	32.23	48.15	75.29	100.00
S 54/60	1.74	5.56	12.53	19.99	26.45	32.21	48.15	75.29	100.00
Limita min	1.44	2.38	4.25	8.00	14.00	23.75	38.11	63.00	95.00
Limita max	6.22	9.19	15.13	27.00	34.50	46.50	62.55	83.00	100.00

Rezultatele obținute pe amestecul informativ S 414 cu un raport A/C de 0.43 au fost următoarele: tasarea 35 mm, volumul de aer oclus 3.8% și 61.34 (MPa) rezistența medie la compresiune pe cuburi cu latura de 150 mm. În rețeta finală pentru amestecul S 414 s-a redus raportul apă/ciment la 0.41 pentru a obține creșteri ale rezistențelor mecanice și o porozitate scăzută.

Pentru amestecurile cu zgură de furnal raportul A/L calculat cu relația (3.3) din cap.3, în funcție de indicele de activitate ($IA_{28}=64\%$) a pulberii de zgură, a rezultat valoarea de 0.47. Utilizarea aditivului superplastifiant a permis reducerea raportului apă-liant (A/L) sub nivelul maxim admis de 0.45 în acord cu NE 014:2002 [11] la cap.3. La prepararea betoanelor conținutul de apă și aditivi au fost ajustate pentru a obține consistența betoanelor la valori cât mai apropiate de 30 ± 10 mm (interval indicat în cap.3, [11]).

Cantitățile de materiale: ciment, proporțiile de pulbere de zgură (GGBS), de aditivi și de agregate naturale și artificiale în stare uscată

utilizate în amestecurile realizate în cele două serii de turnare sunt redate în Tabelul 6-4 și Tabelul 6-5.

Tabelul 6-4. Cantitățile de materiale din compoziția betoanelor, seria I de turnare

Cantități (Kg/m ³)	Amestecuri [Kg/m ³]				
	S 360	S 414	S 54/20	S 54/40	S 54/60
Denumire amestec	S 360	S 414	S 54/20	S 54/40	S 54/60
Ciment (C)	360	414	360	360	360
Pulbere (GGBS) cu Suprafața specifică = 5770 cm ² /g	-	-	54	54	54
Liant total (L)	360	414	414	414	414
Apă totală (inclusiv aditivii) (W)	156.60	169.74	167.67	178.02	178.02
A/L, (apă/ liant)	0.44	0.41	0.41	0.43	0.43
Ag /L, (agregat/ liant)	5.18	4.42	4.5	4.37	4.37
Agregat zgură (ACBFS_0/4 mm)	-	-	119	232	347
Nisip natural (AN_0/4 mm)	596	586	477	347	232
Agregat grosier (AC_4/25 mm)	1268	1245	1267	1231	1231
Agregat total	1864	1831	1863	1810	1810
Aditiv superplastifiant	3.60	4.14	4.14	4.97	4.97
Aditiv antrenor de aer	1.08	2.07	2.07	2.07	2.07

Tabelul 6-5. Cantitățile de materiale la fiecare amestec, seria II de turnare

Cantități (Kg/m ³)	Amestecuri [Kg/m ³]				
	S 360	S 414	S 54/20	S 54/40	S 54/60
Denumire amestec	S 360	S 414	S 54/20	S 54/40	S 54/60
Ciment (C)	360	414	360	360	360
Pulbere de zgură (GGBS) Suprafața specifică = 3775 cm ² /g	-	-	54	54	54
Liant total (L)	360	414	414	414	414
Apă totală (inclusiv aditivii) (A)	166.25	174.31	172.86	181.13	167.62
A/L (apă/ liant)	0.46	0.42	0.42	0.44	0.41
Agregat zgură (ACBFS_0/4 mm)	-	-	119	237	359
Nisip natural (AN_0/4 mm)	607	594	478	355	240
Agregat grosier (AC_4/25 mm)	1290	1261	1269	1256	1275
Aditiv superplastifiant	3.60	4.14	4.39	4.55	4.97
Aditiv antrenor de aer	1.80	2.07	2.07	2.07	2.07

În Figura 6-1 este prezentată curba granulometrică a amestecului total pentru compoziția S 414 și S54/60, încadrată în interiorul zonei de granulozitate admise, în acord cu NE 014-2002 [11].

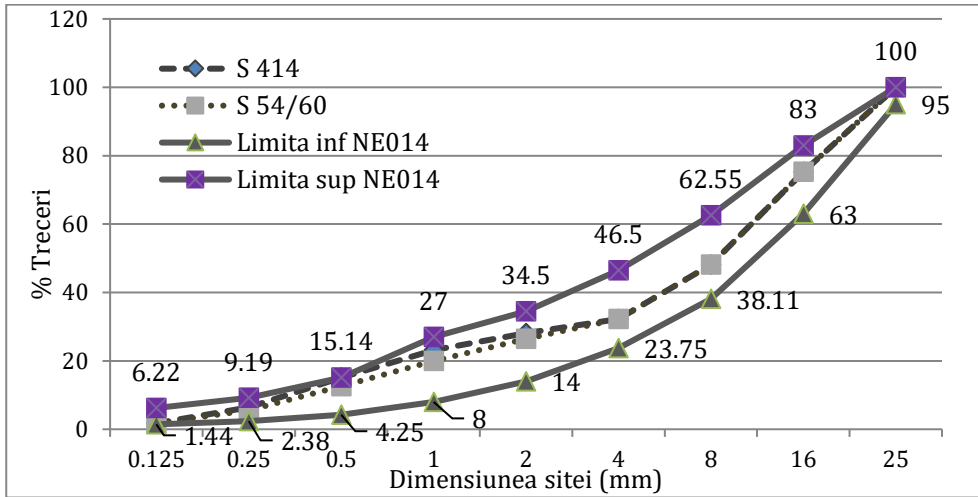


Figura 6-1. Curba granulometrică a amestecului total la compoziția S 414 și S 54/60, seria II

Valori similare și în interiorul limitelor admise din Figura 6-1 s-au înregistrat pentru volumul procentual de treceri ale agregatelor la amestecurile S 360, S 54/20, S 54/40, până la dimensiunea sitei de 4 mm, iar peste această dimensiune curbele granulometrice au fost identice la toate cele cinci amestecuri turnate în seria a doua.

6.4.2 Rezultate pe betonul proaspăt și întărit

Pe amestecul proaspăt s-a determinat consistența conform cu SR EN 12350-2:2009 [104], procentul de aer oclus determinat conform SR EN 12350-7:2009 [82] și densitatea aparentă conform cu SR EN 12350-6:2009 [103] determinată pe cuburi cu latura de 150 mm, a căror rezultatele obținute se găsesc în Tabelul 6-6 și Tabelul 6-7.

Tabelul 6-6. Determinări pe amestecul proaspăt din seria I

Caracteristici	S 360	S 414	S 54/20	S 54/40	S 54/60
Densitatea aparentă a amestecului ρ_a (kg/m ³)	2399	2435	2455	2418	2412
Consistența prin metoda tasării, clasa S1 (mm)	14	15	13	16	15
Aer oclus (%)	1.5	2.0	1.8	2.0	2.0

Tabelul 6-7. Determinări pe amestecul proaspăt seria II

Caracteristici	S 360	S 414	S 54/20	S 54/40	S 54/60	Limite NE 014
Densitatea, (kg/m ³)	2399	2434	2442	2435	2446	2400±40
Consistența, clasa S1 (mm)	39	25	29	26	30	30±10
Aer oclus (%)	3.80	3.00	3.20	3.05	3.25	3,5±0,5

Diferența dintre densitatea măsurată pe betonul proaspăt și densitatea amestecului calculată pe componente de materiale s-a încadrat în limita de ± 40 kg/m³, în acord cu NE 014:2002[11].

În Tabelul 6-8 sunt redate rezultatele obținute la seria întâi de turnare, pentru rezistențele mecanice medii la 28 de zile. S-au efectuat încercări pentru a determina rezistența medie la întindere prin încovoiere la vârsta de 28 de zile pe prisme de 150x150x600 mm (coloana 2), pe prisme de 100x100x550 mm și pe fragmente de prismă de 275 mm rezultate din prismele cu lungimea de 550 mm (coloana 3 și 4). Pentru rezistența medie la compresiune încercările s-au efectuat pe cuburi cu latura de 150 mm (coloana 5). Rezistența medie la compresiune obținută pentru fiecare compoziție în urma încercărilor efectuate pe cuburi cu latura de 150 mm s-a corectat cu coeficientul 0.873, calculat cu ecuația (4.14) din cap. 4, în funcție de rezistența efectivă a cimentului utilizat. Valorile rezistențelor medii la compresiune sunt înregistrate în coloana 6. Pentru a îndeplini criteriile de conformitate al betonului în acord cu SR EN 206-1/A1:2017, din punct de vedere al diferențelor între tipul și condițiile de malaxare utilizate pentru încercările inițiale vis a vis de producția curentă, rezistența la compresiune obținută va superioară cu o marjă față de rezistența caracteristică minimă. Această marjă trebuie să fie în jur de dublu abaterii standard așteptate, sau cel puțin între 6÷12 (MPa). În cazul acestei lucrări marja a fost stabilită la 8 (MPa) peste valoarea minimă de 50 (MPa) a rezistenței la compresiune admisă în NE 014:2002.

Tabelul 6-8. Rezistențele mecanice medii la întindere și la compresiune la 28 de zile, seria I

Amestec	f _{cf} (600 mm) (MPa)	f _{cf} (550 mm) (MPa)	f _{cf} (275 mm) (MPa)	f _c (150 mm) (MPa)	f _c corectat (150 mm) (MPa)	f _c min (MPa)
1	2	3	4	5	6	7
S 360	5.55	6.57	6.71	78.28	68.34	58,00

Capitolul 6

S 414	5.15	5.90	5.56	72.71	63.48	58.00
S 54/20	5.64	6.68	6.42	74.97	65.45	58,00
S 54/40	5.57	6,63	6.38	74.45	65.00	58.00
S 54/60	5.42	6.45	6.25	70.74	61.76	58.00

Rezultatele medii ale rezistențelor mecanice la 28 de zile obținute la betoanele turnate în seria a doua sunt prezentate în Tabelul 6-9.

Tabelul 6-9. Rezistențele mecanice la întindere prin încovoiere și la compresiune la vârsta de 28 zile, seria II

Amestec	S 360	S 414	S 54/20	S 54/40	S 54/60
f_{cr}^{28} (MPa)	4.90	5.22	5.52	5.26	5.67
f_{cm}^{28} (MPa)	63.62	66.18	71.91	69.67	72.15
Clasa betonului rutier	BcR 4.5	BcR 4.5	BcR 5.0	BcR 4.5	BcR 5.0

6.5 Discuții

6.5.1 Determinări pe betonul proaspăt și întărit: densitatea, consistența, aerul oclus, rezistențele mecanice la vârsta de 28 zile, seria întâi

Proporțiile de materiale utilizate în acest experiment au influențat caracteristicile pe betonul proaspăt, consistența, aerul oclus, densitatea aparentă și caracteristicile pe betonul întărit cum ar fi rezistențele mecanice la întindere și la compresiune, în următoarele moduri:

Consistența amestecurilor s-a determinat prin metoda tasării și s-a urmărit realizarea tasării cuprinsă în intervalul (30 ± 10) mm), corespunzătoare pentru o consistență având clasa S1, slab plastică-spre vârtoasă, în acord cu NE014:2002 [11] caracteristică betoanelor rutiere. La cele trei amestecuri de beton cu zgură din seria întâi de turnare, se observă că la o creștere a raportului apă/liant de la 0.41 la 0.43 și a procentului de aditiv superplastifiant de la 1% la 1,2% a crescut și valoarea tasării de la 13 mm la amestecul S 54/20 la 16 respectiv 15 mm pentru amestecul S 54/40 și S 54/60, fiind la același nivel cu amestecul de control S414 și peste nivelul obținut pentru S360, evoluția rezultatelor fiind prezentată în Figura 6-2 a). Cea mai redusă consistență s-a înregistrat la amestecul S 54/20 sub nivelul amestecului de control S

414, deși raportul (A/L) și cantitățile de aditivi au fost identice. Aceasta sugerează că substituția agregatelor naturale cu 20% agregate concasate din zgură a micșorat lucrabilitatea comparativ cu amestecul de control. Toate amestecurile studiate au înregistrat o consistență vârtoasă sub valoare de 20 mm, încadrate conform cu NE012-1:2007 [12] în clasa de tasare S1 (cu valori cuprinse între 10÷40mm).

Aerul oclus măsurat a fost de 1,5% în amestecul S 360, de 1,8% în amestecul S 54/20 și de 2.0% în amestecurile S 414, S 54/40 și S 54/60. Se observă în Figura 6-2a) că procentul de aer oclus măsurat în amestecurile S 54/40 și S 54/60 este mai mare decât în amestecul S 54/20 deși s-a folosit același procent de aditiv antrenor de aer de 0,5%. Aceasta poate fi justificat prin creșterea procentului de aditiv superplastifiant de la 1% la 1.2%, deoarece aditivul superplastifiant poate avea și efect de creștere a conținutului de aer oclus, [6].

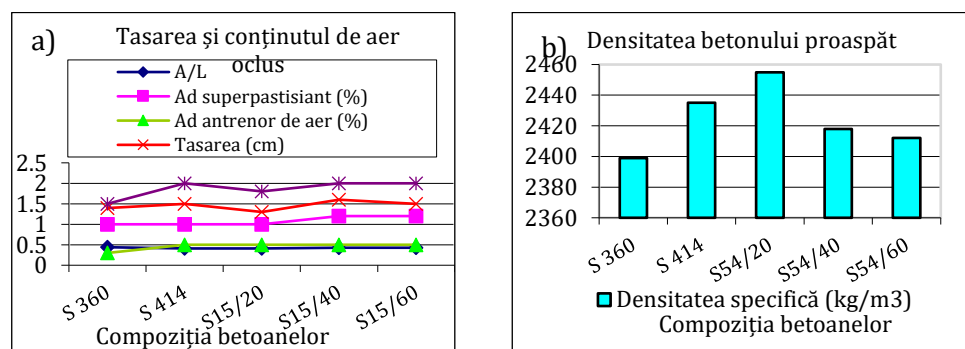


Figura 6-2. Caracteristicile betonului proaspăt, a) Tasarea și conținutul de aer oclus, b) Densitatea pe betonul proaspăt, seria I

Densitatea cea mai mare s-a obținut la amestecul S 54/20 și în descreștere la amestecurile S 414, S54/40, S 54/60, S 360, ca în Figura 6-2b), seria I.

Încadrarea în CLASE a betonului rutier s-a efectuat pe baza rezultatelor obținute pe epruvete prismatice de 150x150x600 mm încercate la 28 de zile, raportate la valorile minime impuse în Tabelul 6-1. Se observă că rezistențele medii la întindere prin încovoiere (f_{cf}) sunt mai mari decât valoarea minimă admisă de 5.5 MPa pentru amestecurile S 360, S 54/20, S 54/40 și sub limita admisă pentru amestecul S 414 și S 54/60, evoluția rezistențelor mecanice este prezentată în Figura 6-3 a) și b). Raportat la Normativul NE014:2002, din punct de vedere al criteriului de rezistență la întindere prin încovoiere amestecurile S 360, S 54/20, S 54/40 se încadrează la clasa la BcR 5,0. Iar pentru amestecul S 414 și S

54/60 s-a obținut o clasă inferioară, încadrată la BcR 4,5 având rezistență medie la întindere (f_{ct}) peste limita admisă de 4.9 (MPa).

Rezistențele la compresiune medii pe cuburi de 150x150x150 mm, (f_c) la 28 de zile sunt peste nivelul minim stabilit de 58 (MPa). Rezultatele rezistențelor la compresiune raportat la NE 012-1:2007[12] permit încadrarea amestecurilor realizate în clasa C55/67, care este superioară celei stabilite în NE014:2002 [11], clasa C35/45.

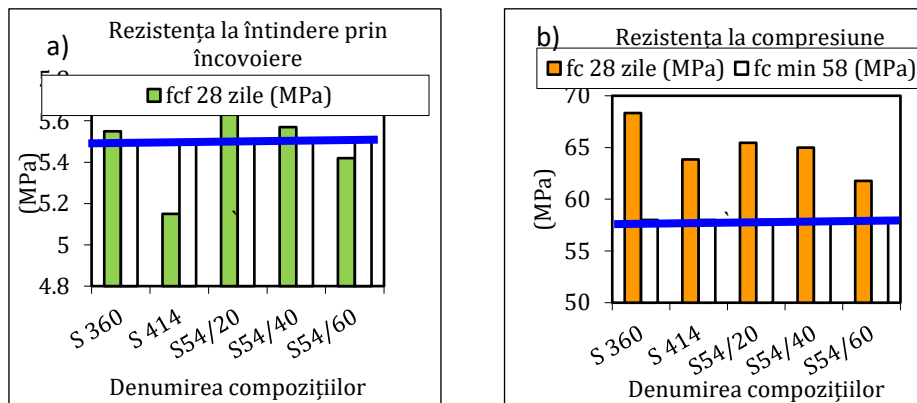


Figura 6-3. a) Rezistența la întindere ; b) Rezistența la compresiune, seria I

Rezistențele medii (f_{ct}) pe prisme de 100x100x550 mm, sunt în general peste valoarea minimă admisă de 6.3 MPa în normativul C22-92, excepție face amestecul S414. Pentru rezistențele la întindere prin încovoiere determinate pe fragmente de prisme cu secțiunea de 100x100x275 s-au obținut valori în general mai mici decât pe prismele întregi, cu până în 5.7% pentru amestecul S 414. Diferențele pot fi datorate modului de aplicare a forței, aplicarea forței centrice în cazul fragmentelor de prismă comparativ cu aplicarea a două forțe egale și simetrice aplicate la treimea deschiderii dintre cele două reazeme circulare de sprijin ale prisme.

6.5.2 Determinări pe betonul proaspăt și întărit: densitatea, consistența, aerul oclus, rezistențele mecanice la vârsta de 28 zile, seria a doua

Valorile obținute pentru densitatea betonului proaspăt, consistență și aerul oclus, s-au încadrat în intervalul limitelor admise în NE 014:2002 [11], imagini foto din laborator în Figura 6-4a).

Se observă, în Figura 6-4b), că există o relație liniară între densitatea aparentă și consistența amestecurilor și între densitatea aparentă și volumul de aer oclus din amestecuri. Corelând diagrama cu cu Tabelul 6-7 se observă că cele mai bune rezultate ale caracteristicilor determinate pe betonul proaspăt sunt înregistrate pentru amestecul S54/20 și S54/60, ceea ce evidențiază cele mai bune proporții ale aditivilor și ale raportului A/L utilizate. Un conținut mai mare de aer oclus îmbunătățește rezistența betonului la îngheț-dezghet, reducând volumul de pori permeabil din beton, specific betoanelor cu porozitate redusă, respectiv cu compactitate crescută.

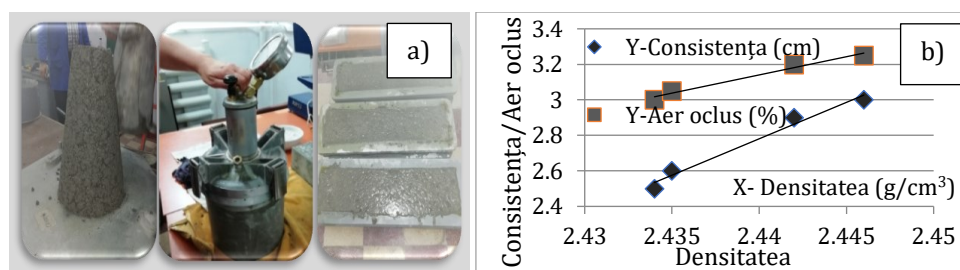


Figura 6-4. a) Determinări pe betonul proaspăt (imagini din laboratorul UTCN), b) Relația între densitatea aparentă - consistență / aer oclus, seria II

Rezistențele mecanice la 28 de zile înregistrate în Figura 6-5, la toate amestecurile cu zgură de furnal au valorile mai mari decât ale amestecului de control S 414.

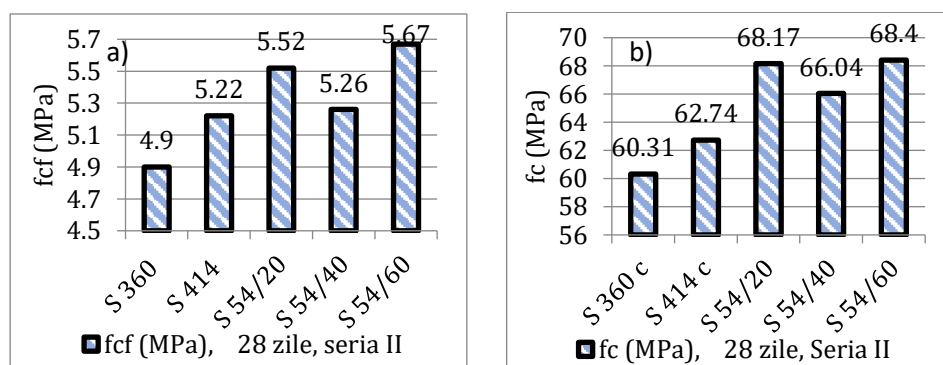


Figura 6-5. a) Rezistențele medii la întindere prin încovoiere, b) Rezistențele medii la compresiune la vârsta de 28 de zile, seria II

Pentru amestecul S 360 s-a înregistrat o scădere accentuată a rezistenței la întindere prin încovoiere. Cauza a fost creșterea raportului apă/liant la 0,46% datorită unui control insuficient al umidității agregatelor la turnarea amestecului. Raportul apă/liant de 0,46% înregistrat la amestecul de control S 360 depășește limita maximă de 0,45, admisă în NE 014-2002. Ca urmare valoarea de control pentru rezistența la întindere și la compresiune la 28 zile s-a considerat doar cea de la amestecul S 414.

6.6 Concluzii parțiale

Proiectarea amestecurilor de betoane rutiere cu zgură de furnal (BcR-S) a urmărit obținerea unor rezistențe crescute la întindere prin încovoiere la vârsta de 28 de zile, cu valori care să permită încadrarea în clasa de beton rutier BcR 5.0 și să aibă caracteristicile pe betonul proaspăt pentru punerea în operă în sisteme de cofraje fixe, în acord cu cerințele NE014:2002.

Rezultatele obținute pe betoanele rutiere realizate în seria întâi și seria a doua de turnare sunt rezumate în continuare:

- Întrucât cantitatea de pulbere de zgură (GGBS) a fost constantă la cele trei amestecuri de beton, rezultă că finețea de măcinare a zgurii, procente diferite de agregate de zgură (ACBFS), consistența betonului proaspăt împreună cu raportul A/L au avut o influență semnificativă asupra performanțelor compozițiilor realizate.
- Consistența determinată prin metoda tasării a înregistrat în seria întâi, valori cuprinse între (13÷16) mm sub nivelul minim admis de 20 mm. Prin optimizarea cantităților de aditivi superplastifianți în seria a doua de turnare, s-au înregistrat valori cuprinse între (25÷39) mm care se încadrează în limitele stabilite în faza de proiectare de 30±10 mm.
- Conținutul de aer oclus a înregistrat în seria întâi, valori cuprinse între (1.5÷2.0)% sub limita minimă admisă de 3%, însă în seria a doua de turnare valorile obținute între (3.0÷3.8)% corespund limitelor admise de 3.5±0.5%.
- Densitatea betonului proaspăt s-a încadrat în limita de 2400 ±40 kg/m³ stabilită în faza de proiectare.
- Rezultatele rezistențelor la întindere prin încovoiere pentru betoanele realizate în seria întâi au permis încadrarea compozițiilor S 360, S 54/20 și S 54/40 în clasa BcR 5.0 fiind obținută clasa de beton rutier propusă în cadrul etapei de proiectare. Pentru compozițiile S 414

și S 54/60 valorile rezistențelor la întindere prin încovoiere s-au încadrat în intervalul (4.9÷5.5) MPa corespunzător clasei de beton rutier BcR 4.5.

- Rezultatele rezistențelor la întindere prin încovoiere la 28 de zile, efectuate pentru seria a doua de turnare au permis încadrarea amestecurilor S 54/20 și S 54/60 în clasa de beton rutier BcR 5,0 și în BcR 4,5 a celorlalte amestecuri realizate (S414 și S54/40).
- Betoanele rutiere încadrate în clasa BcR 5.0 pot fi utilizate pentru trafic greu și foarte greu iar betoanele rutiere încadrate în clasa BcR4.5 corespund utilizării traficului mediu.
- Rezistențele la compresiune pe cuburi cu latura de 150 mm au înregistrat valori peste valoarea minimă stabilită de 58 (MPa) la toate compozițiile realizate.
- Continuarea programului experimental a urmărit o analiză în detaliu a caracteristicilor materialelor componente ale betonului rutier și testarea betoanelor din punct de vedere al cerințelor de durabilitate. Rezultatele cercetărilor din acest capitol au fost publicate sub formă de articole științifice în lucrările [181], [182].

7 Caracteristicile materialelor componente din betonul (BcR-S)

7.1 Introducere

În prezent se acordă mare interes pentru reciclarea și utilizarea eficientă a subproduselor din industria siderurgică. Cea mai frecventă utilizare la noi în țară este pentru producția cimentului în acord cu SR EN 197-1:2011 [14] în domeniul construcțiilor hidrotehnice sub formă de adaos mineral din pulbere de zgură. Zgura de furnal negranulată răcită lent în aer, concasată sub formă de agregate are aplicații la construcțiile civile și la fundațiile structurilor rutiere, în acord cu SR EN 13242+A1:2008 [117]. La nivel național Compania siderurgică Liberty, din Galați are o capacitate de 2.150.000 to/an de producere a fontei [183], din care rezultă cca. 430.000÷645.000 to/an de zgură de furnal. Luând în considerare disponibilitatea la nivel național de zgură de furnal, se propune în acest experiment o nouă aplicație pentru betoanele rutiere. În lucrarea de față s-a studiat influența zgurii de furnal sub formă de constituent suplimentar cu caracteristici cementoase (CSCC) și sub formă de agregat artificial asupra unor caracteristici de durabilitate determinate pe betonul rutier proaspăt și întărit. Anterior acestui studiu s-au efectuat, de către L.T.Cristea și colab., cercetări privind utilizarea agregatelor din zgură de furnal în compoziții de beton rutier prin înlocuirea totală a agregatelor naturale cu agregate artificiale [184]. Rezultatele au înregistrat o rezistență la întindere de 6,1 N/mm², la un raport apă/ciment de 0,40. D.P.Georgescu și A.Apostu au investigat cimentul cu zgură (CEM I, CEM II/B-S) comparativ cu cimentul Portland (CEM I) în amestecurile de betoanele rutiere. Rezultate au arătat că rezistențele la încovoiere au crescut pe măsură ce a crescut conținutul de zgură și finețea de măcinare a cimentului [185]. Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation din Japonia, fiind cea de-a treia companie producătoare mondială de oțel, cu o producție de zgură de furnal la același nivel, colectează aproximativ a 300 kg de zgură de furnal pe tona de fier produs. În scopul de a valorifica această zgură compania a utilizat zgură de furnal sub formă de agregat grosier pentru îmbrăcămințile rutiere. Rezistența la încovoiere obținută a fost de 5,9 N/mm² [186]. Wang Aiguo și colab. au studiat influența agregatelor din zgură de furnal

răcită în aer utilizată ca substituție a agregatelor naturale din calcar asupra absorbției apei la betoane și mortare. Rezultatele cercetării au arătat un conținut mai redus al porilor capilari în matricea mortarului cu zgură de furnal [187] Mujedu K. A., și colab. au investigat înlocuirea agregatului grosier din granit cu agregat din zgura de furnal. Rezultatele au arătat o scădere a lucrabilității, densității și a rezistențelor la compresiune în amestecurile cu zgură [188]. Neville A. M. și Brooks J. J. au subliniat faptul că agregatele au o influență majoră asupra betonului, ele reprezintă în scheletul betonului în jur de 75%, iar în reacția cu cimentul și cu apa agregatele devin active în amestecul de beton prin proprietățile lor geometrice, fizice și chimice [188], [189]. V. Limbachiya și colab. au realizat dale din beton utilizând zgura de furnal măcinată și granulată (GGBS) și silice ultra fină (SF) pentru a înlocui cimentul Portland. Conținutul ridicat de (SiO_2) în (SF) și de (CaO) în (GGBS) au crescut proprietățile de durabilitate ale dalelor din beton, ceea ce a permis înlocuirea cimentului cu succes, până la 40%. Valorile obținute pentru proprietățile de levigare ale betonului utilizat în fabricarea dalelor realizate cu (GGBS) și (SF) s-au încadrat în limite acceptabile [190]. A. C. Apostu [191] a cercetat concentrația de radon din interiorul clădirilor, monitorizate la 28 de zile, 180 și 360 zile, pentru diferite tipuri de cimenturi utilizate la prepararea betoanelor. Radonul fiind un gaz radioactiv care peste o anumită concentrație poate provoca cancer pulmonar, fiind rezultat ca produs secundar al dezintegrării radiului, cel mai frecvent fiind degajat din sol. În cercetarea efectuată de A. C. Apostu s-a observat că indiferent de vârstă, pentru pereții camerei realizați din betoane preparate cu cimenturi cu adaosuri de calcar și cenușă de termocentrală, concentrațiile de radon au fost mai ridicate decât în cazul folosirii la preparare a cimentului cu adaosuri de zgură și calcar și respectiv cu al cimentului cu adaos de zgură. Cea mai mică concentrație de radon s-a obținut pentru betoanele realizate cu ciment cu adaosuri de zgură și aditiv superplastifiant, după vârsta de 1 an, aproximativ 14 Bq/m^3 pentru o rată de ventilare de 0.3 h^{-1} . Studiul a pus în evidență și concentrațiile radiu (Ra) prin determinarea indicilor de radioactivitate pentru cimentul fără adaosuri (CEM I 42.5R) și pentru cimenturi cu adaosuri de zgură, calcar, zgură+calcar, puzzolană+calcar, zgură+cenușă. Valorile obținute pentru concentrația radionuclizilor au fost, în general, mai mici decât valoarea maximă admisă a radiului pentru ciment reglementată de ordinul Ministerului Sănătății nr.51/1983, excepție au fost cimenturile cu cenușă (II/A-V 42.5R). Însă, raportat la cimentul Portland pentru majoritatea cimenturilor cu adaosuri minerale, aici a

fost inclus și cimentul cu zgură de furnal, concentrația radionuclizilor au fost mai mari, rezultate care restricționează utilizarea cimenturilor cu adaosuri minerale pentru clădirile de locuit.

7.2 Ipoteze de lucru/obiective

În această etapă s-au completat cercetările legate de caracteristicile fizice și chimice ale zgurii de furnal prezentate în cap. 5 și 6, prin caracterizarea pulberii de zgură (GGBS) privind gradul de saturare în calce, compoziția mineralogică și conținutul de elemente periculoase din zgura granulată.

Agregatele din zgură (ACBFS) s-au testat la reacția alcalii-silice prin metoda chimică. În cele din urmă caracteristicile fizice și chimice ale materialelor naturale și ale zgurii de furnal au fost analizate din punct de vedere al efectelor asupra durabilității betoanelor.

7.3 Materiale și metode

7.3.1 Materiale

Cimentul utilizat tip CEM I 42,5R, a fost furnizat de S.C.Lafarge-Holcim S.A. Performanțele declarate au fost prezentate în cap.5, fiind raportate la specificațiile tehnice din SR EN 197-1:2011[14]. Suplimentar s-a realizat analiza oxidică a cimentului, determinată de Laboratorul CEPROCIM S.A. [192] obținând valorile înregistrate în Tabelul 7-1.

Tabelul 7-1. Analiza oxidică a cimentului CEM I 42,5R (%)

Oxizi %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P.C. ^(a)	R.I. ^(b)
Valori	18.57	3.09	3.72	0.70	63.93	4.84	0.12	0.74	4.05	0.62
P.C. ^(a) pierderea la calcinare; R.I. ^(b) reprezintă rezidul insolubil în HCL-Na ₂ CO ₃										

Analiza chimică și principalele caracteristici ale zgurii granulate au fost testate de către producător prin rapoartele [108], [193]–[195]. Rezultatele din Tabelul 7-2 au fost comparate cu limitele din standardul SR EN 15167-1:2007 [20]. Incertitudinea de măsurare a proprietăților fizico-mecanice a materialelor a oferit un nivel de încredere de 95%. Sulfații, conținutul de clorură și conținutul de alcalii (sub formă de Na₂O) au fost determinați în laboratorul Institutului de cercetări și proiectări miniere Minesa SA [196].

Tabelul 7-2. Caracteristicile zgurii de furnal granulate[108], [196]

Caracteristici fizice și chimice	Valori individuale	Limite SR EN 15167-1:2007	Metoda de analiză conform cu standardele
Suma (CaO+MgO+SiO ₂)	87.40	≥ 2/3	-
Raportul (CaO+MgO)/SiO ₂	1.38	≥ 1.0	-
Raportul (CaO/SiO ₂)	1.14	1.1...1.4	SR 648:2002
Oxidul de magneziu MgO, (%)	8.70	≤ 18	SR EN 196/2-2013
Sulfat total, (%)	0.91	≤ 2.0	SR EN 1744/1+A1-2013
Sulfat solubil în acid (%)	0.60	-	SR EN 196/2-2013
Sulfat sub formă de SO ₃ , (%)	0.36	≤ 2.5	SR EN 196/2-2013
Pierderea la calcinare, (%)	0.00	≤ 3,0	SR EN 196/2-2013
Conținutul de aluminat tricalcic C ₃ A, (%)	24.25	(6 ÷ 12)	SR EN 1971-2011, ec. lui Bogue
Clorura, (%)	0.00	≤ 0,10	SR EN 196/2-2013
Conținutul de alcalii (Na ₂ O echiv.) (%)	0.348	(0.5 ÷ 1.2)	SR EN 196/2-2013
Indice de activitate la 7 zile, (%)	52.35	Min 45	SR EN 196/1-2016
Indice de activitate la 28 zile, (%)	64.29	Min 70	SR EN 196/1-2016
Stabilitate (Le Chatelier), (mm)	0.00		SR EN 196/3-2016
Reziduu insolubil în HCL, (val. medie înregistrată în anul 2018) (%)	0.36	Max.1.5	STAS 33-84

Reproductibilitatea probelor medii pentru compoziția oxidică a zgurii granulate din perioada 2018÷2020 a fost exprimată procentual ca abatere medie pătratică (S), cu valori înregistrate în Tabelul 7-3.

Tabelul 7-3. Valori individuale și medii a compoziției oxidice a zgurii granulate, %

Oxizi %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Mn ₂ O ₃
Valori individuale [108]	36.70	9.50	0.23	8.70	42.00	0.55	0.28	0.53	0.46	0.26
Valoari medii 2018÷2020	36.85	10.04	-	8.00	41.92	0.59	0.31	0.60	0.44	0.33
S % 2018÷2020	0,12	0,30	-	0.08	0.19	0.02	0.02	0.07	0.03	0.03

Notă: Compoziția oxidică a zgurii granulate a fost determinată utilizând metoda de încercare SR EN 196/2-2013 și metoda echivalentă, fluorescența cu raze -X (FRX).

Abaterea de la media anuală rezultată a fost una redusă, cuprinsă în intervalul de (0.02÷0.19) %.

Agregatele artificiale din zgură de furnal negranulată (ACBFS) răcite lent în aer au fost concasate de către producător la dimensiunea 0/4 mm. Caracteristicile agregatelor naturale și artificiale au înregistrat valori ca în Tabelul 7-4 și 7-5, fiind evaluate în acord cu SR EN 12620:2003+A1:2008 [61] și SR 667:2001 [118]. Sulfații și clorurile solubile s-au determinat în laboratorul Institutului de cercetări și proiectări miniere Minesa SA [196], dezintegrarea fierului și a silicatului dicalcic din zgură s-a determinat de către producător prin raportul [197], granulozitatea și conținutul de particula fine s-a determinat în laboratorul de materiale al UTCN Cluj.

Tabelul 7-4. Caracteristicile agregatelor fine (NA 0/4 mm) și (ACBFS 0/4 mm)

Caracteristici tehnice	Valori individuale ACBFS_0/4 mm	Valori obținute NA_0/4 mm	Limite SR EN 12620
Granulozitate	G _F 85	G _F 85	G _F 85
Coeficient de absorbție a apei (%)	-	WA ₂₄₂	-
Conținut de particule fine sub 0.063 mm -f, (%)	f _{3.5}	f ₃	(3 ÷ 22)
Cloruri solubile (%)	lipsă		
Sulfat solubil în acid, (%)	0.48	-	≤ 1.0
Sulfat total, (%)	0.93	-	≤ 2.0
Dezintegrarea fierului din zgură	Nu prezintă fisuri și nu se dezintegrează		Aspect vizual
Dezintegrarea silicatului dicalcic din zgură	Prezintă o culoare violet uniformă, cu pete strălucitoare în cantități mici distribuite uniform	-	Aspect vizual

Nisipul natural (0/4 mm) a fost procurat din balastiera Beclenut și pietrișul concasat (4/8 mm) din balastiera Sânicosara. Agregatul grosier concasat (cribluri 8/16 mm și 16/25 mm) de la cariera de piatră SC Grandemar SA Cluj având proprietățile fizice și mecanice determinate de către producător prin rapoartele [198]–[200].

Tabelul 7-5. Caracteristicile agregatelor grosiere

Caracteristici	Valori obținute CA_4/8	Valori obținute CA_8/16	Limite SR EN12620	Valori obținute CA_16/25	Limite SR 667

Granulozitate	G _c 90/10	G _c 90/15	-	-	-
Coeфициent de absorbtie a apei WA ₂₄	WA ₂₄ 2	WA ₂₄ 1,4	-	WA ₂₄ 1,2	-
Conținut de particule fine sub 0.063 mm -f,%	-	f _{1.0}	(1.5 ÷4)	-	-
Conținut de fracțiuni sub 0.1 mm, %	-	-	-	0,09	Max.0.5
Coeфициent de formă, %	Sl ₂₀	Sl ₇	(15 ÷50)	7	Max.25
Rezistența la acțiunea repetată a Mg SO ₄ , %	-	0.38	(18 ÷35)	0,38	Max.6
Rezistența la îngheț-dezghet, pierdere de masă,%	F ₁	0,20	(1 ÷4)	0.20	Max.3
Rezistența la uzură, coeficientul micro-Deval	-	M _{DE} 6	(10 ÷35)	6	Max.20
Rezistența la sfărâmare, coeficientul Los Angeles	LA ₃₀	LA ₁₄	(15 ÷50)	14	Max.18

Aditivii au fost procurați de la Badische Anilin und Soda Fabrik (BASF). S-a utilizat aditivul superplastifiant MasterGlenium SKY 527 și aditivul antrenor de aer Master Air 9060. Apa din betoane a fost preluată din sistemul de alimentare a orașului Cluj-Napoca, în acord cu SR EN 1008:2003 [81].

7.3.2 Metode

Pentru a o analiză în detaliu a proprietăților zguri de furnal utilizate la prepararea betoanelor rutiere au fost completate rezultatele prezentate în capitolele anterioare prin determinarea gradului de saturare în calce, compoziția mineralogică și conținutul de elemente periculoase al zgurii (GGBS).

Pentru agregatele utilizate în compoziția betoanelor rutiere s-a determinat modul de finețe, masă volumică, coeficientul de absorbtie a apei și reacția alcalii-silice pentru agregatele din zgură.

7.4 Rezultate

Toate rezultatele obținute din experimentele efectuate în acest capitol ale caracteristicilor fizice și mecanice ale zguri granulate și măcinate (GGBS) și ale agregatelor concasate din zgură de furnal (ACBFS) sunt rezumate în următoarele Tabele 7-6÷7-9:

Tabelul 7-6. Gradul de saturare în calce a zgurii (GGBS),%

(CaO)	S _k ×100	(CaO) liber	Pondere(CaO) combinat chimic	Pondere (CaO) liber
1	2	1-2	3	4
42.00%	36,97%	5,03%	88.02%	11.98%

Tabelul 7-7. Elementele periculoase testate pentru zgura (GGBS)

Denumire	Valori obținute	Valori limită	Denumire	Valori obținute	Valori limită
pH-ul eluatului 10/1, Unități pH	10.76	-	Mercur, mg/kg	< 0.005	0.01
Arsen, mg/kg	<0.4	0.5	Nichel, mg/kg	< 0.2	0.4
Cadmium, mg/kg	< 0.02	0.04	Plumb, mg/kg	< 0.2	0.5
Crom, mg/kg	< 0.05	0.5	Zinc, mg/kg	< 1	4
Cupru, mg/kg	< 0.2	2	Ba, mg/kg	368	20

Notă: Valori limită Ordin 95/2005- deșeurii-L/S=10l/kg, Tabel 2.2, pentru levigabilitate pentru caracteristicile deșeurilor care pot fi acceptate în depozitele de deșeurii inerte.

Tabelul 7-8. Masa volumică și coeficientul de absorbție apei pentru agregate aflate în starea (SSD)

Agregate	ρ_a (Mg/m ³)	ρ_{rd} (Mg/m ³)	ρ_{ssd} (Mg/m ³)	WA ₂₄ (%)
NA_0/4	2.70	2.56	2.61	2.00
ACBFS_0/4	2.59	2.46	2.51	2.00
CA_4/8	2.68	2.59	2.62	1.40
CA_8/16	2.66	2.57	2.61	1.40
CA_16/25	2.67	2.58	2.62	1.20

Tabelul 7-9. Modulul de finețe (M_f), al agregatelor fine de dimensiunea 0/4 mm

Amestec de agregate	100% NA	80%NA+ 20%ACBFS	60%NA+ 40%ACBFS	40%NA+ 60%ACBFS	100%ACBFS
(M _f)	2.72	2.81	2.90	2.97	3.15

7.5 Discuții

7.5.1 Caracterizarea (GGBS) prin gradul de saturare în calce, compoziția oxidică, compoziția mineralogică și conținutul de elemente periculoase.

