

MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE



---

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ**  
DIN CLUJ-NAPOCA

**FACULTATEA DE CONSTRUCȚII**

*Ing. Nicolaie Pop*

# **TEZĂ DE DOCTORAT**

**STRUCTURI RUTIERE RECICLATE LA RECE, ARMATE  
DISPERS CU FIBRE SINTETICE DIN STICLĂ ȘI POLIESTERI**

**Conducător științific,  
Prof. dr. ing. Mihai Iliescu**

## CUPRINS

Cuprins	II
Listă figuri	VI
Listă tabele	XI
<b>INTRODUCERE</b>	<b>1</b>
<b>CAPITOLUL 1. Definirea și descrierea pe capitole a conceptului de reciclat armat dispers cu fibre</b>	<b>3</b>
1.1. Definirea conceptului de material reciclat armat dispers cu fibre	3
1.2. Componenta pe capitole a lucrării	4
<b>CAPITOLUL 2. Utilizarea fibrelor sintetice pentru armarea structurilor rutiere reciclate la rece</b>	<b>6</b>
2.1. Armarea dispersă cu deșeuri din fibră de sticlă a structurilor rutiere suple și semirigide, reciclate la rece “ <i>in situ</i> ”	6
2.2. Alegerea materialelor de armare	7
2.2.1. Armarea cu fibre	7
2.2.1.1. Principalele avantaje ale soluțiilor de armare cu fibre	9
2.2.1.2. Principalele dezavantaje ale soluțiilor de armare cu fibre	9
2.3. Fibrele de sticlă	9
2.4. Fibrele poliesterice	10
2.5. Rolul deșeurilor din fibre de sticlă adăugate la reciclare	11
2.6. Alte materiale utilizate	12
2.6.1. Agregatele naturale	12
2.6.2. Cimentul	13
2.6.3. Bitumul spumat	13
2.7. Determinarea dozajului optim de bitum spumat	14
2.8. Utilizarea fibrelor sau a deșeurilor de fibre din sticlă peliculizate cu rășini poliesterice în tehnologia de reciclare cu bitum spumat și ciment	15
2.9. Aplicarea tehnologiei de reciclare cu fibre în dispersie	18
2.9.1. Utilizarea tehnologiei de reciclare la rece cu fibre de sticlă în dispersie, în cadrul lucrărilor de reabilitare a drumurilor în România și în Județul Sălaj	18
2.9.2. Tehnica de reciclare la rece “ <i>in situ</i> ” din România	19
2.9.3. Utilizarea tehnologiei de reciclare la rece în România	21
2.10. Caracteristicile infrastructurii rutiere în județul Sălaj	21
2.11. Aspecte teoretice și tehnologice	24
2.11.1. Aspecte teoretice	24
2.11.2. Aspecte tehnologice	26
2.12. Concluzii și observații referitoare la această tehnologie de reciclare	27

<b>CAPITOLUL 3. Mecanismele transmiterii tensiunilor de la sistem la fibre. Funcția de armare</b>	<b>31</b>
3.1. Comportamentul structurilor rutiere reciclate la rece armate cu fibre.	
Considerații teoretice	31
3.2. Particularitățile structurilor rutiere reciclate la rece, armate dispers cu fibre	35
3.3. Comportarea materialelor de armare. Principii de bază	36
3.3.1. Adeziunea la interfață	36
3.3.2. Distanța dintre fibre și suprafața specifică a fibrelor	37
3.3.3. Calculul distanței medii dintre fibre și suprafața specifică a fibrelor	38
3.4. Determinarea numărului de fibre din reciclat orientate în 2D, cu planul secțiunii perpendicular pe planul orientării	41
3.5. Determinarea numărului de fibre din reciclat orientate în 3D	42
3.5.1. Exemple de calcul a distanței medii dintre fibre	43
3.6. Fibrele cu funcție de armare. Manifestarea tensiunilor la interfața fibrei	44
3.6.1. Suprafața specifică a fibrelor	46
3.7. Lungimea și dozajul fibrelor de armare dispersă	48
3.7.1. Lungimea fibrelor	48
3.7.2. Lungimea minimă	48
3.7.3. Lungimea medie	49
3.7.4. Lungimea critică	49
3.7.5. Lungimea maximă	49
3.8. Calculul dozajului de fibre necesare la armarea dispersă a reciclatului	50
3.9. Întinderea fibrelor în sistemele polifazice cu crăpături multiple și discontinue în zona de interfață supusă întinderii	51
3.10. Modulul de elasticitate al fasciculelor de fibre înglobate în reciclat	54
3.11. Tensiuni generatoare de fisuri la interfața bimaterial	55
3.11.1. Evaluări analitice	55
3.11.2. Fisura bimaterial	55
3.11.3. Fisurarea la interfață și sub-interfață	55
3.11.4. Exemplificare analitică	56
3.12. Smulgerea fibrelor din sisteme cu crăpături multiple	57
3.13. Defectele de structură rutieră	63
3.14. Defecte ale fibrelor de sticlă cu funcție de armare	64
3.15. Cauzele degradărilor structurilor rutiere reciclate la rece cu fibre în dispersie	64
3.15.1. Cauzele interne	65
3.15.2. Cauzele externe	65
3.16. Degradări datorate fenomenului de fisurare. Tipuri de fisuri	66
3.17. Influența traficului asupra degradărilor interne ale structurilor rutiere reciclate la rece “ <i>in situ</i> ” cu bitum spumat și deșeuri din fibre de sticlă în dispersie	67
3.18. Fenomene de transfer de lichide și gaze ce degradează structurile rutiere reciclate la rece și armate dispers cu deșeuri din fibre de sticlă în dispersie	69
3.19. Structura și numărul porilor (porozitatea)	70
3.19.1. Adsorbția fizică a apei în pori	71
3.19.2. Fenomene de transfer ale apei din aerul umed	72
3.19.3. Transferul apei în condiții de ploaie	73
3.19.4. Mecanismul de transport a apei în cazul imersiunii	74

<b>CAPITOLUL 4. Analiza cu ajutorul microscopiei electronice. Modele de tranziție</b>	<b>75</b>
4.1. Aspecte teoretice ale comportamentului componentelor sistemului	75
4.2. Analiza vizuală cu ajutorul stereolupei Stereolupei “ <i>Olympus SZ</i> ”	76
4.3. Analiza prin scanare cu ajutorul microscopului electronic	79
4.3.1. Etapele prelucrării probelor	79
4.4. Analiza prin dezanrobarea pe clase	82
4.5. Analiza la interfață pe componenți a reciclatului cu fibre în dispersie	82
4.6. Descrierea anrobatului bituminos rezultat după reciclarea structurilor rutiere cu bitum și deșeuri din fibre de sticlă	83
4.7. Modele de tranziție. Modelul Eshelby - Kröner și modelul Mori - Tanaka	84
4.7.1. Estimarea comportamentului la variațiile de temperatură a unei structuri rutiere în straturi cu ajutorul modelului matematic Eshelby - Kröner	85
<b>CAPITOLUL 5. Determinări specifice pe anrobatul obținut prin aplicarea tehnologiei reciclării la rece, cu adaos din fibre de sticlă</b>	<b>89</b>
5.1. Determinări de laborator realizate pe reciclatul cu fibre	89
5.1.1. Confirmarea calității reciclatului cu fibre prin încercări de laborator realizate pe epruvetele prelevate	89
5.1.2. Prelevarea epruvetelor	91
5.1.3. Determinări de laborator pe probele prelevate	91
5.1.4. Studiul parametric al materialului reciclat cu deșeuri din fibre de sticlă în dispersie	102
5.1.5. Determinarea rezistențelor la compresiune pe probe	103
5.1.6. Legătura dintre conținutul de fibre și stabilitatea Marshall	104
5.1.7. Legătura între numărul de treceri la compactare, volumul de goluri și densitatea aparentă	105
5.2. Caracteristicile macroscopice ale reciclatului cu fibre. Geometrii de fibre	106
5.2.1. Factorul de dispersie al fibrelor din materialul reciclat	109
5.2.2. Factorul de eficiență de armare al fibrelor	110
5.2.3. Fisurarea macroscopică	110
<b>CAPITOLUL 6. Aplicații practice ale tehnologiei de reciclare “<i>in situ</i>” cu fibre în dispersie</b>	<b>115</b>
6.1. Tehnologia de reciclare cu deșeuri din fibre de sticlă, bitum spumat și suspensie de ciment	115
6.1.1. Fazele procesului de reciclare “ <i>in situ</i> ” utilizând tehnologia mixturii cu bitum spumat și fibre	115
6.1.2. Tehnologia de dozare a fibrelor	117
6.1.3. Execuția lucrărilor de reciclare cu deșeuri din fibre de sticlă	120
6.2. Determinarea cantităților de lucrări cu ajutorul aplicației de proiectare drumuri „ADVANCED ROAD DESIGN”	121
6.2.1. Scopuri	122
6.2.2. Obiective de referință	123
6.2.3. Configurația geometrică și caracteristicile tehnice ale drumului	123
6.2.4. Situația proiectată	123
6.3. Realizarea rapoartelor de volume pe picheți cu ajutorul “ADVANCED ROAD	

---

DESIGN”	124
6.3.1. Etapele de referință	124
6.3.2. Raportarea terasamentelor și a cantităților de materiale pe poziții kilometrice	126
6.3.3. Raportarea materialelor pe poziții kilometrice în format “csv”	127
6.3.4. Raportarea materialelor pe picheți	128
6.4. Reprezentarea datelor printr-o diagramă coloană	130
6.5. Calculul costurilor necesare realizării - Investiției de bază	132
6.5.1. Calculul costurilor necesare realizării - Investiției de bază - pentru lucrări pe ampriza drumului și “structură rutieră propusă în varianta clasică de reabilitare”	132
6.5.2. Calculul costurilor necesare realizării - Investiției de bază - pentru lucrări pe ampriza drumului și “structură rutieră propusă în varianta de reabilitare prin reciclare “ <i>in situ</i> ” cu bitum spumat, ciment și fibre în dispersie”	134
6.6. Beneficii economice	136
6.7. Concluzii privind aplicațiile practice ale tehnologiei cu bitum spumat, ciment și fibre în dispersie	136
<b>CAPITOLUL 7. Concluzii, contribuții personale, perspective și direcții de cercetare</b>	137
7.1. Concluzii	137
7.2. Concluzii privind siguranța în exploatare a drumurilor reabilite prin reciclare	138
7.3. Contribuții personale	140
7.4. Perspective și direcții de cercetare	140

---

## LISTĂ FIGURI

Fig. 2.1. Tipuri de structuri rutiere cu minerale poligranulare reciclate, armate dispers cu fibre	7
Fig. 2.2. Fibre din sticlă și deșeuri de fibră de sticlă în amestec cu rășini poliesterice după măcinare	10
Fig. 2.3. Reprezentarea variației rezistenței la compresiune în funcție de conținutul de bitum	14
Fig. 2.4. Fibre sintetice din polipropilenă “FORTA FI HMA”	16
Fig. 2.5. Reprezentarea schematică comparativă după starea de viabilitate a rețelei de drumuri județene, din județul Sălaj	22
Fig. 2.6. Reprezentarea schematică a rețelei de drumuri județene pe categorii, din județul Sălaj	22
Fig. 2.7. Reprezentarea schematică a rețelei de drumuri reciclate, în județul Sălaj	23
Fig. 2.8. Imagine din reciclat realizată pe epruveta nr. 1	24
Fig. 2.9. Imagine din reciclat realizată pe epruveta nr. 3	24
Fig. 2.10. Imagine din reciclat realizată pe epruveta nr. 5	24
Fig. 2.11. Fibre de sticlă tăiate din role la lungimea de 12 cm	29
Fig. 2.12. Fibre de sticlă și deșeuri din fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice așternute pe stratul rutier superior	29
Fig. 2.13. Fibre de sticlă uniformizate înainte de reciclare	30
Fig. 2.14. Strat din ciment așternut peste covorul din fibre de sticlă înainte de reciclare	30
Fig. 2.15. Agregate naturale, ciment și fibre așternute înaintea reciclatorului	30
Fig. 2.16. Reciclarea în profunzime a structurii rutiere și a materialelor de adaos	30
Fig. 2.17. Structură rutieră nouă obținută după reciclare	30
Fig. 2.18. Probă de anrobat bituminos prelevată din structura rutieră reciclată	30
Fig. 3.1. Evidențierea cu ajutorul Stereolupei a zonei de interfață trimaterial din reciclat	31
Fig. 3.2. Evidențierea cu ajutorul microscopului electronic a geometriei dispunerii fibrelor în reciclat	32
Fig. 3.3. Tipuri de armare cu fibre a materialului reciclat	33
Fig. 3.4. Reprezentare schematică a unei arii unitare din reciclat și a unei fibre izolate	38
Fig. 3.5. Reprezentarea comparativă a distanței medii calculate dintre fibre în funcție de procentul lor volumic pe 4 epruvete prelevate din reciclat	40
Fig. 3.6. Reprezentarea distanței medii dintre fibre în funcție de numărul de fibre pe 4 epruvete prelevate din reciclat	40
Fig. 3.7. Reprezentare în 2D a armării disperse cu fibre	41
Fig. 3.8. Reprezentare în 3D a armării disperse cu fibre	42
Fig. 3.9. Epruveta nr. 1 cu 21 fibre/As1	43
Fig. 3.10. Epruveta nr. 2 cu 27 fibre/As2	43
Fig. 3.11. Epruveta nr. 3 cu 31 fibre/As3	43
Fig. 3.12. Reprezentare schematică a unei unități de volum și a unei arii unitare din reciclat armat dispers cu fibre	47
Fig. 3.13. Fibre din reciclat cu lungimi peste 30 cm, aglomerate în fascicule și ghemuri	50
Fig. 3.14. Fibră inserată în reciclat	51
Fig. 3.15. Fibră izolată supusă întinderii	52
Fig. 3.16. Reprezentarea unui câmp generalizat de tensiuni generatoare de fisuri la interfața în 2-D	56

Fig. 3.17. Smulgerea fibrelor într-un material reciclat cu crăpături multiple	59
Fig. 3.18. Smulgerea unei singure fibre din sistemul cu crăpături multiple	60
Fig. 3.19. Tipuri de fisuri cauzate de variațiile termice	67
Fig. 3.20. Zonă izolată, degradată din structura rutieră reciclată la rece “in situ” cu bitum spumat și deșeuri din fibre de sticlă în dispersie	68
Fig. 3.21. Reprezentarea fenomenelor de transfer în reciclat	70
Fig. 3.22. Distribuția porilor pe categorii	71
Fig. 3.23. Legarea apei în pori prin adsorbție la interfață	72
Fig. 3.24. Fibre de sticlă ca bariere în difuzia capilară a apei	72
Fig. 4.1. Stereolupa “Olympus SZ”	77
Fig. 4.2. Probă supusă analizei cu Stereolupa “Olympus SZ”	77
Fig. 4.3. Fascicule de fibre dezanrobate parțial și total înglobate în sistemul polifazic reciclat	77
Fig. 4.4. Fascicule de fibre anrobate înglobate în sistemul polifazic reciclat	77
Fig. 4.5. Anrobat bituminos nearmat (fragment) din sistemul polifazic reciclat	78
Fig. 4.6. Zone de anrobat bituminos armat parțial cu fibre dispersate neuniform în sistem	78
Fig. 4.7. Fascicule de fibre excluse parțial din sistem datorită anrobării neuniforme	78
Fig. 4.8. Fascicule de fibre ce creează punți de armare între granulele din sistem	78
Fig. 4.9. Fascicule de fibre ce ies din goluri datorită rușii mecanice a probei	78
Fig. 4.10. Fibre și fascicule de fibre distribuite uniform ce asigură armarea tip “pânză de păianjen”	78
Fig. 4.11. Probă supusă procesului de uscare	79
Fig. 4.12. Probă pregătită pentru metalizare	79
Fig. 4.13. Probă metalizată cu peliculă de aur	79
Fig. 4.14. Fibre dezanrobate parțial în reciclat	79
Fig. 4.15. Fibre înglobate parțial în reciclat	79
Fig. 4.16. Fascicule de fibre excluse din reciclat	79
Fig. 4.17. Fibre înglobate și anrobate total în reciclat	80
Fig. 4.18. Fibre înglobate și anrobate în sistem cu funcția optimă de armare	80
Fig. 4.19. Fascicule de fibre anrobate și înglobate în sistem ce supraarmează local reciclatul	80
Fig. 4.20. Fascicule de fibre degradate de cuțitele reciclatului	80
Fig. 4.21. Fascicul de fibre ce realizează armarea unidirecțională, oblică a reciclatului	80
Fig. 4.22. Fascicul de fibre ce realizează armarea unidirecțională, verticală a reciclatului	80
Fig. 4.23. Corelația dintre rezistența la compresiune și diametrul mediu al particulelor de mastic	84
Fig. 5.1. Aparat pentru determinări “Los Angeles”	90
Fig. 5.2. Etuva	90
Fig. 5.3. Baia de apă termostată	90
Fig. 5.4. Balanță hidrostică	90
Fig. 5.5. Set de site și ciururi	90
Fig. 5.6. Penetrometru “Richardson”	90
Fig. 5.7. Aparat cu inel și bilă	90
Fig. 5.8. Vâscozimetru “Engler”	90
Fig. 5.9. Aparat “Soxhlet”	90
Fig. 5.10. Presă “Marshall”	91
Fig. 5.11. Centrifugă extracție bitum	91
Fig. 5.12. Sonetă “Marshall”	91
Fig. 5.13. Curba granulometrică a agregatului total determinată pe epruveta nr. 1	93
Fig. 5.14. Curba granulometrică a agregatului total determinată pe epruveta nr. 2	95

Fig. 5.15. Curba granulometrică a agregatului total determinată pe epruveta nr. 3	97
Fig. 5.16. Structura rutieră reciclată cu fibre pe DJ 109 lim. Jud. Cluj – Dragu, km: 39+700-39+850	99
Fig. 5.17. Zona marginală cu cedări ușoare a structurii rutiere reciclate cu fibre pe DJ 109 lim. Jud. Cluj – Dragu, km: 39+950	99
Fig. 5.18. Zona izolată parțial segregată din structura rutieră reciclată cu fibre pe DJ 109 lim. Jud. Cluj – Dragu, km: 40+100	99
Fig. 5.19. Reprezentarea grafică în diagrame de tip coloană a parametrilor dominanți în funcție de temperatură	103
Fig. 5.20. Reprezentarea schematică a “stabilității Marshall” în funcție de dozajul de fibre	104
Fig. 5.21. Reprezentarea schematică a “stabilității Marshall” în funcție de dozajul componentelor	104
Fig. 5.22. Reprezentarea schematică a volumului de goluri și densității aparente pe probe	105
Fig. 5.23. Structura macroscopică a reciclatului cu fibre	108
Fig. 5.24. Reprezentarea curbelor tensiune – deformație pentru 3 tipuri de reciclat	112
Fig. 6.1. Schema tehnică de funcționare la reciclatorul WR. 2000, 2200, 2500 (frezare - pulverizare lianți și malaxare pe tamburul de frezare)	116
Fig. 6.2. Tren reciclator utilizat în tehnologia de reciclare cu bitum spumat și fibre de sticlă pe DJ 109, limita jud. Cluj – Dragu format din Autogreder, Compactor 12 to, Reciclator WR 2200, Dozator ciment WM1000, Cisternă de bitum cald	116
Fig. 6.3. Fixarea rolei de folie din polietilenă în instalația de dozare	117
Fig. 6.4. Tăierea fibrelor și așternerea lor în strat uniform pe folia întinsă	117
Fig. 6.5. Uniformizarea stratului de fibre cu ajutorul tamburilor rotative	117
Fig. 6.6. Înfășurarea covorului de fibre fixate cu rășină poliestică pe folia din polietilenă	117
Fig. 6.7. Fazele reciclării și distribuția forței de frânare în structura rutieră	118
Fig. 6.8. Tipuri de sisteme rutiere cu minerale poligranulare ce pot fi reciclate și armate dispers cu fibre	119
Fig. 6.9. Suprafața de teren cu axul în plan și planul de situație proiectat pentru o lungime prestabilită de drum	125
Fig. 6.10. Aplicarea profilului transversal tip pe structură reciclată în picheți prestabiliți	126
Fig. 6.11. Aplicarea profilului transversal tip pe structură clasică în picheți prestabiliți	126
Fig. 6.12. Modul de aplicare a comenzii “Section by Section report for Bulk Earthworks”	127
Fig. 6.13. Tabel reprezentând ariile și volumele de săpătură și umplutură	127
Fig. 6.14. Fișierul de date pentru structura proiectată în varianta clasică de reabilitare	128
Fig. 6.15. Fișierul de date pentru structura proiectată în varianta de reabilitare prin reciclare	128
Fig. 6.16. Modul de aplicare a comenzii (ARUV7MATERIAL SBYINTER POLATION)	129
Fig. 6.17. Modul de aplicare a comenzii (Materials to exclude)	129
Fig. 6.18. Modul de aplicare a comenzii (Apply Bridges Exclude File)	130
Fig. 6.19. Modul de aplicare a comenzii (numedrum - ProfileChNumber)	130
Fig. 6.20. Reprezentarea în diagrame de tip coloană-cilindru a materialelor pe tipuri în valori absolute pentru structura standard	130
Fig. 6.21. Reprezentarea în diagrame de tip coloană-cilindru a materialelor pe tipuri în valori absolute pentru structura reciclată	131
Fig. 6.22. Reprezentarea în diagrama de tip coloană-cilindru a cantităților totale de materiale pe tipuri de structuri	131



## LISTĂ TABELE

Tabelul 2.1. Compoziția chimică a fibrelor de sticlă de tip A	10
Tabelul 2.2. Caracteristicile fibrei poliesterice	11
Tabelul 2.3. Tipuri de fibre utilizate pentru armarea dispersă	17
Tabelul 4.1. Prezentarea datelor rezultate din analiza microscopică a reciclatului cu fibre	81
Tabelul 4.2. Structura reciclatului cu fibre de sticlă	82
Tabelul 5.1. Determinări de laborator pe reciclat cu fibre realizate pe primul sector experimental din România, pe DJ 109, lim. jud. Cluj – Dragu, km: 39+700 – 40+200	92
Tabelul 5.2. Determinări de laborator pe reciclat cu fibre realizate pe primul sector experimental din România, pe DJ 109, lim. jud. Cluj – Dragu, km: 39+700 – 40+200	94
Tabelul 5.3. Determinări de laborator pe reciclat cu fibre realizate pe primul sector experimental din România, pe DJ 109, lim. jud. Cluj – Dragu, km: 39+700 – 40+200	96
Tabelul 5.4. Determinări de capacitate portantă pe reciclat cu fibre realizate pe primul sector experimental din România, pe DJ 109, lim. jud. Cluj – Dragu, km:39+700 – 40+200	98
Tabelul 5.5. Dimensionarea structurii pe primul sector experimental din România, pe DJ 109, lim. jud. Cluj – Dragu, km: 39+700 – 40+200	99
Tabelul 5.6. Parametri variabili în procesul de reciclare	102
Tabelul 5.7. Reprezentarea rezistențelor la compresiune pe probe de reciclat	103
Tabelul 6.1. Calculul costurilor pe cantități de lucrări în varianta clasică de reabilitare a drumului DJ 109 lim. județ Cluj – Dragu – tronson din sectorul experimental km: 39+700 - 40+080	133
Tabelul 6.2. Calculul costurilor pe cantități de lucrări în varianta de reabilitare prin reciclare a DJ 109 lim. județ Cluj – Dragu – tronson din experimental km: 39+700 - 40+080	134

## INTRODUCERE

Fibrele sintetice pot fi utilizate ca “materiale pentru armare dispersă în structurile rutiere reciclate la rece pentru a le îmbunătăți proprietățile fizico-mecanice și a reduce prețul de cost pentru un kilometru de drum reabilitat”.

Din anul 2012 această frază a apărut în lucrările științifice, dar ea urmează a fi confirmată în viitorul în care reciclarea “*in situ*” a structurilor rutiere va fi mult mai larg utilizată, ca tehnologie alternativă în domeniul ingineriei drumurilor.

Această lucrare deschide posibilitatea realizării armării disperse a structurilor rutiere reciclate la rece “*in situ*”, cu deșeuri din fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice și amestecate cu granule din aceste rășini rezultate din procesul de fabricație al piscinelor, căzilor de baie și altor obiecte sanitare armate cu fibre de sticlă, printr-o tehnologie specifică.

Materialele și tehnologiile utilizate pentru reciclare la rece sunt într-o continuă evoluție.

Datorită avantajelor pe care le prezintă armarea dispersă cu fibre a structurilor rutiere reciclate la rece, influențează pozitiv comportamentul în exploatare al acestora. În prezent, numărul abordărilor teoretice și practice în domeniul armării disperse cu fibre a structurilor rutiere reciclate la rece este foarte redus. Totodată, în România nu există realizări tehnologice semnificative în această direcție. După cum se știe și în acest domeniu realizările tehnologice din alte țări sunt cu mult înaintea abordărilor teoretice iar utilajele performante pentru realizarea operațiunilor de reciclare, reciclatoarele-stabilizatoare de tip WR 2000, WR 2200, WR 2400, WR 4200 există în România încă din anii '90, ca tehnologie importată.

Lucrarea de față își propune să fundamenteze științific principiile generale de realizare a reciclării la rece “*in situ*” a structurilor rutiere ranforsate cu fibre de sticlă ori de poliester în dispersie, cu adaos de bitum spumat, ciment (fîler) și apă.

Eforturile tehnologice experimentale au fost direcționate spre optimizarea dozajului de fibre asigurând atât orientarea optimă a fibrelor precum și adezivitatea cât mai bună a lianților la fibre și agregate în prezența apei odată cu omogenizarea amestecului masei de reciclat.

Lucrarea își propune să ofere o imagine de ansamblu a problemelor care apar în aplicarea tehnologiei de reciclare la rece “*in situ*” a structurilor rutiere degradate, cu bitum spumat, ciment și deșeuri din fibre de sticlă în dispersie și soluțiile derivate din observațiile și determinările experimentale.

Nevoile tehnologice de optimizare a soluțiilor de reabilitare a drumurilor prin reciclare

---

pot determina completarea literaturii de specialitate cu această metodă de reciclare în care sunt utilizate deșeuri din fibre de sticlă în dispersie, amestecate cu granule de rășini poliesterice. Ea se bazează pe conceptul de armare cu fibre de sticlă cu orientări diferite care preiau o mare parte din tensiunile deformatoare și le distribuie aleatoriu în masă odată cu disiparea lor și diminuarea potențialului de fisurare. De asemenea, granulele de rășini poliesterice în calitatea lor de material de umplutură intră parțial în golurile generatoare de microfisuri din reciclat.

Această abordare se bazează pe observațiile și determinările microscopice secvențiale, considerate microstructuri speciale și pe răspunsurile la solicitările mecanice realizate pe epruvete, care pot fi diferențiate atunci când dozajul și orientările fibrelor sunt diferite.

Utilizarea acestei tehnologii de reciclare este recomandată în special pentru o dimensionare optimă a structurilor rutiere în care rolul cheie îl au fibrele ce îmbunătățesc semnificativ proprietățile și cresc performanțele acestora.

Pe de altă parte, în lucrare, sunt analizate câteva puncte esențiale cum ar fi: geometria dispunerii fibrelor, funcția de armare, dozajul, distanța medie dintre fibre și comportamentului reciclatului cu fibre la acțiunea forțelor deformatoare. Toate aceste date pot fi utilizate în predimensionarea structurilor rutiere reciclate la rece, în care variabilele de proiectare sunt legate de proprietățile straturilor rutiere pe diverse secțiuni transversale și alte elemente geometrice ale traseului drumului.

Optimizarea structurală a straturilor rutiere este abordată pe bază de soluții specifice elaborate într-o diversitate de condiții locale care converg spre o acceptare atât tehnologică cât și economică. Este prezentat și un model de studiu parametric pentru aceste tipuri de structuri rutiere reciclate din care pot fi trase concluzii privind avantajele și dezavantajele realizării lor.

Sunt abordate aspecte legate de omogenitatea dispersiei fibrelor, de compatibilitate a componentilor în căutarea soluției de realizare a dispersiei optime, care maximizează rigiditatea structurală.

Pornind de la criterii simple, de mecanica ruperii cu efecte neliniare și de la mecanismele de propagare a fisurilor în structurile reciclate, sunt formulate concluzii limitate de incertitudinile ce pot deschide alte direcții de cercetare cu privire la proprietățile mecanice ale reciclatului cu fibre în dispersie.

## CAPITOLUL 1

### ***DEFINIREA ȘI DESCRIEREA PE CAPITOLE A CONCEPTULUI DE RECICLAT ARMAT DISPERS CU FIBRE***

#### **1.1. Definirea conceptului de material reciclat armat dispers cu fibre**

Scopul principal al acestei lucrări este să evidențieze posibilitatea armării disperse cu fibre sau deșeuri din fibre de sticlă a structurilor rutiere reciclate la rece “*in situ*” cu bitum spumat și ciment. Pentru definirea conceptului de “material reciclat armat dispers cu fibre” și confirmarea caracteristicilor fizico-mecanice superioare ale acestuia față de oricare anrobat bituminos clasic, au fost realizate investigații cu ajutorul microscopiei de înaltă performanță și determinări de laborator pe probele prelevate pe parcursul realizării sectoarelor experimentale.

Acest domeniu de cercetare este de actualitate atât datorită dezvoltării de diverse tehnologii de recuperare și reciclare a materialelor cât și datorită necesității protecției mediului înconjurător. Soluția de reciclare la rece “*in situ*” cu bitum spumat, ciment și fibre sau deșeuri din fibre de sticlă în dispersie a structurilor rutiere degradate, răspunde cerințelor actuale privind economia de resurse materiale, coroborată cu cerințele de mediu. Deșeurile din fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice și amestecate cu granule din aceste rășini rezultate după măcinare au un potențial poluant extrem de ridicat.

Lucrarea a pornit de la ideea necesității studierii posibilităților de utilizare a acestor deșeuri în tehnologia de reciclare și a compatibilității lor cu ceilalți componenți din sistem. Primele încercări au necesitat introducerea și dezvoltarea soluțiilor de control al dozajului pe componenți înainte și în faza de reciclare. În acest sens, dacă Reciclatorul Wirtgen 2200 dispune de sisteme de dozare a unor componenți (apă, bitum) a fost necesară și dozarea corectă a fibrelor înainte de preluarea lor de către cuțitele reciclatorului. Această problemă de dozare a fost rezolvată cu ajutorul unei instalații unice în România existente la S.C. FIBREX Co S.R.L. Crasna, județul Sălaj, ce a fost adaptată pentru realizarea acestei operațiuni.

Astfel, după rezolvarea tuturor problemelor de pregătire pe componente, au fost realizate două sectoare experimentale: primul pe drumul județean DJ 109, lim. județ Cluj – Dragu, între km 39+700 – 40+200 iar al doilea pe drumul comunal DC 4 A, DN 1F – Șamșud. În urma prelevării probelor de pe sectoarele experimentale realizate și efectuarea primelor determinări de laborator am constatat că s-a obținut o mixtură asfaltică similară unui anrobat bituminos clasic dar cu rezistențe net superioare.

---

În urma analizelor prin metode optice de înaltă performanță a structurii interne a materialului rezultat din procesul de reciclare cu fibre în dispersie, putem afirma că acesta nu este un compozit polimeric clasic dar are unele comportări oarecum similare cu anumite tipuri compozite.

Rezultatele calitative obținute confirmă corectitudinea ipotezei inițiale privind proprietățile potențial superioare ale acestor tipuri de materiale ce pot fi utilizate pentru realizarea structurilor rutiere de orice categorie. Performanțele și durabilitatea structurilor rutiere obținute în anul 2013 odată cu realizarea sectoarelor experimentale din județul Sălaj, pe drumul județean DJ 109, limita județ Cluj – Dragu, arată că definiția inițială a conceptului de “*material reciclat, armat dispers cu fibre*” este una corectă. Răspunsurile la întrebările privind alte proprietăți ale acestor structuri, implică extinderea studiilor pentru determinarea comportării la solicitări de tipul deformațiilor permanente și oboseală, în condițiile existenței unei varietăți a soluțiilor de armare.

## **1.2. Componenta pe capitole a lucrării**

Lucrarea cuprinde cinci capitole și o anexă în care sunt analizate și prezentate următoarele aspecte:

În Capitolul 1 se definește succint conceptul de armare dispersă cu fibre a materialului reciclat și este prezentat cuprinsul pe capitole al lucrării.

Capitolul 2 face referire la posibilitățile de aplicarea în practică a conceptului de armare dispersă cu fibre sau deșeuri din fibre de sticlă, la alegerea materialelor de armare și la avantajele acestei soluții. Sunt analizate câteva tipuri de fibre ce pot fi utilizate în armarea dispersă, alte materiale utilizate la reciclare și este descrisă tehnologia de reciclare cu fibre sau cu deșeuri din fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice și amestecate cu granule din aceste rășini, rezultate după măcinare. Primele concluzii și observații practice desprinse din descrierea acestei tehnologii, încheie acest capitol.

Capitolul 3 tratează mecanismele transmiterii tensiunilor de la sistem la fibre în procesul de realizare a funcției de armare, adeziunea la interfață și modalitățile teoretice de calcul a distanței medii dintre fibre, a suprafeței specifice, a lungimii fibrelor și a dozajului acestora ca bază pentru un concept nou de proiectare la durabilitate a acestor tipuri de structuri rutiere. Mai sunt reliefate aspecte privind întinderea fibrelor, apariția fisurilor, smulgerea fibrelor, defectele de structură și cauzele degradărilor ce apar la aceste categorii de structuri rutiere. Influența traficului asupra degradărilor structurale și fenomenele de transfer de lichide și gaze în reciclat

sunt expuse în partea finală a acestui capitol.

Aspecte teoretice desprinse din analiza cu ajutorul Stereolupei “*Olympus SZ*” și prin scanare cu microscopul electronic “*Jeol – JSM – 5510 LV*” a structurii materialului reciclat și modelele de tranziție la scară microscopică a distribuției tensiunilor, sunt descrise în Capitolul 4.

În Capitolul 5 sunt prezentate determinările de laborator specifice pe epruvete prelevate din reciclatul cu fibre, un studiu parametric realizat pe baza datelor practice culese, diverse corelații între conținutul de fibre, stabilitatea Marshall și modificările valorilor volumului de goluri și ale densității aparente în funcție de numărul de treceri ale compactorului cu rulouri netede. Descrierea caracteristicilor macroscopice ale reciclatului, diverse geometrii de fibre, factorul de dispersie, factorul de eficiență al armării și fenomenul de fisurare macroscopică încheie acest capitol.

În Capitolul 6 sunt detaliate câteva date sintetice privind utilizarea tehnologiei de reciclare la rece “*in situ*” cu bitum spumat și ciment în România și în județul Sălaj, performanțele structurilor rutiere reciclate la rece cu fibre de sticlă realizate experimental pe drumul județean DJ 109, limita județ Cluj – Dragu, precum și o analiză a posibilităților de utilizare a acestei tehnologii pe alte drumuri județene administrate de CONSILIUL JUDEȚEAN SĂLAJ, în funcție de starea lor de viabilitate. Modul de utilizare a fibrelor sau a deșeurilor de fibre din sticlă peliculizate cu rășini poliesterice în realizarea sectoarelor experimentale sunt descrise în continuarea acestui capitol. În partea finală este propusă o nouă metodă eficientă de determinare a cantităților de lucrări cu ajutorul aplicației de proiectare drumuri “ADVANCED ROAD DESIGN” și de calcul comparativ al costurilor atât în varianta clasică de reabilitare cât și în varianta de reabilitare prin reciclare cu bitum spumat și deșeuri din fibre, pe un tronson de drum din sectorul experimental realizat, în lungime totală de 380 m.