Având în vedere că în procesul tehnologic de elaborare a fontei se introduce calcar în furnal, prin disociere termică se formează oxizi liberi

de calciu și magneziu ca rezultat al prezenței carbonatului de magneziu $MgCO_2$ în calcar. O parte din oxidul de calciu rezultat este necesar saturării oxizilor acizi (SiO_2 , Al_2O_3 și Fe_2O_3) iar restul devine oxid de calciu liber. Oxidul de calciu rămas necombinat (CaO-liber) reprezintă calcea care nu reacționează cu SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 în procesul de ardere a minereurilor și se hidratează lent. Prin reacția de hidratare lentă își mărește volumul și poate genera inconstanță în volum (expansiune). Aplicând formula lui Kühl pentru gradul de saturare în calce (S_k) au rezultat valorile redată în Tabelul 7-6. În cazul cimentului expansiunea nu are efecte semnificative dacă CaO liber este mai mic de 2% din masa clincherului de ciment [91]. Pentru compozițiile de beton realizate în acest experiment cu procent de substituție (13%) a cimentului cu zgură de furnal, CaO liber reprezintă 0,65% care se situează sub valoarea de 2%. Aceste rezultate sunt în concordanță cu caracteristicile (GGBS) rezumate în Tabelul 7-2 care arată că zgura de furnal granulată are constanța de volum stabilă (determinată cu inele Le Chatelier). Un alt aspect legat de oxizii liberi de calciu și magneziu se referă la gradul de carbonatare și hidratare prin expunerea zgurii în atmosferă, determinări care se efectuează și pentru cimentul Portland (CEM I). Acesta poate fi evaluat prin pierderea la calcinare [13], [26]. Zgura de furnal procurată de la Combinatul siderurgic din Galați nu a înregistrat pierdere la calcinare, limita maximă admisă fiind de 3%, menționată în Tabelul 7-2.

Pentru a preveni coroziunea indusă de cloruri este limitat conținutul de cloruri, iar pentru a preveni reacția alcalii-silice (ASR) este limitat conținutul de alcalii. În Tabelul 7-2 valorile înregistrate sunt sub limita maximă admisă pentru conținutul de cloruri și alcalii și sub limita minimă recomandată, ceea ce justifică reacția lentă de hidratare și eliberare a căldurii atunci când este amestecată doar cu apa și a cărei viteze de reacție crește în prezența cimentului Portland. Pentru a preveni coroziunea sulfatică a betonului este limitat conținutul de aluminat tricalcic C_3A [13]. Se observă, în Tabelul 7-2, un conținut ridicat de aluminat tricalcic de 24.25 % la zgura de furnal, peste valoarea maximă admisă de 12%, însă la un procent de substituție a cimentului de 13% conținutul de aluminat tricalcic scade la 3.15%. Comparativ cu zgura de furnal conținutul de aluminat tricalcic la cimentul Portland utilizat, rezultat din compoziția oxizilor de aluminiu și fier este mult mai redus 8.9×10^{-3} (%). Reacția componentului C_3A cu apa la prepararea betonului este violentă deoarece conduce la întărire imediată a pastei de ciment. Pentru prevenirea producerii prizei instantanee a pastei de ciment se adaugă, la clincherul de ciment, un conținut optim de ghips, corelat cu

conținutul de C₃A disponibil, care se exprimă procentual în sulfat sub formă de SO₃ [13]. Dar și conținutul de sulfați este limitat deoarece deteriorează betonul prin reacția cu Ca(OH)₂ și cu aluminatul tricalcic (C₃A) din pasta de ciment întărită [6]. Se observă în Tabelul 7-2 încadrarea conținutului de sulfați pentru zgura de furnal analizată în limitele admise de standardul SR EN 15167-1:2007.

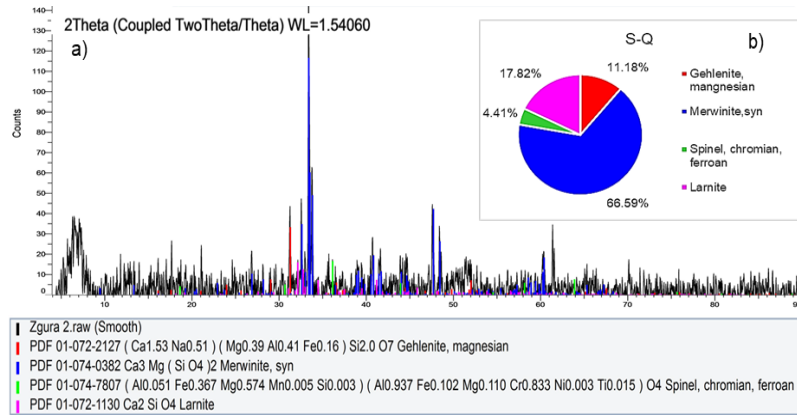


Figura 7-1 a) Difractograma de raze X în pulberi a unei probe reprezentative de zgură de (GGBS) și 2.b) Distribuția procentuală a constituenților mineralogici ai fazei cristalizate

Compoziția mineralogică determinată prin difracție cu raze X la zgură granulată și măcinată a fost reprezentată în Figura 7-1 a) și b).

Analiza difractometrică de raze X în pulberi pe probele de zgură prelevate din Galați a pus în evidență prezența următoarelor faze minerale: merwinit [Ca₃Mg(SiO₄)₂], gehlenit (Ca₂Al₂SiO₇), de fapt un membru al seriei gehlenite - âkermanite și larnit (Ca₂SiO₄), la care se adaugă minerale din grupul spinelului.

Acestea reprezintă faze de foarte înaltă temperatură și sunt caracteristice unor roci precum skarnele, formate la temperaturi de peste 800°C. Prezența lor în zgurile de furnal este explicabilă, prin folosirea ca fondant a dolomitului, [CaMg(CO₃)₂], într-un flux de fluorină (CaF₂) care a mobilizat și a fixat siliciul. Procentele fazelor determinate sunt date în Figura 7-1b).

Rezultatele obținute din testul de levigabilitate [201] precum și valorile limită sunt prezentate în Tabelul 7-7. Majoritatea componentelor chimice analizate în acest capitol, cu excepția bariului au înregistrat valori sub limitele admise în Tabelul 2.2 din Ordinul 95-2005 [115], care se referă la caracteristicile deșeurilor care pot fi acceptate în depozitele

de deșeuri inerte. Utilizarea procentelor optime ale pulberii de zgura în betoane poate conduce la un conținut de bariu în limitele admise datorită faptului că betonul este compact. În studiul [202], testul de levigabilitate pentru determinarea conținutului de plumb din materialele compozite s-a efectuat pe probe compacte de mortar de ciment. Rezultatele au arătat că sticla provenită din dezmembrarea deșeurilor electronice poate fi utilizată ca material de construcție, în condiții de siguranță pentru mediu. Aceasta se datorează faptului că amestecul de ciment și apă blochează elementele periculoase în interiorul compozitului. Din acest considerent s-a efectuat un test suplimentar de levigabilitate la amestecul de beton S 414 și la amestecul cu zgură S 54/20 pe probe mojarate din compoziția betoanelor. Rezultatele testelor [203], [204] au arătat un conținut de bariu de 4.75 mg/kg pentru amestecul S 414 și o valoare apropiată de 5.92 mg/kg pentru amestecul S 54/20. Ambele compoziții au înregistrat conținutul de bariu mai mic decât limita de 20 mg/kg, stabilită în Ordinul 95:2005.

7.5.2 Caracterizarea agregatelor prin proprietățile geometrice, fizice și chimice, modul de finețe, masă volumică, coeficientul de absorbție a apei și reacția alcalii-silice la agregate (ASR)

Prezența sulfatilor în agregatele din zgură conduce la degradări ale betonului, prin umflare. Sulfura de calciu (CaS) este solubilă în mediu cu pH ridicat cum este cazul betonului și poate duce la formarea etringitei secundare. Potențialul dizolvării excesive a sulfurii de calciu (CaS) trebuie redus la minim prin limitarea sulfatului solubil în acid la 1% și prin limitarea conținutului total de sulf la maxim 2.% [27], [61].

Valorile rezultate în Tabelul 7-4 pentru sulfatul solubil în acid de 0,48% și pentru sulfatul total de 0,93% din agregatele (ACBFS) sunt mai mici decât limita superioară recomandată în SR EN 12620 [61]. Constituenții care afectează stabilitatea volumetrică a zgurii de furnal provin din dezintegrarea fierului și a silicatului dicalcic. Lipsa de soliditate a fierului este întâlnită dacă se utilizează agregate din zgură stocată deoarece oxizii de fier se oxidează și apare reacția expansivă care determină dezintegrarea particulelor de zgură [27]. Rezultatele din Tabelul 7-4 arată că nu este afectată stabilitatea zgurii (ACBFS) deoarece

agregatele de zgură utilizate nu prezintă dezintegrare a silicatlui dicalcic și nici dezintegrări feroase.

La agregatele grosiere (CA_8/16, CA_16/25) se observă în Tabelul 7-5 că rezistențele la îngheț-dezghet, la uzură și la sfărâmare au performanțe superioare comparativ cu cele stabilite în standardele referință [61], [118]. Valoarea rezultată pentru modulul de finețe al nisipurilor caracterizează lucrabilitatea amestecurilor de betoane [91]. Din rezultatele obținute în Tabelul 7-9, la amestecurile cu zgură de furnal se observă că valoarea modulului de finețe crește liniar cu creșterea nivelului de substituție a agregatelor naturale cu agregate (ACBFS), care arată că utilizarea agregatelor din zgura de furnal (0/4) mm conduc la scăderea lucrabilității amestecurilor odată cu creșterea nivelului de substituție.

Valorile obținute pentru masa volumică și coeficientul de absorbție a apei sunt cele din Tabelul 7-8. Masa volumică absolută a agregatelor s-a utilizat la calculul cantităților de agregate pentru compoziția betonului utilizând metoda volumului absolut [13]. Masele volumice ale zgurii de furnal sunt mai scăzute decât ale nisipului natural. Coeficientul de absorbție a apei WA_{24} calculat în acord cu [119] pentru starea saturată cu suprafața uscată la cele două tipuri de agregate au aceeași valoare de 2%. Însă conținutul total de umiditate după 24 h de imersie este mai mare cu 10% la agregatele din zgură decât la nisipul natural ca în Figura 7-2b), deoarece cantitatea de apă liberă de la suprafața agregatelor de zgură este mai mare decât a nisipului. Datorită naturii veziculare a agregatelor din zgură (ACBFS), la prepararea betonului, agregatele nu trebuie să fie mai uscate decât starea cu suprafața saturată uscată (SSD) pentru a preveni o lucrabilitate redusă, a minimiza absorbția apei din pasta de ciment care conduce la contracția timpurie și reduce rezistența la îngheț-dezghet [27].

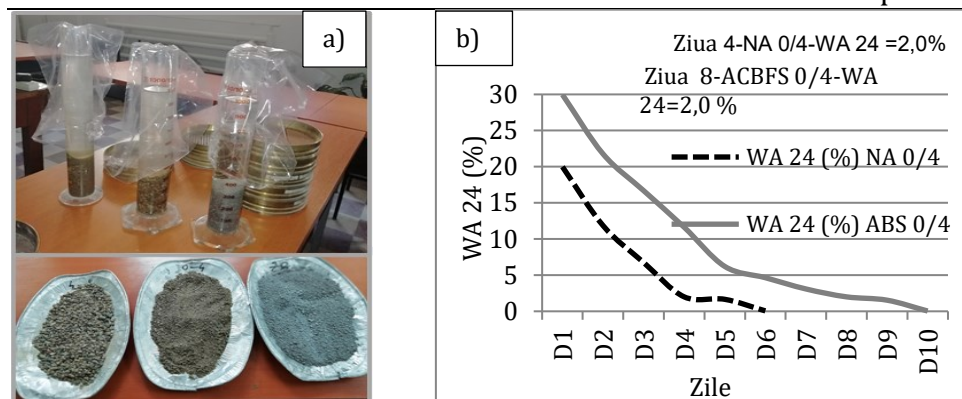


Figura 7-2. a) Agregate uscate și imersate în apă (pietriș, nisip, zgură),
b) Diagrama cu absorbția apei pentru nisip și zgură

Reacția alcalii-silice (ASR) se identifică la agregatele ce conțin silice amorfă sau silice insuficient cristalizată în condițiile unui exces de alcalii aflat în ciment. În cazul agregatelor potențial-reactive trebuie folosite cimenturi cu un conținut redus de alcalii [91]. Rezultatele raportului de încercare [120] obținute prin metoda chimică în acord cu SR 5440:2009 [64] sunt redată în Tabelul 7-10 și în Figura 7-3. Valorile permit încadrarea agregatelor din zgură concasată (ACBFS) la dimensiunea de 0/4 mm în zona A. În această zonă agregatele sunt considerate nereactive și sunt recomandate pentru utilizare la prepararea betoanelor.

Tabelul 7-10. Rezultatele obținute prin metoda chimică

Denumire probă	R _c	S _c	Observații
Zgură granulată ACBFS (I)	65	3	Zona A,
Zgură granulată ACBFS (II)	78	2	Zona A,
Zgură granulată ACBFS (III)	78	2	Zona A,

R_c reducerea concentrației soluției de hidroxid de sodiu, în mmol/dm³;

S_c concentrația de bioxid de siliciu dizolvat, în mmol/dm³;

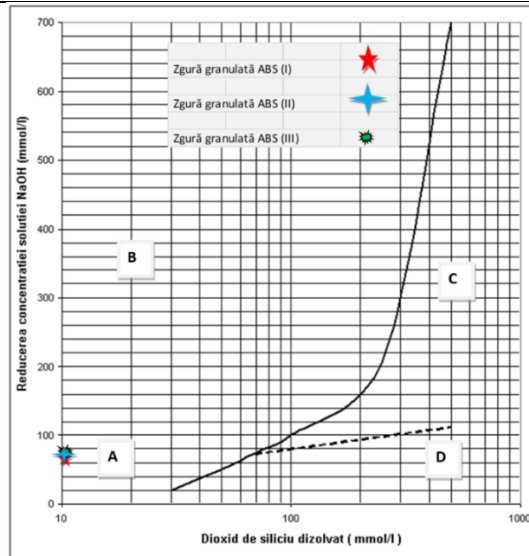


Figura 7-3. Diagrama de reducere a concentrației de hidroxid de sodiu în funcție de bioxidul de siliciu dizolvat

7.5.3 Concluzii parțiale

Din programul experimental efectuat pe amestecuri cu materiale convenționale și materiale artificiale (cu pulbere de zgură (GGBS) și agregate din zgură de furnal concasată (ACBFS)) au rezultat următoarele concluzii:

- Conținutul de masă vitrosă a pulberii de zgură (GGBS) rezultat din măsurătorile XRD a fost de 80%. Creșterea conținutului de masă vitrosă împreună cu finețea de măcinare conduc la creșterea gradului de hidratare a pulberii de zgură.
- Prin substituția cu 13% a cimentului cu (GGBS) oxidul de calciu liber (CaO) a zgurii de furnal (GGBS) a înregistrat o valoare sub limita de 2%, nivel peste care oxidul de calciu liber poate produce expansiune în beton datorită hidratării lente, în timp.
- Un conținut redus de alcalii derivați din oxidul de sodiu (Na₂O) contribuie la atenuarea reacției (ASR) în compoziția betonului. Pulberea de zgură (GGBS) s-a încadrat sub limita superioară admisă de 1.2%.
- Pentru a preveni coroziunea sulfatică a betonului este limitat conținutul de aluminat tricalcic (C₃A) al pulberii de zgură. Pentru o substituție a cimentului cu 13% (GGBS) valoarea rezultată pentru (C₃A) se încadrează în limita admisă.

- Testul de levigabilitate efectuat pe pulberea de zgură (GGBS) pentru a identifica conținutul elementelor periculoase a indicat un conținut mai mic decât valorile limită stabilite în Ordinul 95-2005, excepție a fost conținutul de bariu.
- Din testul de levigabilitate pe beton mojarat sub formă de pulbere din compozitele S 414 și S 54/20 au rezultat valori acceptabile pentru conținutul de bariu. Rezultatele arată că structura compactă a betonului blochează levigarea elementelor periculoase din interiorul compozitului.
- Masa volumică a agregatelor din zgură concasată (2510 kg/m^3) a fost mai mică decât cea a nisipului natural, (2610 kg/m^3).
- Valoarea modulului de finețe a agregatelor (ACBFS) a crescut odată cu creșterea substituției de agregat natural. Valorile mai mari ale modulului de finețe conduc la un necesar de apă mai crescut la prepararea betoanelor pentru a menține o lucrabilitate constantă.
- Agregatele (ACBFS) au avut o capacitate de absorbție a apei mai mare cu 10% decât cea a nisipului natural, deoarece au o structură mai poroasă în comparație cu a nisipului natural. Absorbția apei de agregate din pasta de ciment poate conduce la contracția timpurie și la reducerea rezistenței la îngheț-dezghet a betonului. Pentru a minimiza absorbția apei din pasta de ciment se recomandă ca, la momentul preparării betoanelor, agregatele din zgură să fie în starea (SSD)-saturate cu suprafața uscată.
- Nu se recomandă utilizarea agregatelor de zgură stocate timp îndelungat în depozit, deoarece conduc la lipsa de soliditate a fierului (dezagregare feroasă), prin dezintegrarea particulelor de zgură și determină reacția expansivă în beton.
- Pentru a preveni formarea etringitei secundare care determină reacții expansive, sulfatul solubil în acid este limitat la 1% iar conținutului total de sulf la maxim 2%. Aceste condiții au fost îndeplinite de agregatele din zgură de furnal utilizate în acest experiment.
- În cele din urmă s-a dovedit că agregatele din zgură concasate procurate de la Combinatul siderurgic din Galați nu au fost reactive în reacția alcalii-silice, caracteristică care permite recomandarea lor pentru utilizare în compoziția betoanelor rutiere. Rezultatele cercetărilor din acest capitol au fost publicate sub formă de articol științific în lucrarea [182].

8 Încercări nedistructive de evaluare a durabilității betonului (BcR-S) și evaluarea impermeabilității acestuia

8.1 Introducere

În tendința actuală de realizare a amestecurilor de beton, se remarcă faptul că zgura de furnal granulată și măcinată (GGBS) este unul din componentele betonului rutier [205], [206]. În ceea ce privește înlocuirea agregatelor naturale cu agregate artificiale din zgura de furnal concasată (ACBFS) în compoziția betoanelor cercetările dar și întrebuițarea lor sunt într-un număr mai redus.

Utilizarea cimenturilor cu adaosuri minerale de tip II influențează evoluția rezistențelor betonul întărit printr-o creștere mai semnificativă a rezistențelor, după vârsta de 28 de zile față de betoanele preparate cu ciment Portland [9]. A.M. Aghabaglou [141] a testat performanța la 300 de cicluri de îngheț-dezgheț prin metode nedistructive, a betoanelor compactate prin cilindrare, de tip (RCC), proiectate cu ciment cu adaosuri de cenușă zburătoare cu aplicații pentru baraje, piste de aeroport și îmbrăcămînți rutiere. Amestecurile de tip (RCC) au fost preparate prin înlocuirea cimentului cu cenușă zburătoare pe de o parte și amestecuri realizate prin înlocuirea agregatului cu diferite procente de cenușă zburătoare. Procedura de testare la îngheț-dezgheț utilizată în studiul a fost în acord cu ASTM C666/C666M-03 [138]. Aceasta presupune ca specișenele de beton să fie menținute în aer în camera termostatică de la $(5 \pm 2)^\circ\text{C}$ la $(-18 \pm 2)^\circ\text{C}$ timp de 3 ore pentru ciclu de îngheț urmate de un ciclu de dezgheț în apă la $(5 \pm 2)^\circ\text{C}$ în decurs de o oră. Rezultatele din acest studiu au arătat că înlocuirea agregatului cu diferite procente de cenușă zburătoare este mai eficientă în ceea ce privește caracteristicile de durabilitate comparativ cu amestecurile preparate cu înlocuirea cimentului cu cenușă zburătoare.

Viteza de propagare a impulsurilor cu ultrasunete (UPV) este una dintre cele mai cunoscute tehnici nedistructive pentru evaluarea calității betonului privind omogenitatea și rezistența la compresiune a structurilor existente din beton. Tehnica (UPV), este de asemenea utilizată și în calculul modulului de elasticitate dinamic a betonului în

funcție de timpul de propagare a impulsurilor ultrasonice prin proba de beton [207]. Mohd Shariq și colab. [205], a măsurat viteza (UPV) începând de la vârsta de 3 până la 180 de zile pe probe prismatice din beton simplu realizat cu diferite procente de (GGBS). S-a arătat că valorile (UPV) din betonul care conține (GGBS) sunt mai mici decât cele a betonului de referință pentru toate procentele de înlocuire a cimentului și la toate vârstele testate. Studiul experimental efectuat de S. Krishna Rao și colab. [206] a investigat viteza (UPV) pe epruvete cubice, la betonul de tip (RCC), care a conținut atât zgură de furnal (GGBS) ca substituție a cimentului cât și a nisipului prelucrat (M-sand) obținut din concasarea pietrei din granit ca înlocuire a agregatului fin. Concluziile studiilor au arătat că amestecul cu 40% (GGBS) din studiul cu Ref. [205] și 40%(GGBS) cu 50% (M-sand) din Ref. [206] s-au dovedit a fi optime comparate cu restul amestecurilor, rezultate confirmate de valorile UPV obținute după vârsta de 28 de zile. Cercetătorii au corelat rezultatele prin relații matematice exponențiale între rezistența la compresiune și viteza (UPV), dar și între modulul de elasticitate și rezistența la compresiune a betonului. Însă relațiile matematice obținute sunt aplicabile doar pentru amestecurile realizate, dar permit calculul parametrilor analizați la orice vârstă din cadrul intervalului de testare a probelor de beton.

8.2 Ipoteze de lucru/obiective

În acest capitol s-a investigat influența zgurii de furnal asupra uneia dintre caracteristicile de durabilitate a betonului rutier, precum rezistența la îngheț-dezgheț, determinată cu metode nedistructive prin măsurarea variației modulului de elasticitate dinamic relativ (RDM) la 150 și 300 de cicluri de îngheț-dezgheț la care a fost supus betonul, în acord cu CEN/TR 15777:2006 [123]. Utilizând aceeași metodă s-a măsurat timpul de propagare a impulsurilor ultrasonice (UPTT) la vârsta de 28, 100 și 150 zile pe probele martor folosite la testul de îngheț-dezgheț realizat în acord cu SR 3518:2009. Ulterior s-a stabilit relația matematică între viteza de propagare a impulsurilor ultrasonice (UPV) și rezistențele obținute din încercarea la compresiune. În cadrul experimentului au fost evaluate și următoarele proprietăți fizice ale betonului întărit: densitatea, absorbția apei și adâncimea de penetrare a apei sub presiune, caracteristici care au influență asupra rezistenței betonului la îngheț-dezgheț.

Epruvetele testate în acest program experimental au fost turnate în prima serie, la aceeași dată, având aceeași compoziție de materiale

pentru toate cele cinci amestecuri de beton realizat. Cantitățile de materiale din compoziția amestecurilor realizate sunt prezentate în Tabelul 6-4 din cap.6. Primele două amestecuri de control au fost realizate cu ciment Portland tip CEM I 42,5R și cu agregate naturale (AN), iar în următoarele trei amestecuri s-a utilizat pulbere de zgură de furnal (GGBS) măcinată sub $63 \mu\text{m}$ și agregate din zgură concasate (ACBFS) la dimensiunea de 0/4 mm în trei proporții diferite. Pentru compozițiile realizate se mențin notațiile de mai jos:

S 360, amestec de control cu 360 kg/m^3 ciment Portland și (AN);

S 414, amestec de control cu 414 kg/m^3 ciment Portland și (AN);

S 54/20, $360 \text{ kg/m}^3(\text{ciment}) + 54 \text{ kg/m}^3(\text{GGBS}) + 20\% (\text{ACBFS}) + 80\% (\text{AN})$;

S 54/40, $360 \text{ kg/m}^3(\text{ciment}) + 54 \text{ kg/m}^3(\text{GGBS}) + 40\% (\text{ACBFS}) + 60\% (\text{AN})$;

S 54/60, $360 \text{ kg/m}^3(\text{ciment}) + 54 \text{ kg/m}^3(\text{GGBS}) + 60\% (\text{ACBFS}) + 40\% (\text{AN})$;

8.3 Materiale și metode

8.3.1 Materiale

Caracteristicile fizice și chimice ale materialelor au fost prezentate în cap. 5÷7.

8.3.2 Metode

În acest experiment au utilizat probe preparate în seria I, la fiecare amestec trei epruvete cubice cu latura de 100 mm, trei epruvete cu latura de 200 mm și cincisprezece epruvete cubice cu latura de 150 mm. Epruvetele s-au decofrat după 24h de la turnare și s-au menținut în apă până la vârsta de 7 zile. După această vârstă epruvetele cu latura de 100 mm, de 200 mm și doisprezece bucăți cu latura de 150 mm au fost scoase din apă și s-au păstrat în aer la temperatura de $(20 \pm 2^\circ\text{C})$ și umiditate de $(65 \pm 5\%)$ până la vârsta de încercare.

Așa cum s-a prezentat la ipotezele de lucru, în cadrul experimentului, s-a determinat absorbția apei (w_i) și densitatea aparentă (ρ_a) în conformitate cu STASUL 2414-91 [101], pe epruvete cubice cu latura de 100 mm la vârsta de 90 de zile. Permeabilitatea s-a testat la vârsta de 90 zile pe cuburi cu latura de 200 mm în conformitate cu SR EN 12390-8: 2009 [121].

Rezistențele la îngheț-dezghet au fost determinate în acest program experimental prin metode nedistructive în acord cu CEN/TR 15777:2006 [123]. Pentru a determina rezistența la gelivitate s-au

utilizat 3 epruvete cubice martor cu latura de 150 mm pentru testul de 150 de cicluri, respectiv 3 epruvete pentru testul de 300 de cicluri repetate de îngheț-dezghet. Șase epruvete din fiecare amestec destinate ciclurilor de îngheț-dezghet s-au menținut în aer până la vârsta de încercare de 50 de zile, pe urmă s-au introdus în camera termostatică pentru încercarea la 150 și 300 de cicluri de îngheț-dezghet. Celelalte șase epruvete din fiecare amestec cu latura de 150 mm s-au păstrat în apă pe toată perioada de testare ca epruvete martor în acord cu procedura de testare prevăzută în SR 3518:2009 [102]. Trei probe cu latura de 150 mm din fiecare amestec au fost menținute în apă de la decofrare până la vârsta de 28 zile. La această vârstă s-au efectuat măsurătorile (UPTT) după care au fost încercate mecanic pentru a determina rezistențele la compresiune, valorile obținute se găsesc în cap.6.

Modulul de elasticitate dinamic (E_{dn}) s-a determinat prin calcul după măsurarea timpului (UTPP) prin probele de beton de 150 mm și calcularea vitezei de propagare a impulsurilor ultrasonice (UPV), conform SR EN 12504-4:2004 [122]. Pe epruvetele cu latura de 150 mm, testate la îngheț-dezghet, măsurătorile au fost determinate la vârsta de 50 zile înainte de începerea testului de îngheț-dezghet și după 150 de cicluri, respectiv 300 de cicluri de îngheț-dezghet. Perioada de testare la îngheț-dezghet s-a extins față de prevederile din NE 014:2002 de la 100 până la 300 de cicluri de îngheț-dezghet, similar cu standardul ASTM C666/ C666M-03 [138]. În acord cu acest standard se prevede testarea betoanelor până la 300 de cicluri de îngheț-dezghet sau până când modulul de elasticitate dinamic (E_{dn}) se reduce la 60% [13].

Pe epruvetele martor cu latura de 150 mm aflate în stare saturată, înainte de încercarea la compresiune s-a măsurat timpul de propagare a impulsurilor ultrasonice (UPTT) la vârsta de 28, 100 și 150 de zile. Densitatea betonului întărit în acord cu SR EN 12390-7:2002 [155], a fost determinată cu metoda de referință prin măsurarea volumului de apă dislocuit utilizând cuburi cu latura de 71 mm la vârsta de 150 de zile.

Metodele experimentale utilizate în acest capitol sunt descrise la subcap.4.4.

8.4 Rezultate

8.4.1 Densitatea, absorbția apei și permeabilitatea betonului

În tabelul 8-1 sunt redată rezultatele obținute pentru absorbția apei și adâncimea de penetrare a apei sub presiune (H).

Tabelul 8-1. Absorbția apei și adâncimea de pătrundere a apei sub presiune

Proprietățile fizice ale betonului	S 360	S 414	S 54/20	S 54/40	S 54/60
Wi (%) la 90 zile	2.98	3.22	3.03	3.14	3.19
H (mm) la 90 zile	11	17	2	8	16

8.4.2 Rezultate obținute pe probele testate la 150 și 300 de cicluri repetate de îngheț-dezghet

Viteza de propagare a impulsurilor ultrasonice (UPV) și modulul de elasticitate dinamic (E_{dn}), și rezistențele la compresiune sunt redată în Tabelul 8-2. La 150 de cicluri de îngheț-dezghet epruvetele au înregistrat vârsta de 100 zile, iar la 300 de cicluri de îngheț-dezghet epruvetele au ajuns la vârsta de 150 zile. Vârsta betonului înainte de testul de îngheț-dezghet, considerat momentul zero, a fost de 50 de zile.

Tabelul 8-2. Viteza (UPV) și modulul de elasticitate dinamic (E_{dn}) determinate înainte de testul de îngheț-dezghet și după 150 și 300 de cicluri de îngheț-dezghet

Mix.	Densitatea [g/cm ³]	UPV ₀ [km/s]	UPV ₁₅₀ [km/s]	UPV ₃₀₀ [km/s]	Ed ₀ [GPa]	Ed ₁₅₀ [GPa]	Ed ₃₀₀ [GPa]
S 360	2.301	4.644	4.735	4.682	41.35	42.98	42.04
S 414	2.223	4.610	4.625	4.603	39.37	39.61	39.24
S 54/20	2.298	4.620	4.701	4.642	40.87	42.33	41.26
S 54/40	2.267	4.608	4.630	4.606	40.12	40.50	40.07
S 54/60	2.251	4.600	4.588	4.536	39.69	39.49	38.60

8.4.3 Rezultate obținute pe probele martor menținute în apă în perioada desfășurării testului de îngheț-dezghet

Viteza de propagare a impulsurilor ultrasonice (UPV), modulul de elasticitate dinamic (E_{dn}), și rezistențele la compresiune pe probele martor menținute în apă, sunt redată în Tabelul 8-3.

Tabelul 8-3. Rezultatele (UPV), (E_{dn}), și (f_c) la 28, 100, 150 zile determinate pe probele martor

Amestec	UPV ₂₈ [km/s]	UPV ₁₀₀ [km/s]	UPV ₁₅₀ [km/s]	Ed ₂₈ [GPa]	Ed ₁₀₀ [GPa]	Ed ₁₅₀ [GPa]	f _{cm28} [MPa]	f _{cm100} [MPa]	f _{cm150} [MPa]
S 360	4.633	4.711	4.731	40.39	41.77	42.13	78.28	85.83	87.78
S 414	4.598	4.672	4.670	38.40	39.65	39.62	72.71	81.46	80.96
S 54/20	4.614	4.715	4.704	39.73	41.50	41.30	74.97	87.06	84.80

S 54/40	4.609	4.668	4.657	39.63	40.58	40.96	74.45	80.85	79.38
S 54/60	4.584	4.633	4.623	38.40	39.67	39.46	70.74	76.79	74.77

8.5 Discuții

8.5.1 Absorbția apei și permeabilitatea betonului

Rezultatele obținute s-au reprezentat grafic și s-au comparat raportat la amestecul de control S360 și la amestecul de control S414.

În Figura 8-1 a) și b) sunt prezentate grafic rezultatele absorbției apei după imersare în apă. Se poate observa că valorile obținute la toate compozițiile sunt apropiate de 3%, limită stabilită în acord cu CEB- FIP [141], [208] pentru care betoanele sunt apreciate ca și conforme. Odată cu creșterea procentului de substituție a agregatelor naturale cu agregate concasate din zgură (ACBFS) valorile absorbției de apă cresc și sunt peste nivelul amestecului de control S360. Prin comparație cu amestecul de control S414 amestecurile realizate cu zgură de furnal au o absorbție mai redusă.

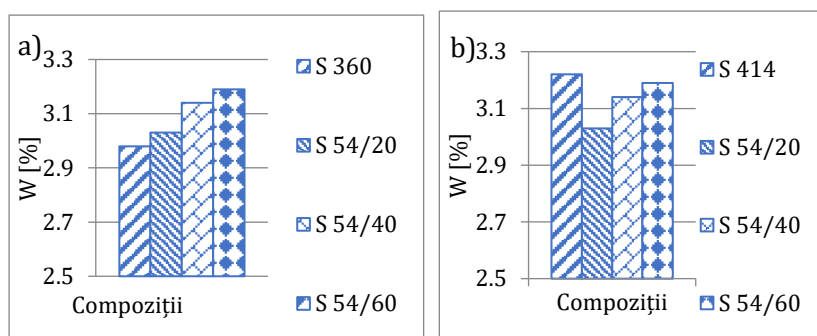


Figura 8-1. a) Absorbția apei comparată cu amestecul S 360; b) comparată cu S 414

Cei mai importanți factori care influențează permeabilitatea betonului sunt conținutul de aer oclus și porozitatea capilară din matricea de ciment hidratată [141], [209]. Valorile adâncimii de penetrare a apei sub presiune sunt redată în Figura 8-2. Se observă că valorile măsurate la amestecurile S 54/20 și S 54/40 sunt cele mai reduse până în 8 mm, sub valoarea amestecurilor de control, dar au crescut până la 16 mm pentru amestecul S 54/60. Adâncimea de penetrare a apei sub presiune a crescut proporțional cu nivelul de substituție a agregatelor din zgură concasate (ACBFS).

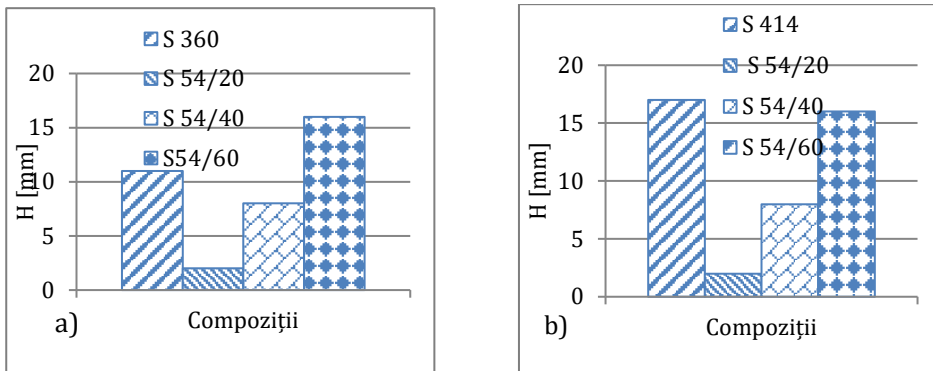


Figura 8-2. a) Adâncimea de penetrare a apei sub presiune comparată cu amestecul S 360; b) comparată cu S 414

8.5.2 Analiza rezultatelor obținute pe probele testate la 150 și 300 de cicluri repetate de îngheț-dezgheț

Evoluția rezultatelor obținute din măsurarea timpului de propagare a impulsurilor ultrasonice (UPTT) înainte de plasarea epruvetelor în camera termostatică, după 150 respectiv 300 cicluri de îngheț-dezgheț sunt prezentate în Figura 8-3. Valori mai mici ale timpului (UPTT) determină valori mai mari ale vitezei (UPV) și (E_{d_n}) indicând amestecuri mai compacte. Valorile (UPV) obținute au fost mai mari decât 4,5 km/s, limită specificată pentru un beton rezistent în acord cu prevederile conținute în articolele cu Ref. [141], [210] pentru toate compozițiile realizate. Prin urmare se observă că amestecurile mai dense S360 și S54/20 au condus la o creștere a (UPV) și (E_{d_n}), acest aspect a fost arătat și de S. K. Rao și colaboratori [206].

Rezultatele indică faptul că până la 150 cicluri de îngheț-dezgheț valorile (E_{d150}) au crescut comparativ cu valorile măsurate înainte de ciclurile de îngheț-dezgheț, descreșterea apare doar la amestecul S54/60, restul amestecurilor nefiind afectate de cele 150 de ciclurile de îngheț-dezgheț. Valoarea modulului de elasticitate dinamic de la 150 până la 300 de cicluri de îngheț-dezgheț este în scădere la toate compozițiile realizate, ceea ce indică degradări din îngheț-dezgheț.

La toate amestecurile cu zgură de furnal valorile (E_{d_n}) sunt sub nivelul amestecului martor S 360. Însă comparativ cu amestecul martor S414, amestecurile cu zgură S54/20 și S 54/40 au modulul de elasticitate dinamic mai mare.

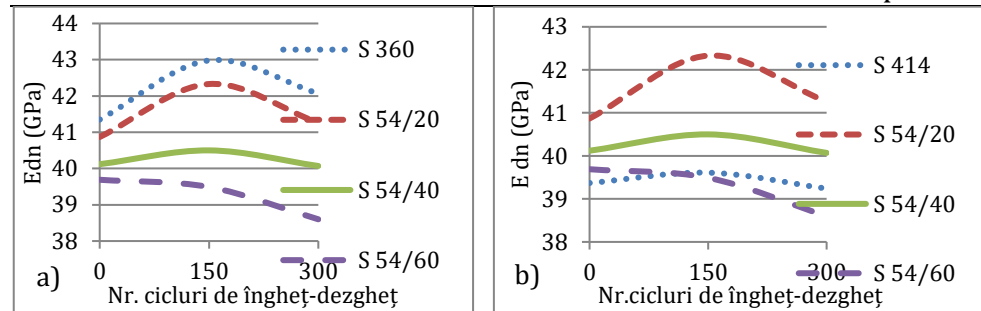


Figura 8-3. a) Modulul de elasticitate dinamic comparat cu amestecul S 360; b) comparat cu S 414

Reducerea modului de elasticitate dinamic relativ după 300 de cicluri RDM₃₀₀, calculată cu ec. (4.26), în conformitate cu CEN /TR 15177 [123] este prezentată în Figura 8-4.

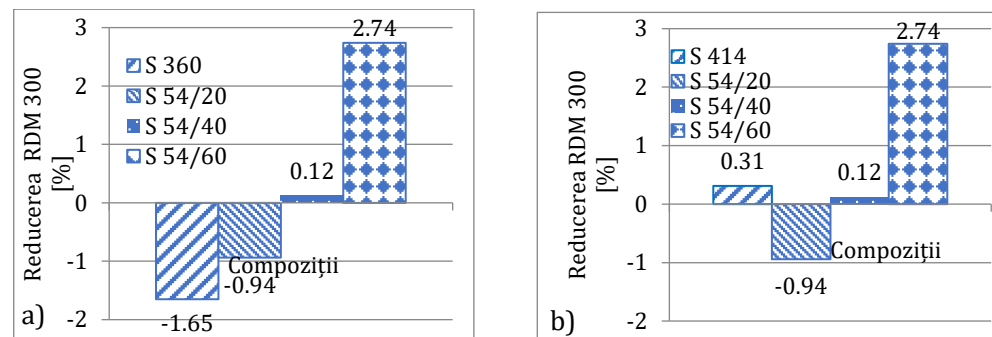


Figura 8-4. a) Reducerea RDM după 300 de cicluri de îngheț-dezghet comparat cu amestecul S 360; b) comparat cu S 414

Amestecurile S360 și S54/20 nu sunt afectate după 300 de cicluri de îngheț-dezghet, amestecul S54/40 prezintă un procent neglijabil 0,12% de reducere a rezistenței la îngheț-dezghet iar amestecul S54/60 are o reducere a rezistenței la îngheț-dezghet de 2,74 %.

În funcție de valorile obținute pentru modulul de elasticitate dinamic la 300 de cicluri de îngheț-dezghet (E_{d300}) s-a stabilit cu ec. (4.27) valorile factorului de durabilitate (D_f) ale compozițiilor realizate, prezentate în Figura 8-5.

Așa cum se poate observa în Figura 8-5 valorile factorului de durabilitate (D_f) la toate amestecurile sunt mai mari decât valoarea 60, corespunzător unui beton satisfăcător [13]. Pentru amestecurile S 360 și S 54/20 factorul de durabilitate depășește procentul de 100%, indicând faptul că până la 300 de cicluri de îngheț-dezghet nu sunt înregistrate daune din îngheț-dezghet.

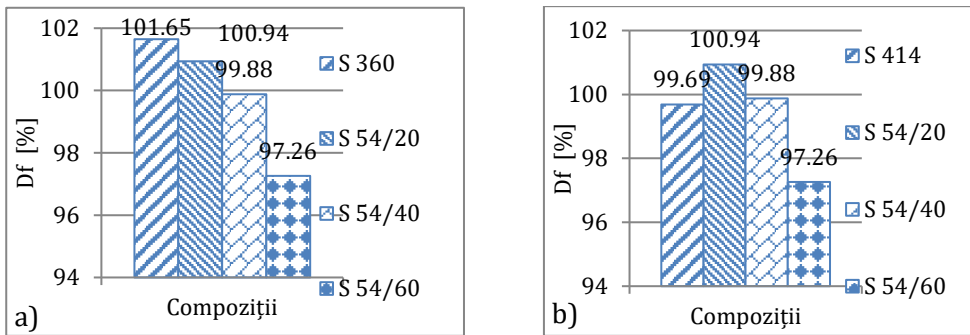


Figura 8-5. a) Factorul de durabilitate (D_f) după 300 de cicluri de îngheț-dezgheț comparat cu amestecul S 360; b) comparat cu S 414

În amestecurile cu zgură de furnal factorul de durabilitate este sub valoarea obținută pentru amestecul de control S360. Dar comparat cu amestecul de control S414 a rezultat o valoare mai mare pentru (D_f) la amestecurile S54/20 și S54/40. Un avantaj important al metodelor nedistructive pentru evaluarea rezistenței la îngheț este posibilitatea de a observa la orice interval de timp progresul deteriorărilor interne suferite de epruvete pe parcursul testului de îngheț-dezgheț [211].

8.5.3 Analiza rezultatelor obținute pe probele martor menținute în apă în perioada desfășurării testului de îngheț-dezgheț

Evoluția în timp a vitezei (UPV) pentru compozițiile realizate sunt prezentate în Figura 8-6. Kaushik și colab. [212] a arătat că viteza (UPV) este influențată de proprietățile materialelor utilizate în beton, cum ar fi tipul de ciment, tipul de agregat, raportul de agregat-ciment și raportul apă-ciment. Rezultatele din prezentul experiment confirmă constatarea din studiul [212] prin faptul ca valoarea (UPV) este cea mai mare în amestecul S 360 urmat de amestecul S 54/20, compoziții cu un raport agregat-liant crescut concomitent cu utilizarea unei cantități de apă reduse. Se observă că după (100÷112) zile valoarea (UPV) este în scădere la toate amestecurile cu (GGBS), evoluția (UPV) fiind diferită de prevederile studiului cu Ref. [205], în care UPV este în creștere lentă până la vârsta de 180 zile.

Timpul de propagare a ultrasunetelor este mai mic prin golurile pline de apă în comparație cu timpul de trecere prin golurile cu aer. Un timp de propagare a ultrasunetelor mai mic conduce la un modul de

elasticitate dinamic mai mare, rezultate în concordanță cu cele obținute în studiul [205].

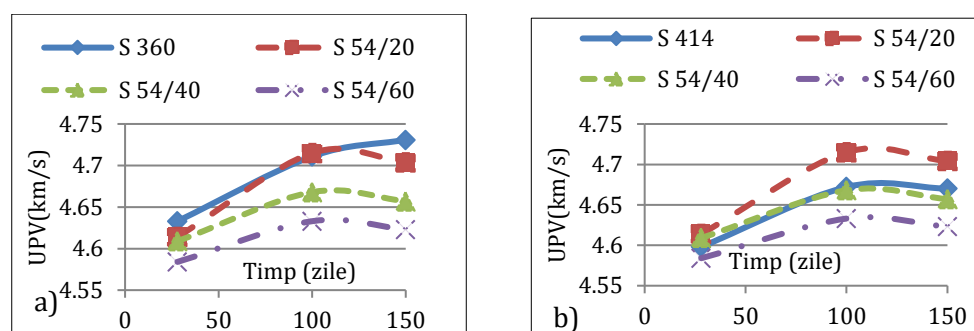


Figura 8-6. a) Viteza (UPV) comparată cu amestecul S 360; b) comparată cu S 414

În figura 8-7. a), b), c), d), e) se prezintă relația exponențială rezultată la fiecare amestec între rezistența medie la compresiune și viteza (UPV) a betonului în funcție de valorile înregistrate la vârsta de 28, 100 și 150 zile pe epruvetele martor cu latura de 150 mm.

Studiile anterioare [13], [205] arată că nu se poate stabili o relație unică între viteza (UPV) și rezistența medie la compresiune (f_{cm}), însă pentru fiecare amestec se poate stabili o tendință de evoluție între acești parametri. Creșterea vitezei (UPV) conduce la creșterea rezistenței la compresiune. Se observă că relațiile exponențiale stabilite au obținut un coeficient de corelație foarte bun (valoarea R) pentru amestecul S 54/20 și S 54/40 cu o eroare standard cuprinsă între (0.0304÷0.0401). Pentru restul amestecurilor eroarea standard al coeficientului de corelație a fost mai redusă având o valoare în intervalul (0.1395÷0.1).

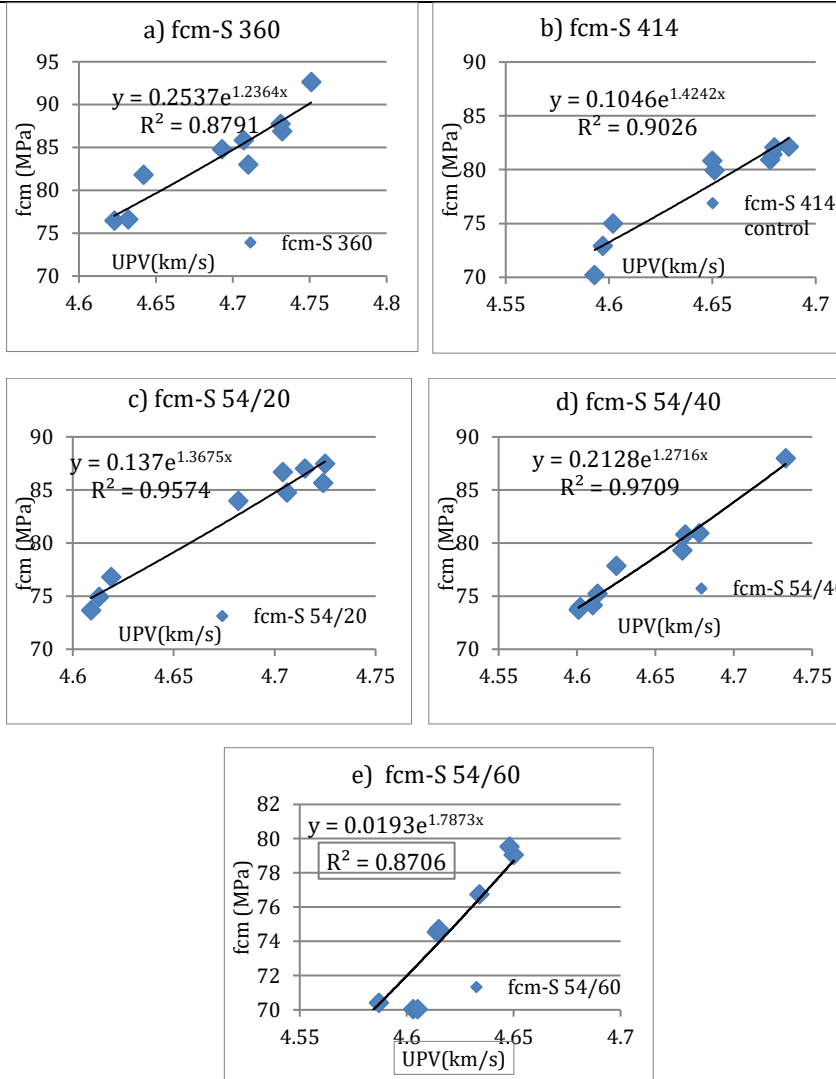


Figura 8-7. a), b), c), d), e) Relația între (UPV)-fcm la toate compozițiile de beton

În figura 8-8 a) este prezentată relația de tip exponențial dezvoltată între modulul de elasticitate dinamic și rezistențele medii la compresiune rezultate la 28, 100 și 150 zile pentru cele trei compoziții cu zgură de furnal, iar figura 8-8 b) este prezentată evoluția modulului de elasticitate dinamic. Din figura 8-8 a) se observă că modulul de elasticitate dinamic (E_{dn}) crește odată cu creșterea rezistenței mecanice, însă scade odată cu creșterea nivelului de substituție a nisipului natural cu agregate din zgură (ACBFS), ca în figura 8-8 b) . Relațiile matematice

stabilite între caracteristicile fizice și mecanice fiind aplicabile compozițiilor realizate în acest experiment.

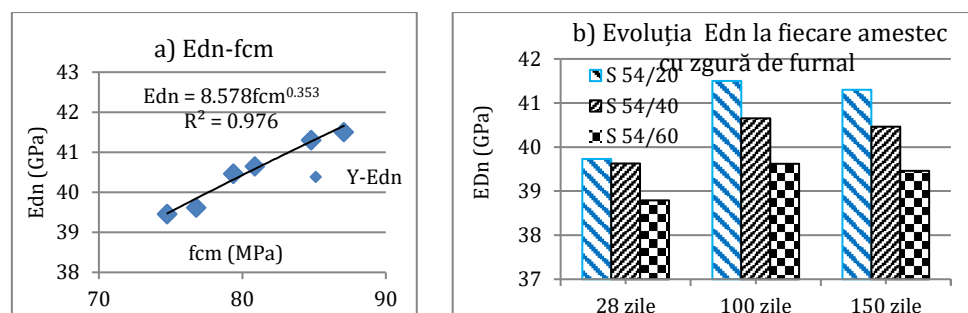


Figura 8-8.a) Relația dintre f_{cm} - E_{dn} ; b) Evoluția E_{dn} la fiecare amestec cu zgură de furnal

8.6 Concluzii parțiale

În această capitol s-a studiat influența zgurii de furnal asupra rezistenței la îngheț-dezgheț determinată prin metode nedistructive pe cuburi cu latura de 150 mm, pentru o perioadă de până la 300 de cicluri în scopul de a urmări progresul deteriorării betonului pe parcursul testului. De asemenea, s-au determinat unele proprietăți fizice ale betoanelor întărite care au influență asupra rezistenței la îngheț-dezgheț. Pentru compozițiile cu zgură de furnal valorile obținute pentru absorbția apei și adâncimea de pătrundere a apei sub presiune au crescut odată cu creșterea nivelului de substituție cu agregate concasate din zgură de furnal.

- Creșterea valorilor la absorbția apei în compozițiile cu zgură de furnal a fost cauzată de densitate mai scăzută a acestor betoane, de porozitatea mai mare a agregatelor de zgură comparativ cu a nisipului natural și de creșterea raportului A/C.
- La toate cinci amestecurile realizate absorbția apei a fost apropiată de limita admisă de 3%.
- Adâncimea de pătrundere a apei sub presiune a fost mai redusă în compozițiile S 54/20 și S 54/40 comparativ cu cele două compoziții martor. Acest rezultat confirmă rezultatele din literatura de specialitate care arată că utilizarea constituenților cu caracteristici cementoase în doze optime îmbunătățesc permeabilitatea betoanelor.

- Pentru toate amestecurile realizate viteza de propagare a impulsurilor ultrasonice (UPV) a fost mai mare decât 4.5 km/s, limită care indică un beton rezistent.
- Compoziția S 54/20 a avut evoluții apropiate de amestecul martor S 360 care a înregistrat cea mai mare o viteză (UPV). Rezultate care sunt justificate de densitatea mai mare a acestor betoane în comparație cu restul compozițiilor.
- Valoarea vitezei de propagare a ultrasunetelor a scăzut treptat în compoziția S 54/40 urmată de S 54/60 pentru care se observă și reducea densității betonului.
- Relațiile matematice particularizate pentru compozițiile din acest experiment permit calculul rezistențelor la compresiune în funcție de viteza (UPV) și a modulului de elasticitate dinamic (E_{dn}) în funcție de rezistențele la compresiune la momente intermediare din intervalul de testare a probelor la care se face măsurarea timpului (UPTT).
- Coeficientul de corelație rezultat din relațiile matematice stabilite arată o bună concordanța între rezultatele obținute.
- Factorul de durabilitate (D_f) calculat la 300 de cicluri de îngheț-dezghet a fost mai mare decât 60, valoare la care betonul este încadrat ca satisfăcător.
- Reducerea modulului de elasticitate dinamic relativ (RDM_{300}) a înregistrat valoarea maximă de 2.74% sub limita de 15% admisă în SR 3518:2009, la toate compozițiile realizate.
- Cele mai mari deteriorări din îngheț-dezghet au fost înregistrate la amestecul S 54/60, având valoarea (RDM_{300}) cea mai mare.
- Cercetările realizate prin tehnici nedistructive sunt corelate cu tehnicile distructive confirmate prin rezultatele obținute în cap.6, pentru rezistențele la întindere din încovoiere la 28 de zile, care au permis încadrarea amestecurilor S 54/20 și S 54/40 în clasa BcR 5.0, respectiv în clasa BcR 4.5 pentru amestecul S 54/60. Rezultatele cercetărilor din acest capitol au fost publicate sub formă de articole științifice în lucrările [213], [214].

9 Rezistența la îngheț-dezgheț a (BcR)- cadrul național și european

9.1 Introducere

Pentru început se prezintă o analiză de ansamblu asupra cerințelor și recomandărilor legate de expunerea la îngheț- dezgheț a structurilor din beton la nivel internațional, însă scopul lucrării urmărește selectarea metodelor de testare la îngheț-dezgheț utilizate la noi în țară și utilizate la nivel european cu aplicabilitate pentru experimentul aflat în derulare. Această cercetare este legată de utilizarea în amestecurile de betoane rutiere a zgurii de furnal (GGBS) ca și constituent cu caracteristici suplimentare cementoase și utilizarea zgurii ca agregat concasat (ACBFS) cu rol de substituție parțială a nisipului natural de dimensiune 0/4mm. Conceptul de durabilitate echivalentă definit în lucrarea *Soluții avansate pentru betoane durabile* [126] și în acord cu CEN/TR16563 [215] are ca obiectiv corelarea experienței din teren cu rezultatele din laborator prin dezvoltarea unei baze de date cu diferite amestecuri de betoane de referință și cu expuneri la diferite medii de exploatare. În țările europene conceptul de performanță echivalentă a betonului se regăsește în Directiva EN 206 [10], [126] însă aplicarea acestuia în majoritatea țărilor nu este implementată deoarece se impune un sistem național recunoscut cu informații clare despre betoanele de referință. Prin definiție, durabilitatea la îngheț a betonului reprezintă capacitatea de a rezista la cicluri repetate de îngheț-dezgheț de-a lungul duratei de viață fără a se deteriora din cauza pierderii de material de la suprafața betonului sau din cauza fisurilor interne [126]. Parametrii generali cunoscuți la noi pentru proiectarea betonului rezistent la îngheț-dezgheț sunt: raportul (A/C), rezistența la compresiune, permeabilitatea și conținutul de aer oclus, limitarea permeabilității și a rezistenței la îngheț-dezgheț la agregatele utilizate în compoziția betoanelor. Pe lângă acești parametri la nivel internațional sunt stabilite cerințe suplimentare pentru factorul de spațiere a porilor și proporția de materiale suplimentare cementoase (SCM) utilizate la fabricarea cimentului sau a constituenților suplimentari cu caracteristici

cementoase (CSCC) adăugați separat împreună cu cimentul în producția de beton, definiți ca în lucrarea [156]. Majoritatea dintre acești parametri sunt testați conform standardelor Europene, excepție face factorul de spațiere a porilor de aer care se regăsește în cerințele de durabilitate din Norvegia, Danemarca, Canada și USA [126]. Ca exemplu Standardul Canadian CSA A23.1-2-2009 [126], [216] stabilește cerințe pentru factorul de spațiere al aerului oclus de $230\mu\text{m}$. În Rusia standardul GOST 26633-2015 [126], [217] limitează raportul (A/C) la 0,45 și conținutul de aer oclus la $5\div 7\%$ pentru structurile rutiere. La noi în țară prin aplicabilitatea standardului SR EN 206+A1:2017 [10] prevede pentru betoanele rezistente la îngheț, utilizarea agenților de antrenare a aerului cu valori minime stabilite în funcție de dimensiunea maximă a agregatului, limitarea raportului (A/C) și valori minime pentru rezistențele la compresiune. Pentru betoanele rutiere se prevăd, prin normativul NE 014:2002 [11], cerințe suplimentare privind valori minime pentru rezistențele la întindere prin încovoiere și pentru rezistența la îngheț-dezghet, criterii care până în prezent nu au fost corelate cu cele din SR EN 206+A1:2017.

În ceea ce privește utilizarea (SCM)-urilor în amestecuri de betoane expuse la îngheț-dezghet standardul German DIN 1045-2 [218] indică valori limită pentru betoane cu întărirea lentă precum cele cu cenușă zburătoare. Standardul Canadian [216] sugerează utilizarea (SCM)-urilor în cazul betoanelor expuse la atacuri combinate de sulf și clorură, iar cerințele standardului Rusesc GOST R 55224-2012, clauza 5.11.2 [126], [219] pentru betoane rezistente la îngheț acceptă zgura de furnal ca fiind principalul adaos mineral la fabricarea cimentului pentru betoanele rutiere, elemente armate și structuri de poduri. La noi în țară în acord cu EN 206+A1:2017[10] se acceptă utilizarea adaosurilor de tipul II (adaosuri puzzolane sau hidraulic latente) în următoarele proporții, cenușa zburătoare maxim 33% din masa cimentului în funcție de domeniile de utilizare și silicea ultra fină în procent de maxim 11% din masa cimentului, pulberea de zgură (GGBS) maxim 50% din masa cimentului. Obținerea unui beton durabil precizează Hooton, 2012 [126], [220] pentru cele mai agresive condiții de expunere este condiționat de materiale, de proiectarea amestecurilor și de respectarea unor tehnologii de construcție adecvate. Metodele de testare a rezistenței la îngheț și criteriile de acceptare diferă de la o zonă la alta, în funcție de tipul de

experiment, planul de conservare al probelor, durata și intervalul de temperatură din camera termostatică și de criteriile de acceptare. Toții acești parametri sunt condiționați de mediul de expunere a structurii din beton rutier. Se remarcă câteva observații principale de alegere a metodelor de testare, exemplu pentru structurile amplasate într-un mediu uscat realizate din beton de înaltă performanță principala evaluare a rezistenței la îngheț este de evaluare a fisurilor interne, prin metoda ASTM C666/C666M, procedura A [138]. Însă pentru betoanele rutiere autoritățile rutiere impun prioritar efectuarea testului de exfoliere cu agenți de dezghețare [221]. Standardele din Rusia impun pentru Clasa de expunere XF la îngheț-dezgheț o rezistență minimă la compresiune care să fie atinsă înainte ca betoanele să fie expuse la îngheț- dezgheț. Există și alte metode de evaluare a rezistenței la îngheț cum ar fi metoda de evaluare al factorului de protecție al porilor cunoscut sub numele de (PF) care reprezintă un criteriu pentru evaluarea rezistenței la îngheț-dezgheț a betonului în acord cu standardul finlandez SFS 4475:1998 [126], [222]–[224] și alta prin evaluarea permeabilității betonului [126], [225]. În majoritatea țărilor din Europa evaluarea fisurilor interne a structurii expuse la îngheț se face în acord cu CEN /TR 15177:2006 [123] prin care se măsoară modulul de elasticitate dinamic, variația lungimii și absorbția de apă după minim 56 de cicluri de îngheț-dezgheț, iar testul de pierdere de material de la suprafața betonului se face în acord cu standardul suedez SS 137244 [125] și CEN /TS 12390-9:2017 [124] prin care se calculează pierderea de masă a materialului de la suprafața betonului după 56 sau 112 de cicluri de îngheț-dezgheț. În America de Nord evaluarea fisurilor interne se face în acord cu ASTM C666/C666M [138] după 300 de cicluri de îngheț-dezgheț iar testul de pierdere a masei de material la suprafața betonului se face în acord cu ASTM C672 [226] la 50 de cicluri de îngheț -dezgheț. Metodele adoptate în China pentru evaluarea fisurilor interne sunt în acord cu standardul GB/T 50082-2009 [126], [128] prin care se evaluează pierderea de masa și rezistența la compresiune după minim 25 de cicluri de îngheț-dezgheț. Această metodă este apropiată cu cea utilizată la noi în țară în acord cu standardul național SR 3518-2009 [102], în ceea ce privește pregătirea probelor, durata, temperatura ciclurilor de îngheț-dezgheț și criteriile de acceptare pentru pierderea de rezistență la compresiune.

Cele prezentate arată că metodele de testare sunt structurate pe două forme de deteriorare: prima *exfolierea la suprafață* a betonului și a doua se referă la *fisurarea internă* a structurilor din beton. Termenul de scalare este curent utilizat în studiile internaționale dar la noi uzual este termenul de exfoliere a suprafeței betonului. Definiția termenului de scalare se găsește în CEN/TS 12390-9:2009 [124] și reprezintă pierderea de material de la suprafața betonului produsă de ciclurile de îngheț-dezgheț cu agenți de dezghețare. În ceea ce privește criteriile de acceptare a rezultatelor obținute prin diferite metode de testare există rezerve legate modul de pregătire, de conservare, vârsta epruvetelor comparat cu expunerea reală a structurilor. Datorită acestor dezacorduri se constată că unele metode nu prezintă criteriile de acceptare în mod explicit, cum ar fi metoda CEN/TR 15177:2006 utilizată în Europa pentru testarea fisurării interne, iar rezultatele obținute sunt deseori comparate cu cele a betoanelor de referință, prezentate în continuare în mai multe studii experimentale care abordează această problemă.

Peter Boos și Zbigniew Giergiczny, [227] au testat rezistența la îngheț în acord cu CEN/TS 12390-9:2017 a betoanelor realizate cu trei tipuri de ciment CEM I, CEM II, CEM III provenite din patru fabrici Europene. Inițial exfolierea la suprafață a fost mai crescută la amestecurile cu CEM II și cu CEM III comparative cu amestecul cu CEM I. Prin modificarea condițiilor de conservare a betoanelor cu CEM II și III pierderea de material de la suprafața betonului a fost în intervalul rezultatelor betoanelor realizate cu CEM I. Buletinul Tehnic Frostprüfung von Beton, din Ingineria și cercetarea federală a căilor navigabile [228], recomandă o conservare de 14 zile în loc de 7 zile sub apă pentru betoanele cu hidratare lentă și testul la îngheț-dezgheț să fie efectuat după 56 sau 90 zile. D. Kocáb și colab. [211], din Cehia, a determinat rezistența la îngheț dezgheț a betoanelor realizate cu agregate provenite de la diferite stații de concasare. Metodele de testare alese au fost GB/T50082-2009 ca metodă distructivă utilizată pentru evaluarea fisurării interne a structurii și ASTM C666-03 ca metodă nedistructivă utilizată pentru măsurarea modulului dinamic de elasticitate relativ, (RDM). D. Jozwiak-Niedzwiedzka [229] din Polonia a efectuat un studiu legat de influența agregatului ușor asupra deteriorării suprafeței betonului în prezența agenților de dezghețare datorită fenomenului de îngheț-dezgheț. A utilizat metoda Borås în acord cu

standardul Suedez SS 137244 [125]. T.Syamak și colab. [230] a utilizat metoda ASTM C666 pentru determinarea modului de elasticitate relativ, variația lungimii și pierderea masei în studiul privind influența (GGBS) asupra rezistenței la îngheț la betoanele auto-compactante (SCC). M. K. Kazberuk [231] a studiat rezistența la îngheț-dezgheț prin testarea exfolierii la suprafață, în acord cu metoda (slab test) din CEN/TS 12390-9:2017, a betonului cu cenușă zburătoare supus la 112 cicluri de îngheț-dezgheț în prezența soluției de NaCl în concentrație de 3%. M. K. Kazberuk a arătat că rezultatele testelor analizate statistic în acord cu criteriile de acceptare din SS 137244:1995, în compoziții cu până la 25% cenușă zburătoare, utilizarea aditivului antrenor de aer și condiții adecvate de întărire permit obținerea unui beton durabil. Jun P. H. și colab. [232] au studiat proprietățile de durabilitate a betoanelor care conțin agregate reciclate și materiale puzzolane precum cenușă zburătoare și zgura de furnal măcinată. Rezistența la îngheț a fost determinată cu metoda ASTM C666 prin testul rapid. S.Huai-Shang și colab. [233] au studiat durabilitatea la îngheț-dezgheț a betonului cu aer antrenat. A măsurat modulul de elasticitate dinamic relativ și pierderea masei până la 400 cicluri de îngheț-dezgheț cu metoda GB/T50082-2009. Rezultatele au fost corespunzătoare până la 300 de cicluri de îngheț-dezgheț. De asemenea și la noi în țară s-au efectuat cercetări experimentale pentru evaluarea rezistenței la îngheț-dezgheț a betonului cu metoda CEN/TS 12390-9 (cube test) pentru exfolierea suprafeței, utilizând standardul național SR 3518:2009 și metoda CEN/TR 15177:2006 pentru evaluarea fisurării interne a structurii [234].

9.2 Ipoteze de lucru/obiective

În această lucrare sunt prezentate trei metode de testare pentru rezistența la îngheț- dezgheț determinată prin: pierderea de material de la suprafața betonului (exfolierea) utilizând metoda CEN/TS 12390-9:2017 [124] (slab test) completată cu SS 137244 [125], prin evaluarea fisurării interne a structurii prin metoda CEN/TR 15177:2006 [123] și prin metoda distructivă în acord cu standardul național SR 3518:2009 [102]. Primele două metode sunt metode de testare la îngheț-dezgheț utilizate de țările din Europa iar cea de a treia este metoda frecventă

utilizată la noi în țară. Deoarece betoanele rutiere sunt expuse fenomenului de îngheț-dezghet cu agenți de dezghetare metoda de măsurare a cantității de material exfoliat de la suprafața betonului o considerăm necesară pentru testarea la îngheț-dezghet a acestor tipuri de betoane.

Amestecurile au fost proiectate să se poată utiliza în condiții de expunere la clasa XF4 (expunere la îngheț F având saturație puternică de apă cu agenți de dezghetare, nivel de umiditate 4). În acord cu cerințele de durabilitate pentru betoanele rutiere stabilite prin [9], [11] condițiile minime la proiectare au fost: un dozaj de ciment de minim 350 kg/m^3 , raportul A/C maxim 0,45, clasa minimă de rezistență C35/45 și aditiv antrenor de aer cu un conținutul de aer oclus de minim 3% în compoziția acestora.

9.3 Materiale și metode

9.3.1 Materiale

Compozițiile de betoane rutiere din acest experiment fac parte din prima și a doua serie de turnare. În cap. 6 sunt rezumate cantitățile de materiale ale compozițiilor de betoane rutiere.

Pentru identificarea compozițiilor s-au utilizat notațiile de mai jos:

S 360, amestec de control cu 360 kg/m^3 ciment Portland și (AN);

S 414, amestec de control cu 414 kg/m^3 ciment Portland și (AN);

S 54/20, 360 kg/m^3 (ciment)+ 54 kg/m^3 (GGBS)+20% (ACBFS)+80% (AN);

S 54/40, 360 kg/m^3 (ciment)+ 54 kg/m^3 (GGBS)+40% (ACBFS)+60% (AN);

S 54/60, 360 kg/m^3 (ciment)+ 54 kg/m^3 (GGBS)+ 60% (ACBFS)+40% (AN);

9.3.2 Metode

Pentru fiecare amestec, turnat în seria întâi, s-au turnat 4 epruvete cubice cu latura de 200 mm și 12 epruvete cubice cu latura de 150 mm care s-au menținut în aer 24 h, după care s-au decofrat și s-au imersat în apă la temperatura de $(20 \pm 2^\circ\text{C})$. La vârsta de 7 zile, epruvetele au fost scoase din apă și s-au păstrat în aer, în camera climatică, la temperatura de $(20 \pm 2^\circ\text{C})$ și la o umiditate de $(65 \pm 5\%)$ pentru încercarea la îngheț-dezghet în acord cu SR-3518:2009 [102]. La vârsta de 50 zile a început testarea la îngheț-dezghet pe cuburi cu latura de 150 mm prin

metoda distructivă în acord cu SR 3518:2009. După ce cuburile cu latura de 200 mm s-au despicat pentru testul de permeabilitate la vârsta de 90 de zile din fragmentele rămase s-au tăiat fâșii de beton de 150x150x50 mm, iar la 150 zile fâșiile s-au introdus în camera climatică pentru testarea la îngheț-dezgeț. S-au utilizat agenți de dezghețare în acord cu CEN/TS 12390-9:2017 [124] (în acord cu metoda de măsurare a masei exfoliate de la suprafața betonului) și s-a măsurat timpul (UPTT) de propagare a impulsurilor ultrasonice în acord cu CEN/TR 15177:2006 [123] pe fâșiile de beton de 150x150x50 mm.

Pentru amestecurile turnate în seria a doua s-a testat la vârsta de 200 zile, rezistența medie la 150 de cicluri de îngheț-dezgeț pe cuburi cu latura de 150 mm. Au fost realizate trei cuburi pentru probele martor și trei cuburi pentru probele menținute în camera termostatică la fiecare amestec. Toate testele pe betoane au fost efectuate în laboratoarele UTCN, iar tehnicile experimentale utilizate au fost descrise la subcap.4.5.

9.4 Rezultate

9.4.1 Rezultate la îngheț-dezgeț prin măsurarea variației rezistenței la compresiune

Rezultatele obținute cu metoda din SR 3518:2009 [102] sunt prezentate în Tabelul 9-1 (seria I) și Tabelul 9-2 (seria II).

Tabelul 9-1. Rezistențele și pierderile de rezistențe la compresiune după 150 și 300 cicluri de îngheț-dezgeț, seria I

Amestec	f_{cm} , martor (MPa)	$f_{cm,150}$ cicluri (MPa)	η_{150} cicluri (%)	f_{cm} , martor (MPa)	$f_{cm,300}$ cicluri (MPa)	η_{300} cicluri (%)
S 360	85.83	88.32	-2.91	87.78	83.06	5.38
S 414	81.46	75.64	7.14	80.96	71.15	12.10
S 54/20	87.06	85.75	1.51	84.80	77.82	8.32
S 54/40	80.85	76.29	5.63	79.38	73.06	7.96
S 54/60	76.79	67.92	11.55	74.77	60.95	18.47

Tabelul 9-2. Rezistențele la compresiune și pierderile de rezistențe la 150 cicluri de îngheț-dezgeț, seria II

Amestec	S 360	S 414	S 54/20	S 54/40	S 54/60

Capitolul 9

f_{cm} (MPa) martor	73.07	71.94	75.57	73.41	75.53
f_{cm} (MPa) la 150 cicluri	70.23	70.13	77.21	74.66	76.99
η_{150} cicluri (%)	3.89	2.33	-2.17	-1.71	-2.21

Valorile obținute reprezintă rezistențele la compresiune pentru probele martor și pentru probele supuse la cicluri repetate de îngheț-dezgeț și pierderile de rezistență la compresiune între cele două seturi de cuburi cu latura de 150 mm.

9.4.2 Rezultate la îngheț-dezgeț prin măsurarea masei exfoliate de la suprafața epruvetei

S-au calculat valorile individuale pe epruvete de 150x150x50 mm și apoi valoarea cumulată de material exfoliat la fiecare amestec la 7, 14, 28, 42, 56 de cicluri de îngheț-dezgeț ca în Tabelul 9-3.

Tabelul 9-3. Cantitatea cumulată de beton exfoliat (S) după 56 cicluri de îngheț-dezgeț, pe fâșii de 150x150x50 mm raportată la suprafața măsurată, seria I

Amestec	$m_{s,7}$ [g]	$m_{s,14}$ [g]	$m_{s,28}$ [g]	$m_{s,42}$ [g]	$m_{s,56}$ [g]	$m_{s,cumulată}$ [g]	S_{56} , cumulată [kg/m ²]
	7 cicluri	14 cicluri	28 cicluri	42 cicluri	56 cicluri	56 cumulată	
S ₃₆₀	0.200	0.225	0.300	0.400	0.550	1.675	0.080
S ₄₁₄	0.225	0.250	0.350	0.425	0.550	1.800	0.086
S 15/20	0.225	0.250	0.275	0.350	0.450	1.550	0.074
S 15/40	0.250	0.275	0.325	0.400	0.475	1.725	0.082
S 15/60	0.225	0.250	0.350	0.450	0.575	1.850	0.088

Notă: suprafața măsurată a fost de 0.02103 m².

9.4.3 Rezultatele rezistențelor la îngheț-dezgeț determinate prin reducerea procentuală a modulului de elasticitate dinamic relativ (RDM)

Valorile înregistrate pe fâșii de 150x150x50 mm pentru timpul de propagare a impulsurilor ultrasonice (UPTT) și valorile calculate pentru (RDM) după 28 și 56 de cicluri de îngheț-dezgeț sunt redată în Tabelul 9-4.

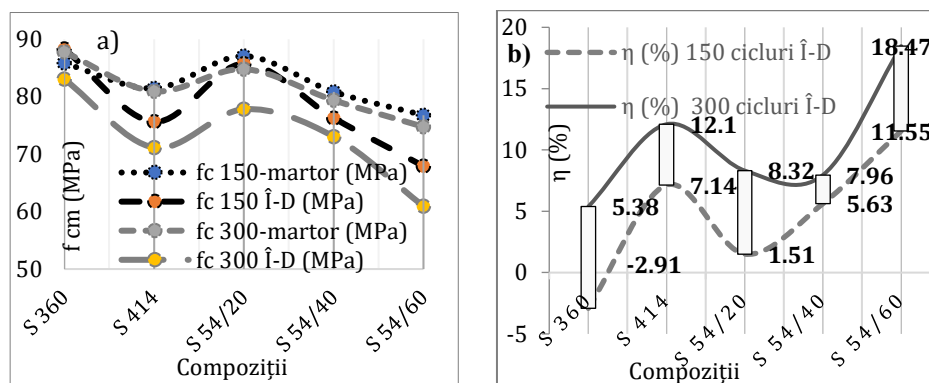
Tabelul 9-4. Măsurarea timpului de propagare a ultrasunetelor (UPTT) înainte și după 56 de cicluri de îngheț-dezghet și calculul (RDM), seria I

Caracteristici	Compoziții de beton				
	S 360	S 414	S 54/20	S 54/40	S54/60
T_0 (μ s)	31.97	32.35	31.98	32.21	32.44
T_{28} (μ s)	32.19	32.63	32.15	32.47	32.79
T_{56} (μ s)	32.24	32.75	32.23	32.53	32.89
RDM ₂₈ (%)	98.68	98.30	98.93	98.43	98.20
RDM ₅₆ (%)	98.37	97.59	98.49	98.09	97.65
(100-RDM ₅₆) %	1.63	2.41	1.51	1.91	2.35

9.5 Discuții

9.5.1 Analiza rezistențelor la îngheț-dezghet determinate prin măsurarea variației rezistenței la compresiune, seria întâi

Evoluția rezistențelor la compresiune la probele martor și la probele, testate la 150 și 300 de cicluri de îngheț-dezghet sunt prezentate în Figura 9-1a), iar pierderile de rezistențe la compresiune după 150 și 300 de cicluri de îngheț-dezghet în Figura 9-1 b).


Figura 9-1. a) Rezistențele la compresiune (f_{cm}) și b) pierderile de rezistențe la compresiune (η) după 150 și 300 de cicluri de îngheț-dezghet, seria I

Se observă că cele mai mari rezistențe la compresiune s-au obținut la amestecul S 360 iar cele mai apropiate de acesta sunt valorile rezultate la amestecul S 54/20. În comparație cu rezistențele de la amestecul de control S 414 s-au obținut valori superioare pentru amestecul S 54/20 și apropiate pentru S 54/40, dar valori inferioare pentru amestecul S 54/60. Evoluțiile au fost similare pentru pierderile

de rezistență la compresiune, pentru amestecul S 54/20 și S 54/40 mai mici decât cele rezultate la amestecul de control S 414. Amestecul S 54/60 a înregistrat cele mai mari pierderi de rezistențe la compresiune. Însă la toate amestecurile pierderile de rezistență au fost mai mici decât limita maximă admisă în SR 3518:2009 de 25%.

9.5.2 Analiza rezistențelor la îngheț-dezghet determinate prin măsurarea variației rezistenței la compresiune, seria II

În figura 9-2a) sunt prezentate valorile medii obținute pentru rezistențele la compresiune după 150 cicluri de îngheț-dezghet. Au fost calculate pierderile de rezistențe la compresiune între probele martor și probele încercate la îngheț-dezghet la vârsta de 200 zile, având evoluția ca în figura 9-2b).

Se observă valori mai mici de 25 % decât limita maximă admisă în standardul național SR 3519-2009. Cele mai bune rezultate s-au obținut pentru amestecul S 54/20 și S 54/60 care se pot justifica prin faptul că aceste betoane sunt mai dense.

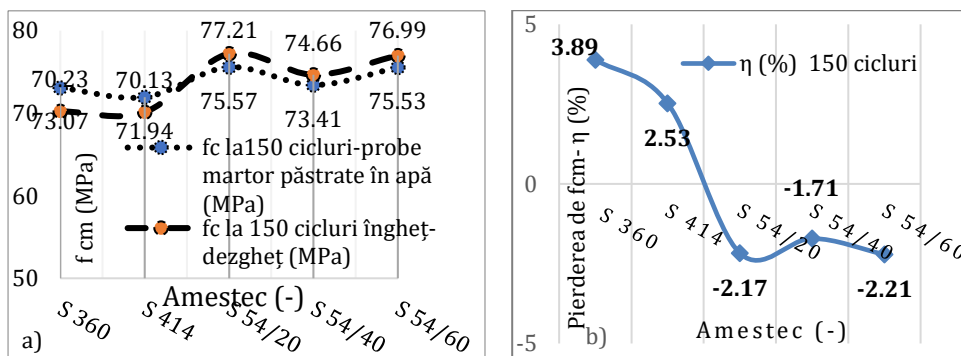


Figura 9-2. a) Rezistențele la compresiune f_{cm} , b) Pierderile de rezistențe la compresiune η , (%), seria II

9.5.3 Analiza rezistențelor la îngheț-dezghet determinate prin măsurarea masei exfoliate de la suprafața epruvetei

Rezistența la exfoliere a fost evaluată calitativ ținând cont de criteriile standardului SS 13 72 44 (Metoda Borás) stabilite în Tabelul 4-1 din subcap.4.5. Valoarea masei exfoliate S_{56} a fost mai mică decât 0.1 kg/m^2 la toate amestecurile realizate (Figura 9-3a)), valoare care a

încadrat betoanele cu rezistență foarte bună la exfoliere. Utilizarea zgurii de furnal a avut o influență pozitivă asupra rezistenței la exfoliere, pentru amestecul S 54/20 rata cumulării de material exfoliat după 28 de cicluri a fost mică decât la cele două amestecuri de control, iar la amestecul S 54/40 după 42 de cicluri (Figura 9-3b).

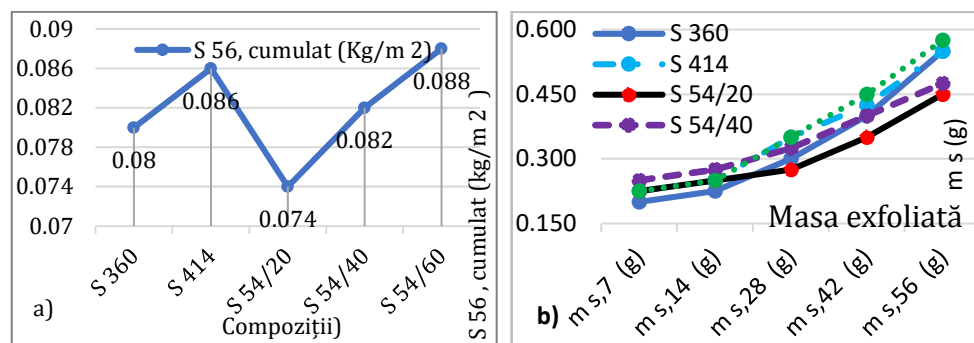


Figura 9-3. a) Cantitatea cumulată de beton exfoliat S56, b) Masa exfoliată la 7, 14, 28, 42 și 56 cicluri, seria I

Rezultatele sunt similare cu cele obținute în studiul din Ref. [231], în care rezistența la exfoliere după 56 de cicluri de îngheț-dezgheț a fost încadrată de asemenea foarte bună, pentru betoanele la care s-a utilizat până în 15% cenușă zburătoare.

9.5.4 Analiza rezistențelor la îngheț-dezgheț determinate prin reducerea procentuală a modului de elasticitate dinamic relativ (RDM)

Așa cum se observă în Figura 9-4a) modulul de elasticitate dinamic relativ (RDM) înregistrează o reducere după 56 de cicluri de îngheț-dezgheț de până în 2% la amestecurile S 360, S 54/20, S 54/40 și de până la 3% la amestecurile S 414 și S 54/60. Reducerea procentuală la amestecurile S 54/20 și S 54/40 este mai mică decât la amestecul de control S 414 dar mai mare pentru amestecul S 54/60. Comparat cu amestecul S 360 reducerea procentuală este mai mică la amestecul S 54/20 dar mai mare la amestecurile S 54/40 și S 54/60.

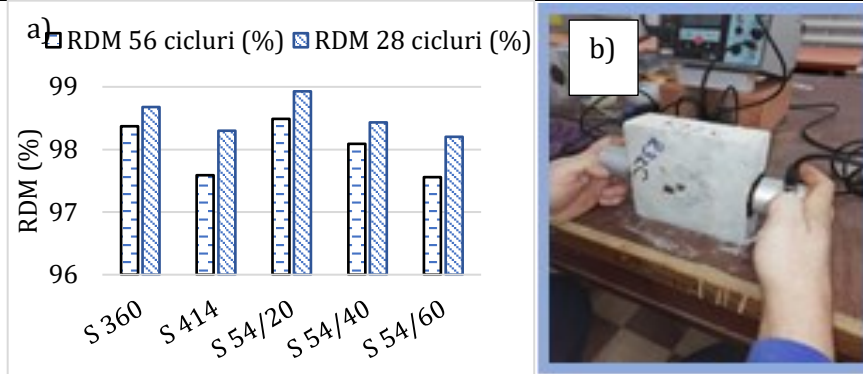


Figura 9-4. a) Modulul de elasticitate dinamic relativ (RDM) la 28 și 56 de cicluri de îngheț-dezghet; b) imagini cu măsurarea timpului (UPTT), seria I

Metoda ultrasonică permite localizarea degradărilor structurale precum a fisurilor produse de fenomenul de îngheț-dezghet prin valorile înregistrate la măsurarea timpului de propagare a impulsurilor ultrasonice (UPTT). Dacă fisurile fac un unghi drept cu viteza de propagare a impulsului, unda suferă o difracție în jurul fisurii și duce la creșterea duratei de parcurs a undei. Dacă direcția fisurii coincide cu direcția de propagare a impulsului unda poate trece prin beton pe ambele părți ale fisurii și durata de parcurs a undei nu este afectată [13], [235]. Cu cât timpul de propagare a impulsurilor ultrasonice (UPTT) este mai mic cu atât modulul de elasticitate dinamic relativ (RDM) și rezistența la compresiune a betonului este mai mare. Dacă durata de parcurs a undei este mai mică înseamnă că proba de beton testată are mai puține goluri și fisuri interne ceea ce conduce la concluzia că densitatea betonului este mai mare.