Mai multe perspective și direcții de cercetare, concluziile și contribuțiile personale aduse în implementarea tehnologiei de reciclate la rece “*in situ*” cu bitum spumat și fibre sau deșeuri din fibre de sticlă în dispersie a structurilor rutiere degradate, sunt expuse în Capitolul 7.

## CAPITOLUL 2

### ***UTILIZAREA FIBRELOR SINTETICE PENTRU ARMAREA STRUCTURILOR RUTIERE RECICLATE LA RECE***

#### **2.1. Armarea dispersă cu deșeuri din fibră de sticlă a structurilor rutiere suple și semirigide, reciclate la rece “*in situ*”**

La baza conceptului de armare a materialelor existente în structurile rutiere suple și semirigide reciclate la rece stau câteva întrebări de bază la care vom căuta răspunsuri adecvate.

Acestea sunt:

- a) De ce este utilă recuperarea prin reciclare a materialelor componente ale structurilor rutiere suple și semirigide (balast, piatră spartă, cribluri, bitum)?;
  - b) Cum se realizează utilizarea componenței eterogene a materialelor reciclate?;
  - c) Cum se realizează punerea în valoare a compoziției mineralogice și chimice eterogene a acestor materiale?;
  - d) Dacă utilizarea materialelor de adaos cu compoziții și structuri mineralogice diferite (cribluri, piatră spartă, balast) este necesară?;
  - e) Dacă lianții de adaos, în amestec au compatibilitate limitată (ciment + bitum)?;
  - f) Cum se manifestă apariția microfisurilor în amestecul reciclat datorită compatibilității limitate a materialelor și a lianților aflați în interacțiune care generează un gradient de tensiuni superficiale specific?;
  - g) Cum se realizează alegerea unui material de armare în funcție de caracteristicile și condițiile de utilizare a noului complex rutier?;
  - h) Dacă respectarea condiției de reciclare a materialelor de armare – deșeuri de fibră de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice implică degradarea parțială a acestora?;
  - i) Cum se realizează compatibilitatea fibrelor de armare cu materialele (agregatele) și lianții din amestecul reciclat?;
  - j) Dacă este asigurată creșterea rezistențelor structurilor rutiere în urma introducerii în masa de material reciclat a materialelor de armare (fibrelor în dispersie)?;
  - k) Cum putem reduce posibilitatea apariției microfisurilor (considerate ca principal factor generator de degradare) în masa de material reciclat?;
  - l) Cum se poate asigura distribuția uniformă în masă a fibrelor?;
  - m) Dacă amestecul de material reciclat se constituie în mediu de transmitere a
-

eforturilor atât între faze cât și către fibre ca material de armare prin adeziune sau conlucrare?;

- n) Dacă și cum amestecul reciclat trebuie să protejeze fibrele din masă pe toată durata de exploatare?;
- o) Dacă fibrele vor asigura distribuția concentrărilor de tensiuni odată cu reducerea fenomenului de propagare a fisurilor în masă?;
- p) Dacă fibrele reduc efectele corozive ale agenților chimici asupra masei de material reciclat prin stabilitatea lor chimică?.

Odată definit conceptul de armare dispersă, putem determina câteva tipuri de structuri rutiere reciclate, astfel:

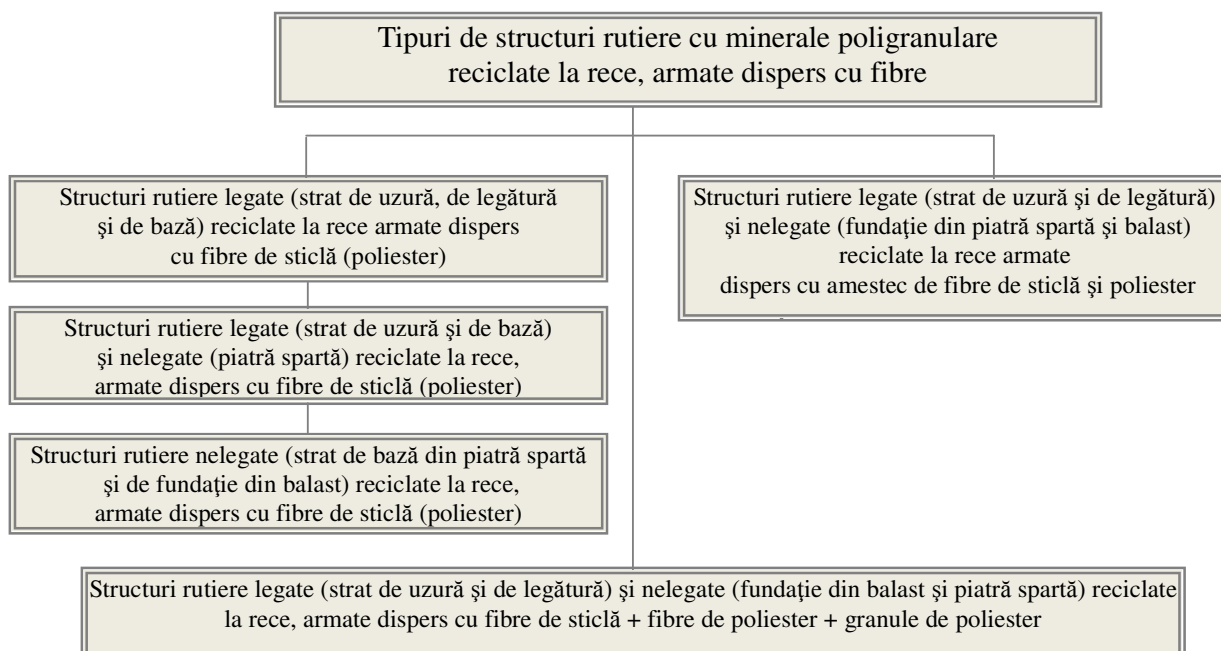


Fig. 2.1. Tipuri de structuri rutiere cu minerale poligranulare reciclate, armate dispers cu fibre

## 2.2. Alegerea materialelor de armare

### 2.2.1. Armarea cu fibre

Armarea dispersă a structurilor rutiere reciclate la rece are ca scop îmbunătățirea proprietăților fizico-mecanice ale acestora. Materialele de armare (fibrele de sticlă sau deșeurile din fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice) pot contribui la ridicarea parametrilor fizico-mecanici ai structurilor rutiere reciclate la rece prin modul de dispersie al acestora, proporția lor în masă și de măsura în care acestea realizează o aderență bună cu scheletul mineral, liant și alte materiale de adaos. Fibrele reprezintă componenta discontinuă în masă având atât un rol



ranforsant cât și rol de umplere a spațiilor interstițiale dintre fracțiunile granulare odată cu diminuarea porozității sistemului și reducerea tensiunilor superficiale la interfața componentelor și reducerea riscului apariției microfisurilor.

Funcția de armare este îndeplinită dacă fibrele au rezistență la tracțiune și elongația strâns corelate cu cele ale materialului reciclat și dacă se asigură atât transferul solicitărilor exterioare de la ranforsant la fibre, cât și protecția fibrelor împotriva degradărilor mecanice sau prin coroziune.

Alegerea fibrelor de sticlă sau a deșeurilor din fibre de sticlă peliculate cu rășini poliesterice, ca materiale de armare, se justifică prin necesitatea atingerii scopului propus și impune cunoașterea condițiilor generale pe care acestea trebuie să le îndeplinească. Acestea sunt:

- modul de elasticitate ridicat;
- formă corespunzătoare care să asigure realizarea corectă a dozajului și dispersia în masă;
- suprafață specifică de aderență a lianților de adaos.

Utilizarea extinsă a fibrelor de sticlă și a celor din poliesteri ca materiale componente (geogridurile, geosintetice, geocompozite antifisură) dar și ca materiale pentru construcția de drumuri, căi ferate, construcții hidrotehnice, ducă la concluzia că acestea ar putea fi utilizate și pentru armarea dispersă a structurilor rutiere suple, semirigide ori rigide întrucât prezintă următoarele caracteristici de bază:

- rezistențe mari la rupere, la tracțiune, compresiune și șoc;
- stabilitate dimensională;
- rezistență la coroziune;
- nu absorb apă, nu se degradează sub acțiunea factorilor organici iar cele de sticlă nu ard;
- fibrele de sticlă au stabilitate termică bună (la 370°C își păstrează aproximativ 50% din valorile caracteristicilor fizico-mecanice pe care le au la temperatura obișnuită);
- buni izolatori electrici și termici;
- au densități reduse;
- au prețuri extrem de reduse fiind materiale reciclate.

### **2.2.1.1. Principalele avantaje ale soluțiilor de armare cu fibre**

Principalele avantaje ale fibrelor cu funcție de armare în reciclat sunt:

- costul foarte redus al fibrelor (deșeuri rezultate de la producerea obiectelor sanitare cu fibre de sticlă în matrice de rășini poliesterice);
- rezistență la șoc;
- rezistență la întindere și compresiune;
- rezistență la atac chimic și biologic;
- rezistență la acțiunea apei și la umiditate timp îndelungat;
- rezistență la impact (fibre de sticlă).

Această serie de avantaje recomandă utilizarea fibrelor de sticlă pentru armare dispersă a structurilor rutiere reciclate, pe considerentele performanțelor acestora ca materiale cu funcție de armare, economice și de mediu.

### **2.2.1.2. Principalele dezavantaje ale soluțiilor de armare cu fibre**

Principalele dezavantaje ale fibrelor cu funcție de armare sunt:

- rezistență scăzută la abraziune;
- aderență limitată a liantului la fibră în prezența apei.

Aderența relativ scăzută a liantului la fibră în prezența apei necesită fie folosirea unor agenți chimici de cuplare, fie reducerea cantității de apă din amestec până la o valoare care să nu influențeze semnificativ acest fenomen.

Caracteristicile fizico-mecanice ale structurilor rutiere reciclate la rece și armate dispers cu fibre sunt influențate semnificativ de forma și dimensiunile materialelor poligranulare, de omogenitatea distribuției lor în masă și de cantitatea de fibre pe unitatea volumică de material reciclat de dozajul și tipul de lianti utilizați.

## **2.3. Fibrele de sticlă**

Fibrele de sticlă se obțin prin topirea compușilor silicoși la temperaturi de 1.200 – 1.600°C în cuptoare de topire a sticlei. Din topitura de sticlă se realizează baghete sau bile din care prin retopire se filează filamente care în contact cu aerul se solidifică și se înfășoară cu viteză mare pe tamburi speciali când are loc o puternică etirare și subțiere a filamentelor. Fibrele pot fi rupte mecanic și așternute pe o folie din poliester ca suport pentru realizarea unei pături de fibre în grosimea cerută de utilizator. Fibrele ondulate conferă cea mai bună fixare în matrice având funcție de armare. Ele servesc la fabricarea obiectelor sanitare, a celor de mobilier urban ori de

grădină etc. din rășini poliesterice armate cu fibre de sticlă. Compoziția chimică a acestora este prezentată în Tabelul 2.1. [32].

**Tabelul 2.1. Compoziția chimică a fibrelor de sticlă de tip A**

Tipul de fibră de sticlă	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)
Fibre de tip A	65	25	10

Fibrele de sticlă cu lungimea de 12 cm și deșeurile de fibre din sticlă cu lungimi cuprinse între 2,50 și 5,00 mm, peliculizate cu rășini poliesterice și amestecate cu granule din aceste rășini, rezultate după măcinare, sunt prezentate în Fig. 2.2.



*Fig. 2.2. Fibre din sticlă și deșeurile de fibră de sticlă în amestec cu rășini poliesterice după măcinare*

#### **2.4. Fibrele poliesterice**

Din poliesteri se realizează o varietate de materiale între care și fibrele textile care au apărut în anii '50. Termenul de poliester cuprinde o varietate de materiale din cadrul fibrelor textile, din care o parte au început să fie luate în considerare pentru armarea dispersă a betoanelor. Literatura de specialitate recomandă un volum de 1%, care poate asigura o bună comportare pentru reducerea fisurilor datorate contracției. Dozajul de fibre în acest procent volumic nu dă creșteri semnificative ale rezistenței și durității. Durabilitatea fibrelor de polipropilenă în sistemul polifazic agregat – ciment – apă nu este complet elucidată și se presupune că acestea își reduc rezistența sub acțiunea componentilor alcalini ai cimentului. Fibrele poliesterice pot fi utilizate pentru armare, au puritate de 100%, sunt non-magnetice,

rezistente la coroziune, neutre chimic și nonhigroscopice [32].

**Tabelul 2.2. Caracteristicile fibrei poliesterice**

<b>FIBRA POLIESTERICĂ</b>	
Modul de elasticitate $E$	2800 - 3100 MPa
Rezistență la rupere $\sigma_t$	55 - 75 MPa
Limita de elasticitate	50 - 150 %
Temperatura de topire	170 °C
Absorbția de apă (ASTM)	0,16

Comportarea materialelor de armare dispersate în masa de material reciclat diferă în funcție de compoziția și caracteristicile acestora, de distribuția lor omogenă și modul de dispunere al acestora, de proporția în care sunt folosite precum și de măsura în care se realizează o bună aderență între cele 3 componente în amestec: scheletul mineral (al agregatelor) – liant – fibra de armare.

### **2.5. Rolul deșeurilor din fibre de sticlă adăugate la reciclare**

Proporția de deșuri din fibre de sticlă adăugate în masa de reciclat are în vedere obținerea caracteristicilor fizico-mecanice specifice tipului de mixtură ce urmează a fi obținută prin această metodă. Dozajul fibrelor exprimat în procente masice, așa cum a fost determinat în Capitolul 3, asigură un număr minim necesar de fibre pe unitatea de volum din materialul reciclat, precum și îndeplinirea funcției de armare. Deșeurile din fibre de sticlă cu lungimi mai mici de 5 cm nu vor fi luate în considerare ca având funcție de armare întrucât acestea nu asigură legarea suficient de puternică a granulelor sub acțiunea liantului.

Stabilirea și utilizarea în dozaje corecte a deșeurilor din fibre de sticlă în funcție de tipul și adâncimea de reciclare și caracteristicile materialelor granulare existente în structura rutieră este condiția de bază a obținerii unor structuri reciclate cu capacități portante ridicate. În continuare, vom exemplifica câteva caracteristici fizico-mecanice ale agregatelor naturale, cimentului și bitumului spumat în calitate de componenți ai stratului rutier obținut după reciclare.

## 2.6. Alte materiale utilizate

În principiu, materialele utilizate în tehnologia reciclării la rece “*in situ*” a structurilor rutiere sunt următoarele:

- agregate naturale: din structura existentă și de aport;
- lianți hidraulici: ciment sau var;
- lianți bituminoși: bitum, emulsie bituminoasă cationică (cu bitum simplu sau modificat) și/sau bitum spumat;
- apă.

### 2.6.1. Agregatele naturale

Agregatele naturale (balast, piatră spartă) preluate de cuțitele reciclatorului din structura rutieră existentă, degradată, au următoarele caracteristici de bază:

- nu sunt curate;
- conțin părți levigabile, urme de produse petroliere sau resturi organice;
- sunt mărunțite suplimentar sub acțiunea cuțitelor reciclatorului astfel încât curba granulometrică determinată inițial pe probele prelevate va avea ușoare abateri;
- prezintă urme de alterare chimică;
- prezintă roci parțial descompuse sub acțiunea apelor freatice sau agenților fizico-chimici din atmosferă aflați în contact cu acestea prin fenomenul de absorbție capilară.

Determinările de laborator au evidențiat faptul că adezivitatea bitumului scade cu până la 50% față de cea obținută pe agregatele spălate.

Agregatele de adaos trebuie să aibă următoarele caracteristici:

- uzură mică datorată circulației rutiere cu un coeficient Los Angeles mai mic de 20%;
- omogenitate mineralogică;
- proveniență din roci bazice sau neutre care asigură o bună adezivitate a bitumului spumat;
- rezistență la compresiune;
- forme granulare poliedrice pentru evitarea sfărâmării sub circulație.

Agregatele de adaos sunt, de regulă, balast de râu spălat sau piatră spartă cu granulația între 25 și 40 mm.

---

### 2.6.2. Cimentul

Cimentul favorizează maturarea amestecului, mărește domeniul de plasticitate și adezivitatea bitumului la agregatele naturale. Cimentul amestecat cu bitum își modifică mai greu compoziția chimică împiedicând îmbătrânirea prematură a bitumului și este denumit în literatura de specialitate “filer activ”.

Cimentul dozat corespunzător mărește suprafața specifică de aderență a agregatului natural și compactitatea reciclatului care împreună cresc rezistențele mecanice și stabilitatea acestuia. Rezistența la forfecare și la alte tipuri de deformații plastice crește odată cu micșorarea grosimii peliculei de bitum, iar acest fenomen este favorizat prin procesul de “filerizare” a agregatelor.

Din studiile de laborator realizate pe anrobate bituminoase obținute prin reciclare “*in situ*” cu bitum spumat și deșeuri din fibră de sticlă în dispersie, în care cimentul a fost înlocuit cu filer de calcar au rezultat următoarele concluzii:

- adezivitatea bitumului în prezența filerului de calcar și stabilitatea reciclatului nu s-au modificat;
- vâscozitatea bitumului spumat a crescut ușor;
- volumul de goluri s-a redus cu 1 până la 3%.

Deșeurile din fibră de sticlă adăugate în masă în procente de 1,5 până la 3% în prezența filerului de calcar își îndeplinesc funcția de armare și măresc coeziunea reciclatului.

### 2.6.3. Bitumul spumat

Prin proprietățile sale de liant în masa de reciclat, bitumul spumat realizează:

- peliculizarea agregatelor și anrobarea acestora în faza premergătoare legării lor;
- menținerea adezivității sub acțiunea factorilor deformați, în prezența apei.

Se recomandă utilizarea bitumului D 80/100, încălzit la 160-170°C care are o bună capacitate de spumare în momentul dozării acestuia de către instalația de dozare a reciclatorului Wirtgen 2200.

Dozajul de bitum și vâscozitatea acestuia influențează stabilitatea mecanică a reciclatului. La dozaje insuficiente de liant după compactare apar suprafețe poroase ce se degradează ușor sub acțiunea apei.

## 2.7. Determinarea dozajului optim de bitum spumat

Pornind de la faptul că în masa de reciclat pe lângă agregate și ciment sunt adăugate deșeuri de fibră de sticlă, uneori în amestec cu rășini poliesterice, stabilirea dozajului optim de liant este o caracteristică hotărâtoare pentru proprietățile fizico-mecanice ale materialului obținut.

Variația rezistenței la compresiune în funcție de conținutul de bitum realizată pe epruveta nr. 5 prelevată din reciclat este prezentată mai jos:

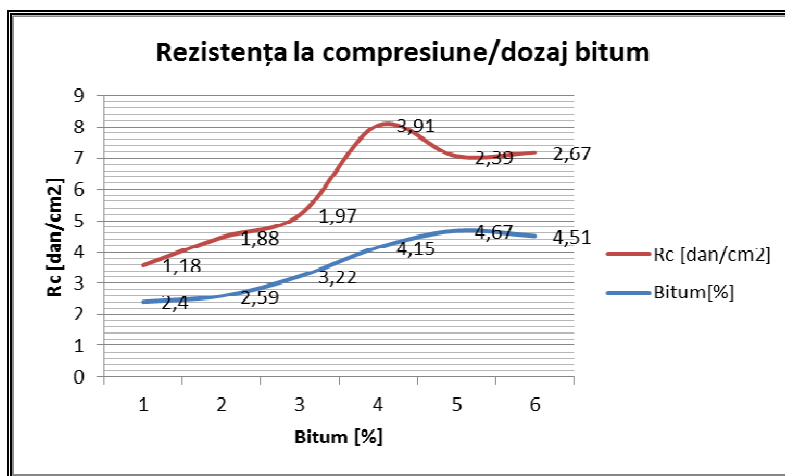


Fig. 2.3. Reprezentarea variației rezistenței la compresiune în funcție de conținutul de bitum

Conținutul de bitum trebuie să asigure anrobarea agregatelor și a fibrelor în vederea obținerii unor valori maxime pentru stabilitatea Marshall, densitatea aparentă și fluaj. Cantitatea de bitum necesară anrobării complete a componentelor după observații experimentale este de circa 3,5%. Depășirea acestei valori duce la diminuarea calității anrobotului obținut prin reciclare după cum se poate observa din graficul de la Fig. 2.3.

Excesul de bitum creează în masa de reciclat deformații plastice ireversibile și favorizează diminuarea capacității portante, facilitând infiltrarea apei prin porozitate și în final dezanrobarea și degradarea structurii rutiere. Concluzia cea mai importantă este că în stabilirea conținutului optim de bitum spumat sunt determinante încercările experimentale care evidențiază procente de componente la care anrobotele au cele mai bune caracteristici fizico-mecanice. Înainte de stabilirea dozajului optim de liant se fac pregătiri de laborator după cum urmează:

- determinarea granulozității pe sorturi;
- determinarea caracteristicilor bitumului (adezivitate, punct de înmuiere, penetrație);

- determinarea caracteristicilor fibrelor ce urmează a fi adăugate în masă (lungime, diametru, cu sau fără granule de rășini poliesterice);
- calculul compoziției procentuale pe dozaje de agregat;
- realizarea curbelor de granulozitate și verificarea încadrării lor în zonele recomandate în normele tehnice;
- calculul suprafeței specifice și a dozajului de liant.

Calculul necesarului de liant pentru anrobate bituminoase obținute prin reciclarea “*in situ*” a structurilor rutiere cu deșeuri de fibre de sticlă în dispersie se poate realiza cu relația [60]:

$$b = 0,035 P + 0,045 N + 0,15 F_1 + 0,15 F_2 + C$$

în care:

b – procentul de bitum;

P – procentul de granule cu dimensiunea > 2 mm;

N – procentul de granule cuprinse între 0,074 și 2 mm;

F<sub>1</sub> – procentul de părți fine (ciment sub 0,074 mm);

F<sub>2</sub> – procentul de fibre (cu lungimea peste 5 cm);

C – coeficientul care ține seama de condițiile locale, de porozitatea rocii etc. și care variază între 0,7 și 1,0.

Din datele experimentale putem formula câteva concluzii legate de dozajul de bitum utilizat prin această tehnologie de reciclare, astfel:

- creșterea dozajului de bitum cu 0,3 – 0,5% este necesară pentru asigurarea anrobării fibrelor dispersate în masa de reciclat și asigurarea gradului de compactare corespunzător;
- mărirea dozajului de ciment cu 1 – 1,5% duce la creșterea gradului de compactare cu 0,7 – 1%;
- granulozitatea continuă a agregatelor și prezența fibrelor în dispersie în amestec cu rășini poliesterice asigură o compactitate ridicată a amestecului reciclat.

## **2.8. Utilizarea fibrelor sau a deșeurilor de fibre din sticlă peliculizate cu rășini poliesterice în tehnologia de reciclare cu bitum spumat și ciment**

Deschidem un domeniu în care soluțiile de reciclare și armare dispersă cu fibre vor câștiga din ce în ce mai mult teren, datorită caracteristicilor fizico-mecanice îmbunătățite ale acestor tipuri de structuri rutiere.

Planul de calitate și control pentru tehnologia reciclării cu bitum spumat și fibre este

---



elaborat de constructor în colaborare cu coordonatorul sectorului experimental și armonizat cu cerințele impuse de standardul SR EN ISO 9001:2008.

Abordările teoretice în domeniul armării disperse cu fibre a structurilor rutiere reciclate la rece, armate cu fibre, sunt extrem de puține iar realizări tehnologice nu există. Câteva exemple din domenii conexe privind armarea dispersă sunt redată mai jos:

Reglementarea tehnică din 21/04/2003 publicată în Monitorul Oficial al României, Partea I nr. 576 bis din 12/08/2003 și denumită “Ghid pentru stabilirea criteriilor de performanță și a compozițiilor pentru betoanele armate dispers cu fibre metalice”, indicativ GP-075-02, betonul armat dispers cu fibre metalice – BFM este definit ca “*material obținut prin amestecul cimentului, agregatelor, fibrelor metalice, aditivilor, adaosurilor minerale și apei la preparare, în proporțiile prestabilite, ale cărui proprietăți se dezvoltă prin hidratarea și întărirea cimentului și interacțiunea dintre fibrele metalice și matrice*” [45].

Astfel, noțiunea de beton “armat dispers cu fibre” de diferite tipuri va fi acceptată în literatura de specialitate din țară.

În data de 01.09.2010 Grupa specializată nr. 7 – Drumuri, poduri, porturi și aeroporturi eliberează Acordul Tehnic nr. 004-07/1253-2010 pentru produsul “FORTA FI HMA - fibre din polipropilenă pentru mixturi asfaltice” ce se utilizează în mixturile asfaltice de tip MASF (mixtura asfaltică stabilizată cu fibre) [78].

Produsul “FORTA FI HMA” este format din fibre sintetice din polipropilenă de culoare galben – negru – cenușiu având următoarele proprietăți fizice [78]:



Fig. 2.4. Fibre sintetice din polipropilenă “FORTA FI HMA”

Materiale de ..... Polyolefin/Aramid  
 Lungime ..... 3/4" (19 mm), 1-1/2" (38 mm)  
 Forma ..... Twisted fibrilate & Monofilament fibre  
 Culoare ..... Galben, Negru, Cenușiu  
 Greutatea specifică ..... 0.91/1.44  
 Rezistența la rupere ..... 70.000 p.s.i./400.000 p.s.i.  
 Temperatura de topire ..... 212°F/800°F (100°C/427°C)

Adaosul de fibre active de 0,30 - 0,50% creează în masă o rețea tridimensională care asigură mixturii asfaltice de tipul MASF, stabilitate la temperaturi ridicate, flexibilitate la temperaturi scăzute și o bună rezistență la uzură. Produsul este fabricat de FORTA Corporation SUA.

Totuși, armarea dispersă cu fibre a structurilor rutiere reciclate la rece are un al doilea scop major, acesta fiind controlul procesului de generare a microfisurilor în masa de material reciclat, a capacității de absorbție a energiei generate de forțele deformatoare, a creșterii rezistenței la impact, la șoc și gradienti de temperatură.

În Tabelul nr. 2.3. sunt redate caracteristicile fizico-mecanice ale diverselor categorii de fibre sintetice ce pot fi utilizate la armarea dispersă a betoanelor sau mixturilor asfaltice.

**Tabelul 2.3. Tipuri de fibre utilizate pentru armarea dispersă [32]**

Felul fibrei	Diametru [μm]	Densitate [kg/m <sup>3</sup> ]	Rezistența la întindere [N/mm <sup>2</sup> ]	Modulul de elasticitate [N/mm <sup>2</sup> × 10 <sup>3</sup> ]	Alungire la rupere [%]	Rt/ρ [Nmm/kg × 10 <sup>-9</sup> ]
Azbest	0,02-20	3200	500-3000	80-150	0,50-2,0	0,15-0,95
Vată minerală	10	2700	500-800	70-120	0,6	0,18-0,30
Carbon (grafit)	8-9	1900	1800-2600	200-380	0,5-1,0	0,95-1,37
Oțel	5-800 7850	5-800 7850	1000-3000	210	3-4	0,13-0,39
Sticlă	9-15	2500	1000-4000	70-80	1,5-3,5	0,46-1,60
Polipropilenă	20-200	900	300-800	3,5-5,0	20-25	0,33-0,90
Poliester	20-200	950	700-900	8,4	11-13	0,74-0,95

Utilizarea tehnicii de reciclare “*in situ*” este condiția obligatorie de eficiență maximă, ce conferă posibilitatea realizării unor sisteme complexe de tipul: agregate minerale – lianți – fibre – apă. Astfel, se îndeplinesc condițiile de recuperare a unor componente din sistem cum ar fi agregatele și de utilizare a deșeurilor din fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice ce au un potențial poluant ridicat.

## **2.9. Aplicarea tehnologiei de reciclare cu fibre în dispersie**

Utilizarea tehnicii de dozare a fibrelor, unică în România, existentă la S.C. FIBREX Co S.R.L. Crasna, județul Sălaj, așa cum a fost prezentată în Capitolul 2, cu ajutorul căreia fibrele sunt tăiate la dimensiunile prestabilite, stropite cu liant și așternute în covor continuu pe o folie din polietilenă cu grosimea de 0,02 m, constituie un progres evident față de tehnicile clasice de așternere manuală a acestora în fața reciclatorului.

Opinia aproape unanimă este că straturile interfaciale în masa de reciclat asimilată cu un sistem polifazic (agregate, lianți, fibre, apă), au o influență extrem de importantă asupra proprietăților fizico-mecanice și asupra lucrabilității întregului sistem.

Studiile teoretice, de obicei, se mulțumesc cu modele de adeziune bună sau rea. Controlul proprietăților masei de reciclat aramat dispers cu fibre constă în a găsi tipul de fibre cu lungimea optimă și a alege lianții capabili să îmbunătățească proprietățile componentelor la interfață.

### **2.9.1. Utilizarea tehnologiei de reciclare la rece cu fibre de sticlă în dispersie, în cadrul lucrărilor de reabilitare a drumurilor în România și în Județul Sălaj**

Tehnologia de reciclare/ranforsare la rece, “*in situ*”, a structurilor rutiere degradate cu adaos de ciment și emulsie bituminoasă, a fost introdusă în țara noastră în anul 1996, odată cu mașina de frezat/reciclat 2100 DCR.

Lucrarea publicată de Katz și Milewski [37] prezintă materialele de umplutură minerale, organice și sintetice, curent utilizate și trage concluzia că aproape toate materialele naturale ori sintetice, pot fi într-o formă sau alta amestecate cu o matrice pentru a forma un compozit cu proprietăți fizico-mecanice îmbunătățite.

Deșeurile din fibre de sticlă cu rol de umpluturi disperse și cu funcție de armare, au utilizări multiple ca elemente de ranforsare în matrice organice, ceramice ori metalice, toate făcând parte din domeniul materialelor compozite. De asemenea, sunt cunoscute geotextilele neșesute tridimensionale, realizate dintr-un aglomerat de fibre din monofilament polimeric, consolidate prin interșesere și utilizate pentru filtrare-separare, protecție și drenaj în construcția de căi ferate, drumuri, drenuri, tuneluri, canale, diguri și depozite de deșeuri menajere. Nu poate fi asimilat stratul de reciclat și aramat dispers cu fibre, cu materialele compozite, deoarece acestea au adeziune interfacială sporită între fibre și matrice iar proprietățile fizico-mecanice sunt diferite.

Tehnologia de reciclare, tipul și calitatea lianților precum și procentele volumice ale componentelor pot îmbunătăți adeziunile interfaciale și pot oferi capacitate mare de “preluare a

stresului fizic de transfer” [24] în perioada de exploatare. Adeziunea interfacială dintre fibre, granulele de agregate, particulele fine de lianți și moleculele de apă din amestec este vitală în obținerea unei structuri rutiere reciclate și armate dispers cu fibre cu proprietăți fizico-mecanice îmbunătățite.

Tehnologia de reciclare la rece și armarea dispersă cu fibre a reciclatului urmărește realizarea de structuri rutiere cu materiale tradiționale, din care o parte reciclate, având cicluri de producție rapide și costuri recurente de exploatare mai mici decât tehnologiile clasice.

Din anul 2007, compania ROMFRACHT Spedition apare pe partea comercială a pieții din România, pe segmentul fibrelor pentru armarea pardoselilor dar și cu mărci înregistrate pentru armarea mixturilor asfaltice ale companiei “FORTA Corporation” cum ar fi fibrele din aramid (monofilament) și polyolefină (răsucit&monofilament) FORTA®, FORTA-FI®, apărute în SUA în luna august 1982 sub denumirea de “FORTA-AR” și testate la University of Texas at Austin în anul 1986 [78].

Fibre de celuloză pentru Mixtura Asfaltică Stabilizată cu fibre sintetice de tip (MASF), apărute în Germania acum 30 de ani sunt utilizate pe scară tot mai largă în Europa și lume.

În România, acestea se utilizează de peste 25 de ani ca mărci înregistrate sub denumirea de “TECHNOCEL®” sau granulele de tip “TOPCEL®” [78].

Geocompozitele și geogriile realizate din fibre de poliester se utilizează cu bune rezultate atât pentru armarea pământului cât și la ranforsarea straturilor rutiere bituminoase noi și armarea rosturilor longitudinale la supralărgiri pentru diminuarea procesului de transmitere a fisurilor de reflexie și a apariției făgașelor.

În România, mărcile înregistrate de tip Trisoplast® sau Fornit® au început să fie utilizate semnificativ după anul 2001 în construcția de drumuri noi, drumuri de acces ori forestiere, precum și la reabilitări de căi ferate. Acestea sunt geogriile triaxiale ori biaxiale confecționate din polipropilenă, protejate cu un strat din PVC împotriva distrugerilor la punerea în operă, cu rezistențe la rupere de 20 kN/m, 30 kN/m, 40 kN/m și 60 kN/m [78].

În cazul armării disperse cu deșeuri de fibre din sticlă peliculizate cu rășini poliesterice a structurilor rutiere degradate reciclate la rece “*in situ*” cu adaos de bitum spumat, ciment și apă de hidratare, nu există în literatura de specialitate date referitoare la abordări teoretice ori experimentale.

### **2.9.2. Tehnica de reciclare la rece “*in situ*” din România**

Tehnica de reciclare/ranforsare la rece “*in situ*”, cu adaos de ciment și emulsie bituminoasă,

---

a fost introdusă în țara noastră în anul 1996. Reciclarea la rece este o tehnologie ce poate fi utilizată cu succes la reabilitarea și modernizarea drumurilor în România. În funcție de utilizarea sau nu a lianților și recuperarea agregatelor, reciclarea poate fi:

- reciclare cu recuperarea totală a agregatelor și adaos de lianți (bitum, ciment);
- reciclare cu recuperarea parțială a agregatelor fără adaos de lianți (bitum, ciment).

Promovarea de tehnici și utilaje inovatoare pentru realizarea lucrărilor de drumuri a continuat. Astfel, începând cu anul 2004, sunt utilizate în România reciclatorul WR 200i, WR 2200, WR 2400 și WR 4200 - cel mai mare utilaj de acest gen din lume, dotate cu un sistem de frezare - malaxare și așternere cu lățime variabilă de 2,00 - 4,20 m, precum și cu o instalație de dozare pentru apă, ciment și bitum.

**Foto 1. Mașina de frezat/reciclat Wirtgen 200i [90]**



Model	Lățime de lucru	Adâncime de lucru	Puterea motorului	Greutate de operare, CE *
WR 200i	2000 mm	0-500 mm	320 kw/435 CP	24.100 kg

**Foto 2. Mașina de frezat/reciclat Wirtgen 2200 [91]**



Model	Lățime de lucru	Adâncime de lucru	Puterea motorului	Greutate de operare, CE *
W 2200DCR	2100 mm	0-330 mm	534 kw/726 CP	28.900 kg

**Foto 3. Mașina de frezat/reciclat Wirtgen 2400 [92]**



Model	Lățime de lucru	Adâncime de lucru	Puterea motorului	Greutate de operare, CE *
WR 240i	2400 mm	0-510 mm	447 kw/608 CP	31.000 kg

**Foto 4. Mașina de frezat/reciclat Wirtgen 4200 [93]**

Model	Lățime de lucru	Adâncime de lucru	Puterea motorului	Greutate de operare, CE *
WR 420i	3.000 mm - 4.200 mm	0 - 200 mm	2 x 433kW/ 589 CP	77.000 kg

### 2.9.3. Utilizarea tehnologiei de reciclare la rece în România

Se poate observa la nivel național o creștere semnificativă a utilizării tehnologiilor de reciclare în cadrul lucrărilor de reabilitare/modernizare a drumurilor naționale, județene și comunale.