Din analiza rezultatelor obținute în Tabelul 9-4 se observă că durata de propagare (UPTT) cea mai mică s-a obținut la amestecurile S 360 și S 54/20, la care s-au obținut și cele mai bune rezultate la toate testele efectuate, sugerând că aceste amestecuri au porozitatea cea mai redusă. Durata de propagare (UPTT) a crescut, în timp ce rezultatele rezistențelor la îngheț-dezghet au scăzut în ordinea enumerată la amestecul S 54/40 și S 414. Cea mai lungă durată de propagare (UPTT) s-a înregistrat la amestecul S 54/60 care a obținut cele mai mici rezistențe la îngheț-dezghet peste nivelul amestecului de referință S 414.

9.6 Concluzii parțiale

În această lucrare sunt prezentate trei metode de testare pentru rezistența la îngheț-dezghet, două pentru evaluarea degradărilor interne și una pentru pierderea de material de la suprafața betonului rutier. Factorii de care depinde selectarea unei metode de lucru în laborator depinde de: scopul cercetării, domeniu de aplicabilitate al betonului, clasele de expunere, etc. Compararea rezultatelor între metode este dificilă datorită faptului că sunt mășurați parametri diferiți. Cu toate acestea fiecare parametru testat furnizează rezultate suplimentare care conduc la o interpretare mai precisă privind comportarea betonului rutier la îngheț-dezghet.

Rezultatele obținute prin aplicarea metodelor din acest capitol pentru testarea betoanelor rutiere cu zgură de furnal la cicluri repetate de îngheț-dezghet conduc la următoarele concluzii:

- Valorile rezistențelor la îngheț-dezghet la cele două amestecuri de control au fost mai mari la amestecul S 360 comparat cu S 414, din seria I. Aceste rezultate se datorează faptului că prin creșterea dozajului de ciment de la 360 la 414 kg/m³ a crescut cantitatea de apă, necesară la preparare, concomitent cu reducerea cantității de agregate în amestecul S 414;
- Valorile pierderilor de rezistență la compresiune determinate în acord cu SR-3518:2009 (metodă de evaluarea a fisurării interne) după numărul maxim de 300 de cicluri de îngheț-dezghet au fost cele mai mici la amestecul S 54/40 urmate de amestecul S 54/20, turnate în seria I. Cele două amestecuri cu zgură au pierderile de rezistență la compresiune mai mici decât amestecul de control S 414 dar mai mari decât S 360.
- Pentru rezistențele la compresiune obținute la 150 cicluri de îngheț-dezghet la amestecurile din seria II, s-au înregistrat valori mai mari la toate amestecurile cu zgură de furnal comparativ cu amestecurile realizate cu materiale convenționale.
- Prin aplicarea metodei SR CEN/TS 12390-9:2017 de evaluare a pierderii de material exfoliat de la suprafața betonului pentru compoziția S 54/20 s-au obținut cele mai mici pierderi de masă exfoliată, dar în creștere pentru amestecurile S 54/40 și S 54/60 turnate în seria I. Deoarece betoanele rutiere sunt expuse fenomenului de îngheț-dezghet cu agenți de dezghetare această metodă este cea mai indicată pentru evaluarea rezistenței la îngheț-dezghet.

- Se observă că evoluția reducerii procentuale (RDM) este similară cu cea a pierderilor de rezistență la compresiune la 150 și 300 de cicluri de îngheț-dezghet, ceea ce confirmă concordanța rezultatelor între cele două metode.
- Un avantaj important al metodei nedistructive este că oferă posibilitatea de a observa progresul degradărilor interne provocate din îngheț-dezghet utilizând aceleași seturi de epruvete pe toată durata testului. Metoda de măsurare a pierderilor de rezistență la compresiune este mai precisă în comparație cu metoda de reducere procentuală (RDM), așa cum se poate observa și în această cercetare. După 300 de cicluri de îngheț-dezghet la același amestec S 54/60, pierderile de rezistență la compresiune au atins valoarea de 18,47% iar reducerea procentuală a $(RDM)_{300}$ a fost doar de 2,35%. Însă cele două metode se dovedesc a fi complementare deoarece timpul de propagare al impulsurilor ultrasonice (UPTT) prin beton este în legătură directă cu rezistența la compresiune având factorul comun densitatea betonului.
- Cercetările realizate arată că prin înlocuirea cimentului cu 13% pulbere de zgură (GGBS) și până la 20% agregate naturale, 0/4 mm substituite cu agregate din zgură concasată (ACBFS), parametrii de durabilitate pentru amestecul S 54/20 sunt peste nivelul amestecului de control S 414 atât în seria I cât și în seria II de turnare. Rezultatele cercetărilor din acest capitol au fost publicate sub formă de articole științifice în lucrările [182], [236].

10 Investigații prin relaxometrie (RMN) pe probe supuse la îngheț-dezgeț

10.1 Introducere

Rezistența la îngheț este un factor care trebuie luat în considerare la proiectarea structurilor din beton rutier, deoarece fenomenul de îngheț-dezgeț produce deteriorarea structurii interne și a stratului de la suprafața betonului. Dacă betonul este expus într-un mediu uscat structura nu este de obicei afectată de fenomenul de îngheț-dezgeț. Însă betonul rutier fiind în contact cu apa, aceasta este absorbită de beton în structura porilor și generează o tensiune mare care provoacă deteriorarea structurii interne și produce ireversibil modificarea proprietăților inițiale ale betonului [211], [237], [238].

Cel mai important factor care influențează rezistența la îngheț-dezgeț este distribuția și dimensiunile porilor [185], [211]. Dimensiunea porilor nu înregistrează modificări mari în stadiul de amestecare și de latență, în care activitatea compușilor chimici încetinește, dar are loc o modificare a dimensiunii acestora începând cu stadiul de întărire [6]. Spațiile libere care nu au fost umplute cu produși de hidratare formează pori capilari iar golurile formate în gel ca spații interstițiale interconectate, definesc porii de gel. Acești pori de gel pot fi clasificați în pori intra-C-S-H și pori inter-C-S-H (silicat de calciu hidratat) [130]. Volumul total de goluri dintr-un beton întărit poate ocupa între 1 și 10% din volumul total al betonului, limita superioară indicând un beton poros cu rezistență scăzută [13]. Standardul PN-EN 480-11 [240] descrie structura porilor în betonul întărit prin următorii parametri: conținutul total de aer A [%], suprafața specifică α [mm^2], factorul de spațiere L [mm] și conținutul de micropori A_{300} [%]. Factorul de spațiere (L) a porilor poate fi determinat după modelul simplificat a lui Powers, care presupune că toate bulele de aer au același diametru și sunt distribuite în colțurile unui cub. O altă abordare pentru determinarea factorului de spațiere (L) a porilor de aer se bazează pe conceptul Philleo care ia în calcul atât sistemul de goluri de aer cât și ale particulelor de agregate,

principiul metodelor a fost descris de către Wawrzeńczyk J. și Kozak W. în lucrarea [241]. Cerințele de durabilitate limitează factorul de spațiere la 0.20 mm în Norvegia și Danemarca și 0.25 mm în Canada [126]. J.Yuan [242] a experimentat variația porilor din beton în cadrul acțiunii ciclurilor de îngheț-dezghet prin utilizarea tomografiei (CT) cu raze X. Rezultatele au arătat că nu a existat o variație mare a cantităților și volumului de pori localizați în intervalul ($0.5 \text{ mm}^3 \div 20 \text{ mm}^3$), dar s-au înregistrat schimbări majore pentru porii plasați în afara acestui interval. Tomasz T și Tomasz Z.[243] au studiat efectele rezultate din progresul hidratării și al carbonatării asupra porozității și a permeabilității la 90 de zile și 2 ani de conservare pe paste realizate cu ciment Portland cu raporturi diferite de A/C. Rezultatele au pus în evidență schimbări ale porozității deschise cauzate de progresele ulterioare de hidratare și de carbonatare dar fără schimbări semnificative în timp ale permeabilității.

Datorită proprietăților puzzolane și hidraulice materialele suplimentare cementoase (SCM) pot fi utilizate ca substituție a cimentului în compoziția proiectată. Acestea influențează proprietățile betonului proaspăt prin reacția lor cu apa sau cu hidroxidul de calciu (CH), formând compuși suplimentari de hidratare. Materialele suplimentare cementoase de tip (SCM) pot avea proprietăți puzzolane reacționând chimic cu hidroxidul de calciu (CH), pentru a forma silicat de calciu hidratat (C-S-H) suplimentar, compus de hidratare care are cea mai mare contribuție la dezvoltarea rezistenței betonului. Unele (SCM)-uri au proprietăți hidraulice care influențează betonul proaspăt prin hidratare mai lentă, reglează priza și întăresc pasta de ciment. Ca exemplu din categoria materialelor suplimentare cementoase cu caracteristici hidraulice face parte zgura de furnal granulată și măcinată și cenușile zburătoare de natură calcică, iar din categoria materialelor puzzolane face parte cenușa zburătoare de natură silicioasă și silicea ultra fină [6]. În acest context, zgura de furnal granulată și măcinată (GGBS) în combinație cu silicea ultra fină (SF) sunt utilizate în industria betonului pentru diferite aplicații, deoarece dețin beneficii de rezistență, durabilitate, economice și de mediu, așa cum rezultă din următoarele studii de cercetare prezentate.

S. Krishna Rao și colab. au investigat efectului (GGBS) asupra proprietăților mecanice și a rezistenței la uzură a betonului de tip (RCC) pentru un nivel de substituție a cimentului cu (GGBS) de la 10% până la

60%. Betonul compactat (RCC) reprezintă un amestec de beton rigid realizat din materiale convenționale proiectat cu un volum mai mare de agregat și un conținut mai scăzut de ciment decât cel al betonului convențional [6]. Rezultatele testelor au arătat că după vârsta de 28 de zile creșterea conținutului (GGBS) a condus la creșterea rezistenței la uzură a betonului (RCC) la toate nivelurile de înlocuire [157].

Metodele de investigare privind efectul materialelor suplimentare cu caracteristici cementoase sunt diferite de la cele standard până la metode de analiză a microstructurii betonului, însă toate studiile de cercetare urmăresc concordanța rezultatelor obținute pentru a ajunge la concluzii cât mai precise. SSSA Nedunuri și colab. [244] a utilizat testul de saturație a apei și porozimetrie cu mercur pentru a studia evoluția structurii porilor în funcție de vârsta de întărire a mortarelor cu ciment Portland și a celor înlocuite parțial cu silice ultra fină (SF), zgură de furnal granulată și măcinată (GGBS) și cenușă zburătoare (FA). Majhi R.K. și Nayak A.N [245] a determinat rata de absorbție a apei de către porii capilari prin testul de sorbție pe betoane având în compoziția lor (GGBS) și agregate reciclate din beton (RAC). Caracteristicile micro structurale investigate prin efectuarea studiului de microscopie electronică de scanare (SEM) și a difracției cu raze X, au întărit rezultatele obținute. Renato J. și colab. [246] a studiat porozitatea betoanelor prin intermediul a două metode nedistructive, prin micro tomografie cu raze X și prin scanner digital. Rezultatele porozității obținute prin metode nedistructive au fost compatibile cu cele obținute prin testul standard prin porozimetria de intruziune cu mercur (MIP). Însă studiul efectuat de către Diamond S. [247] a atras atenția prin faptul că metoda (MIP) este neadecvată pentru măsurarea dimensiunii porilor datorită incapacității de a pătrunde în porii de gel C-S-H, fiind mai degrabă adecvată pentru a evalua porozitatea aparentă. Analiza structurii porilor a fost efectuată în studiul [248] utilizând teoria fractalului care permite o evaluare cantitativă bazată pe dimensiunea fractală a porilor. Prin modelul fractal propus de S.Jin și colab. [249] s-a obținut o regresie între dimensiunea fractală și factorul de durabilitate. Parametrii caracteristici ai structurii porilor din betonul reciclat cu fibre reziduale au fost investigați în studiul efectuat de J. Zhou și colab. [250] folosind testul porozimetriei de intruziune a mercurului și teoria fractală. Rezultatele au arătat că structura porilor a fost influențată în

principal de raportul apă-ciment. Kowalczyk, R.M. și colab. a evidențiat prin tehnica de relaxometrie (RMN) mecanismul schimbului de apă-izopropanol în paste de ciment. Rezultate au arătat că izopropanolul a relevat o prezență mai mare a porilor capilari comparativ cu probele saturate cu apă, însă în porii gelului C-S-H izopropanolul nu a înlocuit apa în aceeași măsură [92]. Una dintre metodele nedistructive frecvent utilizate pentru a evalua fisurile interne rezultate din fenomenul de îngheț-dezgheț este metoda de măsurare a timpului de propagare a impulsurilor ultrasonice (UPTT), procedură în acord cu Raportul Tehnic CEN/TR 15177:2006 [123]. Creșterea timpului de propagare a undei prin beton arată un număr mai mare de pori și de fisuri interne cauzate de fenomenul de îngheț-dezgheț.

Noutatea acestei cercetări constă în utilizarea relaxometriei de rezonanță magnetică nucleară (RMN) [86], [130]–[135] pentru a determina apa reziduală din porii materialului și a efectelor ciclurilor de îngheț-dezgheț asupra sistemului poros din betonul întărit. Marele avantaj al tehnicilor RMN este acela că sunt complet neinvazive și în plus permit studierea materialelor fără o preparare prealabilă a probelor. Utilizând această tehnică se pot obține informații despre structura poroasă a betonului care conține pastă de ciment și agregate, similar cu abordarea lui Wawrzeńczyk J. și Kozak W. [241] bazată pe conceptul lui Philleo.

10.2 Ipoteze de lucru/obiective

Investigațiile (RMN) asupra efectelor ciclurilor de îngheț-dezgheț vin în completarea rezultatelor obținute din măsurarea caracteristicilor fizice (densitate, absorbția apei și conținutul de pori permeabili) ale betonului rutier întărit determinate prin metodele standard din cap. 8. Rezultatele porozității obținute din acest experiment au fost raportate la cele obținute în cap. 9, privind rezistențele la compresiune și pierderile de rezistențe la compresiune după 300 de cicluri de îngheț-dezgheț. Microstructura betonului (în acest caz dimensiunile porilor și distanța dintre aceștia) a fost investigată și analizată folosind microscopia electronică de scanare (SEM). Metodele de investigație au vizat obținerea unor concluzii mai precise pentru selectarea dozajului optim de zgură de furnal care să asigure durabilitatea betonului rutier cu zgură de furnal.

10.3 Materiale și metode

10.3.1 Materiale

Materialele utilizate în compoziția betoanelor au fost descrise în capitolele anterioare. Compozițiile de beton fac parte din prima serie de turnare, iar cantitățile de materiale se găsesc în Tabelul 6-4 din cap.6. Pentru identificarea compozițiilor s-au utilizat următoarele notații:

S 360, amestec de control cu 360 kg/m³ ciment Portland și (AN);

S 414, amestec de control cu 414 kg/m³ ciment Portland și (AN);

S 54/20, 360 kg/m³(ciment)+ 54 kg/m³(GGBS)+20% (ACBFS)+80% (AN);

S 54/40, 360 kg/m³(ciment)+ 54 kg/m³(GGBS)+40% (ACBFS)+60% (AN);

S 54/60, 360 kg/m³(ciment)+ 54 kg/m³(GGBS)+ 60% (ACBFS)+40% (AN);

10.3.2 Metode

Pentru acest experiment au fost necesare opt epruvete cubice cu latura de 150 mm și trei cu latura de 71±1.5 mm care s-au menținut în aer 24 h, după care s-au decofrat și s-au scufundat în apă la temperatura de 20±2°C. La vârsta de 7 zile, toate epruvetele au fost scoase din apă și s-au păstrat în camera climatică la temperatura de 20±2°C și la o umiditate de 65±5% până la vârsta de 50 de zile. În continuare epruvetele cubice cu latura de 71 mm au fost menținute în apă până la vârsta de 100 zile, când a fost determinată rezistența la uzură a căror rezultate se vor prezenta în capitolul următor. De la vârsta de 100 de zile până la vârsta de 150 de zile s-au păstrat în aer în camera climatică. Densitatea și conținutul porilor permeabili s-au determinat din media rezultatelor a 3 epruvete cubice cu latura medie de 71 mm, la vârsta de 150 zile, conform cu standardul ASTM C642-2006 [140]. Măsurătorile de rezonanță magnetică nucleară (RMN) au fost efectuate pe eșantioane cilindrice cu lungimea de 20 mm și diametru de 9,5 mm, extrase din două cuburi intacte de 150 mm la fiecare amestec, unul menținut la 300 de cicluri de îngheț-dezgheț și unul martor menținut în apă până la vârsta de 150 de zile. Pentru măsurătorile (RMN) au fost selectate cuburile care au avut densitatea aparentă apropiată de media celor 3 cuburi testate la îngheț-dezgheț prin metoda pierderilor de rezistențe la compresiune conform cu SR 3518:2009 [102].

Pentru măsurătorile (SEM) s-au utilizat fragmente din cuburile cu latura de 150 mm rămase după efectuarea măsurătorile (RMN), din setul

de probe martor care a fost menținut în apă în perioada testului de îngheț-dezgheț. Bucăți mici de probe au fost prelevate din partea interioară a probelor zdrobite și analizate la temperatura camerei folosind un microscop electronic VEGA3 SBU cu un spectrometru de dispersie energetică Quantax EDS de la Bruker pentru a obține informații despre dimensiunile porilor și distanța dintre ele. Tehnicile de lucru au fost descrise la subcapitolul 4.6.

10.4 Rezultate

10.4.1 Rezultatele distribuției relative a mărimii porilor prin tehnica de relaxometrie (RMN)

Distribuția timpilor de relaxare nucleară a porilor de gel obținută din tehnica de inversare numerică Laplace, pentru fiecare compoziție a fost reprezentată grafic în Figura 10-1 și 10-2.

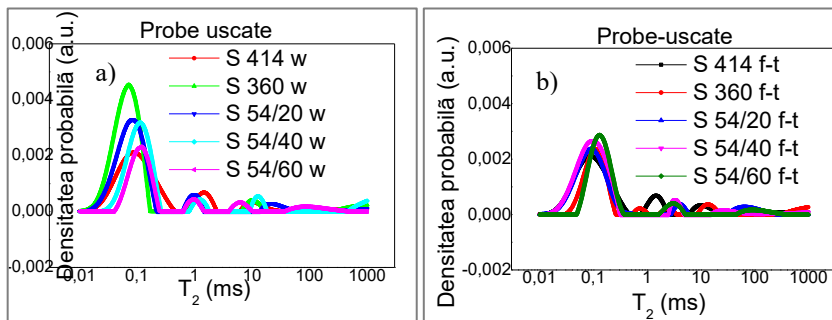


Figura 10-1. Distribuția timpului de relaxare transversală T_2 după uscare (a) probe martor menținute în apă (w), (b) probe menținute la îngheț-dezgheț

Pot fi distinse, în principal, trei picuri a căror poziție poate fi asociată celor trei tipuri de pori. Valorile înregistrate pe axa orizontală pentru timpul de relaxare transversală T_2 sunt proporționale cu dimensiunea porilor (vezi Eq. (4.30) din subcap. 4.6, iar valorile înregistrate pe axa verticală reprezintă densitatea probabilită a porilor cu o dimensiune relativă specificată pe axa x. Unitatea de măsură pe axa y este arbitrară (a.u.). Pentru o comparație directă a curbelor s-a utilizat aceeași scală la fiecare măsurătoare efectuată pe probele martor și pe probele testate la îngheț-dezgheț.

Figura 10-1 reprezintă probele uscate după procedura descrisă mai sus, atât cele martor (Fig.10-1a) cât și cele supuse procesului de îngheț-dezgheț (Fig.10-1b).

Se observă o cantitate mică de apă (primul pic) în porii de tip gel (intra C-S-H) cu dimensiuni până la 2 nm [130], care nu a putut fi îndepărtată în procesul de uscare.

La amestecul S 360 distribuția timpilor de relaxare transversală corespunzătoare porilor de gel pentru probele martor (w), conservate în apă, s-au plasat în apropierea intervalului $0.02 \div 0.3$ ms și a înregistrat o densitate probabilă maximă de 0.0045 pentru o valoare a lui T_2 de 0.08 ms. La valori T_2 ușor deplasate spre dreapta densitatea probabilă maximă a scăzut la 0.003 pentru amestecul S 54/20 și S 54/40 urmat de amestecul S 414 și S 54/60, cu o intensitate mai mică de 0.002. Însă pentru probele supuse la 300 de cicluri de îngheț-dezgheț ($f-t$) intervalul de distribuție a timpului de relaxare transversală s-a deplasat ușor spre dreapta la valori mai mari a dimensiunii porilor între $0.02 \div 0.6$ ms, cea mai pronunțată s-a înregistrat la amestecul S 360 și S 54/60, între $0.06 \div 0.6$. La toate amestecurile menținute în camera termostatică ($f-t$) s-a înregistrat o densitate probabilă maximă apropiată de valoarea înregistrată la amestecurile martor, de 0.003. Rezultatele experimentului arată că după încercarea la îngheț-dezgheț dimensiunea porilor s-a situat la valori mai mari comparat cu amestecurile de control, ceea ce indică apariția micro fisurilor inclusiv în porii (intra C-S-H).

Prin introducerea probelor în apă se evidențiază în Figura 10-2 creșterea clară a ariei picurilor corespunzătoare porilor gel, intra C-S-H și inter C-S-H având dimensiuni care pot ajunge până la 10 nm.

Distribuția porilor continuă cu mai multe picuri de intensitate, mai redusă și aplatizate care corespund porilor capilari, fisurilor sau sunt artefacte ale tehnicii de lucru.

În eșantioanele de control (Fig.10-2a), distribuția timpilor de relaxare transversală a fost în intervalul $0.03 \div 1.10$ ms, iar pentru amestecurile testate pentru îngheț-dezgheț (Fig.10-2b), deplasarea picului spre dreapta a fost înregistrată la valori mai mari, în intervalul $0.1 \div 1.20$ ms.

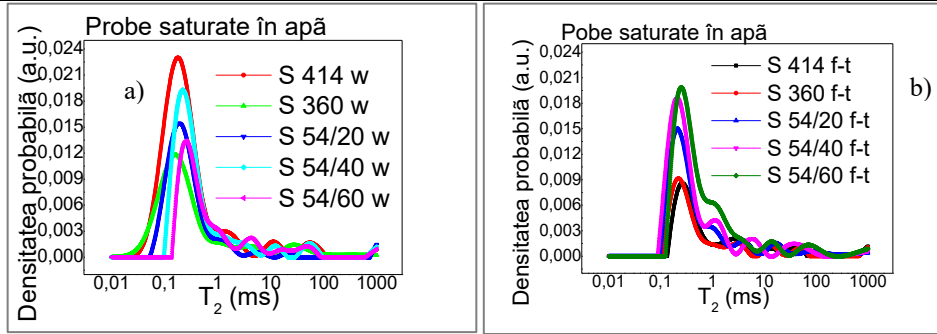


Figura 10-2. Distribuția timpului de relaxare transversală T_2 după saturare cu apă: (a) probe martor menținute în apă (w); (b) probe supuse la 300 de cicluri de îngheț-dezgheț (f-t)

După cum se poate observa și în Figura 10-3, pentru fiecare amestec se prezintă valorile de început și de sfârșit pentru intervalul T_2 , corespunzător distribuției relative a dimensiunii porilor de gel, precum și poziția pentru care se înregistrează valoarea maximă a lui T_2 (linia frântă).

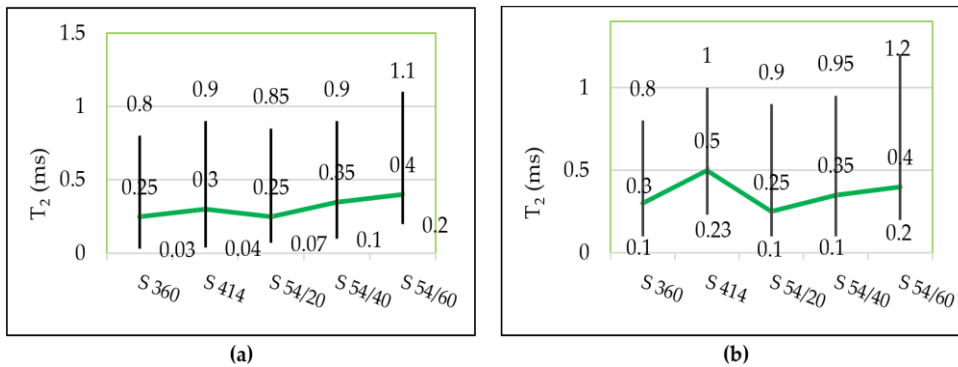


Figura 10-3. Intervalul de distribuție a porilor de gel pentru probele martor (a) și pentru cele supuse ciclurilor de îngheț-dezgheț (b). Ambele măsuratori sunt efectuate pe probe saturate cu apă

Distribuția relativă a dimensiunii porilor la amestecul S 54/20 și S 54/40 s-a menținut apropiată de amestecul de control S 360 și mai redusă decât la amestecul de control S414, atât la probele martor cât și la probele testate la îngheț-dezgheț. Însă pentru amestecul S 54/60 intervalul de distribuție s-a deplasat la valori mai mari în comparație cu cele două amestecuri de referință atât la probele martor cât și la probele testate la îngheț-dezgheț.

În Figura 10-4 a) s-a redat densitatea de probabilitate maximă înregistrată atât la probele martor menținute în apă (w) cât și la probele încercate la îngheț-dezgheț (f-t) saturate cu apă. Pentru probele martor, saturate cu apă (Fig.10-4a) densitatea probabilă maximă, cu valoarea cea mai mare s-a înregistrat la amestecul S 414 (de 0.023), iar cu valoarea cea mai mică (de 0.012) s-a obținut la amestecul S 360. La toate amestecurile cu zgură valoarea maximă a densității de probabilitate corespunzătoare porilor de gel este mai mare decât la amestecul de referință S 360 dar mai mică decât la amestecul de control S 414. Pentru probele testate la 300 de cicluri de îngheț-dezgheț și saturate cu apă (Fig.10-4a) se observă că valoarea maximă a densității probabile corespunzătoare picului porilor de gel crește odată cu creșterea procentului de substituție cu agregate din zgură și se situează peste nivelul amestecurilor de control S 360 și S 414.

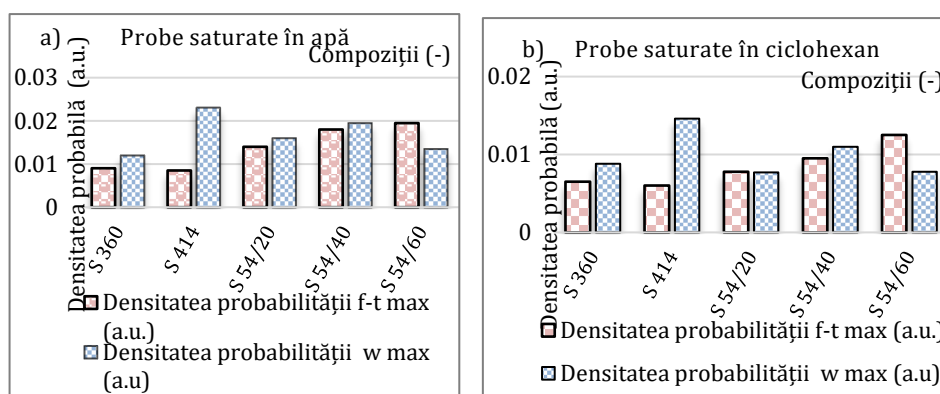


Figura 10-4. Densitatea probabilă maximă (a.u.) a porilor inter și intra C-S-H, pentru probe saturate cu apă, (b) a porilor capilari pentru probe saturate cu ciclohexan

La amestecul S 54/60 menținut la îngheț-dezgheț s-a înregistrat cea mai mare diferență a valorii maxime a densității probabile comparată cu proba martor.

Pentru o mai bună monitorizare a porilor capilari (dimensiuni între 50÷600 nm) este de preferat ca aceștia să fie saturați cu ciclohexan deoarece se poate obține un grad mai ridicat de umplere în cazul ciclohexanului față de cazul apei [130]. Acest lucru se datorează unor unghiuri de contact mult mai reduse la suprafețele minerale din interiorul pastei de ciment la ciclohexan în comparație cu apa [130],

[251]. În Figura 10-5 s-a reprezentat distribuția timpilor de relaxare, iar în Figura 10-4b) s-a reprezentat densitatea maximă corespunzătoare picului porilor capilari la probele saturate cu ciclohexan. Se observă (Fig.10-4b) că evoluția densității probabile maxime a porilor capilari are o tendință similară cu cea a porilor de gel din probele pline cu apă (Fig.10-4a). La probele martor cel mai restrâns interval de distribuție al porilor capilari s-a înregistrat la amestecul S 360 situat între 1.0÷75 ms și cel mai extins la amestecul S 54/60 între 2,2÷150 ms, conform cu Figura 10-6a).

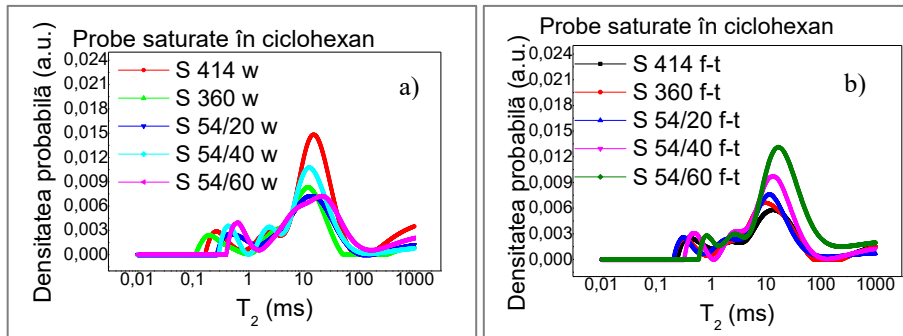


Figura 10-5. Distribuția timpului de relaxare transversală T_2 după saturare cu ciclohexan: (a) probe martor menținute în apă (w); (b) probe supuse la 300 de cicluri de îngheț-dezgheț (f-t)

La probele supuse la 300 de cicluri de îngheț-dezgheț distribuția timpului de relaxare transversală T_2 este ușor deplasată spre dreapta, la amestecul S 360 între 1.0÷90 ms și mai pronunțat la amestecul S 54/60 între 7.0÷200 ms, așa cum se vede și din Figura 10-6b). La amestecul S 54/60 picul corespunzător porilor capilari nu tinde spre intensitatea minimă în poziția lui T_2 (200 ms), ceea ce indică prezența în beton a porilor capilari mai mari sau a fisurilor interne.

Un timp de relaxare mai lung (Fig.10-6b) și o intensitate mai mare (Fig.10-4b) la amestecul S54/60 arată creșterea dimensiunii și proporției porilor capilari la probele testate la îngheț-dezgheț (f-t) comparativ cu probele martor menținute în apă (w).

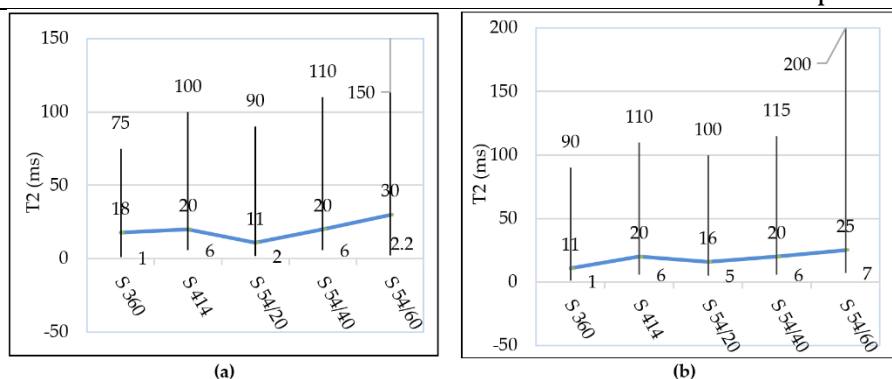


Figura 10-6. Intervalul de distribuție a porilor capilari T_2 (a) pentru probe martor (w), (b) pentru probe testate la îngheț-dezgeț (f-t). Ambele măsurători efectuate pe probele saturate cu ciclohexan

Această modificare a distribuției porilor capilari de la probele supuse la îngheț- dezgeț (f-t) se explică prin faptul că prin fenomenul de îngheț apa pătrunde în structura porilor capilari din beton, îngheață la aproximativ -0.5°C , iar volumul gheții formate este mai mare cu aproximativ 9% față de apa absorbită inițial [211], [237], [238]. Astfel ciclurile repetate de îngheț-dezgeț conduc la creșterea dimensiunilor porilor capilari și apariția fisurilor.

10.4.2 Dimensiunea porilor

Imaginile SEM obținute pentru probele investigate sunt prezentate în Figura 10-7. Pentru a obține o vizualizare mai bună a porilor, toate probele au fost măsurate folosind aceeași parametri, dar mărimi diferite.

Raza porilor și distanța dintre pori au fost măsurate automat de software-ul SEM după selectarea formei mai potrivite (cerc sau elipse) în funcție de forma porilor. Se poate observa că raza porilor variază de la $\sim 33.84 \mu\text{m}$ pentru S 360 la $\sim 2.95 \mu\text{m}$ pentru S 54/60. Toate razele porilor sunt cu dimensiuni peste $\sim 2.95 \mu\text{m}$, indicând încadrarea acestora la pori capilari, în acord cu Ref. [89]. Distanța dintre pori variază de la $\sim 915,06 \mu\text{m}$ pentru S 360 la $\sim 63,64 \mu\text{m}$ pentru S 54/40. Pentru S 54/60 nu s-au găsit alți pori în apropierea porului selectat pentru a măsura distanța dintre aceștia.

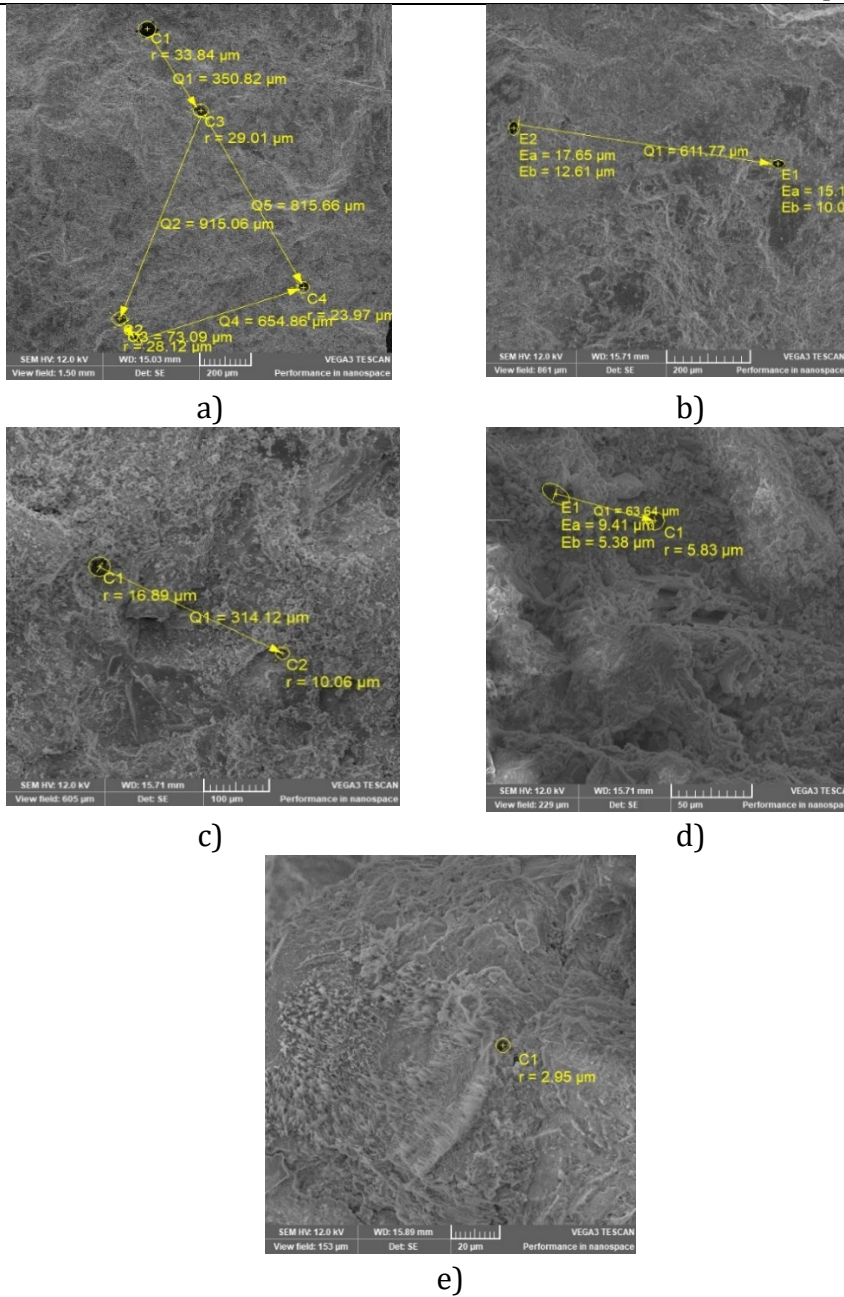


Figura 10-7. Imaginile SEM a) pentru amestecul S 360, b) S 414, c) S 54/20, d) S 54/40 (d) și e) S 54/60

Rezultatele obținute pentru amestecul S 360 sugerează o densitate mai redusă a porilor deoarece s-a identificat cea mai mare distanță între pori.

Aceste rezultate pot fi corelate cu cele obținute din tehnica (RMN) prin care s-a identificat de asemenea o densitate redusă a porilor capilari la proba martor S 360 (Fig 10-4b). În timp ce pentru amestecul S 54/40 distanța între pori este mai redusă în comparație cu amestecul S 360 ceea ce sugerează o densitate mai mare a porilor. Se observă în diagrama măsurătorilor (RMN) la fel, creșterea densității probabile la compoziția S 54/40 comparativ cu amestecul S 360 (Fig.10-4b).

10.4.3 Rezultatele densității și a conținutului de pori permeabili ale betonului întărit

În urma determinărilor efectuate în acord cu ASTM C642 [140], pe cuburi cu latura de 71 mm s-a obținut proporția de pori permeabili (P_0) calculată în funcție de densitatea în stare uscată (ρ_1) și densitatea după saturare și fierbere (ρ_2) cu rezultate ilustrate în Figura 10-8a) și b).

Rezultatele raportate reprezintă media a trei probe testate la fiecare amestec, având abaterea standard (SD) și coeficientul de variație (CoV) prezentate în Tabelul 10-1.

Tabelul 10-1. Abaterea standard (SD) și coeficientul de variație (CoV) calculate pentru densitate și conținutul de pori permeabili

Compoziții	S 360	S 414	S 54/20	S 54/40	S 54/60
SD- ρ_1 (g/cm ³)	0.005	0.019	0.007	0.001	0.013
CoV (%)	0.002	0.008	0.003	0.000	0.006
SD - ρ_2 (g/cm ³)	0.003	0.041	0.009	0.019	0.033
CoV (%)	0.001	0.016	0.004	0.008	0.013
SD - P_0 (g/cm ³)	0.195	1.425	0.763	0.730	1.717
CoV (%)	0.026	0.176	0.100	0.094	0.192

Valorile rezistențelor la compresiune și pierderile de rezistență la compresiune (η_{300}) după 300 de cicluri de îngheț-dezghet determinate pe cuburi cu latura de 150 mm conform cu SR 3518:2009 [102] sunt redate în Tabelul 10-2.

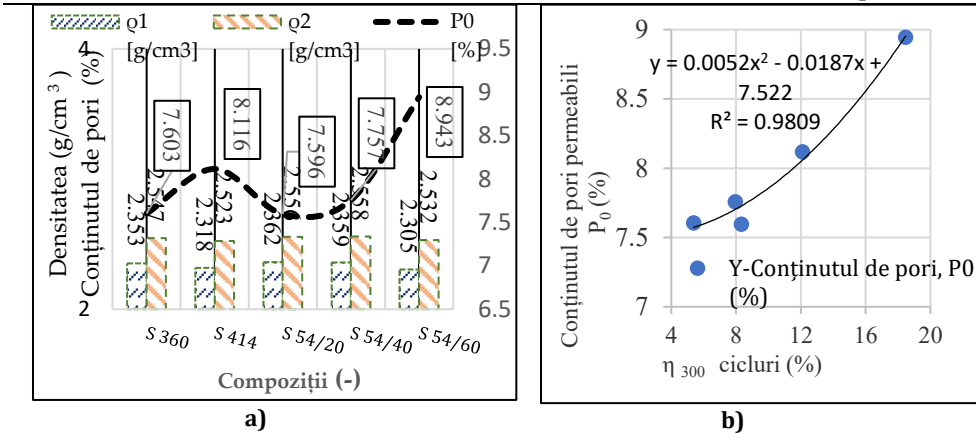


Figura 10-8. a) Densitatea amestecurilor și conținutul de pori permeabili; b) Relația între pierderea de rezistență la compresiune după 300 de cicluri de îngheț-dezghet și conținutul de pori permeabili

Rezultatele medii au înregistrat o abatere standard (SD) în intervalul (0.15÷5.53) MPa, iar coeficientul de variație (CoV) între (0.2÷9.1)%. Se observă că împrăștierea rezultatelor este sub limita acceptată de 15 %, având o calitate rezonabilă într-un interval de la 5 la 10%, așa cum a fost sugerată în studiul [252].

Tabelul 10-2. Rezistențele medii la compresiune, pierderile de rezistențe după 300 de cicluri de îngheț-dezghet, abaterea standard și coeficientul de variație

Mixture	S 360	S 414	S 54/20	S 54/40	S 54/60
fcm -martor (MPa)	87.78	80.96	84.80	79.38	74.77
SD (MPa)	4.802	1.078	0.855	1.528	4.748
CoV (%)	0.055	1.300	0.010	0.019	0.064
fcm - 300 cicluri (MPa)	83.06	71.15	77.82	73.06	60.95
SD (MPa)	0.492	2.630	0.147	4.040	5.525
CoV (%)	0.006	0.037	0.002	0.055	0.091
(η ₃₀₀)	5.38	12.10	8.32	7.96	18.47
SD (MPa)	4.633	2.078	1.089	3.325	2.220
CoV (%)	0.862	0.171	0.132	0.415	0.120

10.5 Discuții

Analizând rezultatele din Tabelul 10-2, se observă că rezistențele la compresiune determinate pe epruvetele martor și pe epruvetele testate la 300 de cicluri de îngheț-dezghet au o evoluție similară cu

rezultatele densităților prezentate în Figura 10-8a). De asemenea valoarea pierderilor de rezistență la compresiune după 300 de cicluri de îngheț-dezghet au tendință de evoluție similară cu cea a conținutului de pori permeabili, dezvoltând o relație polinomială de ordinul doi având coeficientul de corelație foarte bun (valoarea R), prezentate în diagrama din Figura 10-8b).