Tehnologiile de reciclare au o pondere semnificativă și în țările dezvoltate unde infrastructura rutieră este puternic dezvoltată. Cu toate acestea nici în țările dezvoltate reciclarea structurilor rutiere cu bitum spumat, ciment și armarea dispersă cu fibre sau cu deșeuri din fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice, nu a fost realizată până în prezent.

Tehnologia de reciclare la rece cu bitum spumat și ciment este funcție de:

- caracteristicile componentilor și dozajele acestora;
- detaliile tehnologice de execuție;
- condițiile de realizare;
- tehnologia de operare specifică utilajelor.

O etapă preliminară reciclării dar obligatorie, este studiul de laborator care se realizează pe carote și material frezat pentru stabilirea oportunității soluției de reciclare, a adâncimii și a omogenității sectorului de drum, a granulozității și a umidității optime de compactare. Este imperios necesară încadrarea în domeniul de granulozitate specific tehnologiei de reciclare (domeniul Rukel).

### 2.10. Caracteristicile infrastructurii rutiere în județul Sălaj

Din datele existente vom analiza mai jos situația din județul Sălaj, pentru o rețea de drumuri județene în lungime totală de 632 km și vom reprezenta grafic lungimea traseelor de drumuri reabilite/modernizate și a celor cu durată de serviciu expirată, starea de viabilitate și lungimea traseelor de drum ce pot fi reciclate precum și lungimea traseelor de drum reabilite (modernizate) prin aplicarea tehnologiei de reciclare “*in situ*” cu bitum spumat și deșeuri de fibre

din sticlă în dispersie. Rezistența și stabilitatea stratului rutier obținut prin reciclare la rece cu bitum spumat, ciment și deșeuri de fibre din sticlă în dispersie, peliculizate cu rășini poliesterice, a fost determinată pe sectoarele experimentale realizate pe DJ 109, între km: 39+700 – 40+200, lim. județ Cluj-Dragu și pe DC 4 A, DN1F - Șamșud între km: 3+000 – 4+300, județul Sălaj.

Acestea diferă în funcție de natura și compoziția granulometrică a materialului frezat, procentul de bitum spumat utilizat (3,50 - 5,50%), procentul de apă de adaos (5,00 - 15,00 %), procentul de ciment sau filer (1,50 - 4,00 %), procentul volumic de fibre (1,00 - 3,50 %) și procentul de agregate de adaos (5 - 25 m) strat echivalent, considerând adâncimea maximă de reciclare de 30 cm acceptată tehnologic. Vom prezenta, mai jos, rețeaua de drumuri județene aflate în administrarea județului Sălaj, pe categorii, în funcție de starea de viabilitate și lungimea totală a traseelor de drumuri județene care au fost reabilitate utilizând soluția reciclării la rece “*in situ*”.

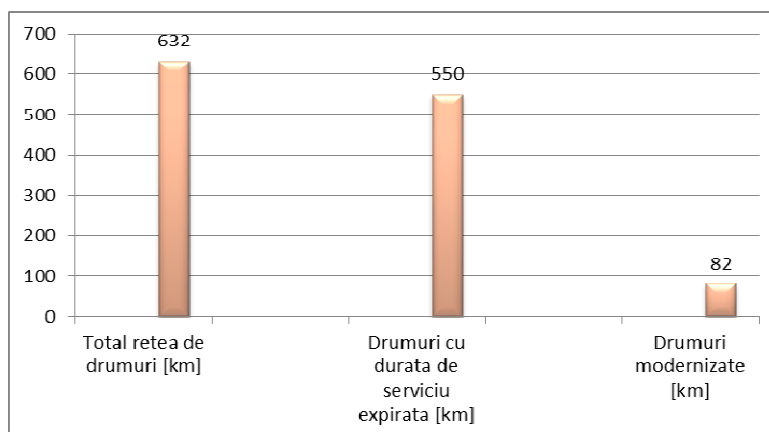


Fig. 2.5. Reprezentarea schematică comparativă după starea de viabilitate a rețelei de drumuri județene, din județul Sălaj

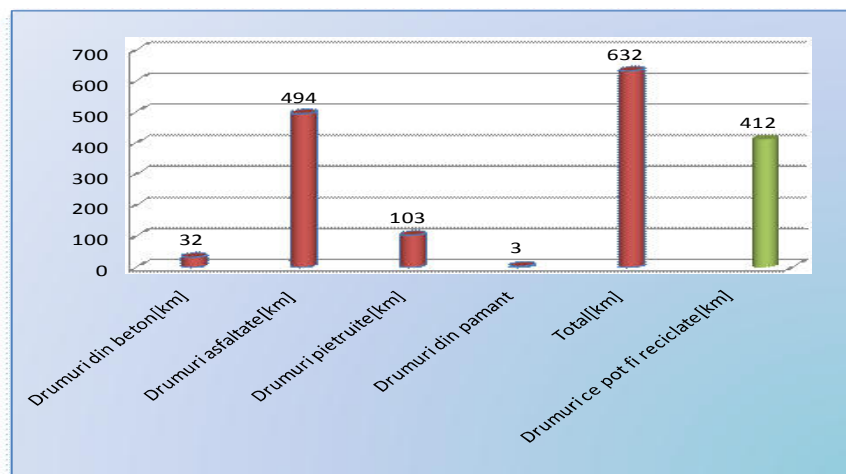


Fig. 2.6. Reprezentarea schematică a rețelei de drumuri județene pe categorii, din județul Sălaj



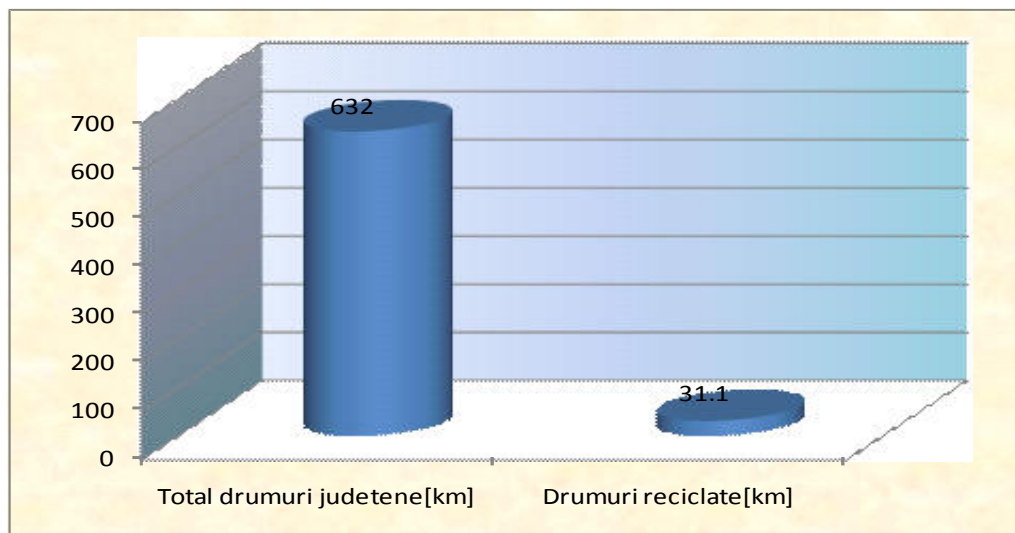


Fig. 2.7. Reprezentarea schematică a rețelei de drumuri reciclate, în județul Sălaj

Primele încercări de reciclare la rece “*in situ*” cu bitum spumat, ciment și deșeuri de fibre din sticlă în dispersie au fost realizate în anul 2013 pe drumul comunal DC 4 A, DN 1C – Samșud, în județul Sălaj. A fost realizat atunci un sector experimental cu două tipuri de fibre astfel:

- deșeuri de fibre din sticlă cu lungimi cuprinse între 2,50 - 5,00 mm, peliculizate cu rășini poliesterice și amestecate cu granule din aceste rășini. Acestea au fost colectate ca deșeu tehnologic măcinat, rezultat din debavurarea obiectelor sanitare (văni, chiuvete, piscine), produse de S.C. FIBREX Co S.R.L. în localitatea Crasna din județul Sălaj;

- fibre de sticlă tăiate din role, la comandă, cu lungimea de 12 cm, nepeliculizate și neamestecate cu granule de rășini poliesterice.

Structura rutiera obținută poate fi denumită “STRUCTURĂ RUTIERĂ RECICLATĂ LA RECE ARMATĂ CU FIBRE (S.R.R.A.F)” și definită ca “amestec de materiale rezultate dintr-o structură rutieră elastică reciclată la rece cu aport de agregate minerale, ciment, liant (bitum spumat) și deșeuri din fibre de sticlă în dispersie”.

Proprietăți sunt similare cu cele ale anrobatorilor bituminoase de tip AB25, urmare a interacțiunii dintre fibre și agregate sub acțiunea puterii liante a bitumului, în prezența suspensiei apoase de ciment cu rol de “filer activ”. Noțiunea de “STRUCTURĂ RUTIERĂ RECICLATĂ LA RECE ARMATĂ CU FIBRE (S.R.R.A.F)” poate fi considerată noutate în literatura de specialitate din România.

La microscop aceste structuri rutiere arată astfel:





Primele concluzii privind structura mixturii cu bitum spumat, suspensie de ciment și fibre au fost trase după prelevarea probelor și efectuarea de observații cu microscopul electronic și cu stereolupa. Imaginile obținute și concluziile ce confirmă corectitudinea conceptului de armare dispersă cu fibre sau cu deșeuri de fibre din sticlă a structurilor rutiere suple și semirigide, reciclate la rece “*in situ*” sunt prezentate mai jos:

- în materialul rezultat fibrele sunt anrobate și înglobate în proporție de peste 98%;
- punțile de armare create de fibrele dispersate și înglobate în reciclat asigură preluarea unei părți a tensiunilor deformatoare iar granulele de poliesteri micșorează volumul de goluri care sunt întotdeauna potențiali factori generatori de microfisuri;
- estimările inițiale privind îmbunătățirea proprietăților reciclatului prin adăugarea de fibre sau deșeuri din fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice și amestecate cu granule de poliesterice au fost confirmate.

## **2.11. Aspecte teoretice și tehnologice**

### **2.11.1. Aspecte teoretice**

Multe tipuri de fibre cum ar fi cele din polipropilenă denumite “FORTA FI HMA” [78] sau fibrele celulozice sunt deja utilizate la armarea mixturilor asfaltice și a betoanelor cu module înalte astfel încât acestea au devenit o clasă de materiale de sine stătătoare.

Există probleme în direcția dozării și omogenizării fibrelor în amestecul reciclat pentru îndeplinirea funcției de armare. Pentru întregul complex reciclat (agregate + bitum + ciment + apă + fibre) vom utiliza denumirea generică de “sistem polifazic”.

Îmbunătățirile aduse proprietăților fizice, mecanice și fizico-chimice ale complexului reciclat, constituie probleme ce nu pot fi rezolvate în timp foarte scurt. În ceea ce privește fibrele, problema cea mai importantă este legată de dozarea și omogenizarea lor. Tuturor fibrelor, privite ca materiale de umplură cu funcție de armare, trebuie să li se confere lungimea potrivită și distribuția dimensională cea mai indicată, legată de cea a particulelor de agregate și lianți din sistemul polifazic. Tehnologia modernă de reciclare la rece este un proces cu fațete multiple care poate satisface diferite nevoi în ceea ce privește mentenanța și reabilitarea infrastructurii de drumuri. În funcție de tratarea sau nu a materialelor cu un agent de legare și armarea cu fibre, se pot identifica două categorii principale de reciclare:

- a) reciclarea la rece “*in situ*” cu liant și fibre;
- b) reciclarea la rece “*in situ*” cu liant și fără fibre.

Stadiul actual al cercetărilor în domeniul reciclării la rece “*in situ*” cu liant și deșeuri de fibre din sticlă, nu permite o analiză cuprinzătoare a tuturor aspectelor apărute în timpul realizării determinărilor de laborator și a sectoarelor experimentale.

Cine acceptă ideea armării disperse a structurilor rutiere reciclate la rece “*in situ*” și armate dispers cu deșeuri de fibre din sticlă peliculizate cu rășini poliesterice, trebuie să răspundă la cel puțin trei întrebări:

- a) Armarea dispersă cu deșeuri de fibre din sticlă poate fi o cale de a ridica rezistențele mecanice a structurii rutiere reciclate la rece utilizată ca strat de fundație a drumului și implicit a creșterii capacității portante a acesteia?;
- b) Cum să se asigure tehnologic condițiile de omogenitate, anaerobare și dispersie uniformă a fibrelor în masa de material reciclat?;
- c) Dacă această tehnologie implică consum suplimentar de resurse și dacă se produce deteriorarea proprietăților componentelor sistemului polifazic?.

Aceste întrebări au devenit acute în ultimii ani datorită creșterii competiției dintre materialele cu structură convențională și cele neconvenționale utilizate la reabilitarea/modernizarea drumurilor.

În plus, materialele de umplură fibroase sunt capabile să îmbunătățească rezistențele mecanice și durabilitatea, dar în afara avantajelor menționate, ele pot face tehnologia reciclării și armării disperse cu fibre mai costisitoare.

### 2.11.2. Aspecte tehnologice

O serie de aspecte tehnologice, încă nerezolvate, ridică probleme diverse dintre care cele mai importante sunt:

- a) comportarea structurilor rutiere reciclate la rece cu materiale de umplură disperse (fibre), la deformații nu sunt încă complet elucidate. Din practică, observăm că, în timp ce adăugarea deșeurilor de fibre din sticlă peliculizate cu rășini poliesterice cu lungimea de 12 - 24 cm conduce la îmbunătățirea majoră a proprietăților, adăugarea deșeurilor de fibre din sticlă peliculizate cu rășini poliesterice, în amestec cu granule de poliester, cu lungimea de 1 - 5 cm, nu conduce la obținerea unui efect similar;
  - b) proprietățile mecanice a structurilor rutiere reciclate la rece și armate dispers cu deșeuri de fibre din sticlă (pentru volume unitare de material reciclat), sunt în concordanță suficient de bună cu cele ale structurilor clasice. Totuși, apar dificultăți considerabile în cazul determinării teoretice a procentelor optime de fibre cu funcție de armare, una din principalele probleme fiind interacțiunea dintre granulele de agregate, lianți și fibre, privite ca material de umplură;
  - c) în determinarea caracteristicilor finale de rezistență ale structurilor rutiere reciclate la rece și armate dispers cu fibre trebuie luate în considerare mecanismele de rupere, care reprezintă fenomene foarte complexe, depinzând de un număr mare de factori;
  - d) creșterea rezistenței la compresiune și la rupere a structurilor rutiere reciclate la rece și armate dispers cu deșeuri de fibre din sticlă arată că în masa de reciclat are loc un proces ce întârzie factorii generatori de microfisuri, fisuri și rupturi de structură. Acest lucru este de interes deosebit pentru tehnologi, atâta timp cât punctul slab al celor mai multe structuri rutiere clasice aflate în exploatare îl reprezintă apariția fisurilor urmate de ruperi și cedări locale cu tendință de extindere datorită condițiilor de trafic și de mediu;
  - e) cercetările în domenii conexe (betoane armate dispers cu fibre), publicate până acum, nu au dus decât la analiza unor studii de caz și descrierea relațiilor empirice legate de acestea;
  - f) adezivitatea (adsorbția) la interfața agregate – liant – fibre, atrage atenția ca factor ce manifestă o influență extrem de importantă asupra proprietăților mecanice și reologice a întregului sistem;
  - g) funcția de armare a fibrelor în dispersie în masa de reciclat este legată direct de fixarea lor în sistem la interfața intergranulară sub acțiunea lianților;
  - h) în general, și în acest domeniu realizările tehnologice sunt înaintea abordărilor teoretice;
-

- i) utilizarea tehnicii de dozare a fibrelor prestabilită la furnizor cu utilaje specifice constituie un progres evident față de tehnicile clasice de așternere a materialelor granulare și a fibrelor în straturi relativ uniforme în fața trenului de reciclare.

La realizarea sectoarelor experimentale au apărut diverse probleme tehnologice cum ar fi:

- degradarea (ruperea) parțială a fibrelor în malaxorul reciclatorului sub acțiunea combinată a cuțitelor și granulelor agregatelor;
- determinarea creșterii procentului de bitum spumat datorită adaosului de fibre pentru asigurarea adezivității acestora;
- distribuția neuniformă în masa de reciclat a fibrelor;
- tendințele de aglomerare în fascicule de fibre în zonele izolate reciclate;
- degradarea covorului de fibre sub acțiunea utilajelor trenului de reciclare;
- excluderea parțială a fibrelor datorită reprofilării cu autogrederul a reciclatului;
- tendințe de segregare a componentelor din reciclat;
- excluderea parțială a fibrelor în zona marginală părții carosabile a drumului;
- compactarea neuniformă a unor suprafețe mici, izolate datorită aglomerării fibrelor în fascicule;
- apariția unor neuniformități a covorului de fibre sub acțiunea roților utilajelor din trusa de reciclate ce rulează înaintea reciclatorului.

### **2.12. Concluzii și observații referitoare la această tehnologie de reciclare**

O serie de aspecte teoretice și tehnologice, încă neabordate, ridică probleme diverse. Câteva dintre avantajele evidente ale tehnologiei de reciclare la rece cu bitum spumat și fibre sau deșeuri din fibre de sticlă în amestec cu rășini poliesterice, sunt:

- calitatea stratului reciclat obținut prin amestecarea materialelor "in-situ" cu ciment în suspensie apoasă, fibre în amestec cu granule de rășini poliesterice și agenți de stabilizare, duce la obținerea unei structuri rezistente, de calitate ridicată. Adăugarea de fluide este realizată prin sisteme de pompare controlate de microprocesorul reciclatorului Wirtgen 2200.
  - protejarea mediului prin utilizarea materialului existent în structura drumului, a deșeurilor din fibre de sticlă în amestec cu granule de rășini poliesterice ce au potențial poluant ridicat. Activitatea de transport și consumul global de energie sunt drastic reduse.
  - reciclarea la rece implică o singură trecere peste structura drumului iar degradarea straturilor inferioare este minimă.
-

Armarea structurilor rutiere reciclate la rece "in situ", utilizând fibre de sticlă sau deșeuri din fibre de sticlă în amestec cu rășini poliesterice, bitum și ciment, are ca scop îmbunătățirea proprietăților fizico-mecanice ale acestora și creșterea duratei lor de viață. Analizele de laborator pe probe prelevate din structura rutieră degradată a drumului DJ109, limita județ Cluj- Dragu între km: 39+700 - 40 +200, pe care s-a realizat primul sector experimental din Județul Sălaj, a dus la concluzia că degradarea structurală se datorează și granulației necorespunzătoare a materialelor din straturile granulare inferioare. În această situație, s-a impus corectarea granulației prin așternerea de material pietros cu grosimea de 15 cm strat echivalent și dimensiunile între 0 și 40 mm, răspândit pe suprafața drumului, anterior reciclării. Umiditatea este și ea modificată în timpul reciclării pentru a furniza condiții optime de compactare a materialului reciclat. Fibrele sau deșeurile din fibre de sticlă amestecate cu granule de rășini poliesterice privesc ca material de umplutură în procesul de reciclare la rece prin adăugare de bitum spumat, capătă funcție de armare în stratul reciclat, îmbunătățind considerabil capacitatea portantă a acestuia.

Trenurile de reciclare utilizate pentru aplicarea acestei soluții pot avea configurații diferite iar după reciclare, materialul este precompactat cu ajutorul unui compactor vibrator, pentru a consolida amestecul și a facilita fixarea fibrelor. În final se reprofilează, și se trece la faza finală de compactare.

Sectorul experimental realizat în județul Sălaj pe drumul județean DJ 109 lim. jud. Cluj – Dragu, între km: 39+700 – 40+300, a evidențiat faptul că deșeurile din fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice, discontinue, în procente volumice de 1,5%; 2%; 2,5%; 3% și 5% se pretează bine la armarea structurilor rutiere reciclate la rece cu adaos de agregate de carieră (piatră spartă 25-40 mm) - 10 cm strat echivalent, bitum spumat (2,50; 3,00; 3,50 și 4%) și ciment (3,5%).

Beneficiile opțiunii de reciclare la rece a structurilor rutiere cu adăugarea de deșeuri din fibre de sticlă având funcție de armare sunt evidente.

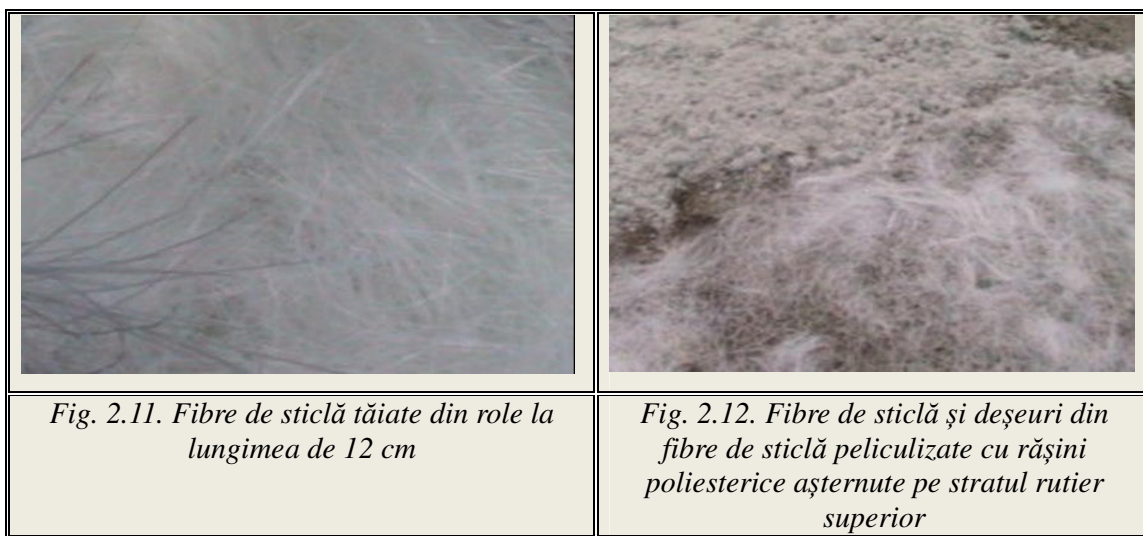
Exemplificăm mai jos câteva dintre acestea:

- calitatea și durabilitatea structurii rutiere reciclate cu deșeuri din fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice sau în amestec cu granule din aceste rășini este evidențiată pe cele două sectoare experimentale realizate în anul 2013. Acestea nu prezintă niciun fel de degradări, în timp ce pe sectoarele de drum reciclate în aceleași condiții și cu aceeași tehnologie, dar fără adaos de fibre în dispersie au apărut degradări specifice atât la structura rutieră cât și la îmbrăcămintea bituminoasă;

- omogenitatea și integritatea structurală a reciclatului;
- degradarea straturilor inferioare ale structurii rutiere sau ale patului drumului este minimă;
- timp de lucru scurt datorită productivității reciclatoarelor Wirtgen;
- perioade scurte de perturbare a traficului rutier;
- eficiența economică evidentă a acestei tehnologii de reabilitare a drumurilor;
- respectarea condițiilor de mediu în sensul în care nu sunt necesare volume mari de materiale suplimentare exploatare din cariere sau gropi de împrumut, iar activitatea puternic poluantă de transport a acestora este practic eliminată;
- costurile totale de resurse materiale și energetice pot fi reduse cu până la 50%.

După cum se știe, întotdeauna există mai multe soluții pentru reabilitarea unui drum degradat. Reciclarea în adâncime cu fibre sau deseuri din fibre de sticlă în amestec cu granule de rasini poliesterice este un concept nou în domeniul ingineriei drumurilor și, datorită economiilor de costuri pe care le oferă, ar trebui considerată ca soluție alternativă .

Pe lângă toate avantajele enumerate anterior ,eficiența economică a acestei soluții a fost confirmată prin realizarea în numai 7 ore a sectorului experimental situat pe DJ109 ,limita județ Cluj- Dragu între km: 39+700 - 40 +200 pe opt faze de lucru prezentate în imaginile de mai jos.





În sprijinul ultimei afirmații stă exemplul de mai sus în care alegerea opțiunii de reabilitare prin reciclare “*in situ*” cu bitum spumat, ciment și deșeuri din fibre de sticlă în dispersie pe sectorul experimental de drum județean DJ 109 lim. jud. Cluj – Dragu, între km: 39+700 – 40+080 și-a dovedit eficiența prin obținerea unui anrobat bituminos cu proprietăți superioare față de alte tipuri de anrobate bituminoase existente.



## CAPITOLUL 3

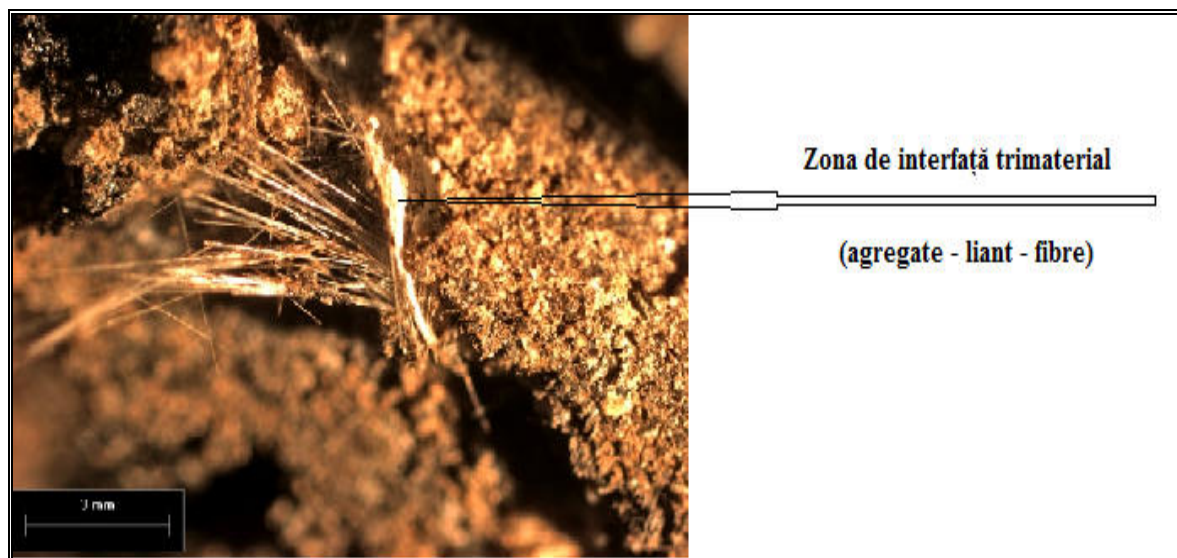
### ***MECANISMELE TRANSMITERII TENSIUNILOR DE LA SISTEM LA FIBRE. FUNCȚIA DE ARMARE***

#### **3.1. Comportamentul structurilor rutiere reciclate la rece armate cu fibre. Considerații teoretice**

Variabilitatea comportamentului în exploatare a structurilor rutiere reciclate la rece armate cu fibre este în funcție de:

- proprietățile componentelor;
- proporția în masă a componentelor;
- forma, dimensiunile și orientarea fibrelor raportate la direcțiile de solicitare;
- interacțiunea la interfață a componentelor lianți – agregate – fibre.

Ponderea în masa de material reciclat a fibrelor în dispersie ca sistem de armare este determinată de caracteristicile fizico-mecanice ale acestuia, natura și caracteristicile agregatelor, tipul și dozajul de lianți, precum și caracteristicile fizico-mecanice propuse ale structurii rutiere reciclate la rece armate dispers cu fibre.



*Fig. 3.1. Evidențierea cu ajutorul Stereolupei a zonei de interfață trimaterial din reciclat*

Analiza acestor structuri necesită cunoașterea fenomenelor și proceselor care au loc la interfața liant – agregate – fibre, aceasta fiind o zonă de tranziție cu evoluție gradată de transfer a



proprietăților. Interfața definită ca suprafață limită comună a doi sau mai mulți componenți este privită atât ca suprafața de separare a componenților unui amestec polifazic cât și ca suprafața de contact. Transferul eforturilor în zona de interfață se realizează numai dacă între componenții din masa de material reciclat și fibre există o suprafață specifică de contact de minim 90% și are loc fenomenul de adsorbție a lianților pe suprafețele de contact cu fibrele. Se reduce astfel, fenomenul de cedare la interfață, ce generează de multe ori situații critice pentru caracteristicile fizico-mecanice ale structurii rutiere reciclate.

Structurile rutiere reciclate la rece armate dispers cu fibre trebuie să asigure:

- a) stabilitate dimensională;
- b) scăderea porozității;
- c) redistribuirea concentrărilor de tensiuni și deformații odată cu diminuarea propagării rapide a fisurilor;
- d) întârzierea procesului de apariție a microfisurilor și reducerea numărului acestora pe întreaga durată de serviciu;
- e) creșterea modulului de elasticitate;
- f) durabilitate și stabilitate la creșterea temperaturii.

Geometria dispunerii fibrelor în materialul reciclat duce la îmbunătățirea caracteristicilor mecanice și fizice ale acestuia.

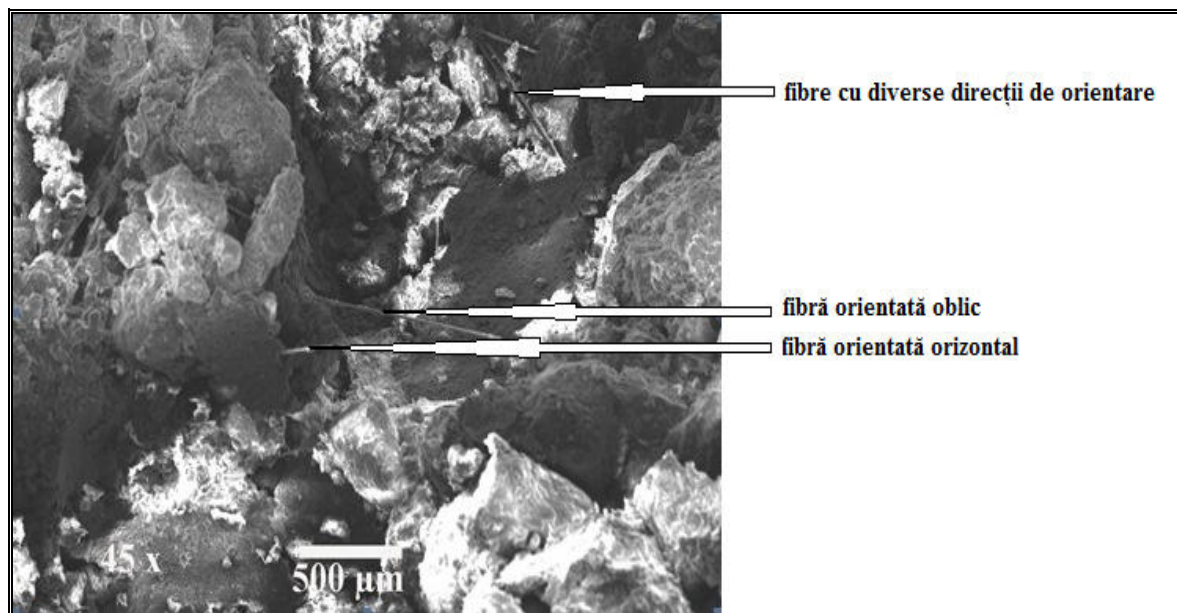


Fig. 3.2. Evidențierea cu ajutorul microscopului electronic a geometriei dispunerii fibrelor în reciclat

Comportarea structurilor rutiere reciclate la rece armate (ranforsate) cu fibre supuse la deformații nu sunt elucidate. Mai mult, adăugarea de granule de polimeri (rășini poliesterice sintetice) rezultate ca deșeu măcinat de la fabricarea obiectelor sanitare din rășini poliesterice armate cu fibră de sticlă poate conduce la îmbunătățirea globală a proprietăților.

Proprietățile mecanice ale acestor tipuri de structuri rutiere exprimate vor fi determinate experimental pentru a putea fi comparate cu cele ale structurilor nearmate. Dificultățile pot apărea la stabilirea limitelor procentelor masice ori volumice ale acestor fibre adăugate în masă precum și interacțiunea dintre particulele componentilor în prezența apei.

În analizele teoretice și experimentale vor fi evidențiate caracteristicile finale ale structurilor rutiere reciclate la rece și armate cu fibre, mecanismele de rupere (fenomene extrem de complexe), contribuția fibrelor la îmbunătățirea caracteristicilor mecanice și inter-relațiile lor cu întreg sistemul.

Distribuția forțelor de compresiune ce poate duce la un spor de capacitate portantă a celor de forfecare sau de rezistență la șoc ar putea deschide noi căi pentru creșterea duratei de viață a structurilor rutiere reciclate la rece și armate cu fibrele lor.

Straturile de interfață liant – fibră – agregat influențează pozitiv proprietățile mecanice ale structurilor și acestea vor fi studiate dincolo de modelele clasice care reflectă o adeziune bună sau rea prin folosirea metodei de analiză prin scanare cu ajutorul microscopului electronic.

Pentru studierea acestor caracteristici prezentăm mai jos câteva caracteristici ale fibrelor utilizate la armarea dispersă și modul lor de distribuire în masa de reciclat:

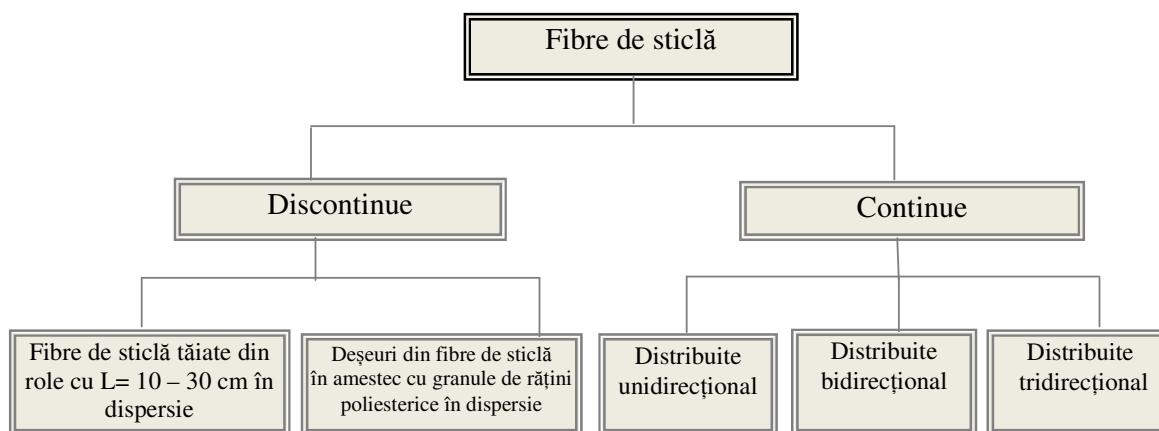


Fig. 3.3. Tipuri de armare cu fibre a materialului reciclat

Microfisurile și fisurile sunt consecința desprinderii la interfață, pe suprafețele de contact a componentelor sistemului polifazic agregat – liant – fibră.

Analiza tensiunilor și a mecanismelor de cedare la interfață asigură date preliminare pentru estimarea rezistenței la compresiune, funcție de parametrii geometrici și de natura materialelor componente. Absorbția energiei de impact și distribuția ei multidirecțională în sistemul reciclat armat cu fibre, trebuie să ducă la deformări plastice care să nu afecteze capacitatea portantă a structurii rutiere reciclate.

Degradările interne ale structurilor rutiere reciclate narmate (microfisurile), reduc semnificativ capacitatea portantă a acestora (cu până la 40 - 50%) și implică durata de funcționare a lor. Există cel puțin cinci potențiale tipuri de structuri rutiere reciclate la rece și armate dispers cu fibre care și ele pot fi distribuite în masă în cel puțin cinci moduri, astfel încât este foarte dificil în această etapă a extrapola parametrii comportamentali în exploatare a fiecăruia, fără determinări experimentale realizate pe fiecare tip de structură în parte.

Din experiență, se constată că cedarea completă a unei structuri rutiere reciclate și narmate are loc în mai puțin de 12 luni, dacă aceasta nu este protejată cu îmbrăcămînți bituminoase multistrat. În cadrul sectorului experimental realizat pe drumul județean DJ 109 lim. jud. Cluj - Dragu, km 39+700 –40+200 a fost realizată o structură rutieră reciclată la rece cu adaos de materiale de aport, liant, deșeuri din fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice și ciment care a rezistat solicitărilor fără apariția de degradări peste 24 de luni. Din luna august a anului 2013 și până în luna mai 2015 nu au apărut degradări de tipul fisurilor pe acest sector experimental. Structura rutieră reciclată cu rol de strat de fundație a fost protejată cu două straturi de mixtură asfaltică, astfel:

- strat de legătură din mixtura asfaltică de tip BADPC 25 în grosime de 5 cm;
- strat de legătură din mixtura asfaltică de tip BAPC 16 în grosime de 4 cm.

În multe cazuri, structura rutieră reciclată narmată cedează complet la suprasolicitări de trafic datorită propagării și acumulării de cedări la interfața sistemului polifazic agregate – liant – fibre. Structura rutieră reciclată și armată dispers cu fibre la aceeași solicitare nu cedează complet datorită menținerii legăturilor de adeziune la interfață a componentilor agregat – liant – fibre și distribuția tensiunilor deformatoare de la complexul reciclat la fibre fără apariția de ruperi locale. Încă nu există o metodologie de evaluare completă a performanțelor structurilor rutiere armate cu fibre înainte și după apariția primei cedări localizate. Pentru analiza acestui fenomen trebuie înțelese mecanismele de apariție și propagare a microfisurilor, apoi a fisurilor însoțite de ruperi fragile/cedări locale ducând la ruperea fibrelor și dezlipirea lor din sistem.

Capacitatea observatorului de a evalua mecanismele fizice de inițiere și dezvoltarea unor asemenea degradări este esențială pentru evaluarea performanțelor structurilor rutiere reciclate la

rece și armate dispers cu fibre și mai ales la proiectarea acestora folosind la maxim avantajele oferite de armarea dispersă.

Analiza degradărilor structurilor rutiere armate dispers cu fibre după ce a avut loc prima cedare se poate realiza progresiv.

Aceasta presupune parcurgerea a cinci etape principale după cum urmează:

- definirea matematică a sistemului polifazic;
- crearea capacității de analiză neliniară a sistemului;
- posibilitatea de calcul a tensiunilor locale pentru a fi identificate potențial stările de tensiune locală maximă;
- stabilirea criteriilor de referință care să determine modul de apariție a cedărilor locale;
- realizarea de modele de degradare a sistemului care să permită evaluarea modului de propagare a cedărilor.

### **3.2. Particularitățile structurilor rutiere reciclate la rece, armate dispers cu fibre**

Tehnologia de reciclare la rece “*in situ*” cu bitum spumat, suspensie de ciment în apă și fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice cu funcția de armare și granule rășini poliesterice în amestec având funcția de umpluturi disperse, a fost realizată experimental cu ajutorul reciclatorului (tren de reciclare) Wirtgen 2200. Stratul rutier obținut se poate utiliza ca strat de fundație, strat de bază sau strat de legătură, în funcție de aportul de ciment, bitum și fibre, ținând cont de clasa tehnică a drumului. Prin această tehnologie de reciclare, stratul rutier reciclat armat cu fibre nu prezintă similitudine cu betonul de ciment armat dispers cu fibre. La amestecurile (mixturile) obținute prin reciclare “*in situ*” cu adaos de bitum spumat și ciment, acesta din urmă are rol de “*filer activ*”, ce asigură scăderea timpului de maturare a amestecului (mixturii) și reducerea sensibilității la apă. În cazul înlocuirii cimentului cu var stins ori cenușă de termocentrală “*fly-ash*”, curba de granulozitate se va modifica astfel încât cenușa să nu depășească în masă valoarea de 2%.

În cazul adaosului de fibre în dispersie cu funcție de armare, este necesară reducerea cantității de apă din amestec, pentru a evita adsorbția acesteia pe suprafața fibrelor având ca rezultat peliculizarea deficitară cu bitum a acestora. Înlocuirea cimentului cu cenușă de termocentrală ori cu var stins cu rol de filer activ se poate face în urma efectuării studiului de rețetă, a încercărilor de rezistență la compresiune, stabilitate și fluaj Marshall, a rezistenței la oboseală și deformații permanente.

---

Stabilitatea și rezistența stratului rutier obținut prin reciclare la rece, armat dispers cu fibre de sticlă ori poliester, având în componență material existent, material de aport, bitum spumat (3,50 – 5,50%), apă de adaos (5 – 15%), filer, ciment (1,50 – 4,00%) și fibră de sticlă (poliester - 1 – 5 %) trebuie să crească față de straturile rutiere reciclate nearmate. Studiile de laborator vor constitui etapa preliminară obligatorie înaintea reciclării pentru stabilirea oportunității soluției de reciclare, a adâncimii de frezare, a omogenității, granulozității și umidității optime de compactare. Eforturile tehnologice vor fi îndreptate atât către determinarea lungimii fibrelor precum și către dozarea lor optimă și identificarea de tehnici de amestecare și dispersie în masă în vederea obținerii orientării optime și realizării adeziunii de interfață între fibre-liant și materialul reciclat (agregate minerale), în prezența apei.

Utilizarea tehnicii de reciclare “*in situ*” este condiția obligatorie ce conferă posibilitatea realizării unor sisteme complexe de tipul agregate minerale – lianți – fibre – apă și îndeplinește condițiile de recuperare/reciclare a unor componente, cum ar fi agregatele și fibrele.

Problema determinării teoretice a cantității de fibre de armare și stabilirea unei rețete de mixtură reciclată este încă în stadiu incipient. Conform datelor de specialitate existente, cimentul nu are rol de liant în sistem, ci de “*filer activ*”

În această situație, există posibilitatea înlocuirii acestuia cu alți componenți (filer de calcar, cenușă de termocentrală – “*fly ash*”, var hidratat), atât din motive legate de costuri, cât și pentru a diminua cantitatea de apă de hidratare din sistem ce ar putea afecta adezivitatea fibră – liant (bitum). O astfel de decizie se poate lua după realizarea experimentelor referitoare la ipoteza inițială. Prezenta teză de doctorat se bazează pe un volum considerabil de date experimentale referitoare la tehnologia de reciclare la rece a structurilor rutiere cu bitum spumat, ciment (filer de calcar), fibre de sticlă și de poliester în baza cercetărilor efectuate astfel încât poate formula concluzii despre viabilitatea metodei și comportarea în exploatare a sectoarelor de drum reabilitate cu această tehnologie.

### **3.3. Comportarea materialelor de armare. Principii de bază**

#### **3.3.1. Adeziunea la interfață**

Importanța deosebită a adeziunii la interfață este subliniată în literatura de specialitate în majoritatea aspectelor ei teoretice și practice [24].

În toate ecuațiile ce descriu comportamentul fibrelor înglobate într-un sistem semielastic din capitolele următoare se va presupune că există o bună adeziune între fibre și materialul reciclat. Dacă această adeziune nu ar exista, ar fi inutilă adăugarea de fibre în dispersie cu funcție

de armare în reciclat, deoarece sub acțiunea forțelor deformatoare acestea s-ar desprinde la interfața trimaterial (agregate – liant – fibre), formându-se goluri generatoare de fisuri iar valoarea eforturilor preluate de acestea ar fi egală cu 0. Mecanismele de transmitere a tensiunilor normale sau tangențiale active la interfața trimaterial în reciclatul cu fibre de sticlă, sunt deosebit de complexe, fiind necesară diferențierea lor. Efortul de întindere pe direcția de orientare a fibrei este datorat ciclurilor termice anuale la care sunt supuse toate tipurile de structuri rutiere și coeficienților lui Poisson, diferiți între fibre și complexul reciclat. Adeziunea poate fi determinată de legături chimice. Din observațiile practice se constată că la valori limită a eforturilor deformatoare aplicate unei structuri rutiere reciclate și ranforsate cu fibre în dispersie, fibrele încep să se desprindă sau chiar să se rupă. Rezistența la rupere prin forfecare în cazul eforturilor de compresiune aplicate transversal pe fibre la epruvetele prelevate în care fibrele au avut lungimea de 12 cm, are rol secundar, rolul primar fiind preluat de rezistența la separare. În complexul reciclat cu umpluturi disperse de fibre din sticlă sau deșeuri de fibre din sticlă în amestec cu granule de rășini poliesterice eforturile normale aplicate se distribuie fiecărei fibre, la interfața trimaterial prin intermediul granulelor de agregate și a liantului.

### **3.3.2. Distanța dintre fibre și suprafața specifică a fibrelor**

Distanța medie dintre fibre și suprafața totală a acestora pe unitatea de volum a materialului reciclat sunt doi factori de importanță vitală, care guvernează sistemul polifazic rezultat, atât în faza inițială de amestecare cât și în faza finală, de priză.

Distanța medie dintre fibre are importanță în proprietățile reologice ale sistemului reciclat și de asemenea, în oarecare măsură, afectează proprietățile mecanice ale structurii rutiere rezultate. Suprafața specifică a fibrelor este un parametru cu importanță în procesul de inițiere a fisurilor din sistem.

Distanța medie dintre fibre este calculată pornind de la numărul fibrelor ce traversează o unitate de arie într-o secțiune oarecare a reciclatului. Acest număr este dependent de aria secțiunii transversale, procentul volumic al fibrelor și tipul de orientare al ranforsării. Pe de altă parte, suprafața specifică a fibrelor este în funcție de perimetrul și aria secțiunii transversale a fibrei și a numărului acestora pe unitatea de arie, independent de orientarea lor.

Într-un material armat dispers cu fibre mai mult sau mai puțin distribuite uniform și la distanțe mici una de alta, distanțarea fibrelor afectează proprietățile acestuia.

Când apare o tensiune de rupere generată de aplicarea unei forțe deformatoare asupra sistemului polifazic reciclat, abilitatea fibrelor de a opri fisurarea depinde de cât de mult se

propagă acea fisură până când întâlnește o fibră. Dacă privim problema în acest fel, ne dăm seama că distanța medie dintre fibre este un factor pur geometric, care se poate determina matematic prin determinarea numărului de fibre dintr-o secțiune transversală a reciclatului. Este dificil de observat cum distanța dintre axele fibrelor, poate influența proprietățile reciclatului. O fisură arbitrară, de regulă se va dezvolta de-a lungul unui plan prin material și aproape niciodată nu se va evidenția propagându-se de la mijlocul fibrei către mijlocul altei fibre, dispuse aleatoriu, doar dacă aceste puncte sunt în același plan.

Este dificil să vedem, de asemenea, de ce distanța dintre fibre ar avea legătură cu eficiența ranforsării și cu funcția de armare a acestora care la rândul ei este dependentă de orientarea și de anrobarea lor. Distanța dintre fibre este pur și simplu o caracteristică geometrică – o dimensiune echivalentă cu un parametru descriptiv al sistemului. În două sisteme diferite cu același procent volumic de fibre  $V_f$ , cu fibre de același diametru, cu aceeași orientare și structură, distanța medie dintre fibre este diferită și ranforsarea lor cu fibre va fi considerabil diferită.

### 3.3.3. Calculul distanței medii dintre fibre și suprafața specifică a fibrelor

Următoarele calcule se bazează pe metoda secțiunilor însumate versus concentrația volumelor, valabile în toate materialele omogene și eterogene.

Se va considera o unitate de arie dintr-o secțiune a reciclatului. Suprafața trebuie să fie destul de mare ca să conțină un număr acceptabil din diferitele componente ale acestuia.

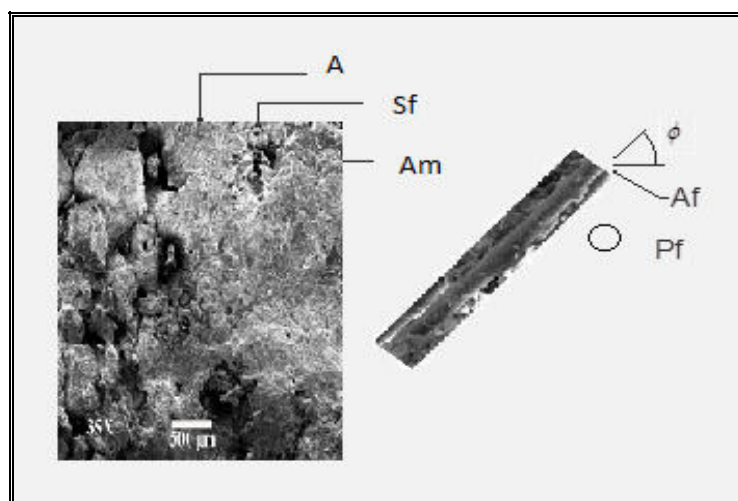


Fig. 3.4. Reprezentare schematică a unei arii unitare din reciclat și a unei fibre izolate

În cazul materialelor armate cu fibre, suma ariilor ( $S_f$ ) tuturor fibrelor intersectate de acea secțiune într-o unitate de suprafață oarecare va fi întotdeauna echivalentă cu procentul volumic

de fibre, indiferent de orientarea acestora (Fig. 3.1). Dacă selectăm un grup de fibre ce formează un unghi  $\phi$  cu normala la secțiune, atunci ariile însumate  $S_f \phi$  ale suprafețelor fibrelor tăiate în unitatea de suprafață, va fi egală cu procentul volumic de fibre din reciclat ( $V_{f\phi}$ ) [39].

$$\Sigma \Delta S_f = \frac{V_f}{A} \quad (3.1)$$

$$\frac{A_s}{A} = V_s = 1 - V_f \quad (3.2)$$

$$\Delta S_f = \frac{A_f}{\cos \phi} \quad (3.3)$$

în care:

$\phi$  = unghiul format de fibră față de direcția normală plană a secțiunii;

$A_f$  = aria fibrei;

$P_f$  = perimetrul fibrei;

$A_s$  = aria unitară a secțiunii din sistemul polifazic reciclat, armat cu fibre;

$V_f$  = fracția de volum a fibrelor;

$V_s$  = fracția de volum a sistemului polifazic.

Numărul de fibre -  $n$  - care trec printr-o unitate de suprafață de pe o secțiune transversală se determină astfel:

- Toată armarea se împarte în grupuri de fibre, care fac un unghi  $\phi$  cu planul secțiunii investigate.
- Pe unitatea de suprafață a secțiunii considerate, aria totală a fețelor tăiate a fibrelor selectate este știută și dată de relația [39]:

$$S_{f\phi} = V_{f\phi} \quad (3.4)$$

- Aria secțiunii transversale a tuturor fibrelor ce formează un unghi drept față de normala la suprafață este cunoscută. Aria fibrelor ce traversează arbitrar secțiunea, depinde de

$$\text{unghiul } \phi \text{ și este dată de relația [39]: } \Delta S_f = \frac{A_f}{\cos \phi} \quad (3.5)$$

- Numărul fibrelor ce traversează aria unitară la unghiul  $\phi$  cu normala la suprafață este dat

$$\text{de relația [39]: } n_\phi = \frac{S_{f\phi}}{\Delta S_f} = \frac{V_{f\phi}}{A_f} \cos \phi \quad (3.6)$$

- Atunci, numărul total al fibrelor ce trec prin aria unitară având diverse unghiuri cu



normala la suprafață este dat de relația [39]:  $n = \sum n_{\phi}$  (3.7)

Putem calcula distanța medie dintre fibre  $s$ , după Romualdi și Mandel, astfel [39]:

$$s^{-} = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (3.8)$$

Rezultatele calculelor distanțelor medii dintre fibre în funcție de procentul volumic, respectiv numărul de fibre determinate pe 4 epruvete prelevate din reciclat sunt reprezentate în diagramele de tip coloană-cilindru din Fig. 3.5. și Fig. 3.6.

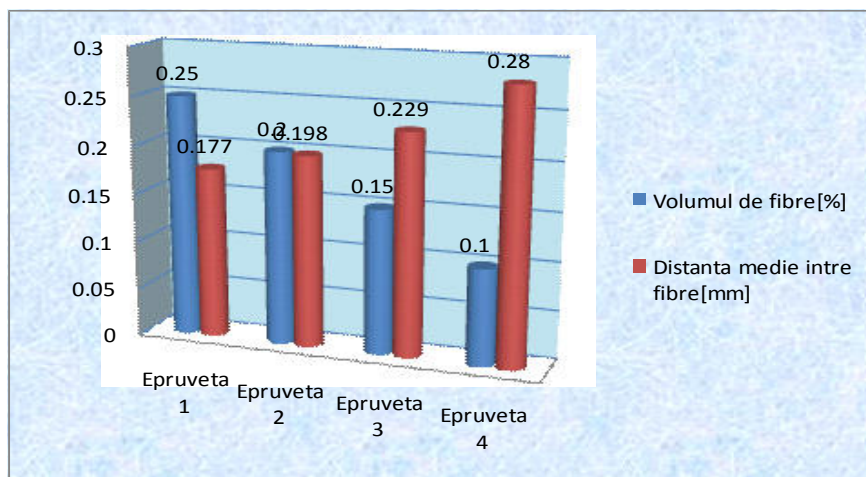


Fig. 3.5. Reprezentarea comparativă a distanței medii calculate dintre fibre în funcție de procentul lor volumic pe 4 epruvete prelevate din reciclat

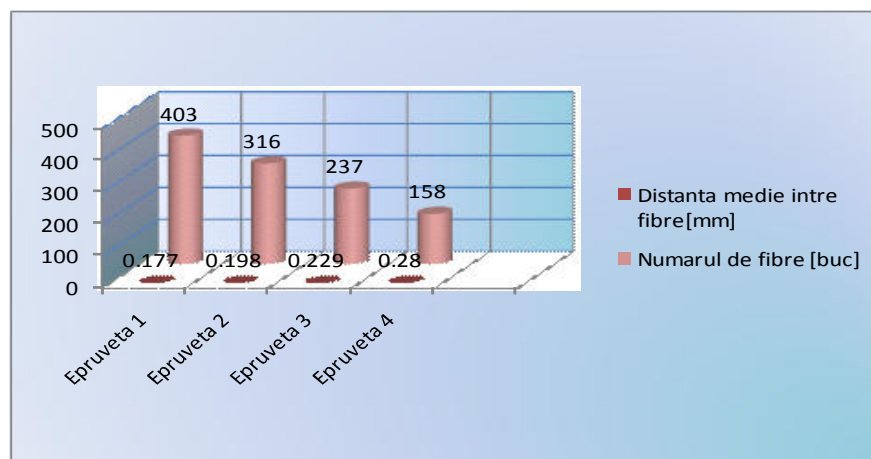


Fig. 3.6. Reprezentarea distanței medii dintre fibre în funcție de numărul de fibre pe 4 epruvete prelevate din reciclat

### 3.4. Determinarea numărului de fibre din reciclat orientate în 2D, cu planul secțiunii perpendicular pe planul orientării

Considerăm un fascicul de fibre intersectându-se în același punct și uniform distribuite în toate direcțiile în planul de orientare iar planul secțiunii este inserat perpendicular la aceasta și în afara punctului de intersecție a fibrelor (Fig 3.7.) [39].

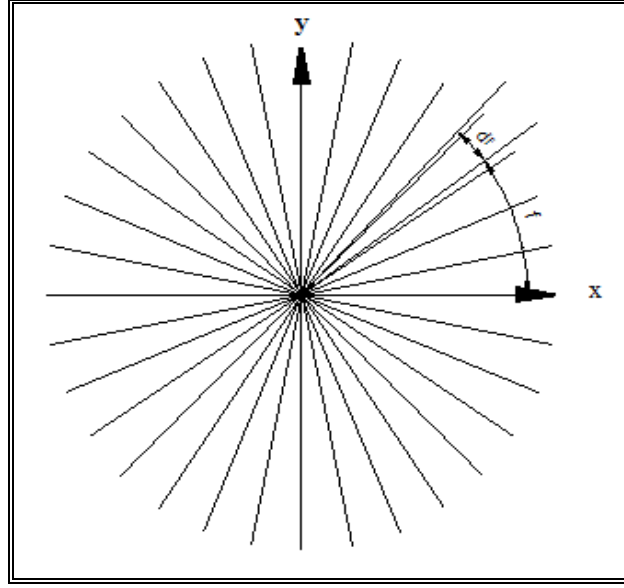


Fig. 3.7. Reprezentare în 2D a armării disperse cu fibre

Fasciculul de fibre cu funcție de armare ce formează unghiul  $\phi$  cu normala la secțiunea plană se află între unghiul  $\phi$  la  $\phi + d\phi$ . Raportul dintre aceste fibre și totalul fibrelor cu funcție de armare este dat de raportul între unghiul  $d\phi$  și  $\pi$  și este dat de relația (3.9) [67]:

$$\frac{V f \phi}{V f} = \frac{d\phi}{\pi} \quad (3.9)$$

de unde [67],

$$n_{\phi} = \frac{V f \phi}{A f} \cos \phi = \frac{V f}{A f} \frac{1}{\pi} \cos \phi d\phi \quad (3.10)$$

prin urmare [67]:

$$n = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} n_{\phi} = \frac{V f}{\pi A f} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \phi d\phi = \frac{2V f}{\pi A f} \quad (3.11)$$

iar distanța medie dintre fibre este [67]:

$$\bar{s} = \frac{1}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sqrt{\frac{A_f}{V_f}} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \bar{s}_{1,0} \quad (3.12)$$

În cazul special al fibrelor cilindrice avem relația [67]:

$$\bar{s}_{2,0,cyl} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{d}{\sqrt{V_f}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{d}{\sqrt{V_f}} \approx 1,11 \frac{d}{\sqrt{V_f}} \quad (3.13)$$

### 3.5. Determinarea numărului de fibre din reciclat orientate în 3D

Prin similitudine putem trage concluzii privind întreaga ranforsare cu fibre a reciclatului dacă vom lua în considerare un fascicul de fibre ce se intersectează într-un punct și se distribuie uniform în toate direcțiile. Secțiunea plană se înserează în afara punctului de intersecție a fibrelor (Fig. 3.8.) [39].

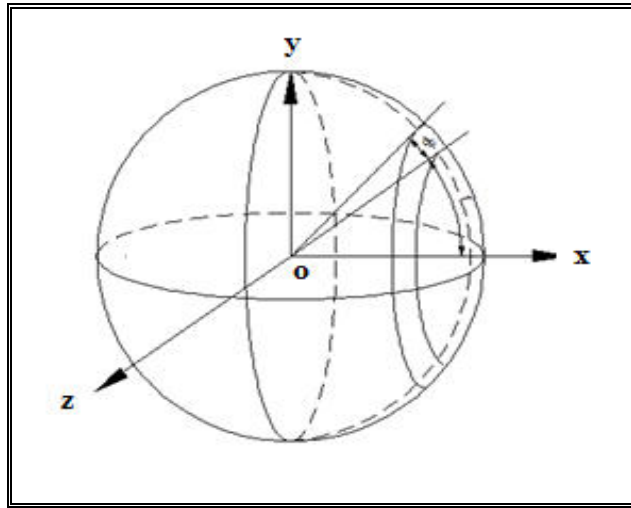


Fig. 3.8. Reprezentare în 3D a armării disperse cu fibre

Fasciculul de fibre ce formează unghiul  $\phi$  cu direcția normală la secțiunea de plan se află între unghiul  $\phi$  la  $\phi + d\phi$ . Raportul dintre acest fascicul de fibre și totalul fibrelor cu funcție de armare este dat de raportul dintre aria zonei unei sfere (de la  $\phi$  la  $\phi + d\phi$ ) și aria unei emisfere este dată de relația (3.14) [39]:

$$\frac{V_{f\phi}}{V_f} = \frac{2\pi r^2 \sin \phi d\phi}{2\pi r^2} = \sin \phi d\phi \quad (3.14)$$

de unde rezultă [39]:

$$n\phi = \frac{V f \phi}{A f} \cos \phi = \frac{V f}{A f} \frac{1}{\pi} \cos \phi d\phi \quad (3.15)$$

deci [39]: 
$$n = \int_0^{\frac{\pi}{2}} n_{\varphi} = \frac{V_f}{A_f} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \varphi \cos \varphi d\varphi = \frac{1}{2} \frac{V_f}{A_f} \quad (3.16)$$

distanța medie dintre fibre este [39]: 
$$\bar{s}_3 = \frac{1}{\sqrt{n}} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{A_f}{V_f}} = \sqrt{2} \bar{s}_{1.0} \quad (3.17)$$

În cazul fibrelor cilindrice avem relația [39]:

$$\bar{s}_{3cyl} = \sqrt{2} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{d}{\sqrt{V_f}} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{d}{\sqrt{V_f}} \approx 1,25 \frac{d}{\sqrt{V_f}} \quad (3.18)$$

O comparație între formulele (3.14), (3.15), (3.16) arată că expresia derivată de Romualdi și Mandel în 1964 pentru distanța medie dintre fibre, este [67]:

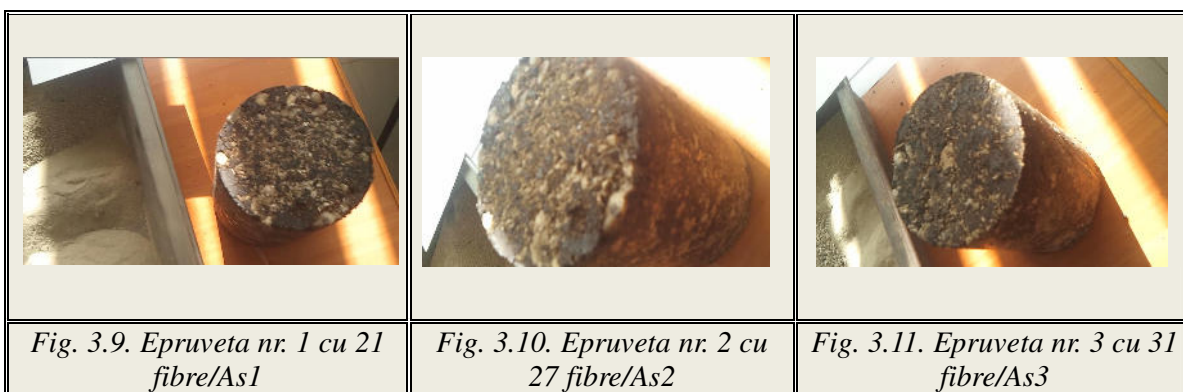
$$\bar{s} = 13,8d \sqrt{\frac{1}{p}} = 1,38 \frac{d}{\sqrt{V_f}} \quad (3.19)$$

Din calcule, rezultă valori mai mari decât cele determinate experimental cu 53% în cazul orientării fibrelor în plan (1D), cu 21% în cazul orientării aleatorii 2D, iar în cazul orientării aleatorii 3D cu 9%.

### 3.5.1. Exemple de calcul a distanței medii dintre fibre

Din determinările experimentale rezultă că:

- la doza de 2,50 kg de fibre/1mc de material reciclat numărul de fibre determinat prin numărare pe secțiunea transversală a unei epruvete cilindrice cu Ø 100 mm după extracție Soxhlet a fost:
  - epruveta nr. 1 - 21 fibre       $As_1 = 0,0079$  mp
  - epruveta nr. 2 - 27 fibre       $As_2 = 0,0079$  mp
  - epruveta nr. 3 - 31 fibre       $As_3 = 0,0079$  mp



Distanța medie dintre fibre se poate determina astfel pentru epruveta nr. 1:

$$\bar{s} = \frac{\sqrt{\pi \times 0,100 \text{ mm}}}{2\sqrt{0,001}} = \frac{0,56}{0,031} = 18,06 \text{ mm} \quad (3.20)$$

Literatura de specialitate [30] arată că atât raportul geometric critic, cât și dozajul optim la care fibrele pot fi utilizate având funcție de armare maximă, este foarte greu de atins. Unii autori susțin că această eficiență maximă nu poate fi obținută în practică din cauză că fibrele cu raportul geometric  $L > L_c \gg df$ , (lungimea mai mare decât lungimea critică și mult mai mare decât diametrul fibrei), se aglomerează în fascicule greu de omogenizat în timpul procesului de reciclare.

Numărul mediu de fibre de armare care intersectează aria  $dA$  se poate calcula și cu relația [67]:

$$N = P \cdot N_{\text{tot}} = \alpha \cdot \frac{V_f}{A_f} \quad (3.21)$$

$$N = 0.9 \times 12738,8 = 11464,9 \text{ fibre/m}^2 \quad (3.22)$$

unde:

$P$  – probabilitatea considerată ca o fibră să intersecteze elementul de arie  $dA$ ;

$N_{\text{tot}}$  – numărul total de fibre;

$V_f$  – procent volumic de armare;

$A_f$  – aria secțiunii transversale a fibrei.

### 3.6. Fibrele cu funcție de armare. Manifestarea tensiunilor la interfața fibrei

O fibră cu secțiunea transversală circulară și raza  $r$  este anrobată de un manșon de material reciclat cu o rază exterioară  $r_m$ , Fig.3.15., astfel încât volumul fibrei din anrobate secvențial este  $V_f = r^2/r_m^2$  [28].

Presiunea interfacială apare când fibra și sistemul secvențial din reciclat sunt supuse la eforturi de tracțiune axiale  $\sigma_f$  și  $\sigma_m$ , iar diferența dintre raza exterioară a fibrei și raza interioară a manșonului înainte de aplicarea forței, are o valoare știută  $\delta$ .

Tensiunile se pot exprima astfel [28]:

$$\frac{u}{h} = \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu(\sigma_t + \sigma_r)) \quad (3.23)$$

unde  $u$  este dislocarea radială,  $h$  este distanța de la axă,  $E$  este modulul lui Young,  $\nu$  este raportul lui Poisson, iar  $\sigma_t$ ,  $\sigma_l$  și  $\sigma_r$  sunt tensiunile tangențiale, longitudinale și, respectiv, radiale.

Dacă manșonul secvențial din sistemul reciclat că ar fi considerat având ( $h=r$ ) fiind supus

la o forță de întindere  $P$  în timp ce asupra suprafeței ( $h=r_m$ ) nu se aplică aceasta forță, putem scrie relația [28]:

$$\sigma_r = \frac{r^2 P}{r_m^2 - r^2} \left( 1 - \frac{r_m^2}{h^2} \right) \quad (3.24)$$

$$\sigma_t = \frac{r^2 P}{r_m^2 - r^2} \left( 1 - \frac{r_m^2}{h^2} \right) \quad (3.25)$$

Substituind ecuațiile (3.24) și (3.25) în (3.23), avem [28]:

$$u = \frac{r^2 P}{(r_m^2 - r^2) E_m} \left[ (1 - \nu_m) h + (1 + \nu_m) \frac{r_m^2}{h} \right] - \frac{\nu_m \sigma_m h}{E_m} \quad (3.26)$$

unde  $E_m$  este modulul lui Young,  $\nu_m$  este raportul lui Poisson, iar  $\sigma_m$  este forța de tracțiune longitudinală în sistemul reciclat.

În cazul în care mansonul este desprins de fibră, la scăderea razei interioare la îndepărtarea forței  $P$ , forța de tracțiune  $\sigma_m$  va fi egală cu cea produsă prin aplicarea forței  $-P$  și a tensiunii  $\sigma_m$ , astfel încât [28]:

$$u_m = \frac{rP}{(r_m^2 - r^2) E_m} \left[ (1 - \nu_m) r^2 + (1 + \nu_m) r_m^2 \right] - \frac{r \nu_m \sigma_m}{E_m} \quad (3.27)$$

unde  $u_m$  este dislocarea matricii la suprafață ( $h=r$ ).

Similar, se poate arăta pentru fibră că [28]:

$$u_f = \frac{rP}{E_f} \left[ (1 - \nu_f) + \frac{r \nu_f \sigma_f}{E_f} \right] \quad (3.28)$$

unde  $u_f$  este deplasarea radială a fibrei la suprafață ( $h=r$ ) atunci când fibra și sistemul sunt desprinse,  $E_f$  fiind modulul lui Young și  $\nu_f$  este coeficientul lui Poisson pentru fibră.

Rezultă că [28]:

$$\delta = u_f - u_m = rP \left[ \frac{(1 - \nu_f)}{E_f} - \frac{(1 - \nu_m) r^2}{(r^2 - r_m^2) E_m} - \frac{(1 + \nu_m) r^2}{(r^2 - r_m^2) E_m} + r \left( \frac{\nu_f \sigma_f}{E_f} - \frac{\nu_m \sigma_m}{E_m} \right) \right] \quad (3.29)$$

Dacă înlocuim  $r_m^2 = \frac{r^2}{V_f}$  avem [28]:

$$\frac{\delta}{r} = P \left\{ \frac{(1 - \nu_f)}{E_f} - \frac{(1 - \nu_m)}{E_m} \right\} + \left( \frac{\nu_f \sigma_f}{E_f} - \frac{\nu_m \sigma_m}{E_m} \right) \quad (3.30)$$

Din ecuația (3a) tensiunea tangențială în sistem la  $h=r$  va fi dată de [28]:

$$t \left( \frac{r_m^2 + r^2}{r_m^2 - r^2} \right) P = \left( \frac{1 + V_f}{1 - V_f} \right) P \quad (3.31)$$

Comportamentul fibrelor în reciclat coroborat cu condiția îndeplinirii funcției de armare exprimat matematic în relațiile de mai sus, presupune o bună adeziune în zona de interfață-bimaterial în care acționează tensiunile tangențiale, longitudinale și radiale.

### 3.6.1. Suprafața specifică a fibrelor

Suprafața specifică a fibrelor (SSF) este dată de suma ariilor suprafețelor specifice ale tuturor fibrelor într-o unitate de volum a sistemului polifazic (excluzând zona de capăt a fibrelor tăiate). Această suprafață specifică ne dă câteva informații despre proprietățile reologice ale reciclatului, dar este în principal un parametru ce guvernează modul în care acesta fisurează, când este tensionat peste elongația limită. Cu cât este mai mare suprafața specifică cu atât fisurile vor fi mai închise (pot fi apropiate) și mai înguste.

Problema determinării mărimii exacte a unei fisuri de siguranță este un parametru ce poate fi măsurat pe probele prelevate din reciclat. Trebuie menționat că o fisură de siguranță este aceea care nu are efect nociv asupra sistemului polifazic reciclat sau asupra ranforsării acestuia.

Dimensional fisura de siguranță (deschiderea fisurii) este în raport invers proporțional cu suprafața specifică a fibrelor cu funcție de armare din sistem.

În cazul reciclării cu bitum spumat și fibre problema se pune în a determina mărimea exactă a unei microfisuri de siguranță, ce nu are efect nociv asupra sistemului polifazic sau asupra ranforsării acestuia. Dimensiunile fisurilor de interfață sunt invers proporționale cu suprafața specifică a fibrelor cu funcție de armare.

Suprafața specifică a fibrelor poate fi calculată în mod asemănător cu distanța medie dintre fibre, cu diferența că acum nu ne imaginăm o secțiune ci două secțiuni, paralele între ele, inserate în sistemul polifazic.

Vom calcula suprafața fibrelor cuprinse în unitatea de volum formată de acele două secțiuni. Calculele se pot simplifica considerabil dacă luăm în considerare faptul că suprafața specifică a fibrelor trebuie să fie independentă de orientarea fibrelor.

Vom lua pentru studiu o unitate de volum din sistemul polifazic reciclat și armat dispers cu fibre și vom considera orientarea fibrelor aleatorie și nealterată de factori externi (Fig.3.12.).