În Figura 10-9 se observă, de asemenea, că rezistențele la compresiune determinate pe epruvetele martor și pe epruvete menținute la 300 de cicluri de îngheț-dezghet își mențin tendința de evoluție cu conținutul de pori permeabili (Fig. 10-9a) respectiv cu dimensiunea relativă a porilor capilari evaluată prin tehnica (RMN) (Fig. 10-9b și c).

Odată cu reducerea conținutului de pori permeabili (P_0) și a timpului de relaxare transversală (T_2) pentru care densitatea probabilă (a.u.) a înregistrat valoarea maximă (linia frântă din Fig.10-6a și b) rezultă creșterea rezistențelor mecanice. Relația polinomială de ordinul doi, derivată prin regresie, dezvoltată între rezistența la compresiune și conținutul de pori permeabili respectiv dimensiunea relativă a porilor capilari determinată pe probele martor au o valoare a coeficientului de corelație foarte apropiată 0.8779 și 0.8567 (Fig. 10-9a și b), ceea ce confirmă concordanța rezultatelor obținute prin metodele standard și tehnica (RMN).

Mai mult confirmarea rezultatelor obținute prin tehnica (RMN) poate fi apreciată și din coeficientul de corelație 0.9931 (având eroarea standard de doar 6.9×10^{-3}) obținut din relația polinomială dezvoltată între rezistența la compresiune și timpul de relaxare transversală (T_2) pentru max. (a.u.) a porilor capilari, măsurat pe probelor menținute la 300 de cicluri de îngheț-dezghet, (Fig. 10-9c). Conținutul de pori permeabili obținut pentru amestecul S 54/20 este mai redus comparat cu cele două amestecuri de control S 360 și S 414.

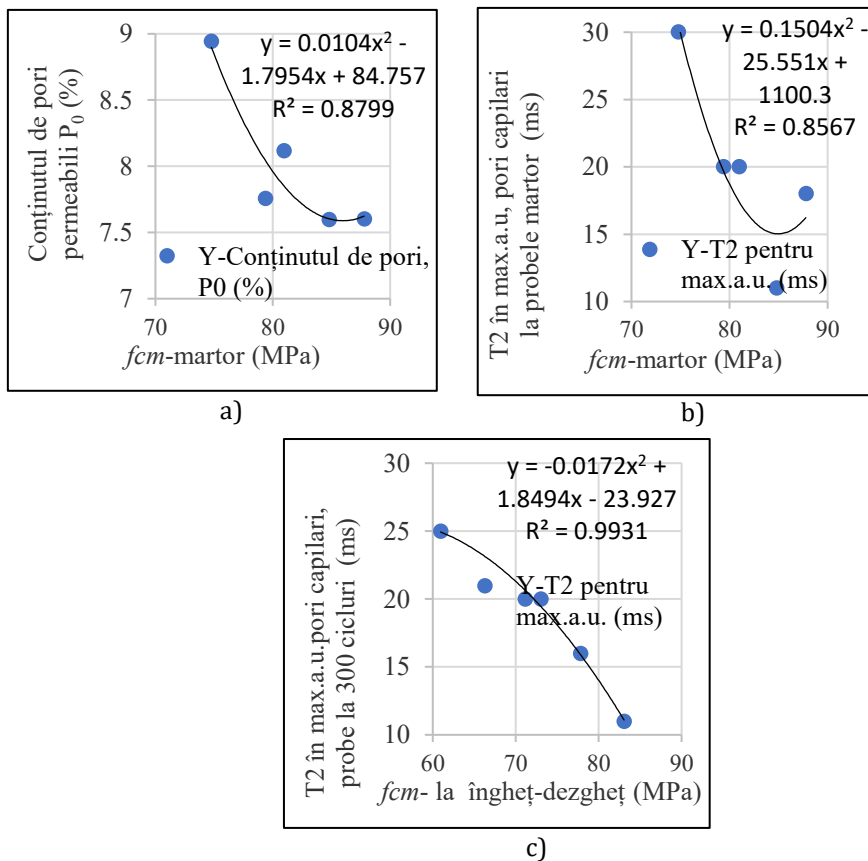


Figura 10-9. Relația între rezistența la compresiune (f_{cm}) și porozitate: a) raportat la conținutul de pori permeabili (P_0) la probelor martor; b) raportat la (T_2) în max.(a.u) la probele martor; c) raportat la (T_2) în max. (a.u.) la probele menținute la îngheț-dezghet

Amestecul S 54/40 se situează peste nivelul amestecului de control S 360 și sub nivelul lui S 414. Însă la amestecul S 54/60 la care substituția cu agregate artificiale a fost de 60% porozitatea betonului a crescut cel mai mult, peste nivelul celor două amestecuri de control. La amestecurile cu zgură de furnal rezistențele mecanice au scăzut odată cu creșterea nivelului de substituție cu agregate din zgură, cele mai mici valori s-au înregistrat la amestecul S 54/60. Cauza care a condus la scăderea rezistențelor mecanice a fost creșterea porozității capilare care la rândul ei a fost influențată de cantitatea de apă utilizată, respectiv de creșterea raportului apă/liant, fapt arătat și în literatura de specialitate [6]. Creșterea suprafeței specifice a zgurii măcinate și creșterea porozității agregatului din zgură au condus la creșterea necesarului de apă la prepararea amestecurilor S 54/40 și S 54/60 pentru a obține

consistența cât mai apropiată de amestecurile de referință, în concordanță cu literatura de specialitate [91]. Agregatele concasate din zgură au o formă angulară, care micșorează lucrabilitatea betonului și au porozitate mai mare decât cea a nisipului natural [27]. Analog, finețea de măcinare a zgurii de furnal a fost mai mare decât a cimentului, suprafața specifică la zgură a fost $5770 \text{ cm}^2/\text{g}$ iar la ciment $4385 \text{ cm}^2/\text{g}$. Dar, pentru amestecul S 54/20 proporțiile de zgură de furnal utilizate au condus la creșterea rezistențelor mecanice și la scăderea porozității, obținând performanțe mai bune decât amestecul de control S 414, la același raport apă/liant. Pentru acest amestec utilizarea zgurii ca liant (GGBS) și a agregatelor (ACBFS) în dozaj redus a fost avantajos.

10.6 Concluzii

Conectivitatea rețelei de pori intra C-S-H, inter C-S-H și capilari a fost investigată pentru prima dată pe eșantioane de betoane rutiere testate la cicluri repetate de îngheț-dezghet prin relaxometrie (RMN) în câmpuri joase, monitorizând distribuția apei și a ciclohexanului care saturează acești pori. Distribuția relativă a porilor de gel și a porilor capilari, determinată prin (RMN), s-a făcut pe eșantioane extrase din probe martor menținute în apă în perioada de testare la îngheț-dezghet și pe eșantioane extrase din probe testate la 300 de cicluri de îngheț-dezghet. Pe cuburi cu latura de 71 mm realizate din aceeași compoziție și încercate la aceeași vârstă s-a obținut conținutul de pori permeabili.

- După ciclurile repetate de îngheț-dezghet intervalul de distribuție a timpului de relaxare transversal T_2 , a porilor intra C-S-H s-a deplasat la valori mai mari comparat cu amestecurile de martor, ceea ce indică apariția microfisurilor inclusiv în porii intra C-S-H. Densitatea probabilă maximă a fost apropiată de valoarea indicată la amestecurile martor.
- Din diagramele de distribuție a porilor de gel inter C-S-H și a porilor capilari pentru probele testate la îngheț-dezghet se observă deplasări la valori mai mari a lui T_2 , la toate compozițiile cu zgură de furnal față de probele martor ceea ce indică creșterea dimensiunii relative a porilor.
- De asemenea, densitatea probabilă maximă, măsurată pe axa y, a crescut odată cu creșterea nivelului de substituție cu agregate concasate, indicând creșterea densității distribuției porilor în beton, cea mai mare creștere a înregistrat amestecul S 54/60.

- Pentru amestecurile S 54/40 și S 54/60 testate la îngheț-dezghet intervalul de distribuție a porilor capilari a înregistrat deplasări la valori mai mari în comparație cu amestecurile martor, ceea ce arată creșterea dimensiunii porilor, datorită creșterii cantității de apă din amestec.
- Pentru amestecul S 54/20 intervalul de distribuție și intensitatea maximă a porilor capilari au fost apropiate de amestecul de control S 360 și mai reduse decât la amestecul de control S 414, ceea ce indică că acest amestec conține dozajul optim de zgură de furnal încorporată.
- Rezultatele obținute pentru conținutul de pori permeabili și rezistențele mecanice obținute prin metode standard și a distribuției porilor capilari obținuți prin tehnica (RMN) au fost în concordanță.
- În urma analizei imaginilor (SEM) pentru amestecurile cu zgură rezultă că densitatea porilor pentru amestecul S 54/20 este cea mai redusă, ceea ce confirmă rezistența la compresiune cea mai mare.
- Prin utilizarea tehnicii CPMG a fost relevată distribuția și dimensiunea relativă a porilor de gel și capilari pe probe de beton testate la îngheț-dezghet, permițând extragerea suplimentară a informațiilor despre porii de gel în comparație cu metoda standard prin care s-a evaluat doar conținutul de pori permeabili.
- Tehnica CPMG poate reflecta efectul ciclurilor de îngheț-dezghet asupra porozității totale din structura interioară a betonului, însă rezultatele trebuie corelate cu cele din metodele standardizate. Această tehnică are avantajul că permite evaluarea progresivă și repetată a distribuției porilor de gel și capilari pe tot parcursul testului de îngheț-dezghet. Rezultatele cercetărilor din acest capitol au fost publicate sub formă de articol științific în lucrarea [253].

11 Rezistența la uzură a betoanelor (BcR-S)

11.1 Introducere

Folosirea zgurii de furnal în proporții optime, ca adaos mineral la masa cimentului și ca substituție a nisipului natural în amestecurile de betoane rutiere, poate fi o soluție atât pentru protejarea mediului cât și pentru economia resurselor naturale. Suprafața terestră cât și ecosistemul acvatic sunt afectate de industria cimentului care contribuie cu aproximativ 5-8% din dioxidul de carbon emis la nivel global, urmat apoi de dioxidul de sulf SO₂ și oxizii de azot NO_x, [254]–[256]. De asemenea consumul de agregate din betoane afectează rezervele naturale de agregate la un nivel de 20 000 milioane de tone /an și o rată a creșterii de 4,7% pe an la nivel mondial [257]. Zgura de furnal este un produs secundar obținut din industria siderurgică, din topirea fontei. Prin procesul de răcirea rapidă în apă a zgurii topite se formează zgura granulată de culoare albicioasă cu dimensiuni de max. 5 mm. Materialul granular rezultat cuprinde aproximativ 85-95%, materiale sticloase formate din aluminosilicați de calciu (necristaline) [254] [258]. Zgura de furnal granulată și măcinată are caracter hidraulic latent, este utilizată ca adaos de tip II în amestecurile de beton pentru îmbunătățirea unor proprietăți în acord cu prevederile SR EN 206+A1:2017 [10] și SR EN 15167-1:2007 [20]. Zgura de furnal negranulată se obține prin procesul de răcirea lentă în aer a topiturii de zgură și prezintă o structură moleculară cristalină, fără utilizare în fabricarea cimenturilor [259], însă după concasare se poate utiliza ca agregat în compoziția betoanelor.

În acord cu ACI 201.2R-08 [8], [260], *Ghidul pentru betoane durabile*, uzura de la suprafața betonului poate fi cauzată de patru acțiuni diferite: din traficului uman pe pardoseli din beton, uzurii datorată traficului de vehicule cu diferite tipuri de anvelope și cu roți din oțel, datorită materialelor abrazive purtate de apă (ex. nisipul) care afectează structurile hidrotehnice cum ar fi barajele și viteza mare a apei care creează cavități la suprafața betonului. Rezistența la uzură este o caracteristică importantă pentru exploatarea drumurilor rutiere. Uzura cauzată de trafic apare la suprafața betonului datorită frecării,

derapajului sau alunecării autovehiculelor aflate în mișcare pe suprafața de rulare. Rezistența la uzură a unui beton depinde de rezistența materialelor componente și de legătura dintre agregat și pasta de ciment [260],[261]. Sunt două puncte de vedere cu privire la tipul de relație matematică dintre rezistența la compresiune și rezistența la uzură. Primul punct de vedere arată că rezistența la compresiune este cel mai important factor pentru rezistența la uzură și că între cele două caracteristici se dezvoltă o relație liniară [254], [262]–[264]. Studiile efectuate de Alaa M. Raşad și colab. 2014 și Kiliç A. și colab. [254], [265] au arătat că relația matematică între rezistența la compresiune și rezistența la uzură este de tip hiperbolică. Y-W.Liu și colab. au studiat influența raportului A/C asupra rezistenței la uzură la patru raporturi diferite de apă/ciment, între 0,26÷0,50. Creșterea rezistenței la uzură s-a înregistrat la amestecurile la care raportul A/C a scăzut. Aceste betoane au avut o porozitate mai mică, o legătură mai bună între pasta de ciment și agregat și o rezistență la compresiune crescută [66], [260]. Al doilea punct de vedere este că rezistența la uzură nu este dependentă doar de rezistența la compresiune [260], [266], [267] aceasta mai este influențată de condițiile de întărire [260], [268], [269] și de tehnologia de finisare a suprafeței [260], [270], [271]. J.T.Kevern și colab.2009 [260], [272], a testat rezistența la uzură a betonului conservat în șase regimuri diferite de întărire. Regimul de întărire a fost în aer, întărirea umedă sub folie de plastic timp de 7 și 28 de zile, regim de întărire cu protecție pe bază de ulei și protecție cu pigmenți pentru întârzierea evaporării. Regimul de întărire în mediul umed cu protecție de plastic a contribuit cel mai mult la densificarea suprafeței betonului și la obținerea celor mai mari rezistențe la uzură datorită realizării efectului de seră. R.K.Dhir și colab. în 1991 [260], [273] au arătat că durata mai lungă de întărire în mediul umed de 7 zile comparată cu 1 zi și 4 zile influențează creșterea rezistenței la uzură. K.J.Bakke și colab., recomandă întărirea umedă de 5-7 zile pentru îmbunătățirea rezistenței la uzură [260], [274]. Studiul lui Laplante și colab. [260], [275] a arătat că silicea ultra fină are o contribuție importantă la creșterea rezistenței la compresiune și la îmbunătățirea rezistenței la uzură a betonului. De asemenea și alți autori au raportat că includerea silicei ultra fină (SF) a crescut rezistența la uzură în beton sau mortar. K.Turk et.al. [276] a studiat rezistența la uzură a betonului autocompactat în care cimentul a

fost parțial înlocuit cu cenușa zburătoare (FA) sau cu silice ultra fină (SF). Procentele de înlocuire cu (FA) au fost 25%, 30%, 35%, și 40%, în timp ce pentru (SF) au fost 5%, 10%, 15% și 20%. Rezultatele au indicat o creștere a rezistenței la uzură în amestecurile cu substituție de până la 15%(SF) în timp ce în amestecurile cu cenușă zburătoare rezistența la uzură a scăzut odată cu creșterea conținutului de (FA), peste 30%. A.M.Rashad et.al. 2014 [254] a studiat efectul silicei ultra fină (SF) și a zgurii de furnal (GGBS) asupra rezistenței la compresiune și a rezistenței la uzură la vârsta de 7, 28, 90 și 180 de zile pe betoanele HVFA (betoane cu nivel înalt de substituție (70%) de cenușă zburătoare(FA)). Rezultatele au indicat cele mai bune rezistențe la uzură pentru amestecurile cu 50%(FA)+20%(SF) și pentru 50%(FA)+10%(SF)+10%(GGBS). T.R.Naik și colab. [260], [263] a investigat efectele înlocuirii cenuși zburătoare (FA), din clasa C, asupra rezistenței la uzură a amestecurilor de beton. Au fost selectate cinci niveluri de înlocuire a cimentului, între 15% și 70%. Rezultatele rezistenței la uzură a fost comparabilă cu amestecul de control pentru procentele de înlocuire de 15% și 30%, dar peste aceste procente, rezistențele au scăzut. Selectarea tipului de agregate grosiere pentru utilizarea acestora în amestecurile de betoane rezistente la uzură a prezentat interes pentru cercetători. Rezistența agregatelor la fragmentare a fost cercetată de A.Kiliç și colab. [265] pe diferite tipuri de agregate grosiere concasate, respectiv pe rocă magmatică, bazalt, cuarțit, calcar și gresie. Coeficientul Los Angeles (LA) a fost determinat pentru fiecare tip de rocă. Ei au observat o corelație puternică între rezistența agregatului și rezistența la uzură a betoanelor. Amestecurile la care agregatele au avut rezistențe inferioare au suferit o pierdere mai mare la uzură decât cele cu agregate rezistente la fragmentare. R.K.Dhir et.al [260], [273] au investigat efectul dimensiunii maxime a agregatului asupra rezistenței la uzură. Au fost testate patru dimensiuni maxime de agregate: 5, 10, 20 și 40 mm. Rezultatele testelor lor au arătat că rezistența la uzură a scăzut pe măsură ce mărimea agregatului grosier a crescut.

11.2 Ipoteze de lucru/obiective

Similar cu cercetările prezentate în partea introductivă ale acestui capitol cercetarea efectuată are în vedere o analiză a evoluției

rezistențelor la uzură și compresiune obținute pentru betoanele rutiere (BcR-S) în care s-a încorporat zgură de furnal prin comparație cu betoanele rutiere realizate doar cu materiale convenționale. Rezultatele obținute pentru cele două caracteristici au fost reprezentate grafic, de data aceasta, printr-o relație polinomială de gradul doi.

11.3 Materiale și metode

11.3.1 Materiale

Încercările la uzură mecanică s-au efectuat atât pe probe din prima serie cât și pe probe din a doua serie a experimentului, compozițiile fiind detaliate în cap.6, având cantitățile de materiale rezumate în Tabelul 6-4 și Tabelul 6-5 păstrând următoarele denumiri:

S 360, amestec de control cu 360 kg/m³ ciment Portland și (AN);

S 414, amestec de control cu 414 kg/m³ ciment Portland și (AN);

S 54/20, 360 kg/m³(ciment)+ 54 kg/m³(GGBS)+20% (ACBFS)+80% (AN);

S 54/40, 360 kg/m³(ciment)+ 54 kg/m³(GGBS)+40% (ACBFS)+60% (AN);

S 54/60, 360 kg/m³(ciment)+ 54 kg/m³(GGBS)+ 60% (ACBFS)+40% (AN);

Au fost procurate agregate grosiere din două surse diferite, sortul cu dimensiunea 4/8 mm a fost extras din balastieră iar sorturile 8/16 și 16/25 mm au fost extrase din carieră. Sursa agregatelor de carieră utilizată este renumită pentru caracteristicile adecvate cerințelor de proiectare a betoanelor rutiere datorită rezistenței foarte bune la uzură având coeficientul Micro-Deval (MDE₆) și rezistența la fragmentare determinată prin coeficientul Los Angeles (LA₁₄) [199], [200].

11.3.2 Metode

Determinarea rezistenței la uzură s-a realizat pe discul abraziv al aparatului Böhme, marca Matest, conform cu standardul SR EN 1338:2004/AC:2006 [142], Anexa H prin evaluarea pierderii în volum. La fiecare amestec realizat în seria întâi, s-au turnat 3 epruvete cubice cu latura de (71 ±1,5) mm pentru testarea la uzură la vârsta de 100 de zile și alte 3 epruvete pentru încercarea la 150 de zile. După turnarea betonului epruvetele s-au menținut în aer 24 h, după care s-au decofrat iar ulterior s-au menținut în apă la temperatura de (20±2)°C. La vârsta de 7 zile, cuburile de 71 mm au fost scoase din apă și s-au păstrat în aer, în camera climatică, la temperatura de (20±2) °C și la o umiditate de

(65±5) %. De la vârsta de 50 de zile până la vârsta de încercare de 100, respectiv 150 zile toate epruvetele s-au plasat în apă la temperatura de (20±5) °C.

Epruvetele cu latura de 150 mm încercate la compresiune la vârsta de 100 de zile, respectiv 150 de zile au fost utilizate ca și probe martor pentru testul de îngheț-dezghet efectuat în acord cu SR 3518:2009 prezentat la cap.9. Epruvetele cubice cu latura de 150 mm au fost menținute în apă de la vârsta de 50 zile până la 150 de zile.

Similar pe cuburi cu latura de 71 mm, la vârsta de 200 zile s-a determinat rezistența la uzură pentru betoanele turnate în seria a doua. Metodele de lucru au avut loc conform procedurilor experimentale prezentate la subcap.4.7.

11.4 Rezultate

Rezultatele pierderilor de volum a epruvetelor realizate în seria întâi, testate la 100 și la 150 de zile și rezistențele la compresiune sunt prezentate în Tabelul 11-1 și 11-2.

Tabelul 11-1. Pierderile de volum din încercarea la uzură și rezistențele la compresiune la vârsta de 100 zile, seria I

Amestec	Δm (g) 100 zile	ρ_R (g/mm ³) 100 zile	ΔV (mm ³) 100 zile	f_{cm} (MPa) 100 zile
S 360	27.73	0.002379	11660	85.83
S 414	32.85	0.002324	14138	81.46
S 54/20	30.85	0.002375	12986	87.06
S 54/40	31.65	0.002323	13627	80.85
S 54/60	39.13	0.002378	16454	76.79

Tabelul 11-2. Pierderile de volum din încercarea la uzură și rezistențele la compresiune la vârsta de 150 zile, seria I

Amestec	Δm (g) 150 zile	ρ_R (g/mm ³) 150 zile	ΔV (mm ³) 150 zile	f_{cm} (MPa) 150 zile
S 360	25.80	0.002300	10833	87.78
S 414	29.63	0.002323	12860	80.96
S 54/20	27.25	0.002377	11577	84.90
S 54/40	28.75	0.002323	12376	79.38
S 54/60	36.25	0.002380	15039	74.77

Tabelul 11-3. Rezistențele la compresiune și la uzură la vârsta de 200 zile, seria II

Amestec	S 360	S 414	S 54/20	S 54/40	S 54/60

f_{cm} (MPa)	73.07	71.94	75.57	73.41	75.53
ΔV (mm ³)	10941	11186	10363	11033	10425

11.5 Discuții

11.5.1 Determinarea rezistenței la uzură, seria întâi

Evoluția pierderii de volum din încercarea la uzură, la vârsta de 100 și 150 de zile, înregistrează o tendință invers proporțională cu rezultatele rezistenței la compresiune, ca în Figura 11-1a) și b). Cu cât rezistențele la compresiune sunt mai mari, cu atât sunt mai mici pierderile de volum a epruvetelor testate așa cum sunt evidențiate la amestecurile S 360 și S 54/20. Iar în sens invers la amestecurile S 414, S 54/40 și S 54/60 rezistențele mai mici la compresiune au condus la pierderii mai mari de volum a epruvetelor testate. Cu toate acestea se observă o creștere a rezistenței la uzură (pierderea de volum scade) la toate amestecurile odată cu înaintarea vârstei de la 100 la 150 zile. Acest lucru este atribuit prelungirii timpului de hidratare al liantului în amestecurile realizate. Pierderea de volumul după testul de uzură la vârsta de 100 zile a fost mai mică cu 8,14% și cu 9,98% la 150 de zile la amestecul S 54/20 comparat cu amestecul de control S 414. O comportare bună privind rezistența la uzură are și amestecul S 54/40, unde se constată la 150 de zile o scădere a pierderii de volum cu 3,76% în comparație cu amestecul de control S 414. În timp ce pierderea de volum la vârsta de 150 de zile a crescut semnificativ cu 16,94% la amestecul S 54/60 comparat cu amestecul de control S 414.

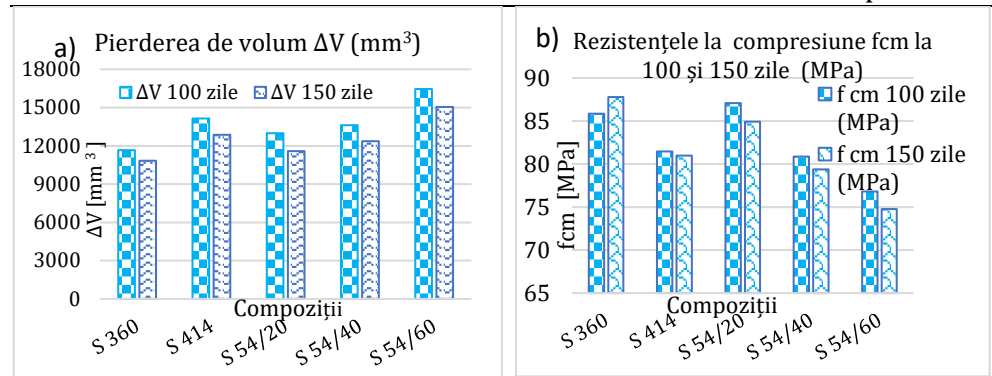


Figura 11-1.a) Pierderea de volum din uzură, b) Rezistența la compresiune, seria I

Figura 11-2 a) și b) arată relația dintre rezistența la compresiune și pierderea de volum după testarea la uzură la 100 și la 150 zile. Se observă că între cele două caracteristici se dezvoltă o ecuație polinomială de ordinul doi, derivată prin regresie, având coeficientul de corelație (valoarea R) foarte bun. Rezultatele obținute le confirmă pe cele oferite de A.M.Rashad și colab. [254], care a stabilit de asemenea o relație polinomială și un coeficient de corelație apropiat de 0,9298 între rezistența la compresiune și pierderea de volum.

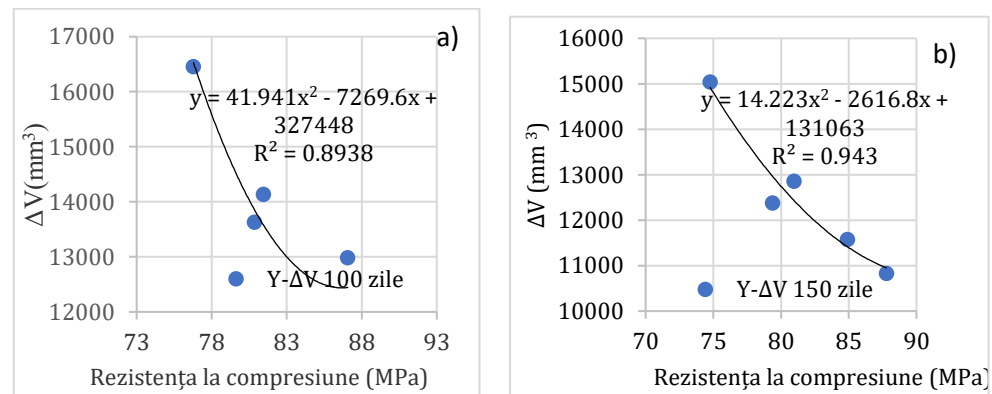


Figura 11-2. Relația între rezistența la compresiune și pierderea de volum a) la 100 zile, b) la 150 zile, seria I

11.5.2 Determinarea rezistenței la uzură, seria a doua

Pierderile de volum a epruvetelor testate la uzură au o tendință invers proporțională cu rezultatele rezistenței la compresiune, ca în

Figura 11-3.a). Cu cât rezistențele la compresiune sunt mai mari, cu atât pierderile de volum sunt mai mici așa cum sunt evidențiate la amestecurile S 54/20 și S 54/60. Toate amestecurile de beton realizate au înregistrat pierderi de volum mai mici decât $18000 \text{ mm}^3/5000 \text{ mm}^2$, valori care au permis încadrarea la clasă de rezistență la uzură 4, marca I, în acord cu clasificarea din standardul, SR EN 1338:2004/1338:2006 [142].

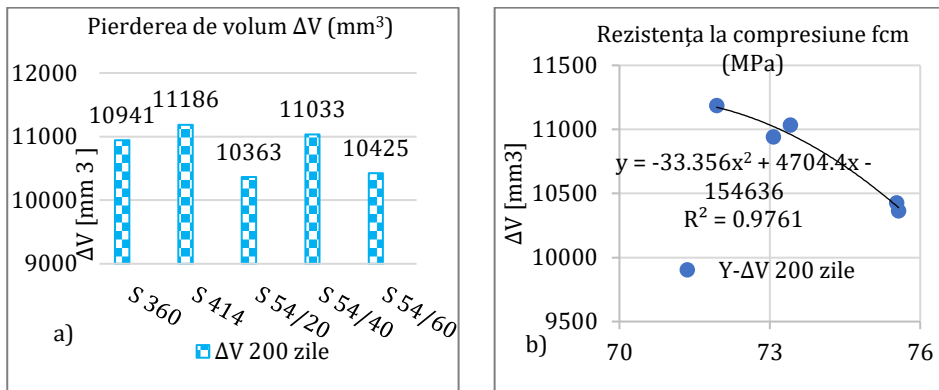


Figura 11-3. a) Pierderea de volum din uzură (mm^3), b) Relația între f_{cm} și ΔV la 200 de zile, seria II

Figura 11-3b) arată relația dintre rezistența la compresiune și pierderea de volum după testarea la uzură la vârsta de 200 de zile. Între cele două caracteristici a fost dezvoltată o ecuație polinomială de ordinul doi, derivată prin regresie, având coeficientul de corelație (valoarea R) foarte bun. Mai mult, se constată că modulul de finețe mai mare al agregatului (ACBFS) decât al nisipului crește rezistența la uzură a suprafeței de beton similar cu rezultatele obținute de Orhan K., în studiul [277]. La același raport A/C pierderea de material la amestecul S 54/20 a fost cu 7.36% mai mică decât la amestecul S 414.

11.6 Concluzii parțiale

În acest capitol s-a testat rezistența la uzură pe trei amestecuri în care s-a inclus aceeași cantitate de 54 kg/m^3 , de pulbere de zgură de furnal granulată și măcinată (GGBS) ca liant și trei procente diferite

(20%, 40%, 60%) de agregate din zgură de furnal (ACBFS) cu dimensiunea de 0/4 mm care au substituit nisipul natural.

- O concluzie generală desprinsă din programul experimental efectuat este că o creștere a rezistenței la compresiune conduce la creșterea rezistenței la uzură a betoanelor rutiere și implicit la scăderea pierderii de masa la uzură. De asemenea factori importanți care au influențat pozitiv rezistența la uzură sunt: agregatele rezistente la fragmentare și la uzură, un raport apă/ciment redus și un regim de întărire în mediul umed de cel puțin 7 zile;
- La compozițiile turnate în seria întâi cele mai bune rezultate s-au obținut pentru amestecurile S 54/20 și S 54/40, la care rezistențele la uzură la toate vârstele au fost mai mari decât la amestecul de control S 414. Pentru amestecul la care s-a substituit 60% agregate din zgură de furnal rezistența la uzură a fost mai mică decât cea obținută la același amestec de control.
- Pierderile de masă la uzură la toate amestecurile cu zgură de furnal turnate în seria a doua, au înregistrat valori mai mici comparate cu amestecul de control S 414, respectiv rezistențe mai mari la uzură.
- Între cele două caracteristici studiate s-a dezvoltat o relație matematică polinomială de gradul doi care arată o regresie a pierderii de volum din încercarea la uzură odată cu creșterea rezistenței la compresiune.
- Amestecurile de beton turnate în cele două serii au înregistrat pierderi de volum mai mici decât $18000 \text{ mm}^3/5000 \text{ mm}^2$, la toate vârstele, valori care au permis încadrarea la clasa de rezistență la uzură 4, marca I. Rezultatele cercetărilor din acest capitol au fost publicate sub formă de articole științifice în lucrările [182], [278].

12 Rezistența betonului (BcR-S) la coroziune indusă de cloruri și carbonatare

12.1 Introducere

O caracteristică importantă care afectează durabilitatea betoanelor rutiere este coroziunea armăturilor încorporate în beton. Degradarea prin coroziune atribuită armăturii din structura betoanelor a fost estimată ca reprezentând 25% din cauzele care influențează durabilitatea betoanelor [150], [279]. La îmbrăcămințile rutiere, armăturile din oțel sunt încorporate fie la rosturile de contact longitudinale, fie la rosturile de dilatație, fie pe toată suprafața dalelor în cazul îmbrăcăminților rutiere armate continuu. De obicei armătura din beton este protejată de un strat inert și dens, de grosime nanometrică, de oxid de fier, cu rol pasivant, care înconjoară armătura din oțel, fiind susținut de alcalinitatea pastei de ciment și de grosimea stratului de acoperire. Însă ionii de clor pot distruge stratul pasivant care înconjoară armătura din oțel prin creșterea concentrației de clorură, activând coroziunea chimică [150], [280]. Atunci când stratul protector al armăturii este străpuns de ionii de clorură, se inițiază coroziunea în puncte (pitting-ul). Se formează cratere locale, a căror adâncime avansează și care sunt umplute parțial cu un produs de coroziune instabil al fierului, oxidul feros friabil, ceea ce face dificilă aprecierea gradului de corodare. Totodată, produșii de coroziune ai fierului având volum mult mai mare decât volumul fierului (factorul de expansiune de 2-10 ori), vor induce tensiuni locale în matricea cementoasă înconjurătoare, inițiindu-se astfel fisuri care vor permite pătrunderea cu mai multă ușurință a ionilor de clorură și avansarea coroziunii [281]. Pe lângă prezența cantității semnificative de ioni de clorură la nivel de armătură, distrugerea stratului pasiv se produce și din cauza carbonatării care reduce pH-ul apei din porii betonului până la nivelul neprotector [282]–[289]. Carbonatarea este o reacție chimică a hidroxidului de calciu Ca(OH)_2 și a silicatulului de calciu hidratat (CSH) cu dioxidul de carbon (CO_2) prezent în aer sau apă și formează carbonat de calciu (CaCO_3) și apă (H_2O), reducând alcalinitatea betonului. La un anumit conținut de umiditate dioxidul de carbon (CO_2) intră prin porii betonului prin difuzie gazoasă. În mod normal condițiile naturale de alcalinitate ridicată

prezente în interiorul betonului protejează armătura împotriva reacțiilor de coroziune. Cu toate acestea, carbonatarea scade valoarea pH-ului din soluția de pori de la valorile tipice ($12 \div 13$) la mai puțin de 9 și distruge pasivitatea barelor de armare încorporate, declanșând procesul de coroziune [290]–[293]. Pentru betoanele permeabile creșterea concentrațiilor de CO_2 din mediul extern mărește rata de carbonatare [294] însă o matrice de ciment compactă împiedică difuzia dioxidului de carbon [295] și nu pune în pericol diminuarea rezistenței la compresiune a betonului [296]. Tuuty K. a dezvoltat un model de predicție a duratei de viață a armăturilor din oțel, conform căruia procesul de coroziune distinge două stadii: primul stadiu de inițiere a coroziunii și al doilea stadiu de propagare a coroziunii. Din momentul inițierii coroziunii, durata până la producerea degradărilor este influențată de umiditatea relativă, de temperatura mediului și de nivelul de oxigen din aer [151], [297]. Perioada de inițiere a coroziunii nu va afecta imediat performanțele armăturii, dar perioada de propagare a coroziunii trebuie luată în considerare deoarece performanțele întregului element din beton armat pot fi afectate în mod semnificativ [297]. Propagarea coroziunii conduce la coroziunea accelerată care se manifestă prin colorarea ruginie, fisurarea stratului de acoperire a armăturii, fisurarea longitudinală în structură, așchiera și delaminarea stratului de acoperire a armăturii [151], [298]. Studii de cercetare arată că există diferite tipuri de aditivi pentru betoane pe bază de nitriți de calciu care generează mecanisme de inhibare chimică și fizică pentru a menține inert stratul din jurul armăturii [150], [299], [300]. Utilizând metoda (HCP) măsură a potențialului semicelular care cuantifică progresia activității de coroziune prin diferența de potențial măsurată între proba testată și un electrod de referință, Pei și colab. au arătat că o creștere a raportului A/C din mortar de la 0,5 la 0,7 a dus la o scădere majoră a timpului până la inițierea coroziunii armăturii. Măsurătorile (HCP) oferă informații despre probabilitatea apariției coroziunii, dar nu evaluează rata efectivă de coroziune, fapt pentru care în literatura de specialitate sunt sugerate alte tehnici mai avansate, precum determinarea rezistenței la coroziune prin polarizare liniară (LPR) [301]. O altă modalitate de reducere a riscului de coroziune a armăturii din beton se poate obține și prin încorporarea unor dozaje optime de materiale cementoase suplimentare (SCM)-uri, precum cenușa zburătoare, zgura de furnal și silicea ultra fină [302]–[307]. Se cunoaște că silicea ultra fină asigură cea mai mare protecție a armăturii din oțel datorită dimensiunii mici a particulei (aproximativ $0.1 \mu\text{m}$), care produce o reacție puzzolană cu

portlanditul (CH) formând o bună legătură a zonei de tranziție (ITZ) între suprafața pastei de ciment și a agregatului [85], [150].

În anul 1970 Administrația Federală a Autostrăzilor (FHWA) a fost preocupată de a descoperii o metodă rapidă de evaluarea a penetrării ionilor de clor în stratul de acoperire a armăturii datorită nevoi de utilizare a sărurilor de dezghețare la îmbrăcămințile rutiere. Rezultatele din metodele existente în acea perioadă au fost specifice evaluării permeabilității betonului la apă și aer, fără să prezinte o corelare cu metodele de evaluarea a difuziei ionilor de clor [150], [308]. În anul 1981 s-a elaborat o versiune finală utilizată în laborator pentru a determina clasa de penetrabilitate la clor a betonului, iar în anul 1991 testul (RCPT) a fost documentat în ASTM C1202 [148]. Conceptul metodei (RCPT), în acord cu ASTM C1202, se bazează pe mobilitatea ionilor de clor forțați să pătrundă în beton prin inducerea unei tensiuni externe aplicate direct pe suprafața betonului. Migrarea clorurii prin beton este un proces lent, însă cercetătorii au descoperit că atunci când un curent electric este aplicat pe o epruvetă de beton, viteza cu care clorurile au migrat în beton a fost accelerată, fapt pentru care testul în prezent este frecvent utilizat [150]. Totuși, testul (RCPT) nu este indicat a se utiliza pentru amestecuri de beton care includ fibre de armare dispersă sau inhibitori de coroziune precum nitriții de calciu, deoarece acestea influențează conductivitatea electrică și se obțin rezultate crescute în mod artificial. Fiabilitatea metodei de testare (RCPT) a fost criticată pentru diferite neajunsuri și în cazul utilizării materialelor suplimentare cu caracteristici cementoase precum silicea ultra fină [150], [309]. În prezent, există încă controverse în ceea ce privește influența căldurii generate de curentul electric aplicat asupra rezultatelor, respectiv asupra asigurării migrației ionilor de clorură, din cauza faptului că nu îi poate identifica doar pe aceștia [310]. Prin urmare, pentru a minimiza efectul temperaturii asupra conductivității electrice, studiile anterioare au sugerat măsurători (RCPT) suplimentare, după perioade scurte de timp de 1 minut și 30 minute, deoarece s-a observat că în acest interval nu sunt înregistrate diferențe mari de temperatură. Multiplicarea măsurătorilor la intervale de 30 minute permit calculul extrapolat al sarcinilor de trecere și al rezistivității. Rezistivitatea betonului calculată din testul (RCPT) poate estima durata stadiului de propagare a coroziunii până la cedarea betonului [151], [311]–[313]. S.Feliu și colab. [314], [315] au realizat o corelare între rezistivitatea betonului, măsurată, și viteza de coroziune la nivelul armăturii încastrate, acestea evoluând invers proporțional. Aceasta a fost cercetată

și de G.K.Glass și colab. [314], [316] care au arătat că rezistivitatea mortarului este dependentă de umiditatea relativă a mediului care influențează și viteza de coroziune a armăturii. Un alt parametru de evaluare a penetrării ionilor de clor este coeficientul de difuzie a ionilor de clor, care poate fi evaluat prin testul NT Build 492 [153], metodă de testare utilizată în Finlanda pentru a determina migrația ionilor de clor în stare non-stabilă. Această metodă reprezintă o metodă alternativă la ASTM C1202, însă diferă prin timpul de expunere (între 24 și 96 h) și prin tensiunea aplicată (30 V). Coeficientul de difuzie rezultă din valorile penetrării clorurilor, grosimea probei, timpul de expunere, tensiunea și temperatura medie a probei [317]. Difuzia ionilor de clor din beton determină stadiul de inițiere a coroziunii în timp ce rezistivitatea betonului arată viteza de propagare a coroziunii [150], [318]. Din studiul efectuat de M.T.Bassuoni și colab. a rezultat că determinarea coeficientului de migrație a ionilor de clor poate elimina incertitudinile din testul rapid (RCPT) de conductivitate electrică. Coeficienții de migrare a clorurilor sunt sensibili la caracteristicile fizice ale structurii porilor, iar sarcinile de trecere sunt influențate în principal de concentrația ionică a soluției din pori. Materialele incorporate în beton, precum silicea ultra fină și inhibitorii de coroziune pe bază de nitrit de calciu (CNI), pot influența elementele chimice a soluției de pori, astfel metoda testului rapid (RCPT) s-a dovedit a fi insuficientă fapt pentru care fost suplimentată cu metoda colorimetrică [150]. McGrath and Hooton [319] a studiat influența diferenței de potențial a curentului electric asupra coeficienților de difuzie a clorurii din beton. Coeficienții de difuzie a ionilor de clor în stare non-stabilă au fost calculați prin aplicarea ecuației Nernst-Planck, utilizând datele din testele de penetrare accelerată a clorurii în condițiile aplicării unei diferențe de potențial între 6 și 30 volți. Concluziile au arătat că eroarea rezultatelor a crescut pe măsură ce potențialul nominal a scăzut. H.R.Soleymani și colab. [320] a efectuat un studiu de laborator pentru a estima coroziunea armăturii din oțel pentru două tipuri de beton, obișnuit și de înaltă performanță. Rezultatele au indicat faptul că interpretarea Tafel (TP), rezistența liniară de polarizare (LPR), măsura potențialului semicelular (HCP) și determinarea conținutului de clorură prin alte metode, au obținut același nivel de activitate de coroziune la doar 24% din probe. Studiul indică necesitatea combinării acestor metode în scopul creșterii gradului de precizie pentru aprecierea coroziunii armăturii din beton. A. Coșa și colab. a testat prin două metode adâncimea de pătrundere a ionilor de clor în betonul autocompactant realizat cu adaos de cenușă zburătoare

sau cu filer de calcar. Studiul arată că utilizând metoda colorimetrică cu soluție de azotat de argint (AgNO_3) s-au obținut rezultate pentru adâncimea de penetrare a clorurii, însă folosind suplimentar metoda microscopiei electronice de baleaj (SEM) s-a determinat și concentrația de clorură din beton, dar rezultatele pentru adâncimea de penetrare a ionilor de clor au fost mai precise. Avantajele utilizării microscopiei electronice s-au dovedit a fi remarcabile, însă nu în sensul de a submina eficiența și practicabilitatea metodei colorimetrice [321]. K.Y.Yeau și colab. a arătat că betonul cu substituție de 40% zgură de furnal granulată și măcinată (GGBS) din masa de ciment și chiar peste acest nivel, a prezentat rezistența la coroziune mai mare comparativ cu betonul de ciment fără (GGBS), după 56 de zile de imersie în apă [302]. P.Sancharoen și colab. [322] au obținut rezistențe la coroziune a armăturii în betonul cu (GGBS) mai mari comparativ cu betonul cu ciment Portland. Însă la expunerea ciclică și simultană a betonului cu (GGBS) la coroziunea ionilor de clor și la carbonatare, rezistența la coroziune acestuia a scăzut față de betonul convențional fapt pentru care s-a sugerat ca durabilitatea acestora să fie analizată cu mare atenție. A.Noushini și colab. [323] au studiat rezistența la difuzie a clorurii pe betonul geopolimeric pe bază de cenușă zburătoare cu conținut scăzut de calciu, la temperaturi și durate de conservare diferite. Pentru acest beton coeficientul de difuzie a clorurii a fost mai mare în comparație cu betonul pe bază de (OPC). Cel mai mare coeficient de difuzie a clorurii în betonul geopolimeric s-a obținut prin tratarea termică la 60°C timp de 24 de ore. Însă coeficientul de difuzie a clorurii a scăzut odată cu creșterea temperaturii de tartare de la 75°C la 90°C . O altă observație a cercetărilor a fost că betonul geopolimeric a avut o capacitate mai redusă de legare a clorurii și un conținut mai mare de ioni de clorură liberi în comparație cu betonul convențional.

12.2 Ipoteze de lucru/obiective

În modele europene standardizate nu există predicții ale duratei de viață a structurilor din beton armat expuse la coroziunea generată de atacul clorurilor. De asemenea, tipul de ciment nu este considerat ca parametru în evaluare pentru coroziunea inițiată de clor. Totuși profesorul J. Bijen propune unele limite pentru betoanele cu ciment cu zgură de furnal: viteza de coroziune de maxim $5 \mu\text{m Fe/an}$ pentru orice punct din armatură, un conținut de cloruri de până la 2% din masa cimentului cu zgură și un raport A/C de max. 0.45. Prin aceste condiții

împreună cu stratul de acoperire a armăturii, autorul consideră că nu va fi pusă în pericol performanța structurii [297]. În raport cu clasa de expunere la coroziune datorată clorurilor XD3, se prevede un raport A/C max. 0.45, clasa minimă de rezistență C35/45, dozajul minim de ciment 350 kg/m³, cerințe care se regăsesc și în SR EN 206:2017 [10].

Epruvetele din acest program experimental fac parte din a doua serie de turnare și cuprinde cinci compoziții, notate S 360, S 414, S 54/20, S 54/40 și S 54/60, având cantitățile de materiale prezentate în Tabelul 6-6, cap.6. Conținutul de apă și aditivi au fost ajustate în seria a II-a de turnare astfel încât să fie asigurată consistența de minim 30 mm, în acord cu NE 014:2002 [11]. Datorită unei erori de adăugare a apei la prepararea amestecului S 360 a fost depășită limita raportului A/C de 0.45. Încercările, testele și analiza rezultatelor au continuat pentru amestecul S 360 dar pentru compozițiile cu zgură de furnal încorporată au fost considerate rezultate de referință doar cele obținute la amestecul de control S 414.

Scopul acestui program experimental a fost de a analiza rezistența la coroziune a armăturii înglobate în betonul rutier preparat cu zgură de furnal, declanșată ca urmare a penetrării ionilor de clor și a carbonatării indusă de scăderea pH-ului din porii betonului. De asemenea, s-a evaluat fiabilitatea testului rapid de penetrare a ionilor de clor (RCPT) în acord cu standardul ASTM C1202, prin suplimentarea metodei curențe cu metoda colorimetrică, urmărindu-se evaluarea adâncimii frontului și a coeficienților de migrație ai ionilor de clor. Concomitent s-a evaluat conținutul de pori permeabili care a reprezentat un indice util pentru corelarea cu coeficienții de migrație ai ionilor de clor în beton. Pentru a întări rezultatele obținute prin testul rapid (RCPT) concordanța dintre rezistențele la compresiune și rezistivitatea betonului la penetrarea ionilor de clor au fost de asemenea analizate.

12.3 Materiale și metode

12.3.1 Materiale

Compozițiile de beton fac parte din a doua serie de turnare, iar cantitățile de materiale se găsesc în Tabelul 6-5 din cap.6.

Înainte de introducerea în beton, zgura de furnal granulată a fost măcinată mecanic până la o granulație mai mică de 63 μm , dimensiune care susține indicele de activitate al acesteia [231], [324], [325]. Evidențiem faptul că suprafața specifică a cimentului a fost de 4385 cm^2/g și greutatea specifică de 3.00 g/cm^3 iar a zgurii măcinată de 3775 cm^2/g și greutatea specifică de 2.77 g/cm^3 , caracteristici determinate în laboratorul UTCN. Rezultatele din rapoartele [108], [196] arată că zgura de furnal (GGBS) utilizată nu conține cloruri.

12.3.2 Metode

Fazele minerale ale zgurii de furnal granulată (GGBS) și negranulată (ACBFS), au fost evaluate utilizând metode de difracție cu raze X (XRD) și de microscopie optică cu lumină polarizată. Investigațiile de difracție cu raze X (XRD) au fost efectuate cu echipamentele din laboratorul Departamentului de Geologie al Universității Babeș-Bolyai din Cluj-Napoca, folosind un difractometru Bruker D8 Advance cu radiație $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 1,541874 \text{ \AA}$), filtru Fe 0,01 mm și un detector unidimensional LynxEye. De asemenea probele din zgură granulată și negranulată s-au studiat prin microscopie optică. Imaginile microscopice au fost realizate utilizând un microscop Nikon Optiphot T2-Pol cu lumină polarizată.

Testul de penetrare rapidă a clorului (RCPT) s-a efectuat la vârsta de 150 de zile pe epruvete cilindrice cu diametrul de 100 mm sub formă de fâșii de 50 ± 3 mm grosime. Pe aceleași probe utilizate la testul (RCPT) s-a determinat coeficientul de migrație a ionilor de clor după despicarea axială și pulverizare cu soluție de azotat de argint (AgNO_3). Pe fragmente de epruvete prismatice de $150 \times 150 \times 300$ mm s-a determinat la vârsta de 28, 56 și 150 zile adâncimea stratului de carbonatare pe suprafața betonului întărit prin pulverizarea feței proaspăt despicate a soluției de fenolftaleină. Rezistența la compresiune a fost determinată pe fragmente de prismă cu secțiunea de 150×150 mm la vârsta de 150 de zile. Densitatea, absorbția apei și conținutul de pori permeabili au fost testate pe fragmente din cilindrii cu diametrul de 100 mm, rămași după tăierea fâșiilor utilizate la testul (RCPT). Metodele de lucru au avut loc conform procedurilor experimentale prezentate la subcap. 4.8.

12.4 Rezultate

12.4.1 Analiza zgurii granulate (GGBS) și negranulate (ACBFS) prin difracție cu raze X (XRD) și microscopie optică cu lumină polarizată

În zgura granulată (GGBS), principala fază minerală identificată este merwinitul, urmat de ghehlenit magnezian și carbon. Suplimentar apare sticla, în fază amorfă, Figura 12-1 și 12-3a).

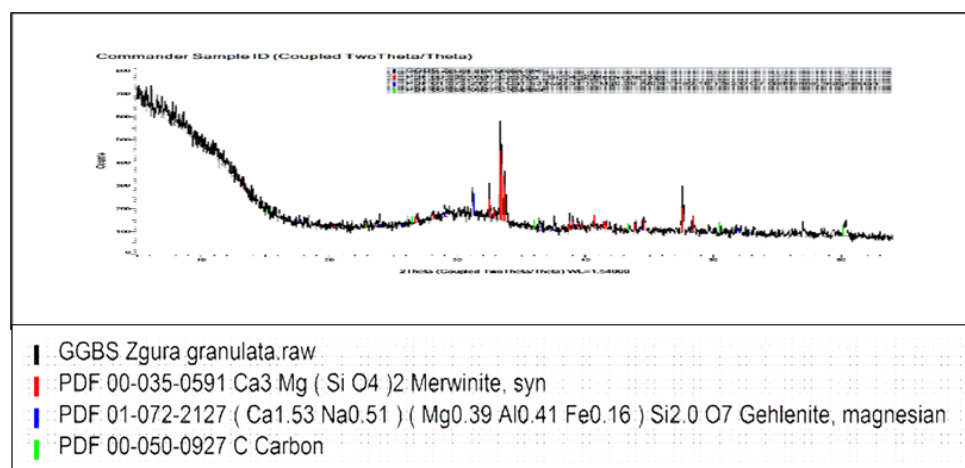


Figura 12-1. Spectru de difracție cu raze X pentru (GGBS) cu linii caracteristice pentru: ghehlenit magnezian, merwinite și carbon

În agregatele concasate din zgura negranulată (ACBFS), spectru de difracție cu raze X a indicat drept fază principală ghehlenitul magnezian și subordonat clinoferrosilit și silicat de aluminiu, Figura 12-2 și 12-3b).

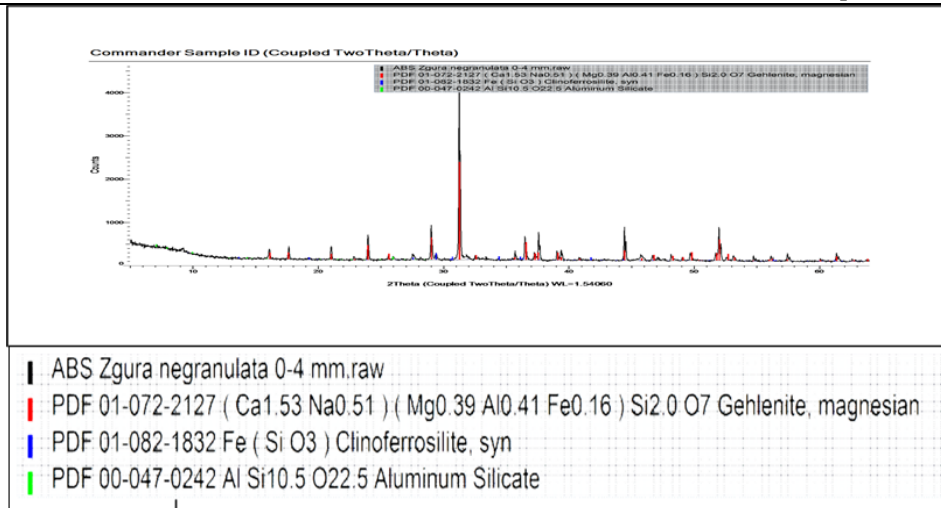


Figura 12-2. Spectru de difracție cu raze X pentru (ACBFS) cu linii caracteristice pentru: ghelenit magnesian, clinoferrosilit și silicat de aluminiu

Principalele faze minerale identificate pentru agregatele din zgură sunt în concordanță cu cele menționate în Ghidul de bune practici pentru utilizarea (ACBFS) în betoane rutiere, [27]. Din rezultatele măsurătorilor XRD s-a estimat pentru zgura granulată (GGBS) faza amorfă 80%, iar pentru zgura negranulată (ACBFS) faza cristalină 100%.

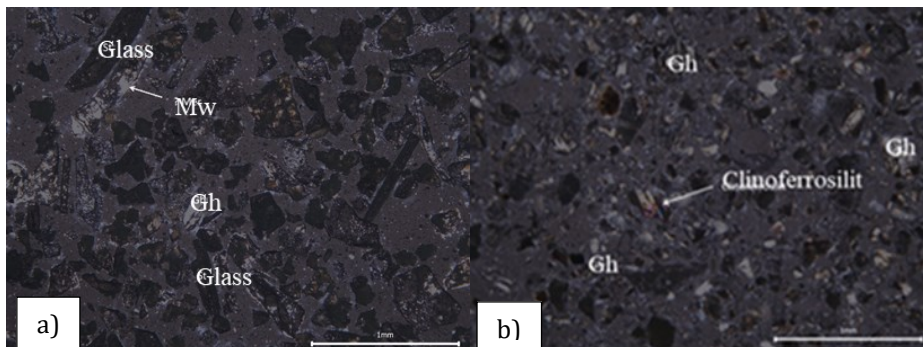


Figura 12-3. a) Imagine microscopică pentru (GGBS), b) Imagine microscopică pentru (ACBFS)

12.4.2 Rezultatele testului de penetrare rapidă a clorului (RCPT)

Tabelul 12-1 prezintă rezistivitatea electrică la 30 minute de la începutul testului RCPT (ρ), temperatura medie a soluției de clorură de

sodiu (T_{med}), adâncimea de penetrare a ionilor de clor (X_d), coeficient de migrație aflat în stare de non-echilibru (D) și viteza coroziunii (Cr).

Tabelul 12-1. Rezistivitatea, penetrabilitatea ionilor de clor și viteza coroziunii, seria II

Amestec	30-min, I Curentul ui [mA]	30-min Rezistiv itatea [Ω m]	T_{med} [$^{\circ}$ C]	X_d , Adâncimea de penetrare [mm]	D Coeficient de migrație [$\times 10^{-12}$ m ² /s]	Cr [μ m, Fe/yr %]
S 360	130	72.73	27.63	33.53	32.32	0.0137×10^{-3}
S 414	111	85.03	25.80	23.45	22.16	0.0118×10^{-3}
S 54/20	58	161,58	23.43	5.20	4.41	0.0062×10^{-3}
S 54/40	70	133.79	24.25	14.13	12.96	0.0075×10^{-3}
S 54/60	65	144.17	23.73	9.43	8.42	0.0069×10^{-3}

12.5 Discuții

12.5.1 Testul de penetrare rapidă a clorului (RCPT)

Sarcinile electrice de trecere (Q) după 6h, conform testului rapid (RCPT), s-au încadrat în intervalul ($1255 \div 3089$) Coulomb iar sarcinile de trecere extrapolate din înregistrările la 30 minute au fost între ($1262 \div 2798$) Coulomb, ceea ce în concordanță cu ASTM C1202, Tabelul 4-3, subcapitolul 4.8.1 corespunde unei clase scăzută, respectiv moderată, de penetrabilitate a ionilor de clor. Raportul între seturile de date înregistrate și seturile de date extrapolate, Figura 12-4a) se încadrează în intervalul ($0,80 \div 0,91$), în general sunt mai mici pentru valorile extrapolate. Excepție face amestecul S 54/20 la care raportul între sarcinile de trecere extrapolate și cele înregistrate a fost de 1.01, având valori foarte apropiate. Aceasta ar putea indica faptul că pentru amestecul S 54/20 efectul de temperatură asupra sarcinilor de trecere nu a avut nici o influență.

Așa cum se observă în Figura 12-4a), sarcinile electrice de trecere (Q) pentru compozițiile cu zgură de furnal sunt mai scăzute decât cea a compoziției de control S 414 realizată cu materiale convenționale. Aceasta este atribuită rezistivității crescute așa cum rezultă din Tabelul 12-1, respectiv a reducerii conductivității electrice de soluția din pori care ar putea fi indusă de pulberea de zgură de furnal, în concordanță și cu rezultatele obținute în studiul [150]. Însă dintre compozițiile fără zgură de furnal cea mai redusă sarcină de trecere s-a înregistrat la S 414

datorat raportului A/C de (0.42) mai mic decât la amestecul S 360 la care raportul A/C a fost de (0.46). Aceasta arată că un raport A/C crescut poate conduce la scăderea rezistivității betonului la penetrarea ionilor de clor. În Figura 12-4b) s-a reprezentat evoluția rezultatelor pentru viteza coroziunii. Se observă la amestecul S 54/20 și S 54/60 cele mai mici valori ale acestui indicator.

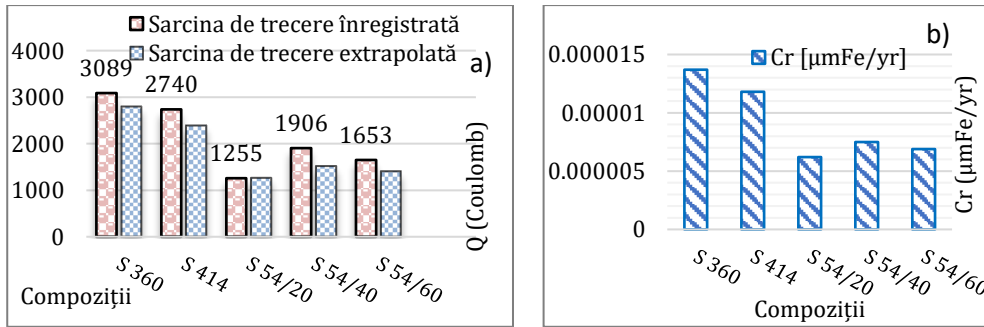


Figura 12-4. a) Sarcina de trecere (Q), b) Viteza coroziunii (Cr), seria II

12.5.2 Determinarea coeficienților de migrație a ionilor de clor (D)

Adâncimea medie de penetrare a ionilor de clor măsurată și coeficienții de migrație calculați în acord cu ecuația (4.40), subcapitolul 4.8.2 au valori prezentate în Tabelul 12-1. Figura 12-5 ilustrează frontul de clor pentru compozițiile S 360 și S 54/20, observându-se vizual adâncimea de pătrundere a ionilor de clor în beton. Deși aceste măsurători fizice sunt mai puțin dependente de conductivitatea electrică a betonului rezultatele au o tendință comună cu rezultatele din testul (RCPT). Astfel s-a constatat că, la adâncimea medie de penetrare a ionilor de clor de 5.20 mm înregistrată la compoziția S 54/20 și de 9.43 mm la compoziția S 54/60 au rezultat coeficienții de migrație (D) cu valori de $4.41 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ respectiv $8.42 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$. Aceste valori fiind cele mai reduse, în mod similar cu rezultatele obținute în urma testului rapid RCPT.

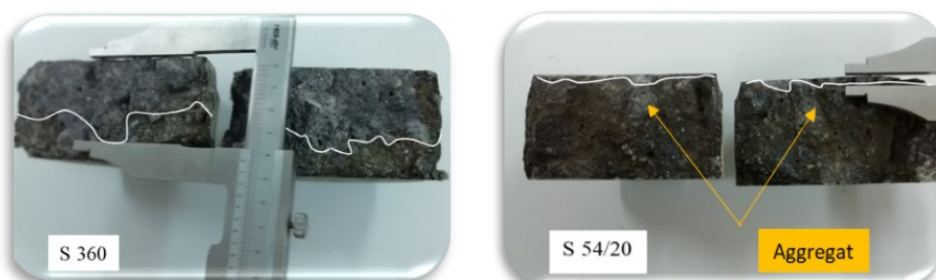


Figura 12-5. Frontul de migrare a ionilor de clor pentru amestecul S 360 și pentru S 54/20, Seria II

12.5.3 Determinarea adâncimii stratului de carbonatare a betonul întărit

Profilul de carbonatare a fost determinat folosind fenolftaleină ca soluție indicator. După o oră de la pulverizarea suprafeței, zona necarbonată se va menține violet, pentru probele cu pH-ul mai mare de 9, în timp ce zona carbonată va rămâne incoloră, în acord cu SR CR 12793 [154]. Din analiza vizuală a probelor testate la vârstele de 28, 56 și 150 zile s-a constatat că toate probele testate nu și-au pierdut bazicitatea, dovedit prin menținerea culorii violet pe întreaga suprafață pulverizată.

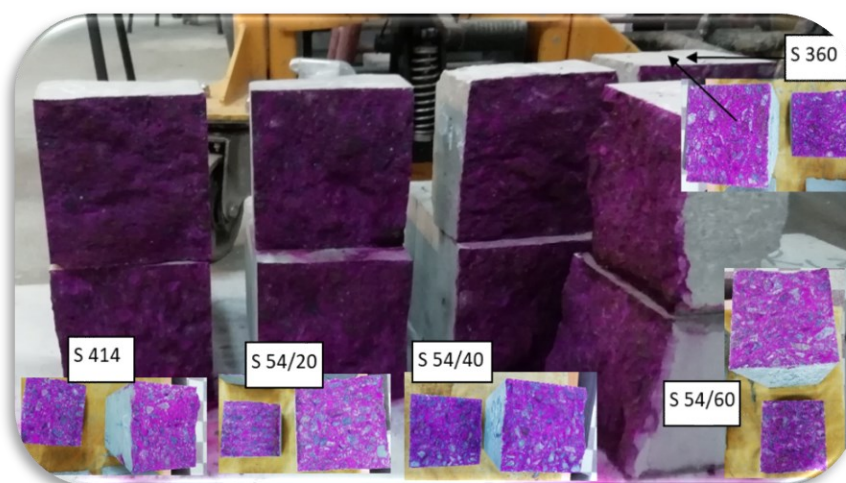


Figura 12-6. Progresul de carbonatare după o oră de la testarea probelor la vârsta de 56 zile, seria II

În Figura 12-6 se prezintă imagini cu aspectul probelor după o oră de la aplicarea soluției de fenolftaleină comparativ cu probele proaspăt pulverizate. Se observă doar o scădere a intensității culorii violet odată cu uscarea soluției pe suprafața pulverizată. În acest experiment adâncimea stratului de carbonatare d_k , a fost zero.

12.5.4 Determinarea densității, absorbției de apă și a conținutului de pori permeabili

În urma determinărilor efectuate pe fragmente de cilindrii cu latura de 100 mm s-a obținut conținutul porilor permeabili (P_0), densitatea în stare uscată (ρ_1), densitatea după saturare și fierbere (ρ_2), densitatea aparentă în stare de umiditate naturală (ρ_a), absorbția după imersie (m_1), absorbția după imersie și fierbere (m_2) cu rezultate prezentate în Figura 12-7a) și b). Conținutul de pori permeabili, sau porozitatea aparentă a fost în acest experiment un indice util de corelare a structurii porilor cu coeficienții de migrație a ionilor de clor în beton, în concordanță cu specificațiile din literatura de specialitate [150]. Valorile obținute pentru porozitatea aparentă, s-au încadrat în intervalul (5.63÷6.79) %, respectiv, sunt mai mici decât limita de 10 % peste care betonul este considerat poros [13]. Porii de gel (C-S-H) nu au fost monitorizați în acest experiment, deoarece nu au o contribuție majoră în mecanismul de penetrare a ionilor de clor în matricea de beton, rolul acestora fiind de discontinuitate a porilor capilari [150]. Aceste constatări pot fi puse în concordanță cu specificațiile din literatura de specialitate [31], [326]. Astfel, se specifică că procentul microporilor de gel (<30 nm) din betonul cu zgură este mai mare decât al betonului cu ciment Portland, iar porozitatea capilară este mai mică. Cauza acestei diferențe, sugerată de Bakker se datorează unei precipitări diferite a gelului (C-S-H) care conduce la scăderea relativă a porozității capilare. Gelul (C-S-H) din cimentul cu zgură nu se precipită direct pe particulele de ciment, ci în spațiul dintre granulația particulelor de clincher și de zgură de furnal. Această precipitare are ca rezultat o mai bună distribuție a gelului (C-S-H) care conduce la o difuzie și permeabilitatea a ionilor de clor mai scăzută la betonul cu zgură de furnal comparat cu betonul cu ciment Portland [31], [327]. Comparând diagramele din Figurile 12-7 a) și b) se observă că densitatea aparentă a amestecurilor are o evoluție invers proporțională cu conținutul de pori permeabili, respectiv cu absorbția apei. Respectiv, la compozițiile S 54/20 și S 54/60 cu un conținut mai redus de pori permeabili, densitatea betoanelor este mai

mare. La compozițiile S 414 și S 54/40 s-a înregistrat o porozitate mai mare, respectiv o densitate mai mică în comparație cu celelalte compoziții. Pentru toate cele trei compoziții cu zgură de furnal conținutul de pori permeabili determinat este mai redus comparativ cu amestecul de control S 414. Se observă și faptul că cel mai mare conținutul de pori permeabili s-a înregistrat pentru la amestecul S 360. Aceasta s-a datorat raportului apă/liant crescut (0,46).

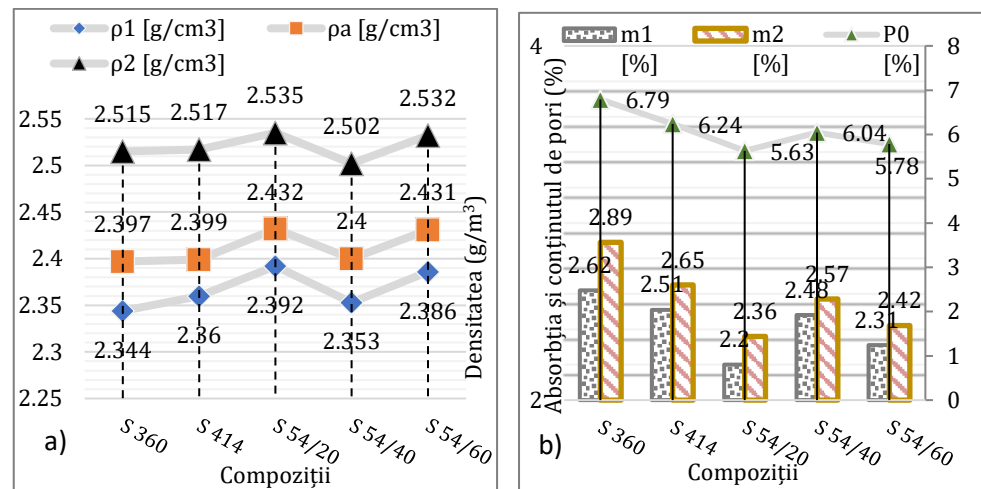


Figura 12-7. a) Densitatea amestecurilor, b) Absorbția apei și conținutul de pori permeabili, seria II

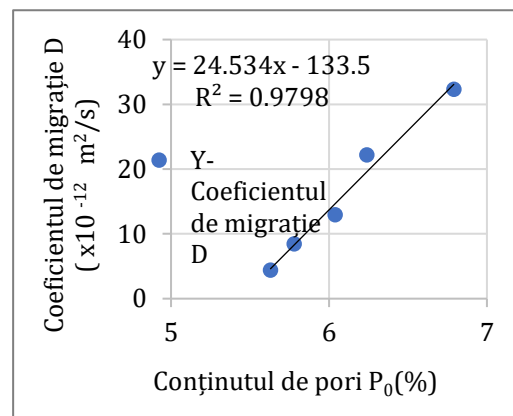


Figura 12-8. Relația între P0 (%) și D (x10⁻¹² m² /s), seria II

Evoluția conținutului de pori permeabili (Figura 12-8) are aceeași tendință de creștere cu coeficientul de migrație a ionilor de clor (D) (Tabel 12-1). Aceasta indică, similar cu specificațiile din literatura de specialitate [150], o relație directă între coeficienții de migrație a clorului și conținutul de pori permeabili.

Eroarea standard a estimării pentru D fiind de $2.02 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, aproximativ 12.59% din valoarea medie a coeficienților de migrație de $16,05 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

12.5.5 Evoluția rezistențelor mecanice, a rezistivității betonului și a adâncimii de penetrare a ionilor de clor în beton

Așa cum se observă în Figura 12-9 a), rezultatele rezistențelor la compresiune la vârsta de 150 de zile au evoluat similar cu cele de la vârsta de la 28 de zile raportate în cap.6. Analizând Figura 12-7a) și Figura 12-9a) rezultă că rezistențele mecanice la vârsta de 150 de zile sunt proporționale cu valorile densității aparente pentru toate amestecurile realizate. Rezistențele mecanice pentru amestecurile cu zgură de furnal au fost mai mari, cu valorile cuprinse în intervalul (0.63÷3.08)% față de amestecul martor S 414, atribuit unei compactități mai mari, respectiv a unei densități mai crescute. Însă analizând evoluția rezistivității betonului la penetrarea ionilor de clor din Figura 12-9b), se observă creșteri între (56,24÷88.69)%, cu valori vizibil mai mari pentru amestecurile cu zgură de furnal vs. (versus) amestecul de control S 414. Concentrația de 3% clorură de sodiu (în acord cu testul rapid RCPT) a produs un impact mai scăzut asupra amestecurilor cu zgură de furnal, respectiv un conținut mai mic de ioni de clor liberi, care poate fi datorat capacității crescute de legare chimică a ionilor de clor, mecanism cinetic prezentat și în lucrarea [323].

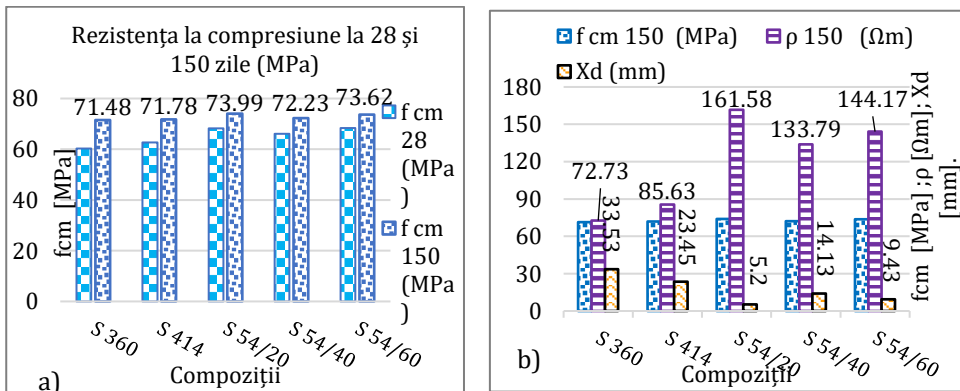


Figura 12-9. a) Rezistența la compresiune fcm la 28 și 150 zile.

b) Comparația între rezistența la compresiune (fcm), rezistivitatea betonului (ρ) și adâncimea de penetrare (Xd) la 150 zile

Mai departe, în diagrama din Figura 12-9b) s-a completat și cu rezultatele obținute pentru adâncimea de penetrare a ionilor de clor prin metoda colorimetrică.

Așa cum a fost de așteptat adâncimea de pătrunderea a clorului în beton a fost invers proporțională cu rezistivitatea și mai redusă cu valori între (39.74÷77.83)% față de amestecul martor S 414.

12.6 Concluzii parțiale

Efectul zgurii de furnal asupra rezistenței la coroziune a armăturii a fost studiat prin testul rapid (RCPT) în acord cu standardul ASTM C1202 completat cu metoda colorimetrică din Testul NT Build 492. Aceste metode au permis determinarea rezistivității betonului și a vitezei de propagare a coroziunii cu testul rapid (RCPT) și identificarea adâncimii de pătrundere și a coeficienților de migrație a ionilor de clor prin metoda colorimetrică. Rezultatele au fost analizate și corelate cu tendințele de porozitate, cu adâncimea stratului de carbonatare, cu rezistențele la compresiune, prin comparare cu nivelul rezultatelor obținute pe amestecul de control realizat cu materiale convenționale. Pe baza rezultatelor acestei cercetări următoarele concluzii pot fi prezentate:

- Sarcinile electrice de trecere (Q) obținute prin testul rapid (RCPT) la compozițiile cu zgură au condus la încadrarea acestora în clasa de penetrabilitate scăzută, iar pentru amestecul de control în clasa de penetrabilitate moderată, conform cu clasificarea din ASTM C1202.
- Viteza de coroziune calculată în funcție de rezistivitatea betonului a fost sub valoarea de 2 $\mu\text{m}/\text{an}$ la toate compozițiile realizate determinând astfel încadrarea în clasa de coroziune “foarte scăzută”, conform cu clasificarea din Tabelul 4-4.
- Temperatura înregistrată în soluția de clorură de sodiu utilizată pentru testului rapid (RCPT) nu a influențat sarcinile electrice trecute prin probele de beton, ceea ce confirmă validarea testului.
- Valorile mari ale rezistivității pentru amestecurile cu conținut de zgură față de cele martor, la pătrunderea ionilor de clor, se datorează concentrației reduse de clorură de sodiu (de 3%) conform testului rapid (RCPT) și în deosebi a prezenței în amestec a zgurii de furnal.

- Datorită porozității aparente mai reduse a betoanelor cu zgură de furnal, coeficienți de migrație și adâncimea de pătrundere a ionilor de clor din aceste compoziții au înregistrat valori mai mici comparativ cu amestecul de control.
- Penetrabilitatea ionilor de clor prin beton evaluată prin metoda colorimetrică împreună cu rezultatele caracteristicilor fizice și mecanice testate au susținut rezultatele obținute prin testul rapid (RCPT).
- Adâncimea stratului carbonatat a fost inexistentă, ceea ce a redus riscul de coroziune a armăturii din amestecurile realizate, rezultatul fiind atribuit compactități crescute din matricea de beton.
- Proporțiile de zgură de furnal în combinație cu materialele convenționale utilizate au fost cele mai eficiente la betoanele turnate în seria doua pentru compozițiile de betoane rutiere S 54/20 și S 54/60. Rezultatele cercetărilor din acest capitol au fost publicate sub formă de articol științific în lucrarea [328].

13 Contribuții inovative, recomandări practice pentru utilizarea BcR-S și concluzii finale

13.1 Contribuții inovative:

Cercetările desfășurate în laboratoarele UTCN evidențiază următoarele contribuții inovative:

- Proiectarea unor noi compoziții de betoane rutiere folosind ca materie primă produse secundare rezultate de la Combinatul siderurgic din Galați. Utilizarea pentru prima dată a zgurii de furnal sub cele două forme de procesare, zgura granulată și măcinată (GGBS) ca liant și zgura răcită în aer (ACBFS) concasată sub formă de agregat fin, în compoziția betoanelor rutiere reprezintă o abordare originală la nivel național.
- Determinarea și analizarea celor mai importante caracteristici fizice și chimice ale pulberii de zgură și ale agregatelor concasate din zgură de furnal, care au impact favorabil sau defavorabil asupra durabilității betoanelor rutiere.
- Evaluarea elementelor periculoase din pulberea de zgură (GGBS) și din compozițiile de betoanelor rutiere care au impact negativ asupra mediului.

În plan secundar, dar cu o importanță deosebită, lucrarea reprezintă un ghid de testare în laborator prin metode moderne utilizate pentru a evalua următoarele performanțe ale BcR-S specifice criteriilor de durabilitate:

- Evaluarea rezistenței la îngheț-dezghet utilizând trei metode de testare: prin măsurarea materialului exfoliat de la suprafața betonului cu metoda CEN/TS 12390 completată cu SS 137244, prin evaluarea fisurării interne a structurii utilizând metoda CEN/TR 15177 și prin metoda distructivă în acord cu standardul național SR 3518.
- Determinarea rezistenței la uzură, prin evaluarea pierderii în volum, utilizând discul abraziv al aparatului Böhme, conform cu standardul SR EN 1338.
- Evaluarea rezistenței la coroziune a armăturii (înglobată în îmbrăcămințile rutiere din beton pentru realizarea rosturilor de contact și de dilatație) utilizând testul rapid de penetrare a ionilor de clor (RCPT)

în acord cu ASTM C1202, completat de metoda colorimetrică (NT Build 492) care a permis determinarea coeficienților de migrare a ionilor de clor prin beton.

- Determinarea adâncimii stratului de carbonatare folosind ca indicator soluție cu 1% fenolftaleină pulverizată pe suprafața betonului imediat după despicarea probelor, în acord cu standardul SR CR 12793.
- Investigarea porozității prin tehnica (RMN) pe eșantioane testate la 300 de cicluri de îngheț-dezgeț realizată pentru prima dată la nivel de cercetare științifică.
- Identificarea porilor capilari și măsurarea distanței dintre pori pe probele de beton, utilizând microscopia electronică de scanare (SEM).
- Investigații pe pulbere și pe agregatele din zgură pentru identificarea compoziției mineralogice și a conținutului de fază amorfă și cristalină, utilizând tehnica (XRD).
- Validarea rezultatelor prin stabilirea unor relații matematice între caracteristicile fizice și mecanice rezultate, a căror coeficienți de corelație au confirmat concordanța tehnicilor diferite utilizate în programul experimental desfășurat. Relațiile matematice au arătat că rezultatele rezistențelor la compresiune au fost în relație direct proporțională cu cele ale vitezei de propagare a ultrasunetelor (UPV) și ale modulului de elasticitate dinamic ($E_{d,n}$) obținute prin tehnice nedistructive (SR EN 12504-4). Evoluția rezistențelor la compresiune au fost invers proporționale cu valorile rezultate pentru pierderile de volum din încercarea la uzură și cu volumul porilor permeabili determinat atât prin metoda standard (ASTM C642) cât și prin tehnica (RMN) și (SEM). În cele din urmă evoluția conținutului de pori permeabili (ASTM C642) au avut aceeași tendință de creștere cu cel al coeficienților de migrație a ionilor de clor determinați cu metoda colorimetrică (NT Build 492).

13.2 Recomandări practice pentru utilizarea BcR-S

- Utilizarea pulberii de zgură (GGBS) adăugată la prepararea betonului rutier, odată cu cimentul Portland, sub formă de constituent suplimentar cu caracteristici cementoase (CSCC) are două avantaje comparativ cu utilizarea cimentului cu adaos de zgură. Mai întâi că se poate controla indicele de activitate la 28 de zile (IA_{28}) prin finețea de măcinare a pulberii de zgură (GGBS), iar pe urmă proporțiile de pulbere de zgură (GGBS) pot fi stabilite în funcție de cerințele proiectului.

- Agregatele din zgură (ACBFS) au avantajul că nu sunt reactive la alcaliile din ciment și formează legături mai bune cu pasta de ciment, datorită unei suprafețe mai aspre obținută din prelucrarea prin concasare. Utilizarea acestora la prepararea betonului rutier în stare saturată cu suprafața uscată (SSD) împreună cu aditivi superplastifianți și antrenori de aerului conduc la îmbunătățirea lucrabilității și durabilității betoanelor expuse la îngheț-dezgeț.
- Betoanele rutiere (BcR-S) realizate în acest program experimental încadrate în clasa BcR 5.0 se recomandă a fi utilizate ca îmbrăcăminți rutiere într-un singur strat, în sistem de cofraje fixe, la drumuri cu trafic greu și foarte greu, pentru drumurile județene și comunale încadrate până la clasa tehnică III.
- Betoanele rutiere (BcR-S) încadrate în clasa BcR 4.5, proiectate în aceleași condiții de punere în operă se recomandă a fi utilizată pentru: drumuri cu trafic mediu, pentru drumurile județene și comunale încadrate până la clasa tehnică IV.
- Toate compozițiile (BcR-S) au aplicabilitate pentru realizarea platformelor de staționare în vămi, platforme aeroportuare, platforme pentru depozitarea transcontainerelor, platforme de parcare, drumuri de exploatare miniere, forestiere și agricole, ținând seama de componența traficului rutier.

13.3 Concluzii finale

- Reintroducerea în circuitul economic a zgurii de furnal rezultată ca produs secundar din industria siderurgică de obținere a fontei are la bază principiul dezvoltării sustenabile. Încorporarea zgurii de furnal în compoziția betoanelor (BcR-S) în timp va înregistra beneficii prin economii legate de costurile de materiale, de întreținere în exploatare și de conservare a resurselor naturale având impact pozitiv asupra mediului înconjurător.
- În prezent Combinatul siderurgic din Galați comercializează zgură de furnal granulată (nemăcinată) la prețul de 18 euro/to fără TVA și a agregatelor concasate (ACBFS) provenite din zgură răcită în aer la prețul de 3.2 euro/to fără TVA. O analiză sumară a costurilor arată că agregatele (ACBFS) reprezintă aproximativ 12% din costul nisipului natural estimat la 27.40 euro/to. Costul zgurii granulate nu poate fi comparat cu al cimentului CEM I 42.5R, deoarece în prețul zgurii granulate nu este inclus costul pentru măcinarea acesteia. Însă un

exemplu poate constitui lucrarea [329] prin care s-a apreciat că zgura măcinată (GGBS) destinată înlocuirii cimentului necesită, în procesul de obținere a clincherului de ciment și de măcinare al acestuia, aproximativ 25% din energia necesară pentru fabricarea unei cantități echivalente de ciment Portland. Un alt exemplu reprezintă economia de costuri din utilizarea (GGBS), realizată în China pentru zonele în care se găsesc marile capitale ale acesteia. A fost estimată o economie de 27%, în anul 2006 [330], în care prețul de comercializare a pulberii de zgură (GGBS) a fost de 62% din prețul cimentului Portland, stabilit pentru zona geografică Beijing, și de 75% în zona Chongqing.