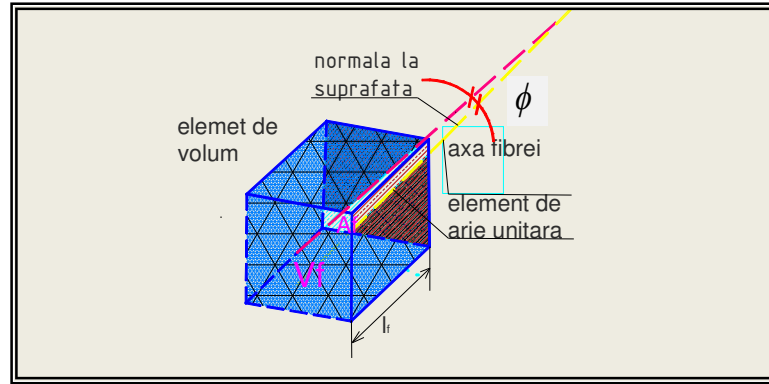


Fig. 3.12. Reprezentare schematică a unei unități de volum și a unei arii unitare din reciclat armat dispers cu fibre

Procentul volumic de fibre se va nota cu  $V_f$ , iar o anumită de fibră are raport specific  $l/d$ . Este evident că o eventuală alterare a orientării fibrelor nu va schimba volumul total al reciclatului, iar numărul total de fibre va rămâne constant. Înmulțind suprafața specifică a fiecărei fibre cu numărul de fibre conținute în unitatea de volum obținem suprafața specifică totală a fibrelor.

În calculele ce urmează vom neglija suprafețele din capetele fibrei, deoarece aceste suprafețe nu se vor comporta în același fel ca restul fibrei în determinarea ancorării fibrelor și nu vor avea o influență semnificativă în formarea fisurilor. Pe de altă parte, suprafețele de la capetele fibrei au o arie infim mai mică decât restul fibrei [39].

Dacă procentul volumic de fibre este notat cu  $V_f$  și fiecare fibră din material are o secțiune transversală  $A_f$  și o lungime  $l_f$  atunci volumul fibrei va fi:  $V_f = A_f l_f$ . Numărul de fibre în unitatea de volum se exprimă astfel [39]:

$$N = \frac{V_f}{V_F} = \frac{V_f}{A_f l_f} \quad (3.32)$$

Circumferința secțiunii transversale a fibrei - o vom nota cu  $P_f$ , (Fig. 3.9). Aria suprafeței specifice a fibrei va fi:  $O_f = P_f l_f$ .

Suprafața specifică totală a fibrelor în unitatea de volum a sistemului polifazic este [39]:

$$SSF = O_f N = P_f l_f \frac{V_f}{A_f l_f} = \frac{P_f}{A_f} V_f \quad (3.33)$$

În cazul special al fibrelor cilindrice, avem [39]:

$$SSF = \frac{\pi d}{\frac{\pi}{4} d^2} V_f = \frac{4}{d} V_f \quad (3.34)$$



În relațiile de mai sus, determinările pentru numărul de fibre pe unitatea de volum și suprafața specifică a fibrelor sunt dezvoltate ca modele matematice pentru condiții particulare sau observații locale de interfață în cazul fibrelor înglobate în sisteme polifazice semielastice. Prezentarea acestora a avut la bază similitudinile existente între sisteme compozite semielastice și sistemele polifazice rezultate din reciclarea la rece a structurilor rutiere cu bitum spumat, suspensie de ciment și deșeuri din fibre de sticlă în dispersie.

### **3.7. Lungimea și dozajul fibrelor de armare dispersă**

#### **3.7.1. Lungimea fibrelor**

Determinările și studiile experimentale ne arată că fibrele și fasciculele de fibre peliculizate cu rășini poliesterice utilizate pentru armarea dispersă la reciclarea cu bitum spumat a structurilor rutiere degradate, trebuie să îndeplinească mai multe condiții tehnice între care este cea a lungimii.

Putem defini câteva elemente legate de lungimea fibrelor:

- lungimea minimă;
- lungimea medie;
- lungimea critică;
- lungimea maximă.

#### **3.7.2. Lungimea minimă**

Lungimea minimă a fibrei reprezintă cea mai mică lungime a fibrei astfel încât aceasta să îndeplinească funcția de armare. Din observațiile din teren precum și din datele experimentale rezultă că lungimea minimă a fibrelor de sticlă și fasciculelor de fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice (la care bitumul are o bună adezivitate), pentru îndeplinirea funcției de armare, este de 5 cm.

Trebuie menționat, faptul că, pe sectoarele experimentale realizate au fost utilizate atât deșeuri de fibre de sticlă amestecate cu rășini poliesterice, cât și fibre de sticlă fasonate din rolele pe care acestea sunt înfășurate în fir continuu.

Deșeurile de fibre măcinate în amestec cu rășini poliesterice rezultate din debavurarea obiectelor sanitare, conțin un procent de 3-8% fibre cu lungimi mai mici de 5 cm, acestea îndeplinind doar funcția parțială de armare sau având rol de umplutură dispersă în masa de reciclat.

### 3.7.3. Lungimea medie

Lungimea medie a fibrei reprezintă media aritmetică a valorii lungimii fibrei celei mai mari și a celei mai mici.

Din datele experimentale (dezanrobarea pe clase) rezultă că lungimea medie a fibrelor de sticlă și fasciculelor de fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice (ce favorizează adezivitatea bitumului) este de 12 cm.

Funcția de armare maximă este îndeplinită de fibrele cu lungimea medie [39].

$$l_{nf} = \frac{l_{\max} + l_{\min}}{2} \quad (3.35)$$

Pentru un număr  $n$  de fibre prezente în sistemul polifazic reciclat avem relația [39]:

$$l_{nf(n)} = \frac{l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n}{n} \quad (3.36)$$

### 3.7.4. Lungimea critică

Lungimea critică a fibrei reprezintă o valoare a lungimii fibrei la care capetele acesteia nu vor fi supuse încărcării totale ( $l > l_c$ ).

Acest lucru favorizează apariția în reciclat a zonei critice potențial plastică, ce ar putea avea o cedare neductilă a fibrei.

Fibrele cu lungimea critică îndeplinesc parțial funcția de armare.

### 3.7.5. Lungimea maximă

Lungimea maximă a fibrei reprezintă lungimea cea mai mare a unei fibre astfel încât aceasta să îndeplinească funcția de armare.

Din observațiile din teren precum și din datele experimentale rezultă că lungimea maximă a fibrelor de sticlă și fasciculelor de fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice, pentru îndeplinirea funcției de armare, este de 30 cm.

Fibrele ce au peste această lungime în cazul în care sunt adăugate în masa de reciclat se aglomerează în ghemuri cu tendința de izolare ce favorizează segregarea și dezanrobarea componentilor ( $l_{\max} \approx 2l_c$ ) (Fig. 3.13.).

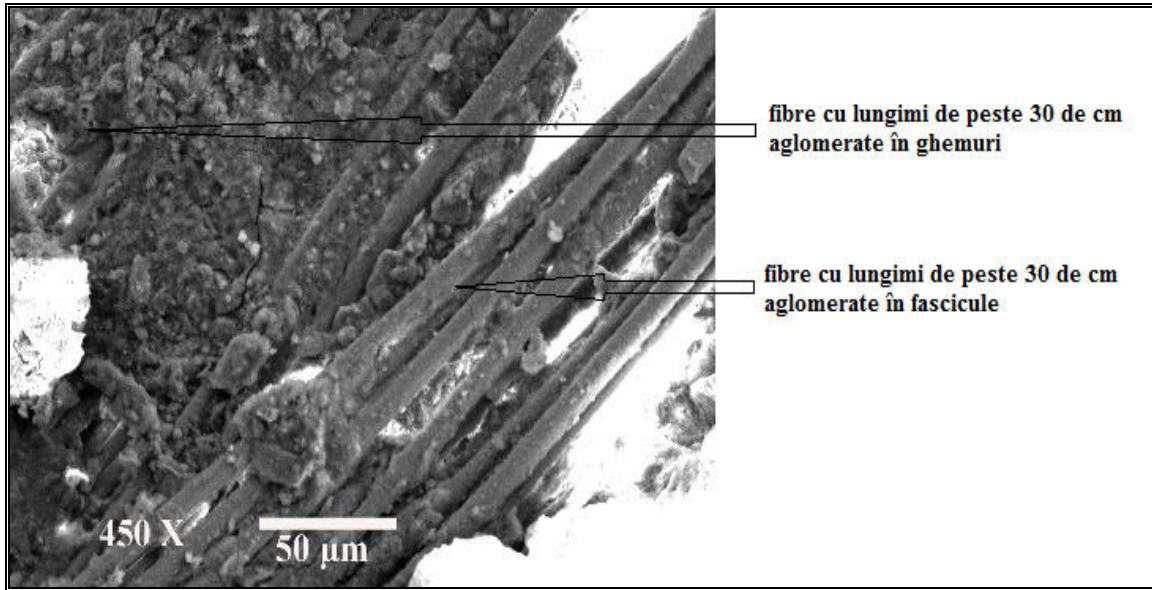


Fig. 3.13. Fibre din reciclat cu lungimi peste 30 cm, aglomerate în fascicule și ghemuri

### 3.8. Calculul dozajului de fibre necesare la armarea dispersă a reciclatului

Ponderea în masa de material reciclat a fibrelor în dispersie ca sistem de armare este determinată de caracteristicile agregatelor, tipul și dozajul de lianți, precum și caracteristicile fizico-mecanice propuse ale structurii rutiere reciclate la rece, armate dispers cu fibre [32].

Una din modalitățile pentru determinarea masei de fibre dintr-un anumit volum de material reciclat este cea folosind regula amestecului. Se definesc următoarele mărimi:

- procentul masic al fibrelor,  $M_{fb}$ , raportul dintre masa fibrelor conținute într-un volum definit de material reciclat și masa totală a acestui volum;
- procentul masic al sistemului reciclat:  $M_s = 1 - M_{fb}$ ;
- procentul volumic al fibrelor,  $V_{fb}$ , raportul dintre volumul fibrelor conținute într-un volum definit de material reciclat și acel volum;
- procentul volumic al sistemului reciclat:  $V_s = 1 - V_{fb}$ ;
- masa fibrelor pe unitatea de suprafață,  $m_{of}$  ( $kg/m^2$ );
- $\rho_i$  – densitățile materialelor din compoziția materialului reciclat.

Se obțin următoarele relații [32]:

$$V_f = \frac{\frac{M_f}{\rho_f}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}} = \frac{\frac{M_f}{\rho_f}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_s}{\frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4}{4}}} = \frac{M_f}{\rho_f} \quad (3.37)$$

$$1 = \frac{\rho_f \cdot (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4)}{M_f \cdot (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4) + \rho_f \cdot M_s} = \frac{\rho_f \cdot (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4)}{M_f \cdot (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4) + \rho_f \cdot (1 - M_f)} \quad (3.38)$$

Se ajunge la o ecuație în care masa fibrelor  $M_f$  este singura necunoscută. Prin înlocuirea valorilor numerice ale densităților materialelor, rezultă masa  $M_f$  [32]:

$$M_f = \frac{\rho_f \cdot X \left( \sum_{i=1}^n \rho_i - 1 \right)}{\sum_{i=1}^n \rho_i - \rho_f} \quad (3.39)$$

Densitatea volumică a materialului reciclat care a înglobat un fascicul de fibre se poate exprima cu relația [32]:

$$\rho = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (3.40)$$

Dozajul de fibre are rol determinant în obținerea unui material reciclat cu proprietăți și caracteristici superioare, ce poate fi utilizat în structurile rutiere cu capacitate portantă și durabilitate ridicată.

### 3.9. Întinderea fibrelor în sistemele polifazice cu crăpături multiple și discontinue în zona de interfață supusă întinderii

Procesul de întindere a fibrelor în sistemele polifazice reciclate și armate dispers cu fibre având crăpături multiple și discontinue a fost studiat și ne arată că la fibrele cu secțiune transversală uniformă, întinderea are loc la o singură fisură. De asemenea, vor fi definite condițiile necesare pentru întinderi multiple [5].

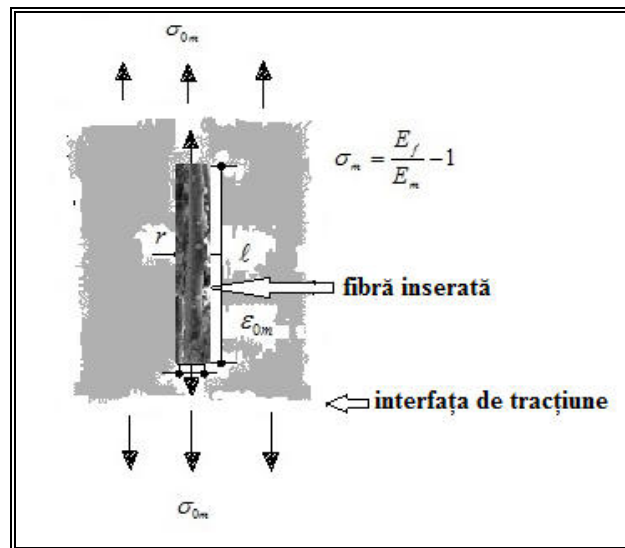


Fig. 3.14. Fibră inserată în reciclat

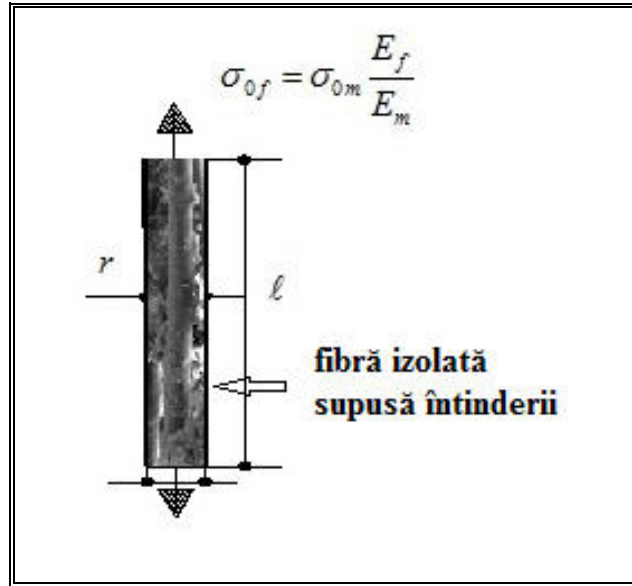


Fig. 3.15. Fibră izolată supusă întinderii

Studiul procesului de întindere a fibrelor în sistemele fibroase cu crăpături multiple și discontinue ne arată că la fibrele cu secțiune transversală uniformă, întinderea are loc la o singură crăpătură. De asemenea, la fibrele cu secțiunea transversală circulară o întindere cu 10%, la o forță de smulgere constantă, se realizează atunci când spațiul crăpăturii este mai mic față de lungimea fibrei, dacă forța de frecare  $\tau_q$  locală se supune următoarei relații [5]:

$$\tau_p = \tau_0 \left( 1 + \frac{8,25x}{l_f} \right) \quad (3.41)$$

Unde  $\tau_0$  este forța de frecare inițială,  $x$  este alungirea relativă a fibrei și sistemului, iar  $l_f$  este lungimea fibrei. Creșterea valorii lui  $\tau_q$  poate fi obținută dacă raza fibrei crește uniform de la centru către capetele ei, iar presiunea interfacială crește în timpul ruperii fibrei. Formulele se derivă relaționând creșterea necesară în rază la constanta elastică a fibrei și matricei,  $\tau_0$ ,  $\mu$  coeficientul frecării de alunecare și  $V_m$  fracțiunea de volum din matrice.

Considerăm un sistem polifazic semielastic cu o fracție de volum  $V_m$  cu fibre în dispersie și cu fascicule de fibre parțial aliniată, supus la o forță de tracțiune acționând asupra direcției majoritare de orientare a fibrelor când acestea au o rezistență uniformă  $\sigma_{fu}$ , lungime  $l_f$ , raza  $r$ , fracție de volum  $V_f$ . Fibrele și sistemul se presupun a fi elastice, iar limita de întindere a fibrelor este mai mare. Forța este transferată uniform între fibre și sistem, depinzând de  $F$  - forța maximă de forfecare la interfață, astfel încât, în timpul ruperii fibrelor aceasta este determinată de forțele

de frecare la interfața dintre fibre și sistem. Ecuația de transfer a tensiunilor de la fibre la sistem pe direcția  $z$  este [5]:

$$\frac{d\sigma}{dz} = \frac{2\tau}{r} \quad (3.42)$$

- în care  $d\sigma$  este forța de rezistență transferată pe distanța  $dz$ .

În cazul fibrei ce traversează o singură crăpătură având smulsă jumătate din lungime, tensiunea  $\sigma_f$  în fibră la suprafața crăpăturii va fi dată de relația [5]:

$$\sigma_f = \frac{2\tau y}{r} \quad (3.43)$$

unde  $y$  este lungimea de fibră smulsă din sistem. Dacă  $y$  este egală cu jumătate din  $l_c$ , avem tensiunea de rezistență în fibră egală cu  $\sigma_{fu}$ , tensiunea de rupere exprimată prin relația [5]:

$$\sigma_{fu} = \frac{\tau l_c}{r} \quad (3.44)$$

Rezultă că nici o fibră nu se va rupe dacă are lungimea mai mică decât  $l_c$ , astfel vom presupune că  $l_f < l_c$ .

La o distribuție aleatorie a fibrelor, toate cu lungimea  $l_f$ , lungimea maximă înglobată ce va fi smulsă va fi de  $l_f/2$ , iar lungimea medie smulsă va fi  $l_f/4$ . Tensiunea medie de întindere în fibre pe suprafața crăpăturii  $\bar{\sigma}_f$ , va fi conform ecuației [5]:

$$\bar{\sigma}_f = \frac{\tau l_f}{2r} \quad (3.45)$$

Înmulțind cu  $V_f$  și substituind  $\tau/r$  din ecuația (3.45), aflăm că smulgerea fibrei are loc la o tensiune compusă dată de ecuația [5]:

$$\sigma_f^0 = \frac{1}{2} \sigma_{fu} V_f \frac{l_f}{l_c} \quad (3.46)$$

Dacă smulgerea continuă, lungimea medie smulsă a fibrei și numărul fibrelor ce trec prin fisură vor scădea. Dacă lățimea fisurii  $p$ , atunci lungimea medie a fibrelor smulse va fi

$$\sigma_f^0 = \frac{1}{2} \left( \frac{l_f}{2} - p \right) \text{ și fracțiunea de fibre încă rămase în crăpătură va fi } 1 - \frac{2p}{l_f}.$$

În acest caz, tensiunea în sistem va fi dată de relația [5]:

$$\sigma_p = \frac{1}{2} \sigma_{fu} V_f \frac{l_f}{l_c} \left( 1 - \frac{2p}{l_f} \right)^2 \quad (3.47)$$

sau [5]

$$\sigma_p = \sigma_p^0 \left( 1 - \frac{2P}{l_f} \right)^2 \quad (3.48)$$

Condiția esențială a menținerii în stare legată a unui sistem cu fisuri multiple este ca fibrele ce trec prin fisură să preia tensiunea adițională rezultată din fisurarea acestuia. Înaintea fisurării tensiunea în sistemul (reciclat) semielastic ranforsat cu fibre discontinue va fi [5]:

$$\sigma_c = \bar{\sigma}_p V_f + \sigma_{mu} V_m = \varepsilon_{mu} E_f V_f (1 - \alpha) \quad (7) \quad (3.49)$$

unde  $\varepsilon_{mu}$  este forța de rezistență la fisurare a sistemului (material reciclat cu umplură dispersă) și  $E_f$  și  $E_m$  modulii lui Young pentru fibră și sistemul polifazic  $\alpha = E_m V_m / E_f V_{fm}$ .

Limita maximă a tensiunii de smulgere ce poate fi suportată de fibre este dată de ecuația (3.46) la care pentru fisuri multiple punem condiția [5]:

$$\frac{1}{2} \sigma_{fu} V_f \frac{l}{l_c} \geq \varepsilon_{mu} E_f V_f (1 - \alpha) \quad (3.50)$$

Apariția fisurilor multiple este probabilă atunci când lungimea fibrelor cu funcție de armare depășește valoarea  $l_m$  [5].

$$\frac{l}{l_c} = 2 \frac{\varepsilon_{mu}}{\varepsilon_{fu}} (1 - \alpha) \quad (3.51)$$

Dacă  $l_m$  este mai mic decât  $l_c$  apar fisuri multiple urmate de smulgerea fibrelor.

### 3.10. Modulul de elasticitate al fasciculelor de fibre înglobate în reciclat

Modulul de elasticitate în lungul fasciculelor legate la interfață prin peliculizare cu rășini poliesterice și înglobate în reciclat  $E_1$  poate fi exprimat cu relația [5]:

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m = E_f V_f + E_m (1 - V_f), \quad (3.52)$$

unde:

$E_f$  - reprezintă modulul de elasticitate al fibrei;

$E_m$  - modulul de elasticitate al fasciculului (matricei).

Modulul  $E_1$  al unui fascicul de fibre peliculizate cu rășini poliesterice, depinde în mod esențial de modulul longitudinal al fibrei  $E_f$ , deoarece  $E_m \ll E_f$ .

### **3.11. Tensiuni generatoare de fisuri la interfața bimaterial**

Modelarea și cuantificarea comportamentului în apropierea și în interiorul a două materiale diferite în zona de interfață în care a apărut o microfisură datorită adeziunii slabe a acestora este prezentată mai jos. Vom utiliza termenul de “fisură bimaterial” pentru descrierea proprietăților în caz de fisurare la interfață a doi componenți din reciclat.

#### **3.11.1. Evaluări analitice**

Evaluările analitice sunt prezentate în formă generală prin utilizarea în mod diferențiat a analizelor microscopice la interfața bimaterial în care apare o fisură. Există și o analiză recent formulată care se apropie de descrierea reală a apariției fenomenului de multifisurare la interfață cu ajutorul modelelor de “franșuri de interferență” găsite de testele realizate cu ajutorul microscopului electronic în aceste tipuri de sisteme polifazice.

#### **3.11.2. Fisura bimaterial**

Determinările teoretice și experimentale, care a fost efectuate în zona de interfață și sub-interfață bimaterial cu ajutorul microscopiei electronice evidențiază mecanica ruperii în timp simultan și tipurile de tensiuni asociate acestui fenomen.

#### **3.11.3. Fisurarea la interfață și sub-interfață**

Din punct de vedere teoretic, acest fenomen prezintă o situație unică și complicată în care există două cantități succesiv-infinite de tensiuni deformatoare ce se manifestă în același punct: un strat fisură și un salt de discontinuitate în proprietățile celor două materiale.

Din punct de vedere fizic, dificultățile descrierii fenomenului sunt semnificative. În cazul în care două materiale sunt unite într-o interfață comună și rezistă la întindere și forfecare, forțele aderente de o anumită formă trebuie să fie prezente.

În practică, aceste forțe aderente sunt, de obicei, derivate fie dintr-un al treilea material, fie din turnare și întărire a materialelor unul într-altul. Pentru cazul în care un al treilea material (liantul) este folosit pentru a fixa două materiale unul față de celălalt, abaterea de la modelul teoretic bimaterial este evidentă.

Deși variații între teorie și realitate vor exista în mod inevitabil la problemele legate de orice fractură bimaterial, cuantificarea acestor factori externi poate, în anumite cazuri, fi făcută prin utilizarea combinată a experimentelor și aproximărilor analitice [24].



### 3.11.4. Exemplificare analitică

Vom prezenta, în cele ce urmează, starea de tensiuni ce apar la interfața bimaterial în forma lor generală, pentru un model simplificat din datele obținute experimental prin utilizarea metodei optice de analiză a unui material granular reciclat legat cu bitum spumat D80/100 considerat omogen ce înglobează deșeuri din fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice în dispersie, Fig. 3.16. [24].

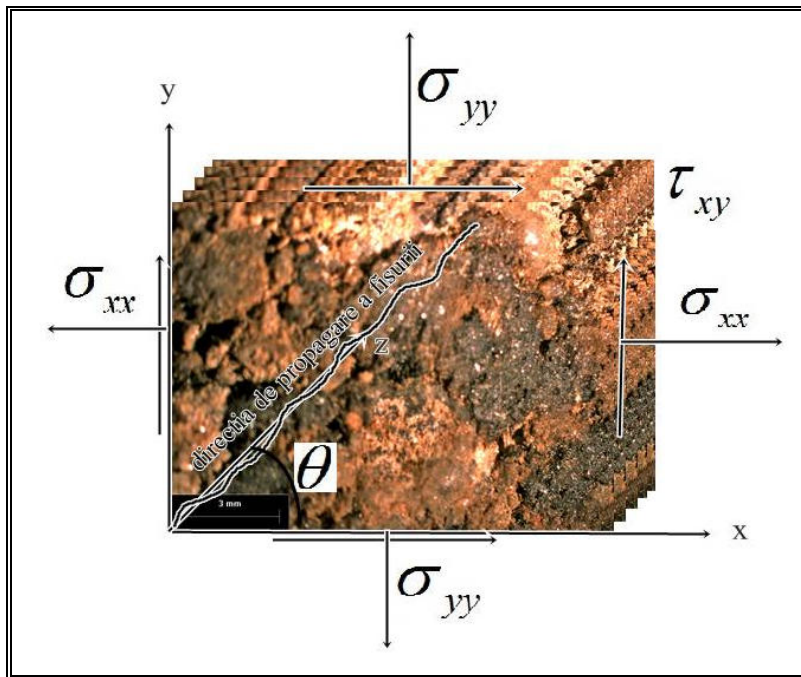


Fig. 3.16. Représentarea unui câmp generalizat de tensiuni generatoare de fisuri la interfața în 2-D

Figură în care:

- $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  și  $\sigma_{xy}$  sunt componentele de tensiuni non-singulare pe cele trei direcții;
- $\tau_{xy}$  - este componenta tensiunii singulare de rupere pe direcția fisurării;
- $\theta$  - este unghiul dintre direcția de propagare a fisurii și axa - x;
- $r$  - este vectorul direcțional de propagare a fisurii la interfață.

Pe baza reprezentării din Fig. 3.16, ecuațiile dimensionale generalizate derivate din mecanica ruperii teoretice, ce exprimă câmpuri de tensiuni pe direcții diferite care apar lângă o fisură existentă la nivel de interfață, într-un material considerat omogen (prin omogenitate înțelegând distribuția uniformă a componentilor în masă și nu omogenitate structurală sau izotropie), pot fi scrise astfel [24]:

$$\sigma_{xx} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} (F_1 K_I + F_2 K_{II}) \quad (3.53)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} (F_3 K_I + F_4 K_{II}) \quad (3.54)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} (F_3 K_I + F_4 K_{II}) \quad (3.55)$$

Unde  $K_I$  și  $K_{II}$  sunt factori ce iau valori diferite pentru tensiuni de tip I și II.

### 3.12. Smulgerea fibrelor din sisteme cu crăpături multiple

Considerăm o fibră supusă întinderii ce traversează o singură fisură în sistem. Când o fibră este smulsă la jumătate din lungime, tensiunea de întindere  $\delta_f$  la suprafața fisurii este [28]:

$$\sigma_f = \frac{2\tau y}{r} \quad (3.56)$$

unde:

$y$  - este lungimea fibrei smulsă din sistem.

Dacă  $y$  este egală cu jumătate din forța de rezistență în fibră  $\sigma_{fu}$  (forța de rupere) va fi dată de relația [28]:

$$\sigma_{fu} = \frac{d_c}{r} \quad (3.57)$$

Rezultă că nicio fibră nu se va rupe dacă lungimea ei este mai mică decât  $l_c$ , iar noi vom presupune că  $l_f < l_c$ .

Cu o distribuție aleatorie a fibrelor, având toate lungimea  $l_f$ , lungimea maximă înglobată ce va fi smulsă, va fi de  $l_f/2$ . Forța medie de întindere în fibre pe suprafața fisurii  $\sigma_f$ , va fi conform ecuației [28]:

$$\bar{\sigma}_f = \frac{d_f}{2r} \quad (3.58)$$

Înmulțind cu  $V_f$  și substituind  $\tau l_f$  din ecuația (4.16), aflăm că smulgerea fibrei va avea loc la o tensiune (forță) compusă dată de ecuația [28]:

$$\sigma_f^0 = \frac{1}{2} \sigma_{fu} V_f \frac{l_f}{l_c} \quad (3.59)$$

În timp ce smulgerea continuă, lungimea medie smulsă a fibrei și numărul fibrelor ce trec peste fisură vor scădea. Dacă luăm lățimea fisurii  $p$ , atunci lungimea medie a fibrelor smulse va

fi  $\frac{1}{2}\left(\frac{l_f}{2} - p\right)$  și fracțiunea de fibre încă rămasă în fisură va fi  $\left(1 - \frac{2p}{l_f}\right)$ .

Tensiunea de rezistență la întindere în sistem va fi [28]:

$$\sigma_p = \frac{1}{2} \sigma_{fu} V_f \frac{l_f}{l_c} \left(1 - \frac{2p}{l_f}\right)^2 \quad (3.60)$$

sau [28]

$$\sigma_p = \sigma_p^0 \left(1 - \frac{2p}{l_f}\right)^2 \quad (3.61)$$

Condiția esențială a fisurilor multiple din sistem este ca fibrele ce trec prin fisură să susțină tensiunea adițională rezultată din ruperea acestuia. Imediat după apariția fisurii, tensiunile într-un sistem polifazic reciclat și armat dispers cu fibre discontinue va fi [28]:

$$\sigma_c = \sigma_p V_f + \sigma_{mu} V_m \quad (3.62)$$

$$\varepsilon_{mu} = E_f V_f (1 + \alpha) \quad (3.63)$$

unde:

$\varepsilon_{mu}$  - este tensiunea (forța de rezistență) la fisurare (rupere) a sistemului;

$E_f$  și  $E_m$  - modulii lui Young pentru fibră și sistem.

Valoarea unghiului  $\alpha$  va fi dată de relația:  $\alpha = E_m V_m / E_f V_{fm}$  (3.64)

Tensiunea ce poate fi preluată de fibre este egală cu tensiunea de smulgere dată de ecuația (4.26) când pentru fisuri multiple avem condiția [28]:

$$\frac{1}{2} \sigma_{fu} V_f \frac{l_f}{l_c} > \varepsilon_{mu} E_f V_f (1 + \alpha) \quad (3.65)$$

Condiția pentru fisuri multiple într-un sistem armat dispers cu fibre discontinue a fost derivată de către McLean.

Apariția fisurilor multiple este posibilă atunci când lungimea fibrei depășește valoarea  $l_m$  [28].

$$\frac{l_m}{l_c} = 2 \frac{\varepsilon_{mu}}{\varepsilon_{fu}} (1 + \alpha) \quad (3.66)$$

Dacă  $l_m$  este mai mic decât  $l_c$  apar fisuri multiple urmate de smulgerea fibrelor în sistemele polifazice reciclate la rece “*in situ*”, armate dispers cu fibre discontinue.

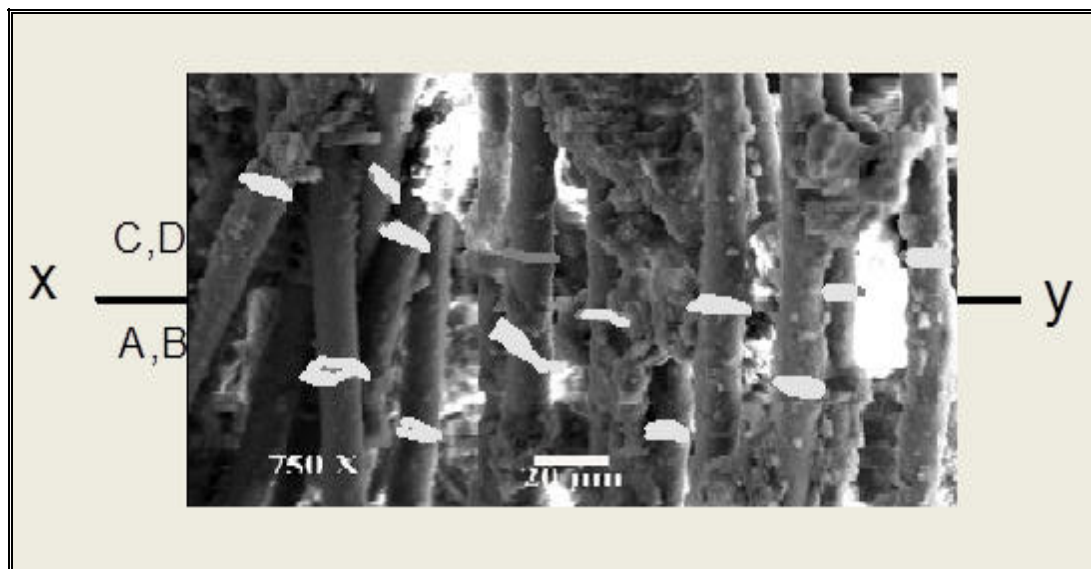


Fig. 3.17. Smulgerea fibrelor într-un material reciclat cu crăpături multiple

Dacă sistemul este supus la eforturi de întindere, blocurile se îndepărtează la aceeași distanță și capetele fibrei sunt trase înăuntru. Într-un ansamblu cum este prezentat și în Fig. 3.17 forțele de frecare vor acționa în direcția și sensul perpendicular pe axa x-y, pentru a se opune întinderii fibrelor.

Se poate nota că, în fiecare bloc din sistem, forțele de frecare acționând într-un sens sunt echilibrate cu cele acționând în sens opus.

Vom examina ce se întâmplă inițial în planul XY la momentul în care sistemul este extins. Fibra 5 va fi trasă din bloc de fiecare parte față de XY contra forțelor de forfecare pe o lungime de  $l/2$ . Fibra 2 va fi trasă afară din blocul B contra forțelor de forfecare pe o lungime egală cu lungimea unui singur bloc. În același timp va fi trasă în blocul C de partea cealaltă a planului XY. Forța tăietoare ce acționează asupra fibrei într-o parte va fi egală și inversă cu cea din cealaltă parte.

Forțele de forfecare inițiale ce acționează asupra fibrelor și străbat planul XY și determină forțele de tragere vor corespunde cu forțele de forfecare care acționează pe lungimile fibrelor variind de la 0 la  $l/2$ , la fel ca și în cazul sistemelor cu crăpături unice.

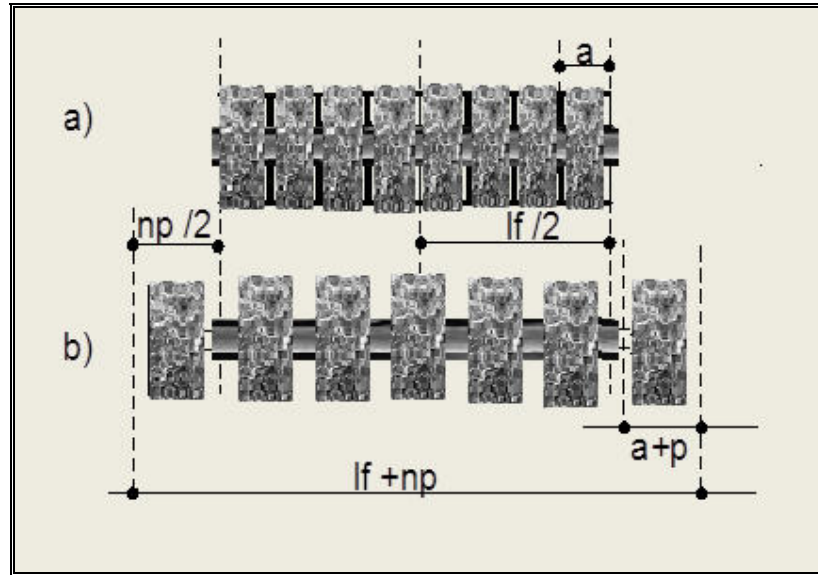


Fig. 3.18. Smulgerea unei singure fibre din sistemul cu crăpături multiple

Notăm lățimea fisurii cu  $p$ , iar lungimea elementului de volum din sistemul arătat în Fig. 3.18. va fi  $l_f + np$ . Lungimea fibrei din jumătatea de element care este în contact cu sistemul va fi [28]:

$$\frac{l_f}{2} \left( \frac{l_f}{l_f + np} \right) \text{ sau } \frac{l_f}{2} \left( 1 - \frac{np}{l_f + np} \right) \quad (3.67)$$

A doua relație exprimă lungimea maximă a fibrei pe care vor putea acționa forțele de forfecare în aceeași direcție ca să reziste la lărgirea fisurii. Lungimea efectivă medie va fi dată de relația [28]:

$$\frac{l_f}{4} \left( 1 - \frac{np}{l_f + np} \right) \quad (3.68)$$

Fracțiunea de volum care încă mai este traversat de fibră va fi [28]:

$$\frac{l_f}{l_f + np} = \left( 1 - \frac{np}{l_f + np} \right) \quad (3.69)$$

Deoarece avem o distribuție aleatorie de fibre, fiecare element de volum din sistem va fi reprezentat într-o secțiune subțire a ansamblului în așa fel încât acestea să includă fisura pe direcția XY la jumătățile blocurilor B și C de fiecare parte.

Observăm, faptul că, fracțiunile de fibre ce trec printr-o fisură din sistem vor fi date de relația [28]:

$$\left(1 - \frac{np}{l_f + np}\right) \quad (3.70)$$

Din ecuațiile (3.69) și (3.70) putem obține tensiunea de întindere  $\sigma_{mp}$  în sistemul cu multiple fisuri [28]:

$$\sigma_{mp} = \frac{1}{2} \sigma_{fu} V_f \frac{l_f}{l_c} \left(1 - \frac{np}{l_f + np}\right)^2, \quad l_m < l_f < l_c \quad (3.71)$$

Aceeași expresie se obține dacă evaluăm tensiunea medie a fibrei în elementul de volum din sistem supus întinderii și fisurării conform Fig. 3.18. și apoi înmulțim cu  $V_f$  (procentul volumic de fibre) când  $p=0$ . [9]

$$\sigma_{mp}^0 = \frac{1}{2} \sigma_{fu} V_f \frac{l_f}{l_c} \quad (3.72)$$

și, deci,  $\sigma_{mp}^0$  este egal cu  $\sigma_p^0$  pentru o singură fisură, ca să putem rescrie ecuația (3.74) [28]:

$$\sigma_{mp} = \sigma_p^0 \left(1 - \frac{np}{l_f + np}\right)^2, \quad l_m < l_f < l_c \quad (3.73)$$

Ecuația (3.73) poate fi exprimată în forma [28]:

$$\frac{\sigma_{mp}}{\sigma_0} = \left(\frac{1}{1+\gamma}\right)^2 \left\{1 + \frac{Al_f}{3\pi\tau_0} \left(\frac{n}{1+\gamma} - \frac{1+\gamma}{n}\right)\right\}, \quad l_m < l_f < l_c \quad (3.74)$$

unde  $\gamma = np/l_f$ , relația dintre  $\sigma_{mp}/\sigma_p^0$  și întinderea fracțiunii  $\gamma$  a sistemului cu fisuri multiple.

Tensiunea corespunzătoare unei întinderii date este întotdeauna mai mică la sistemele cu fisură unică față de sistemele cu fisuri multiple (în care lungimea elementului de volum supus analizei este mai lungă decât  $l/2$ ) și necesită un efort mai mic dacă distanțarea are loc la o singură fisură. La sistemul cu fisuri multiple pe axa x, supus unei forțe deformatoare în absența unei tensiuni suplimentare, putem anticipa ca întinderea uniformă să aibă loc de la o singură fisură sub acțiunea forței de tracțiune. Întinderea fibrelor devine progresiv mai mică în timp ce se lărgeste fisura, pentru ca cele din prima fisură să nu se rupă.

O creștere a forțelor adezive la interfața trimaterial, agregat – liant – fibre, ce se împotrivesc smulgerii fibrelor se poate obține prin creșterea valorii  $\tau$ . Dacă  $\tau$  este determinat de forțele de frecare la interfață, atunci, la o fibră cu secțiunea transversală circulară, o creștere a valorii locale a lui  $\tau$  în timp ce progresează întinderea, se obține dacă diametrul fibrei crește de la centru către capete (Fig. 3.18.). Odată cu creșterea întinderii (smulgerii), creșterea presiunii radiale la interfața trimaterial agregat – liant – fibră va duce la o creștere proporțională a lui  $\tau$ .

Valoarea la care  $\tau$  crește are legătură cu  $p$ , lățimea fisurii. Într-un element de volum din sistem ca și cel din Fig. 3.18., secțiunea fibrei este circulară și că valoarea locală a  $\tau$  din elementul de volum crește în vreme ce acesta se îndepărtează de la poziția inițială către capătul fibrei. Dacă raza fibrei la capătul ei nu diferă prea mult față de raza din mijlocul ei, ca să putem scrie ecuația (3.74) astfel încât aceasta să aibă o valoare constantă, trebuie să ținem cont de faptul că rata de îndepărtare a elementului de volum din sistem față de fibră depinde de distanța până la mijlocul fibrei. Când lățimea fisurii este  $p$ , acest element de volum se va deplasa pe o distanță  $x$  dată de relația [28]:

$$x = p \left( q - \frac{1}{2} \right) \quad (3.75)$$

de unde rezultă că [28]:

$$\tau_q = \tau_0 + Ax \quad (3.76)$$

unde:

$\tau_q$  - este valoarea locală a  $\tau$  în elementul de volum al  $q$ -lea;

$\tau_0$  - este valoarea inițială a  $\tau$  ;

$A$  - este o constantă.

Rezistența la întindere  $\Delta\sigma_q$  transferată între fibră și sistem în elementul de volum cu nr.  $q$  va fi [28]:

$$\Delta\sigma_q = \frac{2a}{r} \left( \tau_0 + Ap \left( q - \frac{1}{2} \right) \right) \quad (3.77)$$

Tensiunea totală transferată în jumătatea de element va corespunde forței de rezistență maxime în fibră astfel încât, sunt  $n$  blocuri de matrice în contact cu fibra [28]:

$$\sigma_{\max} = \sum_{q=1}^{q=\frac{n}{2}} \Delta\sigma_q = \frac{n}{2r} \left( 2\tau_0 + \frac{nAp}{2} \right) \quad (3.78)$$

Din ecuațiile (3.77) și (3.78) rezultă că tensiunea medie de întindere în fibră în primul element de volum de la centru va fi [28]:

$$\bar{\sigma}_{mi} = \frac{na}{2r} \left( 2\tau_0 + \frac{nAp}{2} \right) - \left( \tau_0 + \frac{Ap}{2} \right) \quad (3.79)$$

și că tensiunea medie în elementul de volum  $q$  va fi dată de [28]:

$$\bar{\sigma}_q = \frac{na}{2r} \left( 2\tau_0 + \frac{nAp}{2} \right) - \frac{2a}{r} \left( q\tau_0 + \frac{Apq(q+1)}{2} - \frac{qAp}{2} \right) + \frac{a}{r} \left( \tau_0 + Ap \left( q - \frac{1}{2} \right) \right)$$

$$\frac{a}{r} \tau_0 (n+1) + \frac{A_p}{2} \left( \frac{(n)^2}{2} - 1 \right) + q(A_p - 2\tau_0) - A_p q^2 \quad (3.80)$$

așa că tensiunea medie în fibră în  $n/2$  blocuri va fi [28]:

$$\frac{2}{n} \sum_{q=1}^{q=\frac{n}{2}} \sigma_q = \frac{an}{2r} \left( \tau_0 + \frac{A_p(n-1)(n+1)}{3n} \right) \quad (3.81)$$

Această analiză indică faptul că există posibilitatea obținerii unei întinderi a materialului reciclat cu până la 10% față de starea inițială, fără să se inițieze fisuri și crăpături generatoare de degradări ireversibile datorită prezentei fibrelor cu funcție de armare. În practică, a fost observat un comportament similar și pentru volume de reciclat, armate cu fascicule de fibre ceea ce înseamnă că aria efectivă de contact în timpul întinderii scade ne semnificativ față de fibrele singulare înserate în reciclat.

### 3.13. Defectele de structură rutieră

Defectele structurilor rutiere sunt degradări locale, parțiale sau totale a integrității acestora care apar în general în perioada de serviciu și influențează starea tehnică a drumurilor publice.

Cauzele generale ale acestora pot fi împărțite astfel:

- erori de execuție, prin nerespectarea tehnologiilor, a normelor tehnice și normativelor;
- erori de exploatare;
- apariția unor factori accidentali ce produc degradarea accentuată a căilor rutiere.

Efectele defavorabile a acestor tipuri de erori se manifestă și asupra structurilor rutiere reciclate cu deșeuri de fibre în dispersie, având diverse forme de manifestare. Enumerăm câteva dintre acestea:

- zone cu reciclat segregat datorită calității necorespunzătoare a materialelor, a dozajului de liant, ciment sau fibre;
- aglomerări de fibre în fascicule ce favorizează apariția fisurilor în complexul reciclat;
- apariția de goluri datorită compactării necorespunzătoare;
- apariția separației între straturile structurii rutiere generată de incompatibilitatea parțială a materialelor existente în acestea;
- apariția unor fibre neanrobate și neînglobate în reciclat;



- apariția de fisuri orizontale ca urmare a evaporării rapide a apei în condiții de temperaturi ridicate;
- apariția de fisuri verticale datorită contracției neuniforme de volum care se pot regăsi în același plan sau în planuri diferite;
- apariția de fisuri și crăpături înclinate în structura reciclatului datorită existenței unor zone nearmate dispers cu fibre;
- prezența umidității în exces ce apare sub formă de condens în capilaritate sau datorită infiltrațiilor din pânza freatică de suprafață existentă în terasamentul drumurilor.

Degradările de structură rutieră pot fi asociate cu fenomenele de difuzie prin capilaritate a substanțelor chimice, a apei, a gazelor bogate în dioxid de sulf sau de carbon. Aceste tipuri de degradări pot fi produse și prin apariția oxidului de calciu însoțită de creștere de volum și fisurare.

### **3.14. Defecte ale fibrelor de sticlă cu funcție de armare**

Principalele defecte ce se manifestă în timp asupra fibrelor de sticlă diminuându-le funcția de armare sunt procesele de coroziune fizică și chimică:

- a) coroziunea fizică a fibrelor de sticlă apare datorită dezvoltării tensiunilor interioare în masa de reciclat generate de factori interni sau externi. Procesele fizice de coroziune asupra fibrelor pot fi datorate apariției compușilor de hidratare a cimentului existent în masa de reciclat;
- b) coroziunea chimică se datorează interacțiunii dintre compușii solubili ai fibrelor de sticlă și soluțiile chimice agresive ce pot dizolva parțial sau total porțiuni din structura fibrelor de sticlă. Proveniența acestor agenți chimici agresivi poate fi din produsele petroliere deversate accidental pe partea carosabilă, din apele acide sau compușii chimici existenți în gazele de eșapament la care este expusă structura rutieră timp îndelungat.

Fenomenele de coroziune a fibrelor nu pot fi asociate cu cele de difuzie prin capilaritate întrucât acestea se produc prin difuzia ionilor agresivi pe suprafața expusă a acestora.

### **3.15. Cauzele degradărilor structurilor rutiere reciclate la rece cu fibre în dispersie**

Degradările acestor tipuri de structuri au cauze interne (de legături liante interfazice) sau externe, ca urmare a acțiunii factorilor agresivi de mediu.

---

### 3.15.1. Cauzele interne

Cauzele interne se inițiază prin procese fizice și chimice ce se dezvoltă în masă, acestea fiind [11]:

- creșterea în volum a unor componenți (CaO, MgO) care generează fisurarea structurii având tensiuni mecanice diferențiate, coeficienți de dilatație diferiți, datorită reacțiilor chimice între alcalii cu expansiune de volum;
- permeabilitatea ce permite pătrunderea gazelor și lichidelor în masă;
- gradul de impermeabilitate reprezintă capacitatea de a rezista la o anumită presiune interfacială, fără ca să aibă loc fenomenul de absorbție de apă urmat de scăderea capacității portante.

### 3.15.2. Cauzele externe

Cauzele externe (fizice, mecanice, chimice și biochimice) [33]:

- acțiunile mecanice statice repetate de scurtă sau de lungă durată;
- acțiuni mecanice dinamice repetate (oboseala dinamică);
- acțiunea ciclurilor îngheț-dezghet;
- acțiunea electrolică;
- acțiunea osmotică;
- contracția urmată de pătrunderea agenților chimici;
- acțiunea substanțelor chimice și biochimice urmate de procese de coroziune și/sau creșteri de volum și fisurare).

Mărimea fisurilor acționează intens asupra fibrelor când aceasta este peste 0,40 mm iar durata de serviciu a structurilor rutiere reciclate la rece și armate dispers cu fibre de sticlă scade semnificativ dacă mărimea fisurilor crește mult peste această valoare.

Neomogenitatea structurilor rutiere reciclate și armate dispers cu fibre poate fi produsă de [58]:

- condiții externe datorate unor supraîncărcări exterioare;
- condiții interne (contracția la uscare sau contracția plastică);
- ruperea fibrelor datorită coroziunii.

Degradarea fizică a structurilor rutiere reciclate la rece și armate dispers cu deșeuri din fibre de sticlă supuse ciclurilor îngheț-dezghet (gelivitatea) este accentuată proporțional cu gradul de saturație cu apă. Degradările vizibile sunt fisuri ce se dezvoltă aleatoriu, de la exterior spre interior, care în etapele premergătoare ruperii produc dislocări masive pe zone izolate de

---

reciclat.

În puncte sau zone izolate, dacă este depășită rezistența sistemului asigurată de forțele liante, are loc slăbirea treptată a structurii interne, scăderea coeziunii dintre componente și a adhezivității liant – agregate – fibre.

Apa în pori îngheață progresiv, la început în porii cu dimensiuni mai mari, apoi în golurile structurale și în final în porii mai mici.

Dezghețul are loc prin pătrunderea apei în micro și macrofisurile apărute în ciclurile precedente, iar aderența devine slabă.

În perioada ciclurilor îngheț-dezgheț degradările se amplifică, accentuându-se caracterul lor cumulativ și apariția tensiunilor interioare generatoare de noi fisuri la interfață. Dilatarea liberă a sistemului, crește proporțional cu diferența de temperatură și este condiționat de coeficientul de dilatare termică și de modulul de elasticitate după relația [54]:

$$(\sigma = \alpha E_b \Delta T) \quad (3.82)$$

Degradările interioare se accentuează amplificând starea de microfisurare.

Degradarea structurii rutiere reciclate la rece se amplifică exponențial în cazul variațiilor accentuate și repetate de temperatură. Diferența dintre coeficienții de dilatare termică a componentelor, produce dilatări și contracții neuniforme ce degradează progresiv structura internă a reciclatului.

Fisurile cauzate de dilatarea termică sunt mai mari, mai rare și apar evidențiate, iar cele cauzate de contracția termică sunt dese și fine.

### **3.16. Degradări datorate fenomenului de fisurare. Tipuri de fisuri**

Fisurile în structurile reciclate și armate dispers cu fibre de sticlă apar datorită acțiunilor exterioare (trafic agabaritic, ciclul îngheț-dezgheț) și datorită unor acțiuni ale tensiunilor interioare prezente în masa de reciclat. Apariția fisurilor favorizează pătrunderea apei și substanțelor agresive în masă și afectează durabilitatea structurii rutiere reciclate și a fibrelor înglobate. Fenomenul de fisurare apare și datorită unor eforturi de aderență excesivă aplicate local ca forțe concentrate ce se dezvoltă sub acțiunea traficului sau de curgerea lentă și neliniară, în condiții de temperaturi ridicate a materialului reciclat.

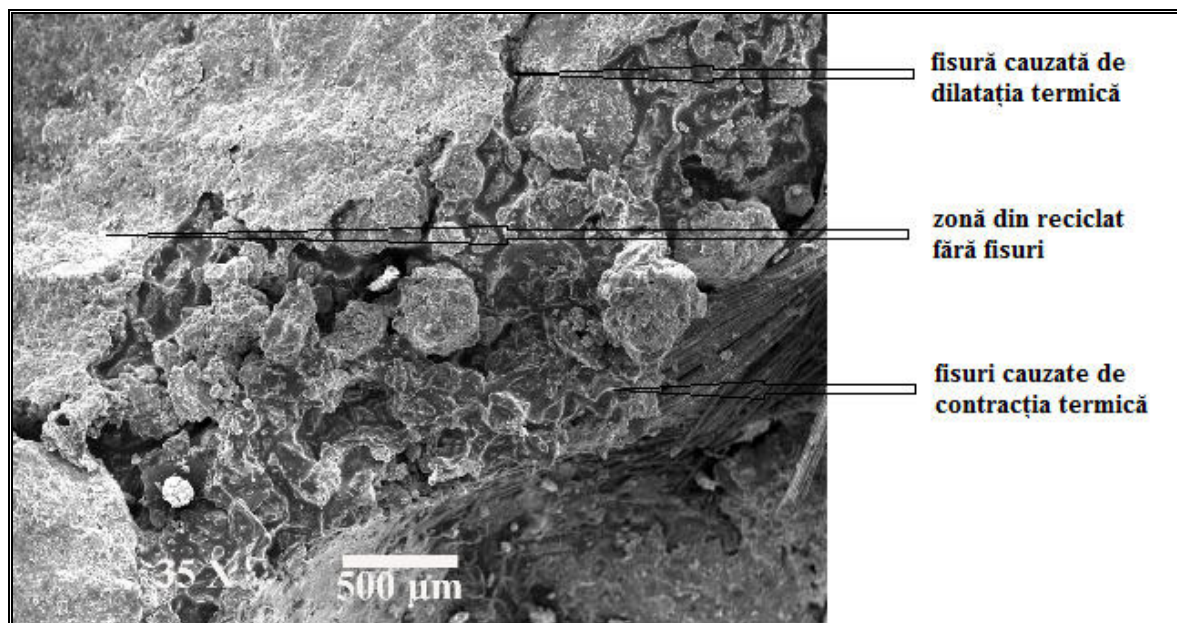


Fig. 3.19. Tipuri de fisuri cauzate de variațiile termice

Principale tipuri de fisuri sunt:

- fisuri datorate contracției și tasării plastice a reciclatului;
- fisuri produse de încărcări cu deformații succesive sau periodice;
- fisuri apărute datorită fenomenului de coroziune chimică a fibrelor în dispersie;
- fisuri apărute datorită fenomenului de uzură exercitat de trafic;
- fisuri apărute datorită apariției fenomenului de impact percutant asupra structurilor rutiere reciclate.

### 3.17. Influența traficului asupra degradărilor interne ale structurilor rutiere reciclate la rece “*in situ*” cu bitum spumat și deșeuri din fibre de sticlă în dispersie

Determinările privind comportarea sub trafic a structurii rutiere reciclate și ranforsate cu deșeuri din fibre de sticlă în dispersie are drept scop calcularea grosimii straturilor rutiere pentru care criteriile de dimensionare sunt respectate (Fig. 3.20.).

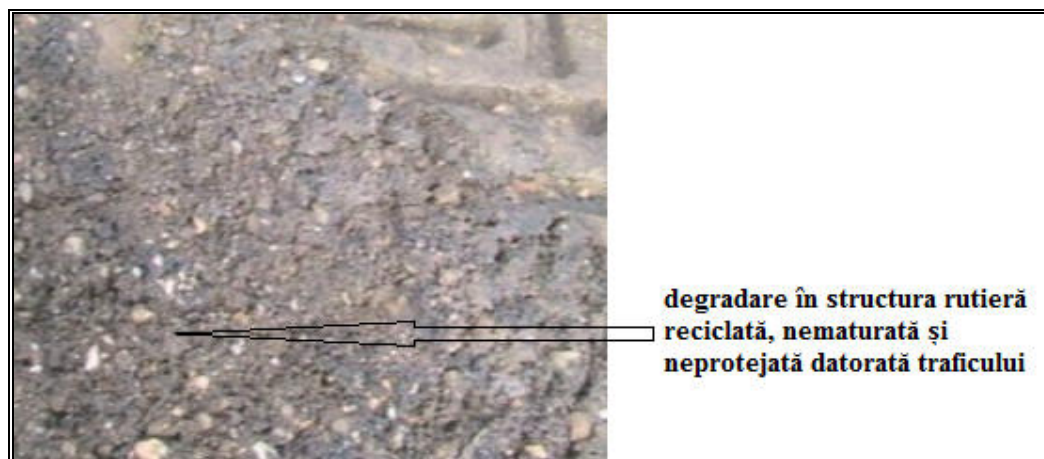


Fig. 3.20. Zonă izolată, degradată din structura rutieră reciclată la rece "in situ" cu bitum spumat și deșeuri din fibre de sticlă în dispersie

Eficiența tehnologiei de reciclare la rece "in situ" poate crește dacă grosimile de ranforsare ale îmbrăcăminților asfaltice se reduc cu până la 30% datorită capacității portante ridicate a anrobatului bituminos de tip AB 2 rezultat după reciclare cu fibre și utilizat ca strat de fundație.

Criteriul admisibil al deformației specifice de la întindere la baza straturilor bituminoase este respectat dacă rata de degradare prin oboseală (RDO) are o valoare mai mică sau egală cu RDO admisibil.

Rata de degradare prin oboseală se calculează cu relația [83]:

$$RDO = N_c / N_{adm} \quad (3.83)$$

unde:

- $N_c$  - traficul de calcul, în osii standard de 115 kN, în m.o.s.;
- $N_{adm}$  - numărul de solicitări admisibil, în m.o.s. ce poate fi preluat de straturile bituminoase, corespunzător stărilor de deformație la baza acestora.

Numărul de solicitări admisibil, care poate să fie preluat de straturile bituminoase, se stabilește cu ajutorul legilor de oboseală a mixturii asfaltice, în funcție de categoria drumului sau a străzii, și de traficul de calcul, cu relațiile:

Pentru autostrăzi și drumuri expres, drumuri naționale europene, drumuri și străzi cu trafic de calcul mai mare de 1 m.o.s.  $1mos = 1 \times 10^6 \text{ o.s. } 115kN$  (3.84)

$$N_{adm} = 4,27 \times 10^8 \times \epsilon_r^{-3,97} \quad (\text{m.o.s.}) \quad (3.85)$$

Grosimea necesară a straturilor rutiere este cea pentru care se respectă condiția:

$$RDO < RDO_{adm} \quad (3.86)$$

în care RDO admisibil are următoarele valori:

- max. 0,80 pentru autostrăzi și drumuri expres;
- max. 0,85 pentru drumuri naționale europene;
- max. 0,90 pentru drumuri naționale principale și străzi;
- max. 0,95 pentru drumuri naționale secundare;
- max. 1,00 pentru drumuri județene, comunale și vecinale.

Criteriul deformației specifice verticale admisibile la nivelul pământului de fundare este respectat, dacă este îndeplinită condiția:

$$\varepsilon_z \leq \varepsilon_{z adm} \quad (3.87)$$

unde:

$\varepsilon_z$  - este deformația specifică verticală de compresiune la nivelul pământului de fundare, în microdeformații, calculată cu programul CALDEROM;

$\varepsilon_{z adm}$  - este deformația specifică verticală admisibilă și se calculează cu următoarele relații:

- autostrăzi și drumuri expres;
- drumuri naționale europene;
- drumuri și străzi cu trafic mai mare de 1 m.o.s. (1 x 10<sup>6</sup> o.s. 115 kN);

$$\varepsilon_{z adm} = 329 N_c^{-0,28} \quad (3.88)$$

- drumuri și străzi cu trafic de calcul cel mult egal cu 1 m.o.s. (1 x 10<sup>6</sup> o.s. 115 kN);

$$\varepsilon_{z adm} = 600 N_c^{-0,28} \quad (3.89)$$

Studiul adsorbției capilare în reciclat a gazelor de eșapament generate de trafic și a celor din atmosferă, a apei și a soluțiilor de substanțe chimice agresive dizolvate în apă, este un proces de bază în conceperea și proiectarea unor structuri rutiere reciclate cu adaos de fibre în dispersie, cu durabilitate sporită.

### **3.18. Fenomene de transfer de lichide și gaze ce degradează structurile rutiere reciclate la rece și armate dispers cu deșeurii din fibre de sticlă în dispersie**

Transferul prin porozitatea internă sau prin microfisuri și fisuri generate de condițiile de trafic ale diverselor substanțe chimice, ale gazelor sau ale apei, sunt legate de mecanismele de adsorbție și absorbție prin capilaritate, de structura porilor, de condițiile de mediu (microclimatul) și de mecanismele specifice de pătrundere în reciclat, legate de starea lor de agregare, așa cum se arată în Fig. 3.21.

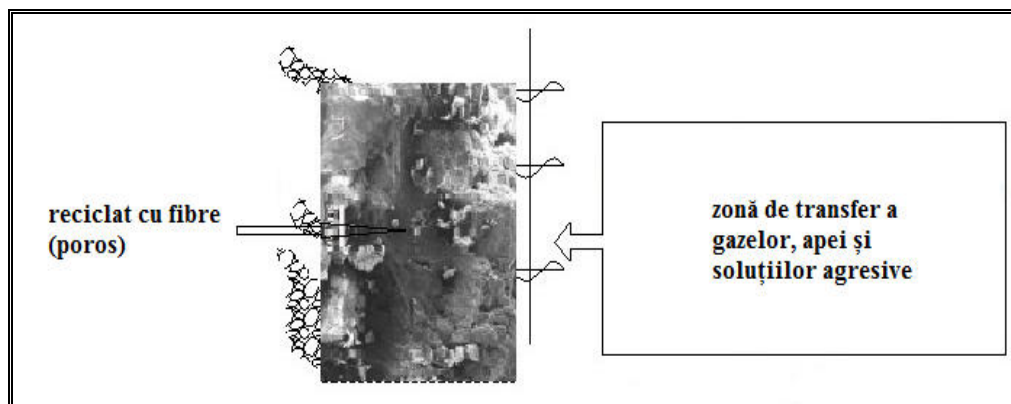


Fig. 3.21. Reprezentarea fenomenelor de transfer în reciclat

Durabilitatea acestor tipuri de structuri este legată direct de volumul de trafic, de tipul de liant, natura agregatelor, numărul de pori și fisuri pe unitatea de volum precum și de prezența apei.

### 3.19. Structura și numărul porilor (porozitatea)

Structura și numărul porilor dar și gradul de umplere, determină rezistența structurii la ciclurile îngheț-dezghet precum și gradul de penetrare în masa reciclatului a gazelor și soluțiilor apoase.

Viteza de transport a apei în pori este în funcție de mecanismul de difuzie, adsorbție sau absorbție capilară.

Gradul de permeabilitate este dependent de structura porozității din reciclat, de condițiile de microclimat, de procentul volumic de fibre în dispersie și de geometria dispunerii acestora ceea ce duce la situația în care, fibrele ce traversează porii deschiși pot reprezenta adevărate bariere în stoparea fenomenului de transfer prin capilaritate. Pe de altă parte structura, densitatea de apariție și distribuția geometrică a porilor diferiți dimensional, reprezintă trei parametri importanți ai permeabilității. Porii deschiși sunt legați prin canale capilare iar viteza de transfer a lichidelor și a gazelor precum și schimbul de substanțe absorbite la nivel de interfață este dependent de mărimea și distribuția acestora.

#### Clasificarea porilor:

- a) După modul de apariție porii sunt:
  - pori generați de operația de compactare;
  - pori plini cu aer;
  - pori de capilaritate;
  - pori din gelivitate.

b) După dimensiuni porii sunt:

- macropori;
- micropori (pori de structură) (Fig. 3.22.).

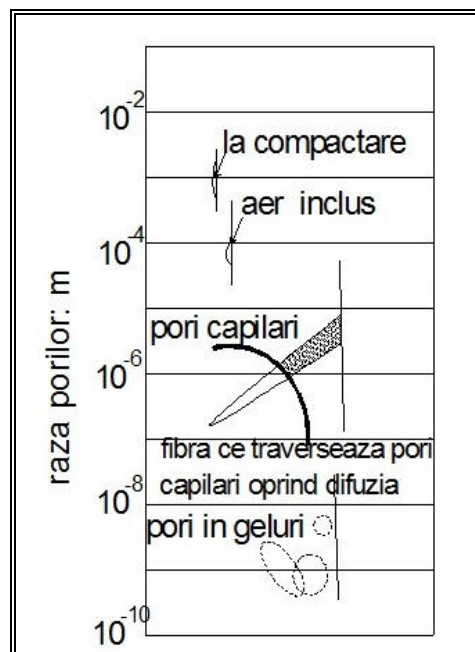


Fig. 3.22. Distribuția porilor pe categorii

Porozitatea degradantă este aceea în care porii care sunt interconectați prin canale capilare multiple ce facilitează transferul masiv al soluțiilor și gazelor.

Scăderea numărului de pori capilari favorizează creșterea rezistenței la coroziune chimică.

### 3.19.1. Adsorbția fizică a apei în pori

Potențialul energetic existent (energie de interfață) la interfața bimaterial, favorizează adsorbția substanțelor (lichide sau gaze) chimice ajunse în structura interioară a porilor. Moleculele de apă sunt adsorbite la interfața porilor iar grosimea stratului legat depinde de volumul de apă din pori (Fig. 3.23.).

Raportul între aria de adsorbție și volumul de apă adsorbit scade proporțional cu raza porului. Saturația microporilor, favorizează condensarea capilară.

Când macroporii se umplu cu apă se reduce nivelul de adsorbție a gazelor prin difuzie. Observăm că o porozitate mare a reciclatului mărește permeabilitatea la lichide și gaze, crește conținutul de apă, devenind aproape impermeabil la adsorbția prin difuzie a gazelor.



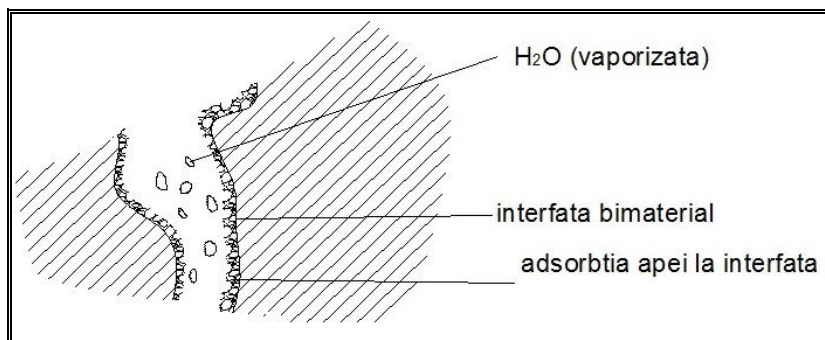


Fig. 3.23. Legarea apei în pori prin adsorbție la interfață

### 3.19.2. Fenomene de transfer ale apei din aerul umed

Structurile rutiere reciclate cu fibre în dispersie primate ca materiale poroase permit transferul gazelor prin difuzie, și soluțiilor apoase prin adsorbție și absorbție, ca urmare a echilibrării gradientilor de concentrație  $C_1$  și  $C_2$  înregistrați între punctele A și B, situați la distanța  $x$  (Fig. 3.24.).

Gazele se transferă prin difuzie capilară și absorbție parțială la interfață, când în urma reacțiilor chimice ce se produc la interfața pori-gaze, rezultă diverși compuși iar concentrația de substanță activă se reduce.

Lichidele și vaporii se transferă prin difuzie capilară cu fenomene fizice de adsorbție și chimice de absorbție ce sunt determinate de variațiile de umiditate ale mediului respectiv de concentrațiile substanțelor active (corozive).

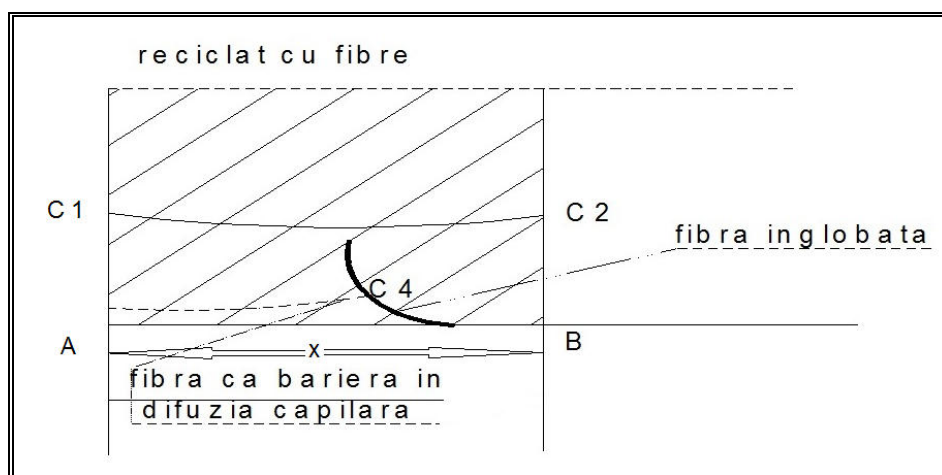


Fig. 3.24. Fibre de sticlă ca barieră în difuzia capilară a apei

Difuzia substanțelor dizolvate în pelicula de apă de la suprafața porului, ceea ce face ca proporția de apă din pori să se reducă, iar intensitatea difuziei substanțelor dizolvate să scadă odată cu umiditatea.

### 3.19.3. Transferul apei în condiții de ploaie

Soluțiile apoase sunt transferate prin capilaritate până la saturație, iar difuzia gazelor este oprită.

Capilaritatea la interfață se datorează forțelor intermoleculare de tip “Van der Waals”. Acestea sunt forțe electrice de putere relativ mică care provoacă atracția dintre moleculele neutre (fără sarcină electrică) din gaze, din gazele lichefiate sau solidificate și din aproape toate corpurile organice lichide și solide. La suprafața de separație de interfață aceste forțe de adeziune se dezvoltă între moleculele substanțelor din materialul reciclat și apa pătrunsă prin capilaritate, formându-se săruri solubile în apă când umiditatea de echilibru crește funcție de higroscopicitate.

Apariția fenomenului de adsorbție capilară se intensifică dacă înălțimea coloanei capilare crește. Dimensiunea forței pe orizontală este funcție de concentrația de apă pe unitatea de suprafață și timpul de acțiune a acesteia.

Adsorbția apei prin capilaritate se produce cu o intensitate mult mai mare decât evaporarea acesteia. La imersiune se evidențiază două zone de interacțiune între reciclat și apă:

- zona de interacțiune parțială;
- zona de interacțiune totală.

În cazul prezenței apelor freactice, fenomenele chimice sunt combinate cu cele fizice (uscarea, înghețul etc.) și ascensiunea capilară este redusă de posibilitatea de evaporare parțială.

Zona de barieră anticapilară formată de fibre reduce transferul de substanțe prin porozitate în cazul imersiunii (Fig. 3.24.).

În cazul imersiei distingem trei tipuri de zone de transfer între reciclat și apa în exces:

- zone de imersie permanentă;
- zone de contact cu ape freactice;
- zone de transfer prin ascensiune capilară.

În această situație are loc transferul prin porozitate și sucțiune capilară favorizat de presiunea hidrostatică, putând fi continuu dacă cel puțin pe una dintre suprafețe există condiții de evaporare.

Carbonații, clorurile și sulfatii pătrunși în structura reciclatului precipită în zona de evaporare și se acumulează în concentrații mari. Recristalizarea acestora se face cu creștere de volum care generează apariția microfisurilor, însoțite de fisurări și crăpături.

Degradările prin expansiune ale reciclatului armat dispers cu deșeuri din fibre de sticlă, sunt mai frecvente și se manifestă diferit în funcție de proporția componentelor mineralogici, natura agregatelor și densitatea acestora.