- Ca urmare extinderea domeniilor de utilizare a produselor secundare de tip zgură de furnal în compoziția betoanelor rutiere la noi în țară este justificată având în vedere atât experiența internațională cât și rezultatele evaluate în timp la 7, 28, 56, 90, 150 și 200 de zile ale cercetărilor experimentale prezentate în această carte, legate de caracteristicile de durabilitate a betoanelor (BcR-S).
- Lucrarea de cercetare reprezintă un prim pas pentru utilizarea în practica curentă a zgurii de furnal la prepararea betoanelor și are în vedere standardizarea betoanelor rutiere (BcR-S), similar cu normativul CD 147:2002 pentru execuția betoanelor rutiere cu adaos de cenușă de termocentrală. Acest deziderat presupune respectarea cu strictețe a valorilor limită pentru procente de substituție a materialelor naturale cu zgură de furnal în compoziția betonului proiectat în funcție de componența traficului rutier și de clasele de expunere în exploatare determinate de condițiile de mediu.
- Deopotrivă se impune includerea în cerințele de proiectare a următoarelor sarcini deosebit de importante pentru aprecierea unei comportări durabile a betonului (BcR-S):
- Limitele admise și obligativitatea testelor pentru caracteristicile fizice și chimice ale lianților și ale agregatelor care în timp pot să producă expansiunea betonului rutier, precum reacția (ASR).
- Evaluarea rezistenței la îngheț-dezghet prin metoda de măsurare a variației rezistenței la compresiune, utilizată la noi în țară în mod curent, nu acoperă cerințele specifice betoanelor rutiere care sunt expuse fenomenului de îngheț-dezghet cu agenți de dezghetare. Cea mai indicată metodă fiind determinarea cantității de material exfoliat de la suprafața betonului menținut la îngheț-dezghet în prezența agenților de dezghetare.

- Completarea cerințelor existente în NE 014:2002 legate de caracteristicile betonului întărit prin măsurarea masei exfoliate cauzată de agenții de dezghețare, evaluarea rezistenței la uzură, evaluarea coroziunii inițiată de clor și de coroziunea din carbonatare. Împreună cu evaluarea caracteristicilor fizice principale, precum permeabilitatea și porozitatea acestor tipuri de betoane, rezultatele vor furniza datele necesare pentru aprecierea unei comportări durabile a betoanelor rutiere cu zgură de furnal pe termen lung.

14 REFERINȚE

- [1] I.Marinescu, C.Anghelache, L.Ene, and M.G.Anghel, "Analiza modernizării infrastructurii rutiere," *RRS Supl. 5/2018*.
- [2] I. Solonenko, "The use of cement concrete pavements for roads, depending on climatic conditions," *Teh. Glas.*, vol. 13, no. 3, pp. 235–240, Sep. 2019, doi: 10.31803/tg-20190518181647.
- [3] AND-605, "Normativ privind mixturile asfaltice executate la cald. Condiții tehnice de proiectare, preparare și punere în operă amixturilor asfaltice.," in *Reglementare din 29/11/2017*, no. 126, 2006, pp. 1–24.
- [4] M.Iliescu and R.Ciocan, "Tehnologii performante aplicate la drumuri," in *Editura U.T. Press, Cluj-Napoca, ISBN978-606-737-082-9*, 2015.
- [5] Z. Li, "Introduction to Concrete," *Advanced Concrete Technology*, pp. 1–22, 2011.
- [6] G.P.Taylor, T.Van Dam, L.Sutter, and G.Fick, "Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement," in *A State-of-the-Practice Manual, Part of InTrans Project 13-482, National Concrete Pavement Technology Center at Iowa State University, Second Edition Guide*, 2019.
- [7] K. Ngozi-Bullock, "An Introduction to Pavement Sustainability SEAUPG's," *Sustainable Pavement Program - Sustainability - Pavements - Federal Highway Administration (dot.gov)*, 2019.
- [8] ACI-201.2R-08, "Guide to Durable Concrete," in *Reported by ACI Committee 201*, 2008.
- [9] D.P.Georgescu, "Îndrumător de proiectare a durabilității betonului în conformitate cu Anexa națională de aplicare a SR EN 206-1. CLASE DE DURABILITATE," in *ISBN 978-973-0-04914-5, Tipografia Everest, București*, 2001.
- [10] SR-EN 206+A1:2017, "Beton. Specificație, performanță, producție și conformitate."
- [11] NE 014:2002, "Normativ pentru execuția îmbrăcăminților rutiere din beton din ciment în sistemele cofraje fixe și glisante," *BucureștiMatrix Rom, 2007 ISBN 978-973-755-185-6*, 2002.
- [12] NE 012-1:2007, "Cod de practică pentru executarea lucrărilor din beton armat și din beton precomprimat.Parte 1: Producerea Betonului," .

- [13] A.M.Neville, "Proprietățile betonului," in *Editura Tehnică București*, 1979.
- [14] SR EN 197-1:2011, "Ciment Partea 1: Compoziție, specificații și criteriile de conformitate ale cimenturilor uzuale," .
- [15] R. Alizadeh; J.Beaudoin; L. Raki; J.Beaudoin; T.Sato, "Cement and concrete nanoscience and nanotechnology," *Materials (Basel)*., vol. 3, no. 2, pp. 918–942, 2010, doi: 10.3390/ma3020918.
- [16] D.W.Hadley, W.L.Dolch, and S.Diamond, "On the occurrence of hollow-shell hydration grains in hydrated cement paste," *Cement and Concrete Research*, vol. 30, no. 1. Elsevier Science Ltd, pp. 1–6, Jan. 01, 2000, doi: 10.1016/S0008-8846(99)00207-0.
- [17] S. H Kosmatka, B Kerkhoff, WC Panarese, "Design and Control of Concrete Mixtures," *Portland Cement Association ISBN: 0-89312-272-6*, 2011. .
- [18] W. Kurdowski, *Cement and Concrete Chemistry*. Springer Netherlands, 2014.
- [19] ASTM C989:1999, "Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars," in *ACI JOURNAL, Proceedings V. 54, No. 3, Sept., pp. 205-232.*, .
- [20] SR-EN 15167-1:2007, "Zgură granulată de furnal măcinată pentru utilizare în beton, mortar și pastă. Partea 1: Definiții, specificații și criteriile de conformitate," .
- [21] ASTM C618-19, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete." <https://www.astm.org/Standards/C618> (accessed Mar. 20, 2021).
- [22] SR EN 450-1:2012, "Cenușă zburătoare pentru beton. Partea 1: Definiții, condiții și criteriile de conformitate."
- [23] SR EN 13263-1/13263+A1:2009, "Silice ultrafină pentru beton. Partea 1: Definiții, condiții și criteriile de conformitate."
- [24] S.C.A., "Slag Cement Asociation," <https://www.slagcement.org/>.
- [25] ACI-233R-03, "Slag Cement in Concrete and Mortar," *American Concrete Institute*, 2003.
- [26] L.Nicolescu, "Betoane hidrotehnice pentru lucrări de îmbunătățiri funciare," in *Editura CERES București*, 1987.
- [27] K.D.Smith, D.A.Morian, and T. V. Dam, "Use of Air-Cooled Blast Furnace Slag as Coarse Aggregate in Concrete Pavements— A Guide to Best Practice," 2012.
- [28] D. W. Lewis, "Properties and Uses of Iron and Steel Slags," *Tech. Pap. MF 182-6. Natl. Slag Assoc. Pleas. Grove, UT.*, 1982.

- [29] C. Recycled Materials Resource, "UG-Mat Blast Furnace Slag Recycled Materials Resource Center," <https://rmrc.wisc.edu/ug-mat-blast-furnace-slag/>.
- [30] B. Mather, "Laboratory Tests of Portland Blast- Furnace Slag Cements," in *ACI JOURNAL, Proceedings V. 54, No. 3, Sept., pp. 205-232.*, 1957.
- [31] J. Bijen, "Blast Furnace Slag Cement For Durable Marine Structures," in *Association of the Netherlands Cement Industry*, 1998.
- [32] W. Hogan., FJ. Meusel., "Evaluation for Durability and Strength Development of a Ground Granulated Blast-Furnace Slag," *Cem. Concr. Aggregates, V. 3, No. 1, Summer, pp. 40-52.*, 1981.
- [33] A. Thomas, "Metallurgical and Slag Cements, the Indispensable Energy Savers," *Gen. Pract. IEEE Cem. Ind. 21 Tech. Conf. 108 pp.*, 1979.
- [34] D. W. Lewis, "History of Slag Cements," in *Symposium on Slag Cement, University of Alabama, Birmingham, Ala.*, 1981.
- [35] M. Mary, "Preparation du Ciment du Latier par Voie Humide le Proces Trief et Son Aplication au Barrage de Bort-les-orgues," in *Annales de l'institute technique du Batiment et des travaux publiques, No. 200, July-Aug.*, 1951.
- [36] S.C.A., "Case Study - Reconstruction of the I-96 Highway," in <https://www.slagcement.org/casestudies/id/25/i-96-reconstruction.aspx>, 2014.
- [37] ASTM C595, "Standard Specification for Blended Hydraulic Cements," 2015.
- [38] S.C.A., "JFK International Airport - Slag Cement Case Study," in <https://www.slagcement.org/casestudies/id/15/jfk-international-airport.aspx>, 2015.
- [39] S.C.A., "Case Study - Replacing Concrete Slabs on the I-275 Highway Across Wayne and Oakland, Michigan," in <https://www.slagcement.org/casestudies/id/4/revive-i-275.aspx>, 2017.
- [40] S.C.A., "Case study - Extension of the parking platform at St. Pete-Clearwater in the Pinellas Region, Florida," in <https://www.slagcement.org/casestudies/id/2/st-pete-clearwater-international-airport.aspx>, 2017.
- [41] S.C.A., "Case Study - Tampa International Airport," in <https://www.slagcement.org/casestudies/id/42/tampa-airport-taxiway.aspx>, 2018.

- [42] S.C.A., "Case study HWY 50 Highway in Hernando County.," in <https://www.slagcement.org/casestudies/id/86/hwy-50-paving.aspx>, 2020.
- [43] M. Regourd, "a. Characterization of Thermal Activation of Slag Cements.," in *Proceedings, 7th International Congress on the Chemistry of Cements (Paris), Septima, Paris, V. 2, III-3, pp. 105-111.*, 1980.
- [44] M. Regourd, "b. Microanalytical Studies (X-Ray Photo Electron Spectrometry) of Surface Hydration Reactions of Cement Compounds," in *Philosophical Transactions (London), Series A, V. 310 (No. 1511) R.S., pp. 85-91.*, 1980.
- [45] M. Regourd, "c. Structure and Behavior of Slag Portland Cement Hydrates," in *Proceedings, 7th International Congress on the Chemistry of Cements (Paris), Septima, Paris, V. 1, III-2, pp. 10-18.*, 1980.
- [46] V. D. Vanden Bosch, "Performance of Mortar Specimens in Chemical and Accelerated Marine Exposure," in *Performance of Concrete in Marine Environment, SP-65, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 487-507.*, 1980.
- [47] M. Roy and G. M. Idorn, "Hydration, Structure, and Properties of Blast Furnace Slag Cements, Mortars, and Concrete," in *ACI JOURNAL, Proceedings V. 79, No. 6, Nov.- Dec. pp. 445-457.*, 1982.
- [48] K. Wood, "Twenty Years of Experience with Slag Cement," in *Symposium on Slag Cement, University of Alabama, Birmingham.*, 1981.
- [49] F. S. Fulton, "The Properties of Portland Cement Containing Milled Granulated Blast-Furnace Slag," in *Monograph, Portland Cement Institute, Johannesburg, pp. 4-46.*, 1974.
- [50] D. R. José, V. Adelardo, C. Leiva, M.-D. la Concha, M. Antonio, and H. Cifuentes, "Analysis of the utilization of air-cooled blast furnace slag as industrial waste aggregates in self-compacting concrete," *Sustain.*, vol. 11, no. 6, 2019, doi: 10.3390/su11061702.
- [51] Pacheco-Torgal, F ; Ding, Y ; Jalali, S., "Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles)," *Constr. Build. Mater.* 30, 714–724., 2012.
- [52] O. Corbu, A. Puskas, A. V. Sandu, A. M. Ioani, K. Hussin, and I. G. Sandu, "New Concrete with Recycled Aggregates from Leftover

- Concrete.No Title," *Appl. Mech. Mater. (Vols. 754–755, pp. 389–394)*, 2015.
- [53] W. S. Association., "Steel Statistical Yearbook 2014," *World Steel Association: Brussels, Belgium*, 2014. .
- [54] A. S. Association, "A Guide to the Use of Slag in Roads. Revision 2," *Australas. Slag Assoc. Inc. PO BOX 1194 Wollongong NSW 2500 Aust.*, 2002.
- [55] A. Nippon Slag, "Amounts of Blast Furnace Slag Produced and Used in FY 2017," <https://www.slg.jp/e/index.htm>, 2017. .
- [56] "<https://en.wikipedia.org/wiki/Dacite>." .
- [57] B. J. Wigum, P. Holmgeirsdottir, S. W. Danielsen, and O. V. Anderson, "Production and Utilisation of Manufactured Sand for Concrete Purposes. Journal No.128-03. Hönnun, Reykjavik," *Iceland.*, 2004.
- [58] P.Quiroga and D.Fowler, "Chemical Admixtures and Supplementary Cementing Materials in Concrete with High Microfines.," 2004.
- [59] ASTM C33/C33M, "Standard Specification for Concrete Aggregates," *Am. Soc. Test. Mater.*
- [60] ACI Education Bulletin, "Aggregates for concrete, Developed by Committee E-701, Materials for Concrete Construction," *Am. Concr. Inst.*, 2006.
- [61] SR EN 12620/12620+A1:2008, "Agregate pentru beton."
- [62] "<https://www.understanding-cement.com/alkali-silica.html>."
- [63] ASTM-C1260., "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)."
- [64] SR 5440:2009, "Incerări pe betoane de ciment. Verificarea reacției alcalii-agregate."
- [65] "<https://www.libertyreadymix.com/2017/06/concrete-popouts-causes-and-prevention-tips>."
- [66] Y-W.Liu, T-H.Yen, and T.Hsu, "Abrasion Erosion of Concrete by Water-borne Sand," *Cem. Concr. Res. pp. 1814-1820.*, 2005.
- [67] JISA-5011-1:2013, "Blast furnace slag aggregate," 2013.
- [68] "Nippon steel & Sumitomo metal technical report," 2015.
- [69] JSCE:1993, "Guidelines for construction using blast-furnace slag aggregate concrete," *Transl. from Concr. Libr. NO. 76 Publ. by JSCE*.
- [70] J. Grove, F. Bektas, and H. Gieselman, "Southeast Michigan Local Road Concrete Pavement Durability Study," *InTrans Proj. Reports. 152. http://lib.dr.iastate.edu/intrans_reports/152.*, 2006.
- [71] W.H.Chesner, R.J.Collins, and M.H.Mackay, "User Guidelines for

- Waste and By-Product Materials in Pavement Construction. FHWA-RD-97-148.,” *Fed. Highw. Adm. McLean, VA*, 2008.
- [72] A. Naranjo, “Clustering of air voids around aggregates in air entrained concrete,” <http://hdl.handle.net/2152/46984>, 2007. .
- [73] “https://www.mineralproducts.org/prod_slag02.htm.”
- [74] G.Wang and R.Thompson, “Slag Use in Highway Construction— The Philosophy and Technology of its Utilization,” *Int. J. Pavement Res. Technol. Vol. 4, No. 2*, 2011.
- [75] D. M. Hammerling, “Calcium Sulfide in Blast Furnace Slag Used as Concrete Aggregate. M.S. Thesis.,” *Michigan Technol. Univ. Houghton, MI*, 1999.
- [76] L. M. Juckes, “Dicalcium Silicate in Blast-Furnace Slag: A Critical Review of the Implications for Aggregate Stability”,” *Miner. Process. Extr. Metall. Vol. 111, No. 3, pp. 120–128(9)*, 2002.
- [77] ASTM C114-2018, “Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement.”
- [78] K. W. Peterson, D. M. Hammerling, L. L. Sutter, T. J. Van Dam, and G. R. Dewey., “Oldhamite: Not Just in Meteorites,” *Proc. 21st Int. Coldhamite Not Just Meteoritesonference Cem. Microsc. Las Vegas, NV*, 1999.
- [79] S. R. Rao, “Resource Recovery and Recycling from Metallurgical Wastes.,” *Elsevier, Amsterdam*, 2006.
- [80] ACI 213R-03, “Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete,” *Am. Concr. Inst. Farmingt. Hills, MI*, 2003.
- [81] SR EN 1008:2009, “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,” .
- [82] SR EN 12350-7:2009, “Testarea betonului proaspăt. Conținut de aer. Metode de presiune.”
- [83] SR EN 934-2+A1:2012, “Aditivi pentru beton, mortar și pastă.”
- [84] ASTM C494 / C494M-19, “Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete,” *ASTM Int. West Conshohocken, PA*, 2019, www.astm.org, 2019.
- [85] D.Whiting and W.Dziedzic, “Resistance to Chloride Infiltration of Superplasticised Concrete as Compared with Currently Used Concrete Overlay Systems,” *FHWA/OH-89/009, U.S. Dep. Transp. Fed. Highw. Adm. 86, pp*, 1989.
- [86] A. Pop, C. Badea, and I. Ardelean, “The Effects of Different Superplasticizers and Water-to-Cement Ratios on the Hydration

- of Gray Cement Using T2-{NMR},” *Appl. Magn. Reson.*, vol. 44, no. 10, pp. 1223–1234, Jul. 2013, doi: 10.1007/s00723-013-0475-5.
- [87] G. J. Verbeck, “Hardened concrete – pore structure,” in *A.S.T.M. Sp. Tech. Publien 169*, 136-42., 1955.
- [88] C. Powers and T. T.I. Brownyard, “Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste (Nine parts),” in *J. Amer. Concr. Inst. 43*, 249-336., 1946.
- [89] K.K.Aligizaki, “Pore Structure of Cement-Based Materials:Testing, Interpretation and Requirements,” in *Taylor&Francis, London and New York*, 432., 2006.
- [90] P.Feldman and R.F.Sereda, “A new model for hydrated Portland cement paste and its practical implications,” *Eng. J. Can. 1970*, 53, 53–59., 1970.
- [91] I.Ionescu;T.Ispas, “Proprietățile si tehnologia betoanelor,” in *Editura tehnica Bucuresti*, 1997.
- [92] R. M. Kowalczyk, A. M. Gajewicz, and P. J. McDonald, “The mechanism of water{\textdash}isopropanol exchange in cement pastes evidenced by {NMR} relaxometry,” *{RSC} Adv.*, vol. 4, no. 40, pp. 20709–20715, 2014, doi: 10.1039/c4ra00889h.
- [93] BARON, “Le beton hydraulique, connaissance et partique.,” *Paris*, *Ed. Press. L E cole Natl. des Ponts Chaussees*, 1982.
- [94] D. Harris, Y. Farnam, R. Spragg, P. Imbrock, and W. J. Weiss, “Early Detection of Joint Distress in Portland Cement Concrete Pavements,” Purdue University, Sep. 2015. doi: 10.5703/1288284315531.
- [95] CD-147:2002, “Normativ pentru execuția straturilor rutiere din beton cu adaos de cenușa de termocentrală,” .
- [96] SR-EN 933-1:2012, “Încercări pentru determinarea caracteristicilor geometrice ale agregatelor. Partea 1: Determinarea granulozității. Analiza granulometrică prin cernere,” .
- [97] C.22-92., “Normativ pentru executarea îmbrăcăminților rutiere din beton de ciment în sistemul de cofraje fixe,” .
- [98] SR EN 196-6:2010, “Metode de încercare a cimenturilor. Partea 6: Determinarea fineții.”
- [99] A.G.Netea, D.L.Manea, and C.Aciu, “Materiale de construcții și chimie aplicată.,” in *UTPRESS, Cluj-Napoca*, 2010.
- [100] SR EN 1015-11:2002/A1:2007, “Metode de încercare a mortarelor pentru zidărie. Partea 11: Determinarea rezistenței la încovoiere și compresiune a mortarului întărit,” .

- [101] STAS-2414:1991, "Determinarea densității, compactității, absorbției de apă și porozității betonului întărit."
- [102] SR 3518: 2009, "Încercări pe betoane. Determinarea rezistenței la îngheț-dezghet prin măsurarea variației rezistenței la compresiune și/sau modulului de elasticitate dinamic relativ."
- [103] SR EN 12350-6:2002, "Încercare pe beton proaspăt. Partea 6: Densitate."
- [104] SR EN 12350-2:2009, "Încercări pe beton proaspăt. Partea 2: Încercarea de tasare."
- [105] SR EN 12390-2:2009, "Testarea betonului întărit-Realizarea și întărirea probelor pentru testele de rezistență."
- [106] SR EN 12390-5:2009, "Încercare pe beton întărit. Partea 5: Rezistența la întindere prin încovoiere a epruvetelor."
- [107] SR-EN 12390-3:2009/AC:2011, "Testarea betonului întărit - Rezistența la compresiune a probelor."
- [108] Raport-527, "Raport încercări zgura granulată și Centralizator caracteristici 2018-2020," *Lib. Galați SA*, 2021.
- [109] A. Moanță, "Use the ESP dust as admixture and additional constituent in cement grinding," *Build. Mater. vol. XXXIV, nr.1.2004.*, 2004.
- [110] SR EN 12457-2:2003, "Caracterizarea deșeurilor. Levigare. Test de verificare a conformității pentru levigarea deșeurilor granulare și a nămolurilor. Partea 2: Test cu o etapă pe șarjă la raportul lichid - solid de 10 l/kg pentru materiale cu dimensiunea particulei sub 4 mm (f.)"
- [111] SR EN 12457-4:2003, "Caracterizarea deșeurilor. Levigare. Test de verificare a conformității pentru levigarea deșeurilor granulare și a nămolurilor. Partea 4: Test cu o etapă pe șarjă la raportul lichid - solid de 10 l/Kg pentru materiale cu dimensiunea particulei sub 10 mm."
- [112] SR EN 16192:2012, "Caracterizarea deșeurilor - analiza eluațiilor."
- [113] SR EN ISO 10523:2012, "Calitatea apei. Determinarea pH-ului."
- [114] SR EN ISO11885:2009, "Calitatea apei - determinarea elementelor selectate prin spectrometrie de emisie optică cu plasmă cuplată inductiv (icp-oes)."
- [115] ORDIN-95:2005, "Stabilirea criteriilor de acceptare și a procedurilor preliminare pentru acceptarea deșeurilor pentru eliminare și lista națională a deșeurilor acceptate în fiecare depozit de deșeuri."
- [116] Council Directive 1999/31/EC, "Council Directive 1999/31/EC of

26 April 1999 on the landfill of waste.”

- [117] SR EN 13242+A1:2008, “Agregate pentru materiale nelegate și legate hidraulic pentru utilizare în lucrări de construcții civile și construcții de drumuri.”
- [118] SR 667:2001, “Agregate naturale și piatră prelucrată pentru drumuri.”
- [119] SR EN 1097-6:2013, “Testarea proprietăților mecanice și fizice ale agregatelor - Partea 6: Determinarea densității particulelor și a absorbției apei.”
- [120] Raport-308, “Verificarea reacției alcalii-silice prin metoda chimică,” *Lab. Univ. Teh. Constr. Bucuresti*, 2020.
- [121] SR-EN 12390-8:2009, “Testarea betonului întărit-Partea 8: Adâncimea de pătrundere a apei sub presiune.”
- [122] SR EN 12504-4:2004, “Cercetări pe beton. Partea 4: Determinarea vitezei de propagare a ultrasunetelor,” .
- [123] CEN/TR 15177:2006, “Testing the freeze-thaw resistance of concrete,” *Int. Struct. damage*.
- [124] CEN/TS 12390-9:2017, “Technical Specifications of Testing hardened concrete - Part 9: Freeze-thaw resistance – Scaling.”
- [125] SS 137244:2005, “Standard Concrete testing - Hardened concrete - Scaling at freezing,” (*Swedish Stand. Institute*).
- [126] A.Shpak and S.Jacobsen, “Requirements and recommendations for frost durable concrete,” in *DaCS Durable advanced Concrete Solutions (ISBN: 978-82-7482-116-3)*, 2019.
- [127] D.J. Niedźwiedzka, “Influence of pre-wetted lightweight aggregate on scaling resistance of high performance concrete,” *3rd Eur. Conf. Adv. Mater. Technol. Bucharest, Rom. Vol.*, 2002.
- [128] GB/T 50082:2009, “Standard Chinese for Test Methods of Long-term Performance and Durability of Ordinary Concrete,” (*Ministry Hous. Urban-Rural Dev. China Beijing China Archit. Build. Press*).
- [129] GOST 10060:2012, “Standard Freeze-thaw resistance,” (*Russian Stand.*
- [130] A. Bede, A. Scurtu, and I. Ardelean, “NMR relaxation of molecules confined inside the cement paste pores under partially saturated conditions,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 89, pp. 56–62, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.cemconres.2016.07.012.
- [131] R. Holly, E. J. Reardon, C. M. Hansson, and H. Peemoeller, “Proton Spin-Spin Relaxation Study of the Effect of Temperature on White Cement Hydration,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 90, no. 2, pp. 570–577, Feb. 2007, doi: 10.1111/j.1551-2916.2006.01422.x.

- [132] A.C.A.Muller, K.L.Scrivener, A.M.Gajewicz, and P.J.McDonald, "Use of bench-top NMR to measure the density, composition and desorption isotherm of in cement paste," *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 178, pp. 99–103, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.micromeso.2013.01.032.
- [133] F. F. Paméla, S. Caré, J. Magat, and T. Chaussadent, "Drying effect on cement paste porosity at early age observed by {NMR} methods," *Constr. Build. Mater.*, vol. 29, pp. 496–503, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.012.
- [134] A. Pop, A. Bede, M. C. Dudescu, F. Popa, and I. Ardelean, "Monitoring the Influence of Aminosilane on Cement Hydration Via Low-field {NMR} Relaxometry," *Appl. Magn. Reson.*, vol. 47, no. 2, pp. 191–199, 2015, doi: 10.1007/s00723-015-0743-7.
- [135] D. D. B. Nergis, P. Vizureanu, I. Ardelean, A. V. Sandu, O. C. Corbu, and E. Matei, "Revealing the Influence of Microparticles on Geopolymers' Synthesis and Porosity," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 14, p. 3211, Jul. 2020, doi: 10.3390/ma13143211.
- [136] L. Venkataramanan, Y.-Q. Song, and M. D. Hurlimann, "Solving Fredholm integrals of the first kind with tensor product structure in 2 and 2.5 dimensions," *{IEEE} Trans. Signal Process.*, vol. 50, no. 5, pp. 1017–1026, 2002, doi: 10.1109/78.995059.
- [137] S.W.Provencher, "CONTIN: A general purpose constrained regularization program for inverting noisy linear algebraic and integral equations," *Comput. Phys. Commun.* 27, 229–242, 1982, doi: 10.1016/0010-4655(82)90174-6.
- [138] ASTM-C666/C666M-03., "Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing," in *Annual book of ASTM Standards. Philadelphia, PA,USA: American Society for Testing and Materials.*, 2008.
- [139] C. Magureanu, I. Sosa, C. Negrutiu, and B. Heghes, "Physical and mechanical properties of ultra high strength fiber reinforced cementitious composites," *Spec. Loadings Struct. Appl. B. H. Oh, al. ©2010 Korea Concr. Institute, ISBN 978-89-5708-182-2*, Jun. 2010.
- [140] ASTM C 642, "Standard test method for Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete," in *ASTM International, West Conshohocken*, 2006.
- [141] A. Mardani-Aghabaglou, K. Ramyar, and Andiç-Çakirir Özge, "Freeze-thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by

- maximum density method," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 37, pp. 259–266, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.01.009.
- [142] SR EN 1338:2004/AC 2006, "Pavele de beton. Condiții și metode de încercări."
- [143] A. Król, Z. Giergiczny, and J. Kuterasińska-Warwas, "Properties of Concrete Made with Low-Emission Cements CEM II/C-M and CEM VI," *Materials (Basel)*, 2020.
- [144] Z. Giergiczny, "Fly ash and slag," *Cem. Concr. Res.* 124, 487–495. [CrossRef], 2019.
- [145] A. Król, "The role of the granulated blast furnace slag in sustainable cement production and waste management," *Econ. Environ. Stud.* 17, 613–624. [CrossRef], 2017.
- [146] A. Król, "The role of the silica fly ash in sustainable waste management. In Proceedings of the E3S Web of Conferences," *1st Int. Conf. Sustain. Energy Environ. Dev. (SEED), Cracow, Poland, 17–19*, vol. Volume 10., 2016.
- [147] M. I. Khan and C. J. Lynsdale, "Strength, permeation, and carbonation of high-performance concrete," *Cem. Concr. Res.* 32, 123–131. [CrossRef], 2002.
- [148] ASTM C 1202, *Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. 2000.
- [149] G. A. Julio-Betancourt and R. D. Hooton, "Study of the Joule Effect on Rapid Chloride Permeability Values and Evaluation of Related Electrical Properties of Concrete," *Cem. Concr. Res.* 34(6) 1007–1015, 2004.
- [150] M. T. Bassuoni; M. L. Nehdi; T. R. Greenough, "Enhancing the Reliability of Evaluating Chloride Ingress in Concrete Using the ASTM C 1202 Rapid Chloride Penetrability Test," *J. ASTM Int. Vol. 3, No. 3*, 2006.
- [151] L. Sadowski; M. Nikoo, "Corrosion current density prediction in reinforced concrete by imperialist competitive algorithm," *Neural Comput Appl.* 25(7-8) 1627–1638, 2014.
- [152] S. Millard, "Measuring the corrosion rate of reinforced concrete using linear polarisation resistance, DTI DME Consortium," *Good Pract. Guid. No 132. Concr. pp 36–38*, 2003.
- [153] NT BUILD 492: 1999, "Chloride Migration Coefficient from Nonsteady-State Migration Experiments," *Nord. Finl.* <https://www.betonconsultingeng.com/services/concrete-testing/nt-build-492/>.
- [154] SR CR 12793:2002, "Determinarea adâncimii stratului de

- carbonatare a betonului întărit.”
- [155] SR EN 12390-7:2002, “Testarea betonului întărit, Partea 7: Densitatea betonului întărit.”
- [156] O. Corbu; A. Ioani; Al. Bakri; M. Abdullah; V. Meişă; H. Szilágyi; A. V. Sandu, “The Pozzoolanic Activity Level of Powder Waste Glass in Comparisons with other Powders,” *Key Eng. Mater.*, vol. 660, pp. 237–243, Aug. 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/kem.660.237.
- [157] T. Rao; P. Sravana; S. Rao, “Abrasion resistance and mechanical properties of Roller Compacted Concrete with GGBS,” *Constr. Build. Mater.* 114 (1), 925-933, 2016.
- [158] B. Kolani, L. Buffo-Lacarrière, A. Sellier, G. Escadeillas, L. Boutillon, and L. Linger, “Hydration of slag-blended cements,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 9, pp. 1009–1018, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.05.007.
- [159] D. Georgescu, A. Apostu, R. Gavrilescu, and T. Seba, “Experimental methods in design of the service life of concrete constructions submitted to the freeze/ thaw attack part II. presentation and analysis of the research results,” *Revista Romana de Materiale/ Romanian Journal of Materials*, vol. 42. 2012.
- [160] O. Ilinoiu, “Concrete Quality Control <https://www.academia.edu/5028532/>,” Bucharest, 2004.
- [161] H. Szilágyi and O. Corbu et al, “Cements with additions – Power reducers,” in *Conference: “Modern science and energy: Energy production, transport and use” -Publishing-House, Cluj <https://www.researchgate.net/publication/295073465>*, 2010.
- [162] O. Corbu, C. Măgureanu, T. Oneţ, and H. Szilágyi, “Energy economy in performant concrete achieving,” *Conf. Vol. Mod. Sci. Energy, UTCN Fac. Install. pag.343-354*, 2010.
- [163] SR 648:2002, “Zgură granulată de furnal pentru industria cimentului,” .
- [164] SR EN 1015-10:2002/A1:2007, “Metode de încercare a mortarelor pentru zidărie. Partea 10: Determinarea densităţii aparente a mortarului întărit,” .
- [165] N.P. Lee; D.H. Chisholm, “Reactive Powder Concrete, study Report SR146 Ltd. Judgeford,” *New Zeland*, 2005.
- [166] A. Pop, C. Badea, and I. Ardelean, “The Effects of Different Superplasticizers and Water-to-Cement Ratios on the Hydration of Gray Cement Using T2-NMR,” *Appl. Magn. Reson.* 44 , 1223–1234, 2013.

- [167] R.K. Majhi and A. N. Nayak, "Development of sustainable concrete using recycled coarse aggregate and ground granulated blast furnace slag," *J. homepage www.elsevier.com/locate/conbuildmat, Constr. Build. Mater.* 159 pp.417–430, 2018.
- [168] P.Lawrence; M.Cyr; E.Ringot, "Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 6, pp. 1092–1105, Jun. 2005.
- [169] P.J.Andersen, "Particle packing and concrete properties," *Mater. Sci. Concr. II*, 111-146, 1995.
- [170] S. E. Chidiac and D. K. Panesar, "Evolution of mechanical properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag and effects on the scaling resistance test at 28 days," *Cem. Concr. Compos. Vol. 30, Issue 2*, p 63-71, 2008.
- [171] H. Zhao; W. Sun, "The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures," *J. Clean. Prod.* 95 pp. 66–74, vol. 2015.
- [172] Q. Wang and P. Yan, "Influence of steel slag on mechanical properties and durability of concrete," *Constr. Build. Mater.* 47 pp.1414– 1420, 2013.
- [173] A. Lübeck, A. L. G. Gastaldini, D. S. Barin, and H. C. Siqueira, "Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag," *Cem. Concr. Compos.* 34, pp .392–399, 2012.
- [174] Q. Li, Z.Li, and G.Yuan, "Effects of elevated temperatures on properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag as cementitious material," *Constr. Build. Mater.* 35, pp .687–692, 2012.
- [175] L.M. Nicula, O. Corbu, and M.Iliescu, "The effect of recycles blast furnace slag waste on the characteristic and durability of cement-based mortars," in *Conference Proccedings, Albena, Bulgaria*, vol. Vol 18, 2018, pp. pp379-39.
- [176] L.M.Nicula, O. Corbu, and M.Iliescu, "Studies based on cement mortar composites with blast furnace slag powder and ultrafine silica," *Int. Multidiscip. Sci. GeoConference SGEM; Sofia, Vol. 18, Iss. 6.4, ProQuest.*, 2018.
- [177] L.M.Nicula, O.Corbu, and M.Iliescu, "Influence of slag powder in the cement mortar mixes on the characteristics of compactness and freeze –thaw strength," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 572 012013, 2019.

- [178] A.Aghaeipour and M.Madkhani, "Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability," *Constr. Build. Mater.*, vol. 141, pp. 533–541, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.019.
- [179] H.Toutanji et al, "Effect of supplementary cementitious materials on the compressive strength and durability of shortterm cured concrete," *Cem. Concr. Res.* 34 311–319., 2004.
- [180] U.Tarek;T. U.Mohammed; et al, "Utilization of Steel Slag in Concrete as Coarse Aggregate," *4th Int. Conf. Sustain. Constr. Mater. Technol. SCMT 2016; Las Vegas; United States; 7 August 2016 through 11 August 2016; Code 137590*, 2016.
- [181] L.M. Nicula; O. Corbu; M. Iliescu, "Study to Achieving a Class of Road Concrete with Slag Powder Addition at the Cement Mass and Substitution with Artificial Aggregates," 2019, doi: 10.1088/1757-899X/572/1/012067.
- [182] L.M.Nicula, O.Corbu, M.Iliescu, and D.G.Dumitraş, "Using the blast furnace slag as alternative source in mixtures for the road concrete for a more sustainable and a cleaner environment," *Rom. J. Mater.*, vol. 50, no. 4, pp. 545–555, 2020, Accessed: Mar. 23, 2021. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/347160808_Using_the_blast_furnace_slag_as_alternative_source_in_mixtures_for_the_road_concrete_for_a_more_sustainable_and_a_cleaner_environment.
- [183] Autorizația de mediu nr. 155 / 27.03.2013, "ARCELORMITTAL GALAȚI S.A."
- [184] Licuța T. CRISTEA and Vasiliță V. CRISTEA, "Chemistry of fully recyclable materials and sustainable development," *AGIR Bull. Suppl.* 3/2015/ <http://www.agir.ro/buletine/2453.pdf>, 2015.
- [185] D. P. Georgescu and A. Apostu, "Analysis of the possibility of using Portland cement with slag in road concrete," *Symp. Anniv. 130 years Rom. Tech. Educ. F. Transp. infrastructure, CAR 2011, 4th Ed. Bucharest, 2011, Oct. 27-28.*, 2011.
- [186] Takayuki MIYAMOTO* Koichi TORII Kenichi AKAHANE Sachiko HAYASHIGUCHI, "Production and Use of Blast Furnace Slag Aggregate," *Nippon STEEL SUMITOMO Met. Tech. Rep. No. 109 JULY 2015. -102-. 1.* www.nipponsteel.com/nssmc/pdf/109-18., 2015.
- [187] WANG Aiguo, L. Peng, L. Kaiwei, L. Yan, Z. Gaozhan, and S. Daosheng*, "Application of Air-cooled Blast Furnace Slag

- Aggregates as Replacement of Natural Aggregates in Cement-based Materials: A Study on Water Absorption Property," *J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed. www.jwutms.net Apr.2018 445.*, 2018.
- [188] K.A.Mujedu, I.O.Lamidi, A.O.Familusi, and A.A.Olatunji, "Utilization of Blast Furnace Slag as Coarse Aggregate in Concrete Production, The International Journal of Engineering and Science (IJES)," *Issue , 11 Ver.II , Pages, PP 50-57, ISSN 2319 – 1813 ISSN 23-19 – 1805*, 2018.
- [189] A.M.Neville, "Concrete technology. 2nd ed. UK," *2nd ed.UK Longman*, 2010.
- [190] V. Limbachiya, E. Ganjian, and P.Glaise, "Strength, durability and leaching properties of concrete paving blocks incorporating {GGBS} and {SF}," *Constr. Build. Mater.*, vol. 113, pp. 273–279, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.152.
- [191] A.C.Apostu, "Transportul materialelor prin materialele de construcții," in *Teză de doctorat*, 2011.
- [192] Raport-552, "Analiza chimică a cimentului CEM I 42.5R," in *Laborator Ceprochim S.A. București*, 2020.
- [193] Raport-AHKRO-13270-Z, "Raport zgură granulată de furnal," *Lib. Galați SA*, 2019.
- [194] Report-AHKRO-13610-2M., "Moisture analyse granulated blast furnace slag in bulk," *Lib. Galați SA*, 2021.
- [195] Report AHKRO 13597-A., "Laboratory Test Report for granulated blast furnas slag," in *Liberty Galați SA*, 2021.
- [196] Raport-130/1-130/2, "Zgură granulată și agregate din zgură concasate," *Minesa SA*, 2021.
- [197] Raport-529, "Agregat din zgură concasat 0/4 mm," *Lib. Galați SA*, 2021.
- [198] Raport-2873., *Încercări pe piatra de carieră*. 2017.
- [199] Raport-960., "Raport încercare cribluri," *SC Gd. SA*, 2018.
- [200] Raport-956., "Raport încercare agregate grosiere," in *SC Grandemar SA*, 2017.
- [201] Raport-2015633., "Test de levigabilitate pe pulbere de zgură granulată GGBS," *Wessling România SRL*, 2020.
- [202] A.Popovic, G.Popița, T.Rusu, C.Roșu, O.Corbu, and T.Gabor et al, "Analysis of lead leachability from composite materials with cathode ray tube glass content," *Environ. Eng. Sustain. Dev. Entrep. 2014 3(1)*, 2014.
- [203] Raport-2022357., "Test de levigabilitate pe pulberi de beton S

- 54/20," *Wessling România SRL*, 2020.
- [204] Raport-2022358, "Test de levigabilitate pe pulbere de beton S 414," *Wessling România SRL*, 2020.
- [205] M.Shariq, J.Prasad, and A.Masood, "Studies in ultrasonic pulse velocity of concrete containing GGBFS," *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 944–950, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.070.
- [206] S.K.Rao, P.Sravana, and T.C.Rao, "Experimental studies in Ultrasonic Pulse Velocity of roller compacted concrete pavement containing fly ash and M-sand," *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 289–301, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.ijprt.2016.08.003.
- [207] International atomic energy agency, "Guide book on non-destructive testing of concrete structures. In: Training course series no. 17," *Viena*, 2002.
- [208] CEB-FIP, "Diagnosis and Assessment of Concrete Structures," *State art Rep. CEB Bull*, 1989.
- [209] N.Banthia, M.Pigeon, and J.Marchand, "Permeability of roller compacted concrete," *J Mater Civ Eng*, 1990.
- [210] E. A. Whitehurst, "Soniscope test concrete structure," 1951. .
- [211] D.Kocáb; B. Kucharczyková; P. Daněk; T. Vymazal; P.Hanuš; R.Halamová, "Destructive and non-destructive assessment of the frost resistance of concrete with different aggregate," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 379(1), 2018, doi: 10.1088/1757-899X/379/1/012022.
- [212] S.K.Kaushik, L.Jaisingh, and M.P.Jaisingh, "Ultrasonic testing of concrete.," *Indian Concr J* 1995687–93.
- [213] L. M. Nicula, O. Corbu, and M. Iliescu, "Studies regarding the evolution into time of the resistance to compression and ultrasonic pulse velocity on road concrete containing furnace slag," *Int. Multidiscip. Sci. GeoConference SGEM, Sofia, Vol. 19, Iss. 6.3*, 2019.
- [214] L.M.Nicula; O. Corbu; M. Iliescu, "Influence of Blast Furnace Slag on the Durability Characteristic of Road Concrete Such as Freeze-Thaw Resistance," *Procedia Manuf. Vol. 46, Pages 194-201*, 2020.
- [215] PD CEN/TR 16563, "Technical Report of Principles of the equivalent durability procedure," in *European Committee for Standardization (CEN)*, 2013.
- [216] CSA A23.1-09-A23.2-09, "Standard for Concrete materials and methods of concrete construction/Test methods and standard practices for concrete," (*Canadian Stand. Assoc.*, 2011.