---

Transferul apei în cazul acestor tipuri de structuri nu se poate realiza continuu datorită prezenței fibrelor în dispersie, când nicio zonă de imersie a structurii nu are condiții de evaporare continuă.

Soluțiile de carbonați, cloruri și sulfați transferați odată cu apa și rămași în zona de evaporare din reciclat se acumulează și crescând concentrațiile favorizează fenomenul de degradare chimică a componenților acestuia, a lianților și a fibrelor.

#### **3.19.4. Mecanismul de transport a apei în cazul imersiunii**

Studiul adsorbției capilare în reciclat a gazelor, apei și a soluțiilor de substanțe chimice agresive dizolvate în apă este un proces de bază în conceperea și proiectarea unor structuri rutiere reciclate cu adaos de fibre în dispersie cu durabilitate sporită.

Fenomenele de transfer ale diverselor substanțe chimice, ale gazelor sau ale apei sunt legate de mecanismele de adsorbție și absorbție prin capilaritate, de structura porilor, de condițiile de mediu (microclimatul) și de mecanismele specifice de pătrundere în funcție de starea lor de agregare.

## CAPITOLUL 4

### *ANALIZA CU AJUTORUL MICROSCOPIEI ELECTRONICE. MODELE DE TRANZIȚIE*

#### **4.1. Aspecte teoretice ale comportamentului componentelor sistemului**

Studiul comportamentului unuia dintre componentele sistemului și interacțiunea acestuia cu sistemul polifazic (matricea) implică adoptarea unor modele matematice de tranziție la scară microscopică ce pot descrie aceste fenomenele cu o exactitate suficient de mare care să confirme determinările realizate cu ajutorul microscopiei electronice de înaltă performanță. Această metodă are la bază modele matematice de tranziție la scară utilizate pentru diferențierea comportamentului și a proprietăților macroscopice elastice/higroscopice și termice ale sistemului, de cele ale constituenților.

Aplicații ale abordării propuse pe cazuri practice sunt redate mai jos unde se poate observa că sistemul polifazic reciclat la rece și armat dispers cu fibre de sticlă are proprietăți fizico-mecanice ce-l recomandă pentru realizarea unor structuri rutiere economice și de înaltă performanță. Se observă, fisuri înclinate în diverse unghiuri față de direcția normală, ce generează tensiuni ce pot fi cuantificate cu un algoritm de analiză simplificată și cu ajutorul datelor experimentale. Fisurile se dezvoltă în zonele interfețelor bimaterial și coincid în cea mai mare parte cu acestea. Odată cu creșterea tensiunilor în sistem până la limita de microfisurare, urmează a doua etapă de fisurare și a treia de rupere ce se manifestă întotdeauna aproape de linia de legătură în bimaterial.

Dacă materiale utilizate au în cea mai mare parte proprietăți fizico-mecanice similare, apare concluzia că degradările se datorează mai ales modulilor de elasticitate diferiți ai componentelor, asociați cu creșterea tensiunilor datorate variațiilor termice asociate ciclurilor îngheț-dezgeț. Am afirmat că unul din rolul fibrelor în sistem este și acela de umplere a acestor goluri și legare a fracțiunilor de agregate anrobate cu lianți pentru reducerea fenomenului de generare a microfisurilor. La microscop pot fi văzute fibrele și fasciculele de fibre peliculizate cu rășini poliesterice care au o puternică aderență la ceilalți componente ai sistemului ce leagă sub acțiunea liantului conglomerate din sistemul polifazic. Golurile existente sunt datorate acțiunii mecanice asupra probei pentru evidențierea fenomenului studiat. Se remarcă, faptul că prezumțiile teoretice inițiale în care am afirmat că fibrele au funcție de armare se integrează bine în sistemul reciclat, îmbunătățindu-i considerabil proprietățile fizico-mecanice, sunt adevărate.

---

#### 4.2. Analiza vizuală cu ajutorul stereolupei Stereolupei “*Olympus SZ*”

În imaginile obținute cu ajutorul Stereolupei “*Olympus SZ*”, se pot observa câteva dintre deficiențele ce apar în procesul de dispersie a fibrelor în masa de reciclat, precum și defectele de anrobare și înglobare ale acestora în sistem. Acestea pot fi descrise astfel:

- fibre dezanrobate parțial și înglobate parțial în sistemul polifazic;
- fibre anrobate parțial și înglobate în sistemul polifazic parțial în sistemul polifazic;
- anrobat bituminos narmat (fragment) din sistemul polifazic reciclat;
- fascicule de fibre excluse parțial din sistem datorită anrobării neuniforme;
- fascicule de fibre ce ies din goluri datorită ruperii mecanice a probei.

Tot în imaginile obținute cu ajutorul Stereolupei se pot observa avantajele ce apar în procesul de armare dispersă cu fibre a structurilor rutiere reciclate la rece.

Acestea pot fi descrise astfel:

- fascicule de fibre anrobate și înglobate în sistemul polifazic reciclat care asigură funcția de armare;
- fascicule de fibre ce creează punți de armare între granulele din sistem;
- fascicule de fibre ce ies din goluri datorită ruperii mecanice a probei, ceea ce înseamnă că o parte din adaosul de fibre umple golurile din sistem și reduce (întârzie) fenomenul de generare a microfisurilor;
- fibre și fascicule de fibre distribuite uniform ce asigură armarea tip “*pânză de păianjen*”, considerată ca fiind cea mai eficientă formă de armare dispersă a unui sistem.

Intenția principală a acestui studiu a fost de observare directă a modelului structural al reciclatului cu fibre în dispersie și cuantificarea comportamentului acestora pe baza observațiilor realizate.

De asemenea, s-au urmărit defectele de structură apărute în apropierea și în interiorul zonelor de interfață bimaterial (agregate – fibre) și trimaterial (agregate – liant – fibre). Acest studiu poate fi considerat un supliment de investigații care sunt în curs de realizare cu scopul confirmării compatibilității fibrelor cu alți componenți prezenți în complexul reciclat și îndeplinirii funcției lor de armare. Pe de altă parte, studiul și-a propus observarea defectelor din anrobat și a celor de înglobare a fibrelor de sticlă în masa de reciclat, în scopul îmbunătățirii tehnologiei de reciclare cu fibre în dispersie a structurilor rutiere degradate.



*Fig. 4.1. Stereolupa "Olympus SZ"*



*Fig. 4.2. Probă supusă analizei cu Stereolupa "Olympus SZ"*

Analizele efectuate nu au avut scopuri și rezultate cantitative, ci au fost mai ales evaluări calitative ce descriu în timp și în mod real proprietățile și comportamentul componentelor sistemului în interacțiunea lor. Determinările experimentale structurale, realizate în două serii de teste cu ajutorul Stereolupei "Olympus SZ" și prin scanare cu microscopul electronic "Jeol – JSM – 5510 LV" sunt prezentate în acest capitol.

Rezultatele fotografice la scară ce conțin diverse tipuri de defecte structurale și de anrobare a fibrelor, diverse geometrii ale dispunerii fibrelor sunt prezentate mai jos, iar acestea rezumă materialul prezentat în acest capitol ca bază pentru activitățile viitoare în zona experimentală.

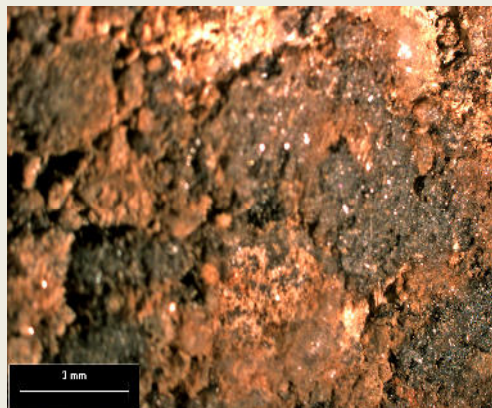


*Fig. 4.3. Fascicule de fibre dezanrobate parțial și total înglobate în sistemul polifazic reciclat*

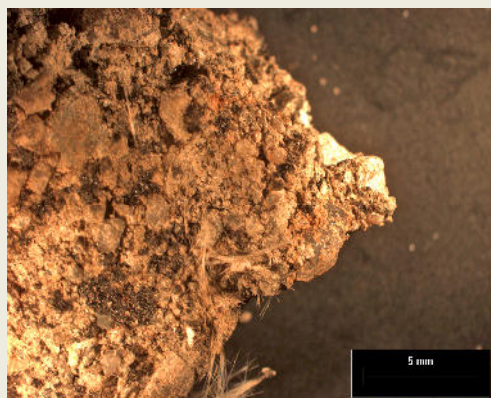


*Fig. 4.4. Fascicule de fibre anrobate înglobate în sistemul polifazic reciclat*

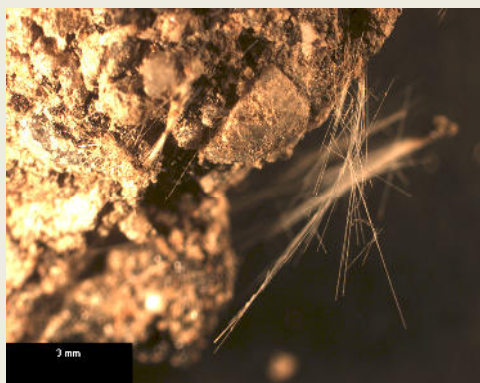




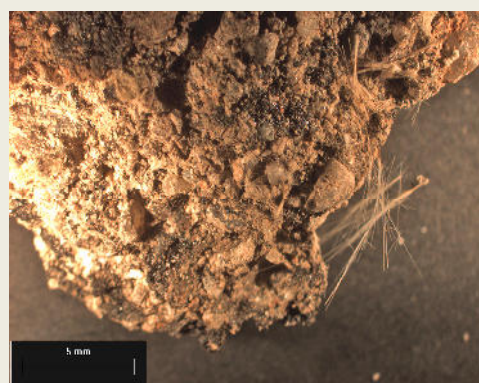
*Fig. 4.5. Anrobat bituminos nearmat (fragment) din sistemul polifazic reciclat*



*Fig. 4.6. Zone de anrobat bituminos armat parțial cu fibre dispersate neuniform în sistem*



*Fig. 4.7. Fascicule de fibre excluse parțial din sistem datorită anrobării neuniforme*



*Fig. 4.8. Fascicule de fibre ce creează punți de armare între granulele din sistem*



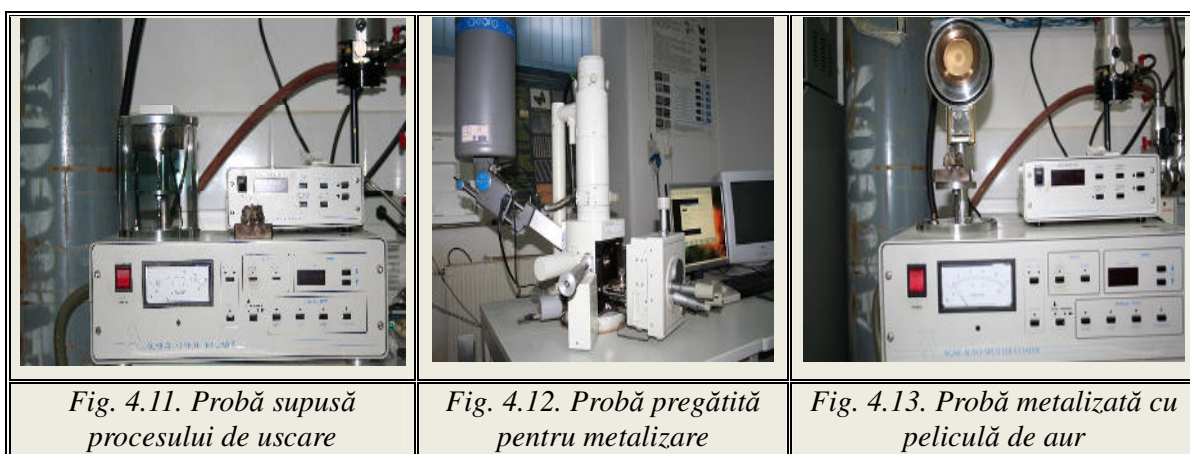
*Fig. 4.9. Fascicule de fibre ce ies din goluri datorită ruperii mecanice a probei*



*Fig. 4.10. Fibre și fascicule de fibre distribuite uniform ce asigură armarea tip "pânză de păianjen"*

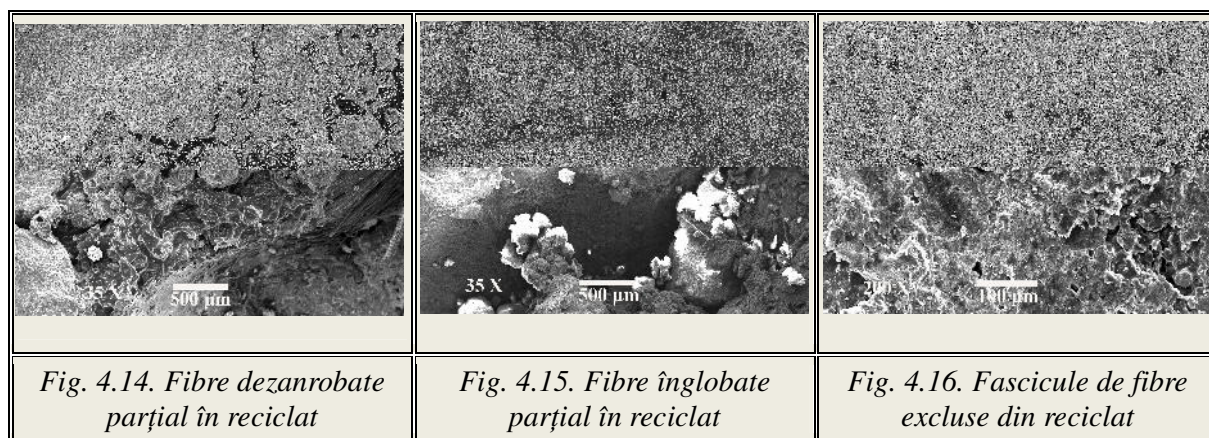
### 4.3. Analiza prin scanare cu ajutorul microscopului electronic

Determinările de structură cu ajutorul microscopului electronic de înaltă performanță (“*Jeol – JSM – 5510 LV*”) au demonstrat că se obține un reciclat similar unui anorbat bituminos de tip AB25, în care fibrele peliculizate cu rășini poliesterice se anrobează cu bitum și se înglobează foarte bine, rezultând un material rezistent cu proprietăți superioare oricărui anrobat bituminos clasic, pretabil pentru realizarea unui strat de fundație de drum cu o foarte bună capacitate portantă. Am realizat astfel, pentru prima dată în România, un complex reciclat cu fibre în dispersie, în care am demonstrat utilitatea fibrelor, care-și îndeplinesc funcția de armare, reduc porozitatea de la 9% în mixturile cu bitum spumat realizate în condiții de laborator la 7%.

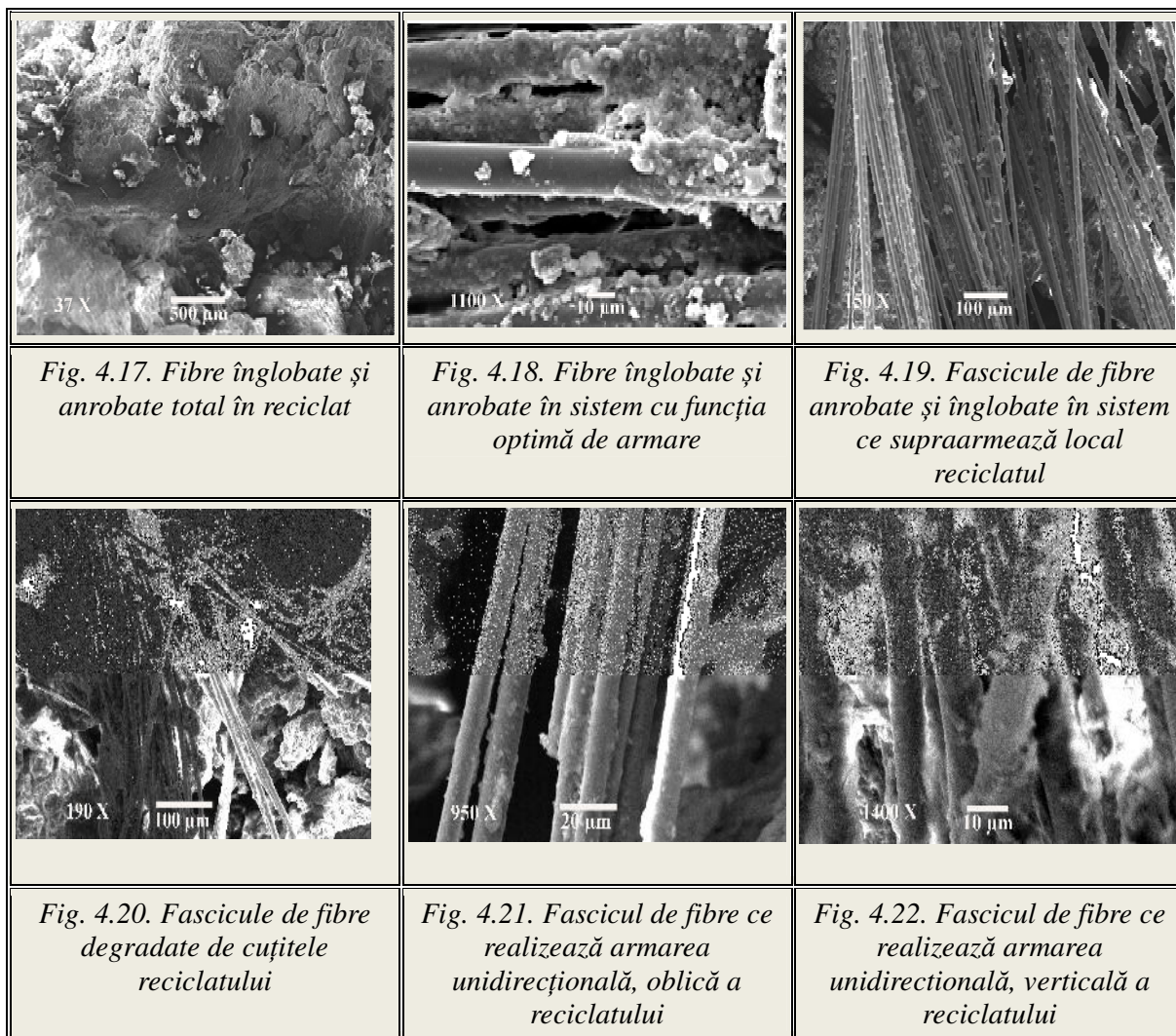


#### 4.3.1. Etapele prelucrării probelor

- Atașarea probei pe un strat de aluminiu (suport) cu ajutorul unei pelicule autoadezive de carbon;
- Metalizarea cu un strat de 10 nm grosime de platină, în „Agar Sputter Coaster”;
- Examinarea la microscopul electronic “*Jeol – JSM – 5510 LV*”.







Analiza prin metoda optică de lucru este indispensabilă în evidențierea microstructurii materialului rezultat din reciclarea la rece “*in situ*” a structurilor rutiere cu bitum spumat, suspensie de ciment și deșeuri din fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice. Astfel, pot fi evidențiați pe de-o parte componenții sistemului polifazic iar pe de altă parte mărimea, forma, distribuția (dispersia), incluziunile și defectele de orice natură de care depind proprietățile lor fizico-mecanice. De asemenea, se poate observa dacă modul de armare este satisfăcător în comparație cu ceea ce în prezent se cunoaște, legat de acest domeniu.

Determinările prin scanare cu ajutorul microscopiei electronice oferă posibilitatea realizării următoarelor observații:

- observarea microscopică a incluziunilor de orice natură (materiale organice, oxizi, granule sau particule de poliesteri etc.);
- observarea pe categorii a componenților structurali și a dispersiei fibrelor în

masa de reciclat;

- observarea defectelor de anrobare și înglobare a agregatelor și a fibrelor;
- stadiul mărunțirii agregatelor sub acțiunea cuțitelor reciclatorului;
- modul de rupere a fibrelor în procesul de dispersie la reciclare;
- observarea transformărilor în diverse stadii de maturare a reciclatului.

În Fig. 4.14. – 4.22. pot fi observate compoziția microstructurii reciclate pe componenți și fibrele de sticlă dispersate în masă, astfel:

- faza închisă la culoare reprezintă zone de anrobat bogate în liantul de bază (bitum);
- faza gri deschis reprezintă zone cu goluri și microfisuri;
- faza de culoare deschisă reprezintă suspensia de ciment;
- fibrele dispersate în masă sunt evidențiate separat fiecare având geometria și poziția specifică;
- evidențierea granulelor de agregate nelegate în sistem datorită peliculizării lor cu bitum degradat prin îmbătrânire;
- evidențierea fasciculelor de fibre apărute în reciclat datorită dispersiei neuniforme la reciclare;
- evidențierea zonelor deschise la culoare ca având continuități de fază poliestică;
- evidențierea succesivă a culorilor închise și deschise pe zone ca fiind faze uniforme și neuniforme.

**Tabelul 4.1. Prezentarea datelor rezultate din analiza microscopică a reciclatului cu fibre**

Numărul de suprafețe pătate cu bitum	931
Suprafața bitumată prin adezivitate	97,33 mm <sup>2</sup>
Suprafața acoperită în procente	23,81 %
Suprafața totală analizată	700 mm <sup>2</sup>
Suprafața medie a amprentei de bitum	0,1772 mm <sup>2</sup>
Suprafața medie a fibrelor	21,778 mm <sup>2</sup>
Raza medie a amprentelor de bitum	0,23 mm

Determinarea pentru obținerea amprentelor de bitum s-a realizat pe epruveta nr. 3, în paralel cu celelalte analize de laborator.

Adezivitatea bitumului pe suprafața granulelor și a fibrelor este evidențiată diferențiat în funcție de mai mulți factori cum ar fi tipul de rocă din care au fost produse agregatele sau prezența SiO<sub>2</sub> în zona de interfață a fibrelor, nepeliculizată cu rășini poliesterice, la care bitumul are o slabă adezivitate.

#### 4.4. Analiza prin dezanrobarea pe clase

Prezentăm în Tabelul 4.2. determinările și rezultatele testelor de evaluare a structurii anrobotului bituminos rezultat după reciclarea cu fibre, cu ajutorul testelor de dezanrobare prin evaluarea distribuției compuşilor pe clase dimensionale (agregate, bitum, fibre) după 36 de ore.

**Tabelul 4.2. Structura reciclatului cu fibre de sticlă**

Numărul probei	Conținut de bitum	Conținut de fibre	Stabilitate Marshall	Densitate aparentă min.
	(%)	(%)	(kN)	(kg/mc)
Epruveta I	2,40	1,50	8,01	1346,55
Epruveta II	2,59	2,00	8,03	1420,57
Epruveta III	3,22	2,50	8,20	1283,95
Epruveta IV	4,15	3,00	8,10	1309,35
Epruveta V	4,67	5,00	7,83	1310,44
Epruveta VI (bitum 4.5)	4,51	3,00 (L =12 cm)	7,90	1357,17

Funcția de distribuție pentru conținutul de părți fine (cimentul cu rol de “filer activ”) o obținem prin interpolare, astfel [59]:

$$f(D) = 0,029 - D^{-1/3} \text{ [%]} \quad (4.1)$$

#### 4.5. Analiza la interfață pe componenți a reciclatului cu fibre în dispersie

De mai mulți ani există mult interes pentru studiul comportamentului în zona de interfață a două sau mai multe materiale diferite legate cu ajutorul diverșilor lianți ce formează un sistem. Aceste fenomene prezintă o serie de situații diverse și complicate în care există doi sau mai mulți

compenți ce aderă la interfață și au proprietăți diferite care determină comportarea sistemului polifazic privit în ansamblu. Discontinuitățile de proprietăți în salturi în diverse zone izolate din sistem pot fi fizic cuantificate și exprimate matematic sau grafic. Dacă două sau mai multe materiale sunt unite într-o interfață comună și rezistă la compresiune și forfecare, forțele aderente (liante) sub o anumită formă trebuie să fie și ele prezente. În practică, diferențe între teorie și realitate vor exista în mod inevitabil, dar cuantificarea unor proprietăți sau factori externi (forțe deformatoare), se face prin utilizarea combinată a experimentelor și aproximărilor analitice.

#### **4.6. Descrierea anrobotului bituminos rezultat după reciclarea structurilor rutiere cu bitum și deșuri din fibre de sticlă**

Am arătat că anrobotul bituminos format în procesul de formare a reciclatului cu bitum spumat și fibre în dispersie este stabil și poate fi utilizat ca strat de fundație la reabilitarea și modernizarea drumurilor de orice categorie sau clasă tehnică. Din încercările de laborator realizate, rezultă că absorbția de apă ajunge la un maxim de 4,10% cu un volum de goluri estimat de 7%. Este evident că în procesul de reciclare cu bitum spumat și fibre are loc anrobarea componentilor care după așternere și compactare vor intra într-un proces de maturare în urma căruia coeziunea va fi la un nivel maxim, posibil de atins tehnologic.

Valoarea densității aparente între limitele valorilor determinate, nu poate fi direct corelată cu rezistențele mecanice ale anrobotului. Putem afirma pe baza experimentelor anterioare faptul că creșterea densității și a aportului de fibre până la o limită tehnologic impusă, duce la creșterea rezistenței la compresiune ( $R$  și  $r$ ) și la scăderea raportului  $r/R$ . Concluzia este că modelul structural experimentat este viabil.

Sub acțiunea forțelor dezvoltate de rotirea cuțitelor reciclatorului, bitumul spumat injectat în cuva amestecătorului anrobează toți compenții din amestec care sunt peliculizați cu apă în zonele de interfață ale acestora, favorizând datorită tensiunilor superficiale create, aderența particulelor fine de bitum.

Dispersia uniformă a fibrelor în masă pe de o parte, și a liantului, pe de altă parte, este asigurată datorită vitezei de rotire a cuțitelor reciclatorului. Cantități de bitum estimate între 0,01 - 0,03% rămân aglomerate între golurile agregatelor grosiere. Rezultă că, imediat după reciclare, avem un amestec de “mastic bituminos umed” și agregate parțial peliculizate cu apă. Acest amestec își păstrează lucrabilitatea până la evaporarea totală a apei astfel încât după așternerea acestuia sub grinda reciclatorului se trece imediat la reprofilarea lui cu ajutorul autogrederului.

La compactare, în prima etapă, are loc aglomerarea și coeziunea parțială a particulelor fine

și a fibrelor anrobate cu bitum încă din faza de malaxare (reciclare). Compactarea amestecului se realizează prin 8 - 12 treceri succesive ale utilajului cu greutatea minimă de 12 tone. Procesul este identic compactării amestecurilor granulare, cu curba Proctor sensibil deviată, datorită conținutului de bitum (considerat fluid, prezent în amestec).

Procesul de anrobare și adezivitatea liantului la agregate și fibre este diferit față de procedeul clasic de preparare la cald a anrobatorilor bituminoase. Putem observa ca fiind evidentă legătura între proprietățile fizico-mecanice (rezistență la compresiune) și dimensiunile granulelor de agregate, a particulelor din suspensia polifazică de bitum, apă cu ciment parțial hidratat cu adaos de fibre în dispersie. Aceasta este ilustrată în figura de mai jos:

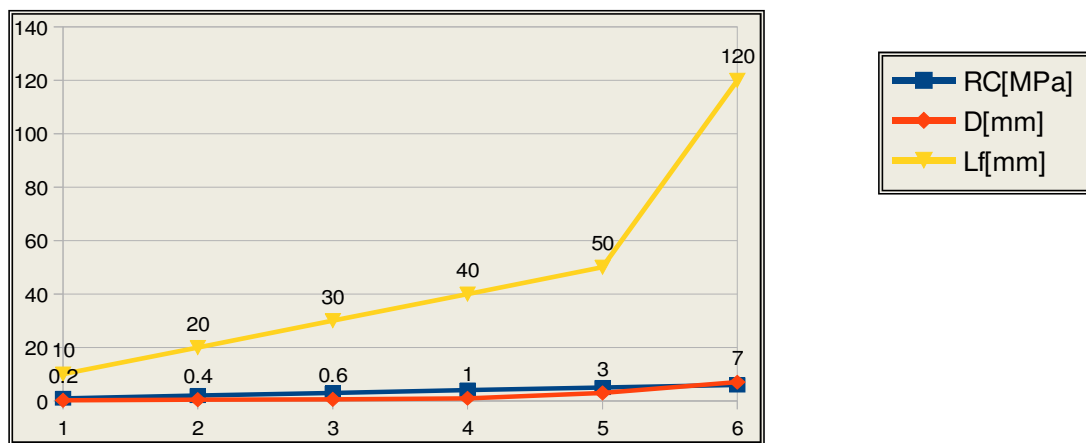


Fig. 4.23. Corelația dintre rezistență la compresiune și diametrul mediu al particulelor de mastic

#### 4.7. Modele de tranziție. Modelul Eshelby - Kröner și modelul Mori - Tanaka

Modelele tranziție la scară sunt bazate pe reprezentări materiale într-un sistem denumit multi-scală. În cazul materialelor polifazice, de exemplu, reprezentarea în sistemul de două scale este suficientă. Aceste modele se bazează pe:

- descrierea proprietăților fizico-mecanice celor doi componenți (reciclat și fibre) în condiții de variații de temperatură. Acești constituenți definesc așa numita comportare "pseudo-macroscopică", la nivel de interfață și subinterfață;
- variațiile termice la care este supus sistemul și implicit cei doi componenți menționați anterior vor furniza posibilitatea descrierii comportării acestora la scară macroscopică. Acest model permite, de asemenea, analizarea unidirecțională la interfața fibră-material.

#### 4.7.1. Estimarea comportamentului la variațiile de temperatură a unei structuri rutiere în straturi cu ajutorul modelului matematic Eshelby – Kröner

Modelul matematic propus de (Kröner – 1958) constituie o metodă ce prezice comportamentul micromecanic a două materiale eterogene legate într-un sistem semielastic. Metoda a fost inițial introdusă pentru a trata cazul materialelor policristaline sau aliajelor de aluminiu, ce transmit sarcini pur elastice.

Ecuțiile matematice ce descriu proprietățile elastice ale unor sisteme omogene există formulate în literatura de specialitate.

Mai recent, un asemenea model a fost îmbunătățit pentru a se lua în considerare tensiuni și tulpini de tensiuni ce apar datorită umezelii în sisteme polifazice semielastice de către autorii Eshelby – Kröner. Prin urmare, empirismul matematic a fost măsura descrierii omogenității și comportamentului sistemului la nivel micromecanic sub acțiunea temperaturii, a componenților unui sistem semielastic. Relațiile matematice au fost stabilite pentru estimarea CME (comportamentul microscopic al elementelor) comparativ cu cel macroscopic ale componenților. Ecuțiile principale ce descriu aceste comportamente pot fi aplicate prin similitudine relativă și sistemelor polifazice semielastice rezultate din reciclarea la rece “*in situ*” a structurilor rutiere armate dispers cu deșeuri din fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice. Acestea sunt [24]:

$$L' = \left\langle L^i : \left( I + E^i [L^i - L'] \right) \right\rangle_{i=m,f} \quad (4.2)$$

$$M' = \left\langle [L^i + L' : R^i]^{-1} \right\rangle_{i=m,f}^{-1} : \left\langle [L^i + L' : R^i]^{-1} : L^i : M^i \right\rangle_{i=m,f} \quad (4.3)$$

Indicii  $m$  și  $f$  sunt utilizați de regulă pentru înlocuirea indicelui  $i$  - al sistemului, ce exprimă stări fizico-mecanice succesive atinse sub acțiunea variațiilor de temperatură.

Conținutul de umiditate pseudo-macroscopică a componenților poate fi exprimată în funcție de sarcina higroscopică la variația de temperatură  $\Delta C^i$

În relațiile (4.2), (4.3) avem medii ponderate de volum (care, de fapt, înlocuiesc integrale de volum, care ar necesita să fie exprimate prin elemente finite de volum). Empiric acestea au fost exprimate suficient de bine ca medii aritmetice sau medii geometrice. Pe de o parte, media geometrică a unui set de numere pozitive este definită ca rădăcină a "n"-a din produsul lor, unde  $n$  este numărul de termeni. Pentru modulul lui Young, de exemplu, media geometrică a modulelor componenților din elementul finit de volum  $\chi_v$  te definită ca [24]:

$$Y^{GA} = \sqrt{Y_R Y_V} \quad (4.4)$$

iar media aritmetică este [24]:

$$Y^{AA} = \frac{Y_R + Y_V}{2} \quad (4.5)$$

O altă abordare analitică putem realiza având în vedere totalitatea stărilor sistemul  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  corespunzătoare greutateților elementelor volumelor finite  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ . Avem astfel media geometrică ponderată (respectiv media aritmetică ponderată) exprimate astfel [24]:

$$\langle X^i \rangle_{i=1,2,\dots,n}^{GA} \text{ respectiv } \langle X^i \rangle_{i=1,2,\dots,n}^{AA} \quad (4.6)$$

care se pot exprima și conform relațiilor [24]:

$$\langle X^i \rangle_{i=1,2,\dots,n}^{GA} = \left( \prod_{i=1}^n x_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n w_i}} \quad (4.7)$$

respectiv [24]:

$$\langle X^i \rangle_{i=1,2,\dots,n}^{AA} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n w_i} \sum_{i=1}^n x_i w_i \quad (4.8)$$

Cele două relații sunt utilizate frecvent în domeniul științei materialelor, în scopul de a realiza o scară diferită modelării de stare la variațiile de temperatură pentru o gamă largă de sisteme bimateriale.

Modelul de tranziție la scară “Mori – Tanaka”, a comportării componentelor într-un sistem bimaterial, este o posibilă alternativă de a dezvolta modelul Eshelby – Kröner. Mori și Tanaka au investigat posibilitatea de a extinde modelul Eshelby – Kröner, de tranziție la scară a comportării componentelor într-un sistem bimaterial, prin includerea “*modelului elipsoidal de soluție diluată la infinit în elementul finit de volum*”, în care volumul fracțiune de umplutură eterogenă încorporat în sistem nu tinde spre zero, dar admite o valoare numerică finită foarte mică.

Calcululele arată că, în multe cazuri, într-un sistem omogen, proprietățile macroscopice aproximative deduse de Mori – Tanaka, sunt aproape cele estimate prin modelul Eshelby – Kröner, arătat anterior. Excepțiile de la această situație pot să apară doar în sistemele eterogene ale căror componente au proprietăți ce trebuie să fie observate separat. De exemplu, la o fracțiune

de volum semnificativ, după modelul Mori – Tanaka estimările se abat considerabil de la descrierea matematică multi-scară anterioară. Astfel, s-a demonstrat că în sistemele multistrat omogene, proprietățile thermohigroelastice ale componentelor pot fi descrise suficient de bine cu următoarele relații [24]:

$$L^I = \left\langle T^i : \left\langle L^i : L^i \right\rangle_{i=m,f}^{-1} \right\rangle = \left\langle L^i : T^i \right\rangle_{i=m,r} : \left\langle T^i \right\rangle_{i=m,f}^{-1} \quad (4.9)$$

$$\beta^I = \frac{1}{\Delta C^I} \left\langle \left( T^i : L^i : \left\langle L^i : T^i \right\rangle_{i=m,f}^{-1} \right)^T \beta^i \Delta C^i \right\rangle_{i=m,f} \quad (4.10)$$

$$M^I = \left\langle \left( T^i : L^i : \left\langle L^i : T^i \right\rangle_{i=m,f}^{-1} \right) : M^i \right\rangle_{i=m,f} \quad (4.11)$$

Exponentul  $T^i$  care apare în relațiile (4.9, 4.10) arată conversia proprietăților componentelor supuși la variații termice, de la scară microscopică la scară macroscopică. Determinarea C.M.E., se poate face folosind relația (4.11). Această ecuație poate fi rescrisă în funcție de proprietățile componentelor, excluzând conținutul de umiditate.