- [217] GOST 26633, "Standard for Heavy-weight and sand concretes Specifications," (*Russian Stand.*, 2015.
- [218] DIN 1045-2:2014-08, "Standard for Concrete, reinforced and prestressed concrete structures - Part 2: Concrete - Specification, performance, production and conformity - Application rules for DIN EN 206," (*German Stand.*, 2014.
- [219] GOST R 55224, "Standard for Cements for transport construction Specifications," (*Russian Stand.*, 2012.
- [220] R.D.Hooton, "Durability Aspects of Fly ash and Slag in Concrete," *Proc. Work. Oslo Thirty Five Years Exp. with Slag Cem. Concr. North Ame*, 2012.
- [221] Kjell Tor Fosså, "Kværner Concrete Solutions AS," 2017.
- [222] Process code 2, "Standard description for bridges and quays. Main process 8," *Nr.R672 Road Adm. Handb. Ser. (Norwegian Public Road Authorities)*, 2015.
- [223] Laboratory research Nr. R210, "Road administration handbook series," (*Norwegian Public Road Authorities p 431*), 2014.
- [224] H.B.Mohammad, J. H. Per, and J.Stefan, "Effect of Internal Hydrophobation, Silica Fume and W/C on Water Sorption of Hardened Cement Pastes," *12th Int. Conf. Durab. Buiding Mater. Components, Poto -Portugal*, 2011.
- [225] GOST 127305:1984, "Standard for Concretes Methods for determination of water impermeability," (*Russian Stand.*
- [226] ASTM C672/C672M, "Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals," (*ASTM Am. Soc. Test. Mater. Int.*, 2012.
- [227] B.Peter and G.Zbigniew, "Testing the frost resistance of concrete with different cement types – experience from laboratory and practice," *Archit. Civ. Eng. Environ. Vol. 3(no. 2) 41-51*, 2010.
- [228] BAW-Merkblatt, "Concrete frost resistance test National Hydraulic Institute 0 Karlsruhe," *Hamburg, Ilmenau (in Ger.)*, 2004.
- [229] D. Jozwiak-Niedzwiedzka, "Influence of pre-wetted lightweight aggregate on scaling resistance of high performance concrete," 2002.
- [230] T.Syamak; N. Mahmoud and S.Behrad, "Effect of GGBS on the frost resistance of self-consolidating concrete," *Constr. Build. Mater. 165 717-722*, 2018.
- [231] M. K-Kazberuk, "Surface Scaling Resistance of Concrete with Fly Ash From Co-Combustion of Coal and Biomass," *Procedia Eng. 57605-613*, 2013.

- [232] P.H.Jun; B.S. Hyun; L. Sooyoung; and Y.A Ki, "Enhancing the Durability Properties of Concrete Containing Recycled, Aggregate by the Use of Pozzolanic Materials," *KSCE J. Civ. Eng.* 17(1) 155-163, 2013.
- [233] S.Huai Shang and H.Y.Ting, "Freeze-Thaw Durability of Air-Entrained Concrete," *Hindawi Publ. Corp. Sci. Journal*, 650791, 2013.
- [234] D.P. Georgescu; D. Apostu; A. Miron, "Experimental Research for the Evaluation of concrete freeze -thaw rezistance," *Rom. J. Mater.*, 40 (2),122-131, 2010.
- [235] R. Jones, "The development of microcracks in concrete," *RILEM Bul No 9, pp110-14, Paris.*, 1960.
- [236] L.M. Nicula; O. Corbu; M.Iliescu, "Methods for assessing the frost-thaw resistance of road concrete used in our country and at European level," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 877 012025, 2020.
- [237] P.C.Aïtcin, "High-Performance Concrete," in *Stern B 624, E & FN SPON, London and New York.*, 1998.
- [238] M.Collepari, "The New Concrete," in *Edizioni Tintoretto*, 2006.
- [239] A.M.Neville, "Properties of concrete," in *Pearson, fifth edition, Harlow*, 2011.
- [240] PN-EN 480-11., "Standard for Admixtures for concrete, mortar and grout - Test methods - Part 11: Determination of air void characteristics in hardened concrete," *Polish Comm. Stand.*, 1998.
- [241] J. Wawrzeńczyka; W.Kozaka, "A method of analyzing the porous microstructure in air-entrained concrete on the basis on 2D image analysis," 2015.
- [242] J. Yuan, Y. Liu, H. Li, and C. Yang, "Experimental Investigation of the Variation of Concrete Pores under the Action of Freeze-thaw Cycles," *Procedia Eng.*, vol. 161, pp. 583–588, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.696>.
- [243] T. Tracz and T. Zdeb, "Effect of hydration and carbonation progress on the porosity and permeability of cement pastes," *Materials (Basel).*, vol. 12, no. 1, 2019, doi: 10.3390/ma12010192.
- [244] S.S.S.A.Nedunuri, S.G.Sertse, and S.Muhammad, "Microstructural study of Portland cement partially replaced with fly ash, ground granulated blast furnace slag and silica fume as determined by pozzolanic activity," *Constr. Build. Mater.*, vol. 238, p. 117561, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117561.
- [245] R.K.Majh; A.N. Nayak, "Bond, durability and microstructural characteristics of ground granulated blast furnace slag based

- recycled aggregate concrete,” in *Construction and Building Materials*, vol. 212, Elsevier {BV}, 2019, pp. 578–595.
- [246] J.R. De Castro Pessoa, J.S.Dominguez, G. D. Carvalho, and J. T. De Assis, “Obtaining Porosity of Concrete Using X-ray Microtomography or Digital Scanner,” *J. Chem. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 4, Apr. 2014, doi: 10.17265/1934-7375/2014.04.007.
- [247] S. Diamond, “Mercury porosimetry,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 10, pp. 1517–1525, Oct. 2000, doi: 10.1016/s0008-8846(00)00370-7.
- [248] L. LI, Z. LI, M. CAO, Y. TANG, and Z. ZHANG, “Nanoindentation and porosity fractal dimension of calcium carbonate whisker reinforced cement paste after elevated temperatures (UP to 900°C),” *Fractals*, vol. 29, no. 02, p. 2140001, Feb. 2021, doi: 10.1142/s0218348x21400016.
- [249] S. Jin, J. Zhang, and B. Huang, “Fractal analysis of effect of air void on freeze-thaw resistance of concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 126–130, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.040.
- [250] J. Zhou, T. Kang, and F. Wang, “Pore structure and strength of waste fiber recycled concrete,” *J. Eng. Fiber. Fabr.*, vol. 14, p. 1558925019874701, Jan. 2019, doi: 10.1177/1558925019874701.
- [251] E. F. Ethington, “Interfacial contact angle measurements of water, mercury, and 20 organic liquids on quartz, calcite, biotite, and Camontmorillonite substrates.” {US} Geological Survey, 1990, doi: 10.3133/ofr90409.
- [252] A. Badr, A. F. Ashour, and A. K. Platten, “Statistical variations in impact resistance of polypropylene fibre-reinforced concrete,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 32, no. 11, pp. 1907–1920, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.05.003>.
- [253] L. M. Nicula, O. Corbu, I. Ardelean, A. V Sandu, M. Iliescu, and D. Simedru, “Freeze–Thaw Effect on Road Concrete Containing Blast Furnace Slag: NMR Relaxometry Investigations,” *Mater. -ISSN 1996-1944*, *Mater. , 14(12)*, 3288, 2021.
- [254] A. M. Rashad, H. H. E.-D. Seleem, and A. F. Shaheen, “Effect of Silica Fume an Slag on Compressive Strength and Abrasion,” *Int. J. Concr. Struct. Mater. Vol.8, No.1*, pp.69-81, 2014.
- [255] A. M. Rashad and S. R. Zeedan, “The effect of activator concentration on the residual strength of alkali-activated fly ash pastes subjected to thermal load,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25,

- no. 7, pp. 3098–3107, Jul. 2011, doi:
10.1016/j.conbuildmat.2010.12.044.
- [256] “National Air Quality Monitoring Network,”
<http://www.calitateaer.ro/public/assessment-page/pollutants-page/oxid-azot-page/index.html>.
- [257] Chendeş R V, “Determinări experimentale privind reutilizarea betonului rezultat din demolarea clădirilor,” *Teză Dr. Univ. Timișoara*, 2017.
- [258] S. R. N, “Concrete technology and design,” *Cem. Replace. Mater. London, U.K. Surrey Univ. Press. First Publ. Vol.3*, 1986.
- [259] Federal Highway Administration, “Research and Technology User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction,” *Publ. Number FHWA-RD-97-148*.
- [260] Benjamin D. Scott and M. Safiuddin, “Abrasion Resistance of Concrete – Design, Construction and Case Study,” *Concr. Res. Lett. www.crlissres.net, Vol. 6 (3).*, 2015.
- [261] Papenfus N, “Applying Concrete Technology to Abrasion Resistance,” *Proc. 7th Int. Conf. Concr. Block Paving, Sun City, South Afric*, 2003.
- [262] T. R. Naik, S. S. Singh, and B. . W. Ramme, “Effect of source of fly ash on abrasion resistance of concrete.,” *J. Mater. Civ. Eng. 417–426*, 2002.
- [263] T.R.Naik, S.S.Singh, and M.M.Hossain, “Abrasion Resistance of High Strength Concrete Made with Class C Fly Ash,” *ACI Mater. Journals, Vol. 92, No. 6, pp. 649-659.*, 1995.
- [264] T.Yen, T.H.Hsu, W.Y.Liu, and S.Chen, “Influence of class F fly ash on the abrasion–erosion resistance of high-strength concrete.,” *Constr. Build. Mater. 21, 458–463.*, 2007.
- [265] A.Kiliç *et al.*, “The Influence of Aggregate Type on the Strength and Abrasion Resistance of High Strength Concrete,” *Cem. Concr. Compos. Vol. 30, No. 4, pp. 290-296.*, 2008.
- [266] B.W.Langan, C.R.Joshi, and M.A.Ward, “Strength and durability of concrete containing 50 % Portland cement replacement by fly ash and other material,” *Can. J. Civ. Eng. 17, 19–27.*, 1990.
- [267] Nanni A, “Abrasion resistance of roller-compacted concrete,” *ACI Mater. Journal, 86(53), 559–565.*, 1989.
- [268] A.Nazari and S.Riahi, “Abrasion resistance of concrete containing SiO₂ and Al₂O₃ nanoparticles in different curing media,” *Energy Build. 43, 2939–2946*, 2011.
- [269] S. Riahi and A. Nazari, “Compressive strength and abrasion

- resistance of concrete containing SiO₂ and CuO nanoparticles in different curing media," *Sci. China, Technol. Sci.* 54(9), 2349–2357, 2011.
- [270] Ytterburg R. F., "Wear-resistant industrial floors of Portland cement concrete," *Civ. Eng. ASCE*, 41(1), 68–71., 1971.
- [271] Nanni A, "Curing of roller-compacted concrete and strength development," *J. Transp. Eng. ASCE*, 114(6), 684–694., 1989.
- [272] J.T.Kevern, V.R.Schaefer, and K.Wang, "The Effect of Curing Regime on Pervious Concrete Abrasion Resistance," *J. Test. Eval.* Vol. 37, No. 4, JTE101761., 2009.
- [273] R.K.Dhir, P.C.Hewlett, and Y.N.Chan, "Near-surface Characteristics of Concrete," *Abrasion Resist. Mater. Struct. Vol. 24*, pp. 122-128., 1991.
- [274] Bakke K. J., "Abrasion Resistance, Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials," *ASTM STP 169D, Bridg. pp. 184-193*, 2006.
- [275] P.Laplante, P.C.Aïtcin, and D.Vezina, "Abrasion Resistance of Concrete," *J. Mater. Civ. Eng. Vol. 3, No. 1*, pp. 19-28., 1991.
- [276] K.Turk and M.Karatas, "Abrasion resistance and mechanical properties of self-compacting concrete with different dosages of fly ash/silica fume," *Indian J. Eng. Mater. Sci.* 18, 49–60., 2014.
- [277] O. Karpuz, M. V. Akpınar, and M. M. Aydın, "Effect of fine aggregate abrasion resistance and its finess module on wear resistance of Portland cement pavements," *Rev. la construcción* 16(1)126-132, 2017.
- [278] M. Nicula, L.M.; Corbu, O.; Iliescu, "The Influence of Blast Furnace Slag on Abrasion Resistance for Road Concretes," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 877 012040, 2020.
- [279] W. Scannell, A. Sohanghpurwala, and M. Islam, "Assessment of Physical Condition of Concrete Bridge Components," *FHWA-SA-97-002, HTA-10/1-96 (3M)P, U.S. Dep. Transp. Fed. Highw. Adm. pp. 2–6.*, 1996.
- [280] A. Bentur, S. Diamond, and N. Berke, "Steel Corrosion in Concrete," *E FN SPON, London*, 1998.
- [281] L.Bertolini, B.Elsener, P.Pedefferri, and R.Polder, "Corrosion of steel in concrete," *WILEY-VCH Verlag GmbH Co. KGaA, Weinheim*, pp.3-17, 21-39, 49-64, 71-130, 165-270, 2004.
- [282] B. Pradhan and B. Bhattacharjee, "Rebar corrosion in chloride environment," *Constr. Build. Mater.* 25 2565–2575., 2011.
- [283] Elsener B., "Macrocell corrosion of steel in concrete-implications

- for corrosion monitoring," *Cem Concr Compos* 2465–72.2465–72., 2002.
- [284] P.A.M.Basheer, P.R.V.Gilleece, A.E.Long, and W. J. McCarter, "Monitoring electrical resistance of concretes containing alternative cementitious materials to assess their resistance to chloride penetration," *Cem Concr Compos* 24437–49., 2002.
- [285] J.N.Enevoldsen, C.M.Hansson, and B.B.Hope, "The influence of internal relative humidity on the rate of corrosion of steel embedded in concrete and mortar," *Cem Concr Res* 241373–82, 1994.
- [286] O.Poupard, A.Ait-Mokhtar, and P.Dumargue, "Corrosion by chlorides in reinforced concrete: determination of chloride concentration threshold by impedance spectroscopy," *Cem Concr Res* 34991–1000., 2004.
- [287] M.F.Montemor, M.P.Cunha, M.G.Ferreira, and A.M.Simoes, "Corrosion behaviour of rebars in fly ash mortars exposed to carbon dioxide and chlorides," *Cem Concr Compos* 2445–53, 2002.
- [288] C.L.Page and G.Sergi, "Developments in cathodic protection applied to reinforced concrete," *J Mater Civ Eng ASCE* 128–15., 2000.
- [289] C. Andrade, C. Alonso, and J. Sarria, "Corrosion rate evolution in concrete structures exposed to the atmosphere," *Cem Concr Compos* 24 55–64., 2002.
- [290] G. Kim, J.-Y. Kim, K. E. Kurtis, L. J. Jacobs, Y. Le Pape, and M. Guimaraes, "Quantitative evaluation of carbonation in concrete using nonlinear ultrasound," *Mater. Struct.*, vol. 49, no. 1–2, pp. 399–409, Dec. 2016, doi: 10.1617/s11527-014-0506-1.
- [291] V.G. Papadakis and C. G. Vayenas, "Experimental investigation and mathematica modeling of the concrete carbonation problem," *Chem Eng Sci* 461333–1338., 1991.
- [292] M. N. F. Papadakis, Vagelis G., Costas G. Vayenas, "Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation," *ACI Mater J* 88363–373., 1991.
- [293] L.J.Parrott and D.C.Killoh, "Carbonation in a 36 year old, in situ concrete," *Cem Concr Res* 19649–656, 1989.
- [294] R. A. Medeiros, M. G. Lima, R. Yazigi, and M. H. F. Medeiros, "Carbonation depth in 57 years old concrete structure," *Steel Compos. Struct. Vol. 19, No. 4* 953-966., 2015.
- [295] P.Pimienta, B.Albert, B.Huetb, M.Dierkens, P.Francisco, and P.Rougeaud, "Durability performance assessment of non-

- standard cementitious materials for buildings: a general method applied to the French context, Fact sheet 1 - Risk of steel corrosion induced by carbonation," *RILEM Tech. Lett.* 1 102 – 108., 2016.
- [296] E.Namsone, G.Šahmenko, and A.Korjakins, "Durability Properties of High Performance Foamed Concrete," *Procedia Eng.* 172 (2017) 760 – 767, 2017.
- [297] Tuutti K., "Corrosion of steel in concrete," *CBI Swedish Cem. Concr. Res. Inst. Stock. Sweden*, 1992.
- [298] E.M.Güneyisi, K.Mermerdaş, E.Güneyisi, and M.Gesoğlu, "Numerical modelling of time to corrosion induced cover cracking in reinforced concrete using soft-computing based methods," *Mater Struct [Google Sch.]*, 2014.
- [299] Nmai, C. K., Farrington S. A., and Bobrowski, G. S., "Organic-Based Corrosion-Inhibiting Admixture for Reinforced Concrete," *Concr. Int., Vol. 14, No. 4, pp. 45–51*, 1992.
- [300] N.Berke and A.Rosenberg, "Technical Review of Calcium Nitrite Corrosion Inhibitor in Concrete," *Transp. Res. Rec., No. 1211, pp. 18–27*, 1989.
- [301] X. Pei, M. Noël, M. Green, A. Fam, and G. Shier, "Cementitious coatings for improved corrosion resistance of steel reinforcement," *Surf. Coat. Technol.*, 2017.
- [302] K. Y. Yeau and E. K. Kim, "An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag," *Cem. Concr. Res.* 35, 1391– 1399, 2005.
- [303] A.A. Ramezaniapour, "Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporation slag, fly ash or silica fume," *Cem. Concr. Compos.* 17, 125– 133, 1995.
- [304] G.J. Osborne, "Durability of portland blast-furnace slag cement concrete," *Cem. Concr. Compos.* 21, 11 – 21, 1999.
- [305] E.F.Irassar, M.Gonzalez, and V.Rahhal, "Sulphate resistance of type V cements with limestone filler and natural pozzolana," *Cem. Concr. Compos.* 22, 361– 368, 2000.
- [306] K.M.A.Hossain and M.Lachemi, "Corrosion resistance and chloride diffusivity of volcanic ash blended cement mortar," *Cem. Concr. Res.* 34 (4), 695–702, 2004.
- [307] O.E. GjArv, "Effect of condensed silica fume on steel corrosion in concrete," *ACI Mater. J.* 92-M60 591– 598, 1995.
- [308] D.Whiting, "Rapid Measurement of the Chloride Permeability of

- Concrete,” *Public Roads, Vol. 45, No. 3, pp. 101–112, 1981.*
- [309] R.D.Hooton, P.Pun, T.Kojuncdic, and P.Fidjestol, “Influence of Silica Fume on Chloride Resistance of Concrete,” *Proc. PCI/FHWA Int. Symp. High Perform. Concr. New Orleans, Louisiana, pp. 245–256, 1997.*
- [310] “[https://www.betonconsultingeng.com/services/concrete-testing/astm-c1202/.](https://www.betonconsultingeng.com/services/concrete-testing/astm-c1202/)”
- [311] C. Andrade; C. Alonso, “Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method,” *Mater Struct.;37623–643 . [CrossRef] [Google Sch., 2004, doi: doi: 10.1007/BF02483292.*
- [312] C. Alonso, C. Andrade, and J. Gonzalez, “Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types,” *Cem Concr Res.;8687–698. [CrossRef] [Google Sch., 1998, doi: 10.1016/0008-8846(88)90091-9,.*
- [313] B. Hope, A. Ip, and G. Manning, “Corrosion and electrical impedance in concreto,” *Cem Concr Res;15525–534 [CrossRef] [Google Sch., 1995, doi: 10.1016/0008-8846(85)90127-9.*
- [314] Lukasz Sadowski, “Methodology for Assessing the Probability of Corrosion in Concrete Structures on the Basis of Half-Cell Potential and Concrete Resistivity Measurements,” *Hindawi Publ. Corp. Sci. J., 2013.*
- [315] S. Feliu, J. A. Gonzalez, S. Feliu, and M. C. Andrade, “Confinement of the electrical signal for in situ measurement of polarization resistance in reinforced concrete,” *ACI Mater. Journal, vol. 87, no. 5, pp. 457–460, 1990., 1990.*
- [316] G.K.Glass, C.L.Page, and N.R.Short, “Factors affecting the corrosion rate of steel in carbonated mortars,” *Corros. Sci. vol. 32, no. 12, pp. 1283–1294, 1991.*
- [317] “[https://www.betonconsultingeng.com/services/concrete-testing/nt-build-492/.](https://www.betonconsultingeng.com/services/concrete-testing/nt-build-492/)”
- [318] R. B. Polder, “The Influence of Blast Furnace Slag, Fly Ash, and Silica Fume on Corrosion of Reinforced Concrete in Marine Environment,” *Heron, Vol. 41, No. 4, pp. 287–300, 1996.*
- [319] P.F. McGrath and R.D. Hooton, “Influence of voltage on chloride diffusion coefficients from chloride migration tests,” *Cem. Concr. Res. Vol. 26, No. 8, pp. 1239-1244, 1996.*
- [320] H. R.Soleymani and M. E. Ismail, “Comparing corrosion measurement methods to assess the corrosion activity of

- laboratory OPC and HPC concrete specimens," *Cem. Concr. Res.* 34 2037-2044., 2004.
- [321] A.Coşa, F.Popa, C.Negruţiu, and Z.Kiss, "The Chloride Penetration Depth of Self-Compacting Concrete Using Scanning Electron Microscopy," *Acta Tech. Napocensis Civ. Eng. Vol. 62,,No.2, 44-53, 2019, J. homepage <http://construcții.utcluj.ro/ActaCivilEng>, 2019.*
- [322] P. Sancharoen and T. Uomoto, "Corrosion of reinforcing steel in GGBS concrete due to cyclic exposure of chloride and carbonation," *Proc. Japan Concr. Inst.*, 2004.
- [323] A.Noushini, A. Castel, J. Aldred, and A. Rawal, "Chloride diffusion resistance and chloride binding capacity of fly ash-based geopolymer concrete," *Cem. Concr. Compos.* 2019., 2019.
- [324] V. G. Papadakis and S. Tsimas, "Supplementary cementing materials in concrete. Part I: efficiency and design," *Cem. Concr. Res.* 32, pp. 1525-1532, 2002.
- [325] T. Sinsiri, W. Kroehong, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasirt, ""Assessing the effect of biomass ashes with different finenesses on the compressive strength of blended cement paste"," *Mater. Des.* 42, pp. 424-433, 2012.
- [326] H.Romberg, "Cement paste pores and concrete properties," *Beton-Informationen* 18, H. 5, pp.50-55, 1978.
- [327] R.F.M.Bakker, "Permeability of blended cement concretes," *Pap. SP79-30 from ACI SP79, Detroit ,pp 589-605, 1983.*
- [328] L.M. Nicula; O. Corbu; M. Iliescu; A. V. Sandu; A. Hegyi, "Study on the Durability of Road Concrete with Blast Furnace Slag Affected by the Corrosion Initiated by Chloride," *Advances in Civil Engineering.* 2021.
- [329] L. L. Hoffis and I. Carmel, "SLAG CEMENT Patent No.: US 7.491,268 B2," *Prior Publ. Data US 2006/O230986 A1 Oct. 19, 2006, 2006.*
- [330] "<https://www.globalslag.com/magazine/articles/482-application-of-ggbs-in-china>)."

15 LISTA FIGURILOR

Figura 0-1. a) Componentele dezvoltării durabile [7], b) Combinații de clase de expunere pentru îmbrăcăminti rutiere	20
Figura 1-1. a) Compușii cimentului Portland; b) Ioni de calciu rezultați din dizolvarea cimentului; c) Formarea compușilor de hidratare (C-S-H) și (CH); d) Densificarea compușilor de hidratare [6].....	26
Figura 1-2. Imagini cu procesarea zgurii de furnal și ciment de zgură (GGBS) [24].....	29
Figura 1-3. Bariera de la râul Scheldt de est, [34]	34
Figura 1-4. Imagini cu reconstrucția autostrăzii I-96 [36]	35
Figura 1-5. Aeroportul internațional JFK -Studiu de caz Ciment de zgură[38]	36
Figura 1-6. Înlocuirea dalelor de beton la autostrada I-275 [39].....	37
Figura 1-7. Extinderea platformei de staționare la aeroportul internațional St. Pete-Clearwater din regiunea Pinellas, Florida [40] ...	37
Figura 1-8. Reconstrucția podului "J" Aeroportul Internațional Tampa [41]	38
Figura 1-9. Imagini cu Autostrada HWY 50 , din Comitatul Hernando [42]	38
Figura 1-10. Condițiile de umiditate ale agregatelor[6]	45
Figura 1-11. a) Reacția alcalii-silice (ASR); b) Deteriorarea din îngheț-dezghet;.....	46
Figura 1-12. a) Degradare la șase ani de exploatare; b) Deteriorare după douăzeci și unu de ani de exploatare [71].....	48
Figura 1-13. a) Solidificarea zgurii în aer, b) Concasarea zgurii negranulate la oțelăria din Galați (sursa imaginilor -de la producător)	50
Figura 1-14. a) Mecanismul agenților de aer antrenat (AEA); b) Mecanismul aditivilor reducători de apă (WR) [6].....	55
Figura 2-1. Structura C-S-H: a) modelul Sierra[91]; b) modelul Radoslaw [92]	59
Figura 2-2. a) Deteriorarea betonului la rosturi; b) Exfolierea; c) Fisurarea sub forma de " D-cracking"	61

Figura 4-1. Imagini din laboratorul UTCN cu determinarea suprafeței specifice a pulberii de zgură	73
Figura 4-2. Imagini din laboratorul UTCN cu determinarea rezistenței la întindere din încovoiere pe mortare cu zgură	75
Figura 4-3. Presa hidraulică utilizată pentru determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere (din laboratorul UTCN).....	76
Figura 4-4. Determinarea rezistențelor pe mortare de ciment din zgură (imagini efectuate în timpul testului în laboratorul UTCN)	77
Figura 4-5. Determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere (imagini din timpul încercărilor a rezistenței la întindere din laboratorul UTCN)	80
Figura 4-6. Determinarea adâncimii de penetrare a apei sub presiune (imagini din timpul testului din laboratorul UTCN).....	86
Figura 4-7. Măsurarea timpului de propagare a impulsurilor ultrasonice în beton (imagini din laboratorul UTCN).....	87
Figura 4-8. a) Camera termostatică din laboratorul UTCN; b) Ciclu timp (t) -temperatura (T), măsurat la centrul suprafeței de încercare al unei epruvete.....	90
Figura 4-9. Colectarea materialului exfoliat, cântărirea masei uscate în etuvă, înlocuirea mediului de încercare existent cu unul nou, cu 3% clorură de sodiu NaCl).....	91
Figura 4-10. Epruvete martor menținute în apă și epruvete menținute la îngheț-dezghet (imagini din laboratorul UTCN)	94
Figura 4-11. a), b) Echipamentul MinispecMQ20 pentru măsurători RMN; c) Echipamentul VEGA3 SBU cu Bruker Quantax EDS pentru măsurători SEM;.....	96
Figura 4-12. Cântărirea hidrostatică a cuburilor cu latura de 71 mm (imagini din laboratorul UTCN)	97
Figura 4-13. Aparatura Böhme (Imagine din laboratorul UTCN)	98
Figura 4-14. a) și b): Imagini din timpul testului (RCPT) din laboratorul UTCN	100
Figura 4-15. Sarcina înregistrată (Q) la 6 h, a) S 54/20, b) S 54/60 (imagini înregistrate cu aparatul marca Controls din laboratorul UTCN)	101
Figura 5-1.Variația densității aparente (ρ) în amestecurile de mortar	113

Figura 5-2. Variația porozității și absorbției de apă în amestecurile de mortar.....	113
Figura 5-3. Variația rezistențelor la compresiune și a compactității în amestecurile de mortar	115
Figura 5-4. Variația rezistenței la întindere din încovoiere în amestecurile de mortar	115
Figura 5-5. Pierderea rezistenței la compresiune la 150 de cicluri de îngheț-dezghet în amestecurile de mortar.....	116
Figura 6-1. Curba granulometrică a amestecului total la compoziția S 414 și S 54/60, seria II	127
Figura 6-2. Caracteristicile betonului proaspăt, a) Tasarea și conținutul de aer oclus, b) Densitatea pe betonul proaspăt, seria I	130
Figura 6-3. a) Rezistența la întindere ; b) Rezistența la compresiune, seria I	131
Figura 6-4. a) Determinări pe betonul proaspăt (imagini din laboratorul UTCN), b) Relația între densitatea aparentă – consistență / aer oclus, seria II.....	132
Figura 6-5. a) Rezistențele medii la întindere prin încovoiere, b) Rezistențele medii la compresiune la vârsta de 28 de zile, seria II	132
Figura 7-1 a) Difractograma de raze X în pulberi a unei probe reprezentative de zgură de (GGBS) și 2.b) Distribuția procentuală a constituenților mineralogici ai fazei cristalizate	143
Figura 7-2. a) Agregate uscate și imersate în apă (pietriș, nisip, zgură),	146
Figura 7-3. Diagrama de reducere a concentrației de hidroxid de sodiu în funcție de bioxidul de siliciu dizolvat.....	147
Figura 8-1. a) Absorbția apei comparată cu amestecul S 360;	154
Figura 8-2. a) Adâncimea de penetrare a apei sub presiune comparată cu amestecul S 360; b) comparată cu S 414.....	155
Figura 8-3. a) Modulul de elasticitate dinamic comparat cu amestecul S 360;.....	156
Figura 8-4. a) Reducerea RDM după 300 de cicluri de îngheț-dezghet comparat cu amestecul S 360; b) comparat cu S 414	156
Figura 8-5. a) Factorul de durabilitate (D_f) după 300 de cicluri de îngheț-dezghet comparat cu amestecul S 360; b) comparat cu S 414.	157
Figura 8-6. a) Viteza (UPV) comparată cu amestecul S 360; b) comparată cu S 414	158

Figura 8-7. a), b), c), d), e) Relația între (UPV)-fcm la toate compozițiile de beton	159
Figura 8-8.a) Relația dintre fcm-Ed _n ; b) Evoluția Ed _n la fiecare amestec cu zgură de furnal	160
Figura 9-1. a) Rezistențele la compresiune (fcm) și b) pierderile de rezistențe la compresiune (η) după 150 și 300 de cicluri de îngheț-dezgheț, seria I	170
Figura 9-2. a) Rezistențele la compresiune fcm, b) Pierderile de rezistențe la compresiune η, (%), seria II.....	171
Figura 9-3. a) Cantitatea cumulată de beton exfoliat S56, b) Masa exfoliată la 7,14,28,42 și 56 cicluri, seria I	172
Figura 9-4. a) Modulul de elasticitate dinamic relativ (RDM) la 28 și 56 de cicluri de îngheț-dezgheț; b) imagini cu măsurarea timpului (UPTT), seria I	173
Figura 10-1. Distribuția timpului de relaxare transversală T ₂ după uscare (a) probe martor menținute în apă (w), (b) probe menținute la îngheț-dezgheț.....	181
Figura 10-2 .Distribuția timpului de relaxare transversală T ₂ după saturare cu apă: (a) probe martor menținute în apă (w); (b) probe supuse la 300 de cicluri de îngheț-dezgheț (f-t)	183
Figura 10-3. Intervalul de distribuție a porilor de gel pentru probele martor (a) și pentru cele supuse ciclurilor de îngheț-dezgheț (b). Ambele măsuratori sunt efectuate pe probe saturate cu apă.....	183
Figura 10-4. Densitatea probabilă maximă (a.u.) a porilor inter și intra C-S-H, pentru probe saturate cu apă, (b) a porilor capilari pentru probe saturate cu ciclohexan.....	184
Figura 10-5. Distribuția timpului de relaxare transversală T ₂ după saturare cu ciclohexan: (a) probe martor menținute în apă (w); (b) probe supuse la 300 de cicluri de îngheț-dezgheț (f-t)	185
Figura 10-6. Intervalul de distribuție a porilor capilari T ₂ (a) pentru probe martor (w), (b) pentru probe testate la îngheț-dezgheț (f-t). Ambele măsuratori efectuate pe probele saturate cu ciclohexan	186
Figura 10-7. Imaginile SEM a) pentru amestecul S 360, b) S 414, c) S 54/20,	187
Figura 10-8. a) Densitatea amestecurilor și conținutul de pori permeabili; b) Relația între pierderea de rezistență la compresiune	

după 300 de cicluri de îngheț-dezghet și conținutul de pori permeabili	189
Figura 10-9. Relația între rezistența la compresiune (fcm) și porozitate: a) raportat la conținutul de pori permeabili (P ₀) la probelor martor; b) raportat la (T ₂) în max.(a.u) la probele martor; c) raportat la (T ₂) în max. (a.u.) la probele menținute la îngheț-dezghet.....	191
Figura 11-1.a) Pierderea de volum din uzură, b) Rezistența la compresiune, seria I.....	200
Figura 11-2. Relația între rezistența la compresiune și pierderea de volum a) la 100 zile, b) la 150 zile, seria I	200
Figura 11-3. a) Pierderea de volum din uzură (mm ³), b) Relația între fcm și ΔV la 200 de zile, seria II	201
Figura 12-1.Spectru de difracție cu raze X pentru (GGBS) cu linii caracteristice pentru: ghelenit magnesian, merwinite și carbon.....	210
Figura 12-2. Spectru de difracție cu raze X pentru (ACBFS) cu linii caracteristice pentru: ghelenit magnesian, clinoferrosilit și silicat de aluminu.....	211
Figura 12-3. a) Imagine microscopică pentru (GGBS), b) Imagine microscopică pentru (ACBFS)	211
Figura 12-4. a) Sarcina de trecere (Q), b) Viteza coroziunii (Cr), seria II	213
Figura 12-5. Frontul de migrare a ionilor de clor pentru amestecul S 360 și pentru S 54/20, Seria II.....	214
Figura 12-6. Progresul de carbonatare după o oră de la testarea probelor la vârsta de 56 zile, seria II.....	214
Figura 12-7. a) Densitatea amestecurilor, b) Absorbția apei și conținutul de pori permeabili, seria II	216
Figura 12-8. Relația între P ₀ (%) și D (x10 ⁻² m ² /s), seria II	216
Figura 12-9. a)Rezistența la compresiune fcm la 28 și 150 zile.....	217

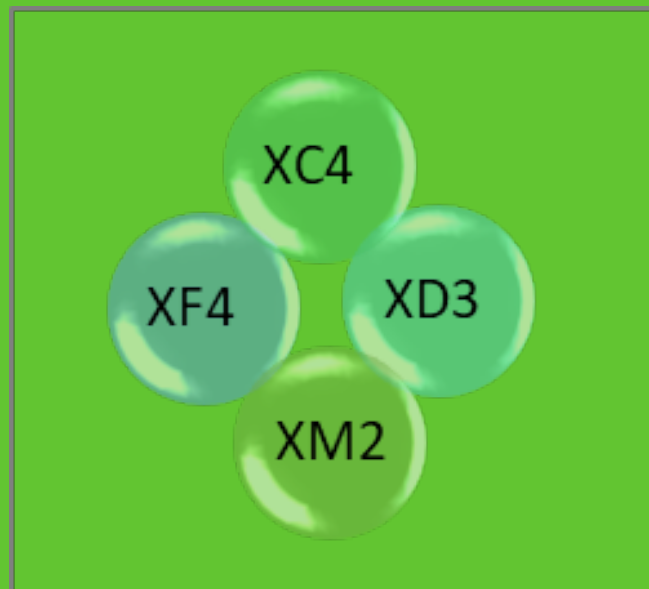
16 LISTA TABELELOR

Tabelul 1-1. Conținutul procentual ai principalilor componenți ai cimentului și ai compușilor de hidratare ai cimentului [6]	26
Tabelul 1-2. Produse uzuale de cimenturi cu zgură de furnal [14]	30
Tabelul 1-3. Intervalul compoziției chimice pentru (GGBS) [25].....	39
Tabelul 1-4. Clasificarea (GGBS) în funcție de indicele de activitate I_A [19]	39
Tabelul 3-1. Clase de betoane rutiere în funcție de clasa de trafic pentru îmbrăcăminte realizată într-un singur strat [11]	66
Tabelul 3-2. Caracteristicile betonului proaspăt pentru punerea în operă în sistem de cofraje fixe. [11].....	66
Tabelul 3-3. Caracteristicile betonului întărit, [11]	67
Tabelul 3-4. Limite stabilite pentru dozajul de ciment, raport apă/ciment și aditivi, [11]	67
Tabelul 3-5. Sorturile agregatelor utilizate pentru un singur strat, [11]	67
Tabelul 4-1. Criteriu de acceptare a rezistenței la îngheț, testul prin exfoliere [125]	91
Tabelul 4-2. Clasele de rezistență la uzură [142]	98
Tabelul 4-3. Interpretare a rezultatelor [148].....	100
Tabelul 4-4. Viteza de coroziune	101
Tabelul 5-1. Cantitățile și procentele de materiale utilizate în compoziția amestecurilor de mortare.....	107
Tabelul 5-2. Caracteristicile cimentului CEM I 42.5R.....	107
Tabelul 5-3. Analiza oxidică a zgurii granulate (GGBS).....	108
Tabelul 5-4. Densitatea în stare îndesată a nisipului natural și a agregatului din zgură (ACBFS).....	109
Tabelul 5-5. Rezultatele experimentale obținute pentru densitatea reală și suprafața specifică a pulberii de ciment și de zgură	111
Tabelul 5-6. Determinarea apei pentru consistența normală și timpul de priză pe pasta de ciment.....	111
Tabelul 5-7. Caracteristicile fizice ale mortarelor de ciment întărite.	112
Tabelul 5-8. Rezistențele mecanice și pierderile de rezistențe la compresiune (η) după 150 de cicluri de îngheț-dezghet.....	114

Tabelul 6-1. Condiții de referință minime la proiectarea betonului rutier [11], [97]	122
Tabelul 6-2. Valorile trecerilor prin site în urma cernerii sorturilor....	125
Tabelul 6-3. Granulozitatea agregatelor pentru amestecul total	125
Tabelul 6-4. Cantitățile de materiale din compoziția betoanelor, seria I de turnare	126
Tabelul 6-5. Cantitățile de materiale la fiecare amestec, seria II de turnare.....	126
Tabelul 6-6. Determinări pe amestecul proaspăt din seria I.....	127
Tabelul 6-7. Determinări pe amestecul proaspăt seria II.....	128
Tabelul 6-8. Rezistențele mecanice medii la întindere și la compresiune la 28 de zile, seria I	128
Tabelul 6-9. Rezistențele mecanice la întindere prin încovoiere și la compresiune la vârsta de 28 zile, seria II	129
Tabelul 7-1. Analiza oxidică a cimentului CEM I 42,5R (%)	137
Tabelul 7-2. Caracteristicile zgurii de furnal granulate[108], [196]	138
Tabelul 7-3. Valori individuale și medii a compoziției oxidice a zgurii granulate, %	138
Tabelul 7-4. Caracteristicile agregatelor fine (NA 0/4 mm) și (ACBFS 0/4 mm).....	139
Tabelul 7-5. Caracteristicile agregatelor grosiere.....	139
Tabelul 7-6. Gradul de saturare în calce a zgurii (GGBS),%	141
Tabelul 7-7. Elementele periculoase testate pentru zgura (GGBS)	141
Tabelul 7-8. Masa volumică și coeficientul de absorbție apei pentru agregate aflate în starea (SSD).....	141
Tabelul 7-9. Modulul de finețe (M_f), al agregatelor fine de dimensiunea 0/4 mm	141
Tabelul 7-10. Rezultatele obținute prin metoda chimică.....	146
Tabelul 8-1. Absorbția apei și adâncimea de pătrundere a apei sub presiune	153
Tabelul 8-2. Viteza (UPV) și modulul de elasticitate dinamic (E_{dn}) determinate înainte de testul de îngheț-dezghet și după 150 și 300 de cicluri de îngheț-dezghet.....	153
Tabelul 8-3. Rezultatele (UPV), (E_{dn}), și (f_c) la 28, 100, 150 zile determinate pe probele martor	153
Tabelul 9-1. Rezistențele și pierderile de rezistențe la compresiune după 150 și 300 cicluri de îngheț-dezghet, seria I	168

Tabelul 9-2. Rezistențele la compresiune și pierderile de rezistențe la 150 cicluri de îngheț-dezgheț, seria II.....	168
Tabelul 9-3. Cantitatea cumulată de beton exfoliat (S) după 56 cicluri de îngheț-dezgheț, pe fâșii de 150x150x50 mm raportată la suprafața măsurată, seria I	169
Tabelul 9-4. Măsurarea timpului de propagare a ultrasunetelor (UPTT) înainte și după 56 de cicluri de îngheț- dezgheț și calculul (RDM), seria I	170
Tabelul 10-1. Abaterea standard (SD) și coeficientul de variație (CoV) calculate pentru densitate și conținutul de pori permeabili	188
Tabelul 10-2. Rezistențele medii la compresiune, pierderile de rezistențe după 300 de cicluri de îngheț-dezgheț, abaterea standard și coeficientul de variație.....	189
Tabelul 11-1. Pierderile de volum din încercarea la uzură și rezistențele la compresiune la vârsta de 100 zile, seria I.....	198
Tabelul 11-2. Pierderile de volum din încercarea la uzură și rezistențele la compresiune la vârsta de 150 zile, seria I.....	198
Tabelul 11-3.Rezistențele la compresiune și la uzură la vârsta de 200 zile, seria II.....	198
Tabelul 12-1.Rezistivitatea, penetrabilitatea ionilor de clor și viteza coroziunii, seria II	212

În urma unor cercetări și studii experimentale proprii, cartea sistematizează metode de testare eficiente, specifice standardelor naționale și internaționale de profil, ce trebuie luate în considerare la proiectarea unor compoziții durabile de beton rutier. Pe baza rezultatelor obținute, concluziile lucrării de cercetare evidențiază măsurile ce trebuie întreprinse în faza de proiectare pentru realizarea unor compoziții de beton rutier, capabile să reziste mediilor la care sunt expuse îmbrăcămințile rutiere: XF4 (îngheț având saturație puternică de apă cu agenți de dezghețare), XC4 (coroziune indusă din carbonatare cu alternanță umezire–uscare), XD3 (coroziune indusă din cloruri cu alternanță umezire–uscare), XM2 (solicitare intensă la uzură).



Zgura de furnal utilizată ca sursă alternativă de material în compoziția betoanelor rutiere poate conduce la un mediu durabil și mai curat !