În modelul Mori – Tanaka apropierea componentelor sistemului polifazic este descrisă ca o zonă izolată de separație a sistemului numită non-fază, în care prin similitudine putem considera:

- sistemul polifazic fără umplutură (fibre) este elementul constitutiv ce înglobează n-1 constituenți (materiale);
- fibrele sunt privite ca incluziuni în acest sistem. În consecință, faza inclusă preia o parte din tensiunile generate de orice interacțiune cu sistemul la scară microscopică. În cadrul abordării Mori și Tanaka, tensorul de localizare al elementelor de volum infinitezimale se poate scrie după cum urmează [24]:

$$T^i = \left[ I + E^i : (L^i - L^e) \right]^{-1} \quad (4.12)$$

Spre deosebire de modelul de tranziție la scară a lui Eshelby – Kröner, modelul Mori – Tanaka implică în mod explicit calculul tensorului de tranziție la scară a componentelor sistemului localizați pe unități de volum infinitezimal. Relația poate fi exprimată astfel [24]:

$$E^i = S_{esh}^i : L^{e-1} \quad (4.13)$$



În practică, calculul “tensorului Hill” poate fi utilizat pentru a descrie comportarea la nivel microscopic la variațiile termice ale fazei de fibre încorporate în sistem, pentru modelul simplificat din ecuația (4.13), care să conducă la relația  $T^e = I$

În consecință, pentru analiza prin similitudine a reciclatului cu fibre, contrar modelului Eshelby – Kröner, modelul Mori – Tanaka oferă relațiile explicite (de fapt, omogenizarea ecuațiilor (4.9, 4.10, 4.11) pentru estimarea eficientă a proprietăților microscopice în care se consideră interacțiunea de bază între materialul - m și fibrele cu funcție de armare - f.

## CAPITOLUL 5

### ***DETERMINĂRI SPECIFICE PE ANROBATUL OBȚINUT PRIN APLICAREA TEHNOLOGIEI RECICLĂRII LA RECE, CU ADAOS DIN FIBRE DE STICLĂ***

#### **5.1. Determinări de laborator realizate pe reciclatul cu fibre**

##### **5.1.1. Confirmarea calității reciclatului cu fibre prin încercări de laborator realizate pe epruvetele prelevate**

Calitatea anrobatelor obținute prin reciclarea “*in situ*” a structurilor rutiere cu fibre sau deșeuri de fibre de sticlă în dispersie a fost confirmată de câteva încercări de laborator și de teste de teren realizate pe structurile rutiere reciclate, după expirarea perioadei de 28 de zile, considerată perioada minimă de maturare a acestora.

Determinările realizate au fost următoarele:

- curbele granulometrice ale componentilor sistemului reciclat;
- rezistență de compresiune la 25°C;
- absorbția de apă;
- stabilitatea Marshall;
- indicele de curgere;
- densitatea aparentă;
- volumul de goluri.

Determinările pe probele prelevate au fost realizate în cadrul Laboratorului autorizat grad II aparținător S.C. DRUM CONSTRUCT S.R.L., cu sediul în Pericei, nr. 60 F, jud. Sălaj, dotat cu aparatură pentru efectuarea încercărilor specifice pentru profilele autorizate:

- Materiale betoane și mortare (MBM );
- Agregate naturale căi ferate și drumuri (ANCFD);
- Materiale drumuri (MD );
- Drumuri (D);
- Geotehnica și teren de fundare (GTF);
- Beton, beton armat, beton precomprimat (B BA BP).

Laboratorul autorizat grad II are competență în domeniile autorizate, pentru încercări în vederea controlului și atestării calității în construcții, pentru controlul interior, pentru controlul

---

exterior de secundă parte și în anumite condiții pentru controlul exterior de terță parte.

Laboratorul execută toate încercările în conformitate cu standardele și normativele în vigoare, în anumite condiții bine determinate, pe probe reprezentative.

Pentru a răspunde sarcinilor ce îi revin, în cadrul laboratorului lucrează personal de specialitate, calificat, care cunoaște aparatura și modul de funcționare, precum și modul de efectuare a încercărilor, ceea ce duce la o interpretare corespunzătoare a rezultatelor, în așa fel încât rapoartele de încercări elaborate de laborator, să constituie elementul de bază pentru luarea deciziei privind realizarea unor produse de calitate.

Aparatura utilizată:

		
<i>Fig. 5.1. Aparat pentru determinări "Los Angeles"</i>	<i>Fig. 5.2. Etuva</i>	<i>Fig. 5.3. Baia de apă termostată</i>
		
<i>Fig. 5.4. Balanță hidrostatică</i>	<i>Fig. 5.5. Set de site și ciururi</i>	<i>Fig. 5.6. Penetrometru "Richardson"</i>
		
<i>Fig. 5.7. Aparat cu inel și bilă</i>	<i>Fig. 5.8. Vâscozimetru "Engler"</i>	<i>Fig. 5.9. Aparat "Soxhlet"</i>



### 5.1.2. Prelevarea epruvetelor

Au fost prelevate epruvete de formă cilindrică și cubică pentru toate tipurile de determinări enumerate mai sus. De asemenea, au fost prelevate probe de agregate din structura rutieră reciclată înainte de compactare.

După prelevare toate probele au fost protejate pentru menținerea umidității și transportate la laborator.

### 5.1.3. Determinări de laborator pe probele prelevate

În cadrul programului de laborator s-au stabilit metodele și procedurile de investigație și s-au ales din probele prelevate ca fiind reprezentative un număr de trei. Evaluarea rezistenței mecanice a materialului reciclat s-a realizat prin metoda stabilității Marshall. Pentru cele trei probe s-au mai realizat succesiv următoarele determinări:

- indicele de curgere (fluajul);
- densitatea aparentă prin metoda cântăririi cu balanța hidrostică, pe fiecare probă;
- conținutul de bitum;
- absorbția de apă;
- raportul S/I;
- dezanrobarea pe clase;
- curba granulometrică a agregatului total.

Se poate observa că, abaterile standard se încadrează în valorile admise pentru mixturile asfaltice de tipul anrobatelor de tip AB 25 cu care poate fi asimilat materialul reciclat.

**Tabelul 5.1. Determinări de laborator pe reciclat cu fibre realizate pe primul sector experimental din România, pe DJ 109, lim. jud. Cluj – Dragu, km: 39+700 – 40+200**

**Epruveta nr. 1 prelevată la km. 39+700**

<b>RI 679 din 08.07.2013,</b>		Cod FL 042	
DJ 109 P, KM:32+700, margine dreapta +1,90, H =15 cm			
Caracteristici cilindri Marshall	<b>Proba EB 31,5 50/70- AB 25</b>	<b>AB 25+FIBRE 2,50%</b>	
(S) Stabilitatea Marshall (kn)	<b>8,01</b>	<b>6,5 - 13,0</b>	
(I) Indice de curgere, fluajul (mm)	<b>3,72</b>	<b>1.5 - 4.0</b>	
Raport S / I (kn/mm)	<b>2,15</b>	<b>1,6 - 4,3</b>	
Densitatea aparentă min (kg/mc)	<b>2284,64</b>		
Absorbția de apă (%)	<b>1,78</b>	<b>1,5 - 6,0</b>	
Granulozitatea prin spălare și cernere conform SR EN 933-1/2002			
	Masa uscată totală (g)		
	M 1		
	1147,4		
	Masa uscată după spălare (g)		
	M 2		
	1097,8		
	Masa uscată a părților fine spălate M 1 - M 2 (g)		
	49,6	Procente de refuz	Procente cumulate
			<b>Zona granulometrică</b>
			Dozaj AB 25
Site ochiuri pătrate (mm)			<b>AB 25</b>
31,5	0	0	<b>100,00</b>
25	0	0,00	<b>100,00</b>
16	207	18,04	<b>81,96</b>
8	266,5	23,23	<b>58,73</b>
4	219,4	19,12	<b>39,61</b>
2	88,5	7,71	<b>31,90</b>
1	155,6	13,56	<b>18,34</b>
0,63	54,1	4,72	<b>13,62</b>
0,2	64,9	5,66	<b>7,97</b>
0,1	23,6	2,06	<b>5,91</b>
0,075	18,2	1,59	<b>4,32</b>
Material rămas fund Pi	0	0,00	
trece 0.63+ret. Filtru+rezid bitum	49,6	4,32	
	1147,4	100,00	
Procentul de cernut al părților fine pe procent părți fine= $[(M1-M2)/M1] \times 100$		sita de 0.063 mm	4,32
validare rezultate= $[(M2-M2+Pi)/M2] \times 100=$			0

masa în aer m o ( g )	m în aer după 1 h apă (g) m1	m 2 în apă ( )	Volum cmc	$\rho$ g/cmc	$\rho$ med. g/cmc
1184,81	1191,93	672,62	519,31	2281,51	<b>2284,64</b>
1192,74	1200,08	678,78	521,3	2288,01	
1201,3	1207,1	681,23	525,87	2284,40	

<b>Coținut de bitum</b>	
masa cartuș g	17,1
mixtura + cartuș g	1215,9
mixtura + cartuș după extracție g	1161,2
masa cartuș după extracție g	19,8
f cartuș g	2,7
f balon g	3,3
masa probă g	1198,8
agregat total + cartuș g	1164,5
Bitum total în cartuș g	51,4
<b>Coținut bitum în mixtură %</b>	<b>3,90</b>
agregat total g	1147,4
<b>Coținut de agregat</b>	<b>95,71</b>
Agregat + bitum	100,00

**Prescripții  
AND 605 :  
2014  
min .  
4,00 %**

Zona granulometrică prescrisă **AND 605:2014**

Abateri față de dozaj

100	100	100	100
90	100	95	100
74	97	78,75	87,05
52	85	55,86	61,74
37	66	37,63	40,77
22	50	30,94	32,86
14	39	17,84	18,95
10	35	13,19	14,01
4	22	7,84	8,16
3	12	5,81	5,99
2	7	4,25	4,34

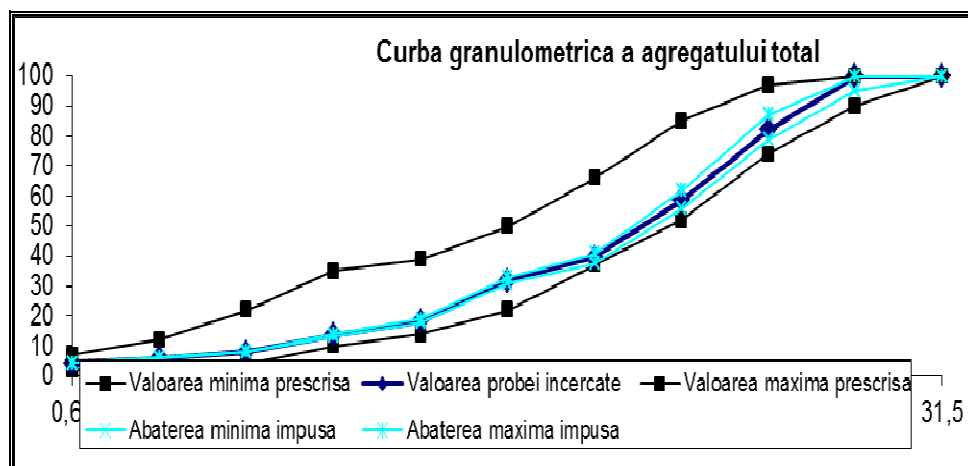


Fig. 5.13. Curba granulometrică a agregatului total determinată pe epruveta nr. 1

**Tabelul 5.2. Determinări de laborator pe reciclat cu fibre realizate pe primul sector experimental din România, pe DJ 109, lim. jud. Cluj – Dragu, km: 39+700 – 40+200**

**Epruveta nr. 2 prelevată la km. 39+800**

Caracteristici cilindri Marshall		Proba EB31,5 reciclat 50/70-AB 25 asimilat	AND 605:2014	
			AB 25+FIBRE 3%	
(S) Stabilitatea Marshall (kn)		<b>8,2</b>	<b>6,5 - 13,0</b>	
(I) Indice de curgere ,fluajul (mm)		<b>3,72</b>	<b>1,5 - 4,0</b>	
Raport S / I (kn / mm)		<b>2,20</b>	<b>1,6 - 4,3</b>	
Densitatea aparentă min (kg/mc)		<b>2287,23</b>		
Absorbția de apă (%)		<b>3,26</b>	<b>1,5 - 6,0</b>	

RI 756 din  
08.07.2013  
Cod FL 042  
DJ 109 P,KM:39+800, margine stânga +1,50, H =15  
cm

Granulozitatea prin spălare și cernere conform SR EN 933-1/2002

	Masa uscată totală (g)	Procente de refuz	Procente cumulate	Zona granulometrică SR 7970 / 2001
	M 1			
	1006,8			
	Masa uscată după spălare (g)			
	M 2			
	935,9			
	Masa uscată a părților fine spălate			
	M 1 - M 2 (g)			
	70,9			
Site ochiuri pătrate (mm)			<b>100,00</b>	
25	36,5	3,63	<b>96,37</b>	<b>90 - 100</b>
16	97,1	9,64	<b>86,73</b>	<b>74 - 97</b>
8	134,5	13,36	<b>73,37</b>	<b>52 - 85</b>
4	121,8	12,10	<b>61,27</b>	<b>37 - 66</b>
2	170,5	16,93	<b>44,34</b>	<b>22 - 50</b>
1	102,4	10,17	<b>34,17</b>	<b>14 - 39</b>
0,63	152,6	15,16	<b>19,01</b>	<b>10 - 35</b>
0,2	56,8	5,64	<b>13,37</b>	<b>4 - 22</b>
0,1	49,6	4,93	<b>8,44</b>	<b>3 - 12</b>
0,063	14,1	1,40	<b>7,04</b>	<b>2 - 7</b>
Material ramas fund Pi	0	0,00		
trece 0.063+ret. Filtru+rezid bitum	70,9	7,04		
	1006,8	100,00		

Procentul de cernut al părților fine pe sita de 0.063 mm  
procent părți fine= $[(M1-M2)/M1] \times 100$  7,04  
validare rezultate = $[(M2-M2+Pi)/M2] \times 100=$  0

masa în aer m o (g)	m în aer după 1 h apă (g) m1	m 2 în apă (g)	Volum cmc	$\rho$ g/cmc	$\rho$ med. g/cmc
1184,81	1191,93	674,52	517,41	2289,89	<b>2287,23</b>
1192,74	1200,08	677,55	522,53	2282,62	
1201,3	1207,1	682,33	524,77	2289,19	

<b>Conținut de bitum</b>	
masa cartuș g	17,7
mixtura + cartuș g	1069,7
mixtura + cartuș după extracție g	1020,7
masa cartuș după extracție g	22,1
f cartuș g	4,4
f balon g	3,8
masa probă g	1052
agregat total + cartuș g	1024,5
Bitum total în cartuș g	45,2
<b>Conținut bitum în mixtură %</b>	<b>4,10</b>
agregat total g	1006,8
<b>Conținut de agregat</b>	<b>95,70</b>
Agregat + bitum	100,00

**Prescripții AND 605 : 2014**  
min . 4,00 %

Zona granulometrică prescrisă **AND 605:2014**

100	100
90	100
74	97
52	85
37	66
22	50
14	39
10	35
4	22
3	12
2	7

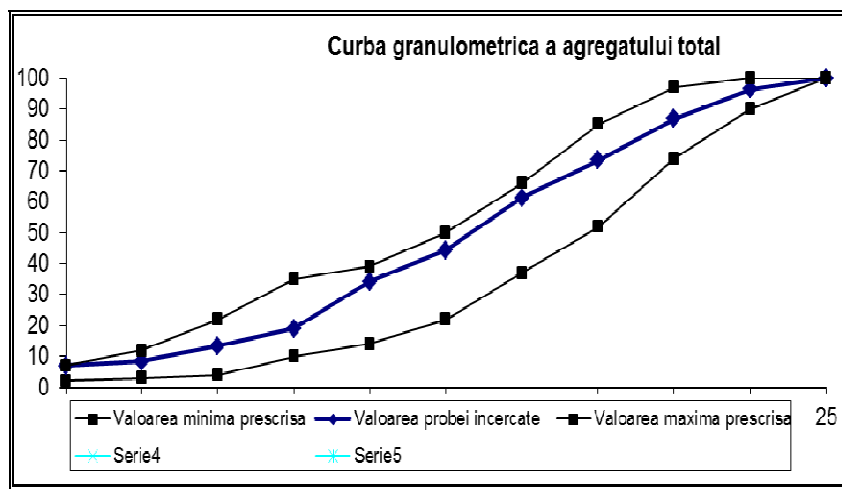


Fig. 5.14. Curba granulometrică a agregatului total determinată pe epruveta nr. 2



**Tabelul 5.3. Determinări de laborator pe reciclat cu fibre realizate pe primul sector experimental din România, pe DJ 109, lim. jud. Cluj – Dragu, km: 39+700 – 40+200**

**Epruveta nr. 3 prelevată la km. 39+880**

RI 202 din 20.04.2013 DJ 109 P,KM:39+800, marginile stânga +1,50, H =15 cm		Cod FL 042			
Caracteristici cilindri Marshall	<b>Proba EB31,5 reciclat 50/70-AB 25 asimilat</b>	<b>SR 7970 / 2001</b>			
(S) Stabilitatea Marshall (kn)	<b>9,66</b>	<b>AB 25+FIBRE 3%</b>			
(I)Indice de curgere, fluajul (mm)	<b>3,6</b>	<b>min 5.0</b>			
Densitatea aparentă min (kg/mc)	<b>2285,33</b>	<b>1.5 - 4.0</b>			
Absorbția de apă (%)	<b>3,48</b>	<b>2200</b>			
	<b>2.00 - 8.00</b>				
Granulozitatea prin spălare și cernere conform SR EN 933-1/2002					
	Masa uscată totală (g)				
	M 1				Dozaj AB 2 nr. 4 / martie 2013
	1052,7				
	Masa uscată după spălare (g)				
	M 2				
	984				
	Masa uscată a părților fine spălate				
	M 1 - M 2 (g)	Procente de refuz	Procente cumulate	Zona granulometrică SR 7970 / 2001	
	68,7				
Site ochiuri pătrate (mm)			<b>100,00</b>	AB 2	<b>100</b>
25	51,2	4,86	<b>95,14</b>	<b>90 - 100</b>	<b>96,52</b>
16	149,6	14,21	<b>80,93</b>	<b>71 - 100</b>	<b>77,05</b>
8	248,7	23,62	<b>57,30</b>	<b>50 - 86</b>	<b>57,97</b>
4	210,6	20,01	<b>37,29</b>	<b>34 - 63</b>	<b>39,06</b>
1	165,8	15,75	<b>21,54</b>	<b>14 - 39</b>	<b>22,76</b>
0,63	42,9	4,08	<b>17,47</b>	<b>10 - 35</b>	<b>18,12</b>
0,2	96,7	9,19	<b>8,28</b>	<b>4 - 22</b>	<b>9,67</b>
0,1	18,5	1,76	<b>6,53</b>	<b>3 - 11</b>	<b>.7.16</b>
Material rămas fund Pi trece 0.10+ret. Filtru+rezid bitum	0	0,00			
	68,7	6,53			
	1052,7	100,00			
Procentul de cernut al părților fine pe sită de 0.063 mm procent părți fine=[(M1-M2)/M1]x100 validare rezultate =[(M2-M2+Pi)/M2]x100=					
	6,53				
	0				
masa în aer m o ( g )	m în aer după 1 h apă (g) m1	m 2 în apă (g)	Volum cmc	p g/cmc	p med. g/cmc
1203,61	1209,41	681,52	527,89	2280,04	<b>2285,33</b>
1205,44	1213,4	686,39	527,01	2287,32	<b>2285,33</b>
1201	1207,89	683,12	524,77	2288,62	

<b>Conținut de bitum</b>				
masa cartuș g	14,4			
mixtura + cartuș g	1112,8			
mixtura + cartuș după extracție g	1064,1			
masa cartuș după extracție g	17,2			
f cartuș g	2,8			
f balon g	3			
masa probă g	1098,4			
		<b>Prescripții SR 7970 / 2001 3.4 - 5.0 %</b>		
agregat total + cartuș g	1067,1			
Bitum total în cartuș g	45,7			
<b>Conținut bitum în mixtură %</b>	<b>3,50</b>			
agregat total g	1052,7			
<b>Conținut de agregat</b>	<b>95,84</b>			
Agregat + bitum	100,00			
Zona granulometrică prescrisă SR 7970 / 2001		Abateri față de rețetă AB 2, nr.4 /martie 2013 conform SR 7970/2001		
	90	100	91,52	100
	71	100	72,05	82,05
	50	86	52,97	62,97
	34	63	35,06	43,06
	14	39	18,76	26,76
	10	35	15,12	21,12
	4	22	7,67	11,67
	3	11	5,66	8,66

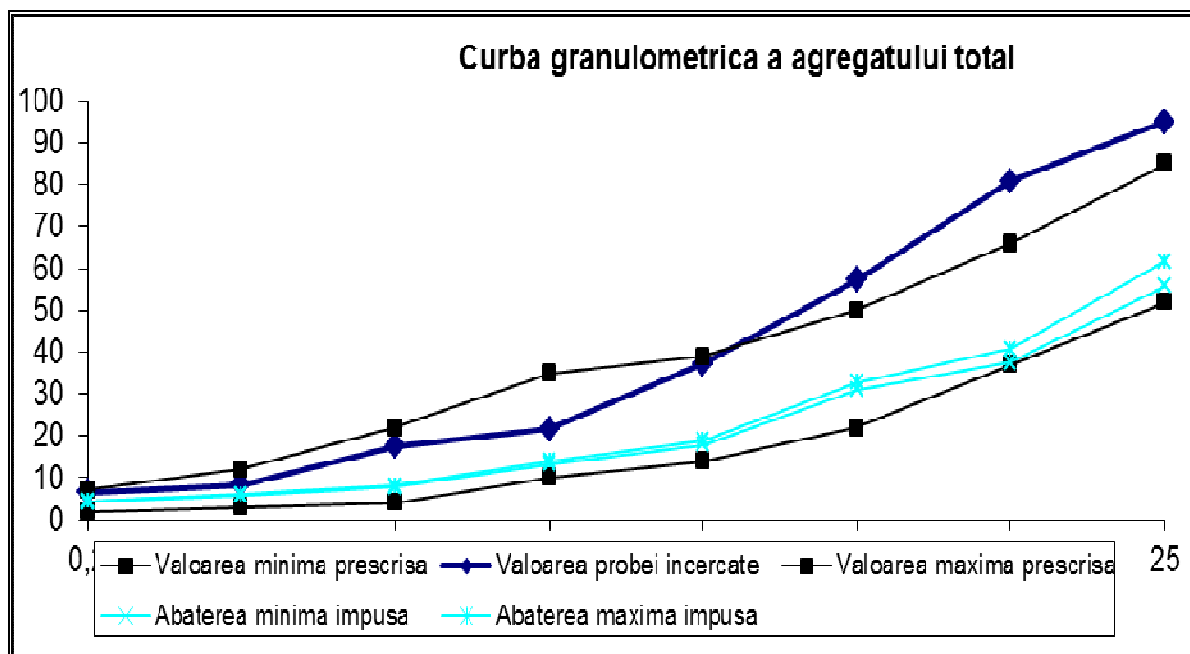





Fig. 5.15. Curba granulometrică a agregatului total determinată pe epruveta nr. 3

**Tabelul 5.4. Determinări de capacitate portantă pe reciclat cu fibre realizate pe primul sector experimental din România, pe DJ 109, lim. jud. Cluj – Dragu, km:39+700 – 40+200 Epruveta nr. 3 prelevată la km. 39+880**

<i>OFFICIAL REPORT OF TESTING / RAPORT DE ÎNCERCARE</i>									
<i>BEARING CAPACITY TEST BY BENKELMAN BEAM /</i>									
DETERMINAREA PORTANȚEI CU DEFLECTOMETRUL TIP BENKELMAN									
No./Nr.: 1700 / 1      Date/Data: 30.08.2013									
Work / Lucrarea: REABILITARE DJ 109, LIM.JUD.CLUJ-DRAGU, KM:33+700 - 34+500									
Road section / Sector de drum (poz.km.): Platforma Axa 1- longitudinal									
Side / Parte:									
Type of Layer / Tipul stratului: <b>RECICLAT CU FIBRE DE STICLA</b>									
Axel load / Sarcina pe osia din spate:									
Tyre pression / Presiunea în pneuri: <b>6.5 at</b>									
Fulkrun ratio / Raportul pârgheiei: <b>2:1</b>									
Test date / Data încercării: <b>30.08.2013</b>									
Average deflexion / Deflexiunea medie, 1/100 mm									
$d_{BM} = Sd_i/n$ 56,7 $d_{BM} \text{ admis} = 250$									
Average deviation / Abaterea medie, 1/100 mm									
$SB = \sqrt{\frac{\sum d_i^2 - n \times d_{BM}^2}{n-1}}$									
Average deviation / Abaterea medie, 1/100 mm      8,0 $C_v \text{ admis} = 35$									
$C_v = 100 \times SB/d_{BM}$ 14,1      35									
No./Nr.	Overseer / Pichet	Chainage / Poziție km.	C <sub>2,4</sub>	C <sub>5,0</sub>	d <sub>2,4</sub> =A+BxC <sub>2,4</sub>	d <sub>5,0</sub> =A+BxC <sub>5,0</sub>	d=2xd <sub>5,0</sub> - d <sub>2,4</sub>	d <sub>i</sub> =115 x d/P	d <sup>2</sup>
1		32+700	24	26	40,3	43,5	46,7	41,7	1742,4
2		32+730	28	32	46,7	53,1	59,5	53,2	2828,4
3		32+760	26	30	43,5	49,9	56,3	50,3	2532,4
4		32+790	40	44	65,9	72,3	78,7	70,3	4948,3
5		32+820	36	40	59,5	65,9	72,3	64,6	4176,2
6		32+850	32	34	53,1	56,3	59,5	53,2	2828,4
7		32+880	36	40	59,5	65,9	72,3	64,6	4176,2
8		32+910	34	36	56,3	59,5	62,7	56,0	3140,8
9		32+940	34	36	56,3	59,5	62,7	56,0	3140,8
n=	9								
<b>Total</b>								510,11	29.513,90
Rezultatele Raportului de încercare se referă doar la proba supusă încercării /The Test Report results are regarding only the analyzed samples.									
Raportul de încercare nu poate fi utilizat sau multiplicat în alte scopuri fără aprobarea emitentului / The Test Report cannot be multiplied or used in other purposes without the approval of the issuer.									

Informații despre capacitatea portantă a structurii rutiere obținute prin reciclare la rece “*in situ*” și armare dispersă cu deșeuri din fibre de sticlă în dispersie pe drumul județean DJ 109, între km: 39+700 - 40+200 conform „Normativ pentru determinarea prin deflectografie și deflectometrie a capacitații portante a drumurilor cu structuri rutiere suple și semirigide”, indicativ CD31/2002 sunt prezentate în Tabelul 5.4.

**Tabelul 5.5. Dimensionarea structurii pe primul sector experimental din România, pe DJ 109, lim. jud. Cluj – Dragu, km: 39+700 – 40+200**

Structura rutieră nouă proiectată este următoarea:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 5 cm BA16;</li> <li>- 5 cm BAD25;</li> <li>- 15 cm reciclat;</li> <li>- 40 cm balast existent;</li> <li>- pământ P<sub>5</sub>.</li> </ul>		
		
<i>Fig. 5.16. Structura rutieră reciclată cu fibre pe DJ 109 lim. Jud. Cluj – Dragu, km: 39+700-39+850</i>	<i>Fig. 5.17. Zona marginală cu cedări ușoare a structurii rutiere reciclate cu fibre pe DJ 109 lim. Jud. Cluj – Dragu, km: 39+950</i>	<i>Fig. 5.18. Zona izolată parțial segregată din structura rutieră reciclată cu fibre pe DJ 109 lim. Jud. Cluj – Dragu, km: 40+100</i>

Structura se dimensionează pentru un trafic mediu, cu o valoare  $N_c = 0.4$  m.o.s.

#### ***Stabilirea comportării sub trafic a sistemului rutier***

Structura rutieră poate prelua solicitările din trafic dacă sunt respectate concomitent următoarele criterii de dimensionare:

#### **1 Criteriul deformației specifice de întindere admisibile la baza straturilor bituminoase**

$RDO \leq RDO_{\text{admisibi}}$  - rata degradării prin oboseală ( RDO ) are o valoare mai mică sau egală cu RDO admisibil.

$RDO = N_c / N_{\text{adm}}$        $N_c$  - traficul de calcul în milioane de osii standard de 115 KN (m.o.s.)

$N_{\text{adm}}$  – numărul de solicitări admisibil, în m.o.s., care poate fi preluat de

straturile bituminoase, corespunzător stării de deformație la baza acestora

$$N_{adm} = 24,5 \times 10^8 \times \varepsilon_r^{-3,97} \quad (\text{m.o.s.}) \text{ pentru traficul de calcul mai mic de } 1 \text{ m.o.s. } (1 \times 10^6 \text{ o.s. } 115)$$

$RDO_{adm}$  are valoarea: max. 1 pentru drumuri comunale și străzi locale

$$RDO = 0.20 \leq RDO_{admisibi} = 1, \text{ condiție îndeplinită}$$

**2. Criteriul deformației specifice verticale admisibile la nivelul pământului de fundare este respectat dacă este îndeplinită condiția:**

$\varepsilon_z \leq \varepsilon_{zadm}$        $\varepsilon_z$  deformația specifică verticală de compresiune la nivelul patului drumului, în microdeformații

$\varepsilon_{zadm}$  deformația specifică verticală admisibilă la nivelul pământului de fundare

$$\varepsilon_{zadm} = 600 N_c - 0,28 \quad < 1$$

(microdef) pentru traficul de calcul mai mic de 1 m.o.s. ( $1 \times 10^6$  o.s. 115)

$$\varepsilon_z = 345 \leq \varepsilon_{zadm} = 775 \text{ microdef.}, \text{ condiție îndeplinită}$$

**Sector omogen: 39+700 - 40+200**

DRUM: REABILITARE DJ 109, LIMITA JUDEȚ CLUJ -DRAGU

Sector omogen: KM:32+700-33+200, SECTOR EXPERIMENTAL

VARIANTA DE REABILITARE PRIN RECICLARE CU FIBRE

Sarcina..... 57.50 kN

Presiunea pneului 0.625 MPa

Raza cercului 17.11 cm

Stratul 1: Modulul 3600. MPa, Coeficientul Poisson \*\*\*\*\*, Grosimea 5.00 cm

Stratul 2: Modulul 3000. MPa, Coeficientul Poisson \*\*\*\*\*, Grosimea 5.00 cm

Stratul 3: Modulul 3000. MPa, Coeficientul Poisson \*\*\*\*\*, Grosimea 15.00 cm

Stratul 4: Modulul 300. MPa, Coeficientul Poisson \*\*\*\*\*, Grosimea 55.00 cm

Stratul 5: Modulul 80. MPa, Coeficientul Poisson \*\*\*\*\*, și e semifinit

**REZULTATE:**

R	Z	sigma r	epsilon r	epsilon z
cm	cm	MPa	microdef	microdef
.0	-10.00	-.911E+02	.107E+08	.213E+08
.0	10.00	-.128E+03	.107E+08	.213E+08
.0	-25.00	-.492E+02	.411E+07	.821E+07
.0	25.00	-.430E+01	.411E+07	.774E+07
.0	-80.00	-.854E+00	.786E+06	.154E+07
.0	80.00	-.127E+00	.786E+06	.133E+07

Verificarea sistemului rutier la îngheț-dezghet.

Modul de calcul a adâncimii de îngheț și verificarea complexului rutier la îngheț-dezghet sunt prezentate în STAS 1709/1-90, 1709/2-90, 1709/3-90.

*Se determină:*

- adâncimea de îngheț în complexul rutier  $Z_{cr}$  reprezintă nivelul cel mai coborât de la suprafața drumului la care apa interstițială se transformă în gheață în timpul iernii;

- indicele de îngheț reprezintă diferența dintre maximul și minimul curbei temperaturilor medii zilnice ale aerului cumulate pe toată durata iernii, prin însumare algebrică a temperaturilor și se exprimă în  $^{\circ}\text{C} \times \text{zile}$ ;

- grosimea echivalentă a sistemului rutier reprezintă grosimea stratului de pământ cu aceeași capacitate de transmitere a căldurii cu a straturilor componente ale sistemului rutier și se exprimă în cm;

Adâncimea de îngheț în complexul rutier  $Z_{cr}$ , se consideră egală cu adâncimea de îngheț a pământului de fundație  $Z$ , în condiții de porozitate și umiditate specifice acestuia, la care se adaugă un spor al adâncimii de îngheț  $\Delta Z$  și se calculează cu relația:

$$Z_{cr} = Z + \Delta Z \text{ [cm]}$$

$$\Delta Z = H_{SR} - H_e$$

unde:  $H_{SR}$  – grosimea sistemului rutier alcătuit din straturi de materiale rezistente la îngheț în cm;

$H_e$  – grosimea echivalentă de calcul la îngheț a sistemului rutier în cm.

Se calculează gradul de asigurare la pătrunderea înghețului, cu relația:

$$K = H_e / Z_{cr}$$

$$H_e = \sum_{i=1}^n h_i \cdot C_{ii} = 10 \cdot 0.5 + 15 \cdot 0.75 + 55 \cdot 0.9 = 5 + 11,25 + 49,50 = 65,75 \text{ cm}$$

$$\Delta Z = H_{SR} - H_e = 80 - 65,75 = 14,25 \text{ cm}$$

$$I_g = 92.95 \Rightarrow z = 81 \text{ cm}$$

$$Z_{cr} = z + \Delta z = 14,25 + 81 \text{ cm} = 95,25 \text{ cm}$$

$$K = H_e / Z_{cr} = 0.557$$

$$K_{adm} = 0.69$$

$$K > K_{adm}$$

**CONCLUZIE:**

Urmare a faptului că sunt îndeplinite simultan cele 3 condiții de dimensionare, structura rutieră este corect alcătuită pentru traficul estimat.

Pentru o grosime de 80 cm a structurii rutiere și un tip climatic II, structura rutieră rezistă la acțiunea înghețului.

#### 5.1.4. Studiul parametric al materialului reciclat cu deșeuri din fibre de sticlă în dispersie

Studiul parametric a avut ca obiectiv identificarea parametrilor dominanți și influența lor în stabilitatea fizico-mecanică a reciclatului asimilat cu un anrobat bituminos de tip AB25. Parametrii procesului de reciclare prestabiliți au fost în număr de minim patru. Variația succesivă a trei dintre ei a dus la realizarea încercărilor pentru fiecare din cele două situații.

Cei trei parametri variabili considerați de interes, sunt:

- viteza de reciclare -  $v$  (7 m/s și 10 m/s);
- procentul volumic de bitum adăugat -  $P$  (2,50% și 3,00%);
- temperatura agregatelor -  $T$  (20°C și 25°C).

Parametrul de lucru secundar a fost:

- viteza de rotație a arborelui reciclatorului -  $r$  (130 rot./min).

**Tabelul 5.6. Parametri variabili în procesul de reciclare**

Parametrii variabili	T 20 °C	T 25 °C
$v_1 = 7 \text{ m/s};$ $P_1 = 2,50\%$	Proba 1	-
$v_2 = 10 \text{ m/s};$ $P_2 = 3,00\%$	Proba 3	-
$v_3 = 12 \text{ m/s};$ $P_3 = 4,00\%$	-	Proba 5

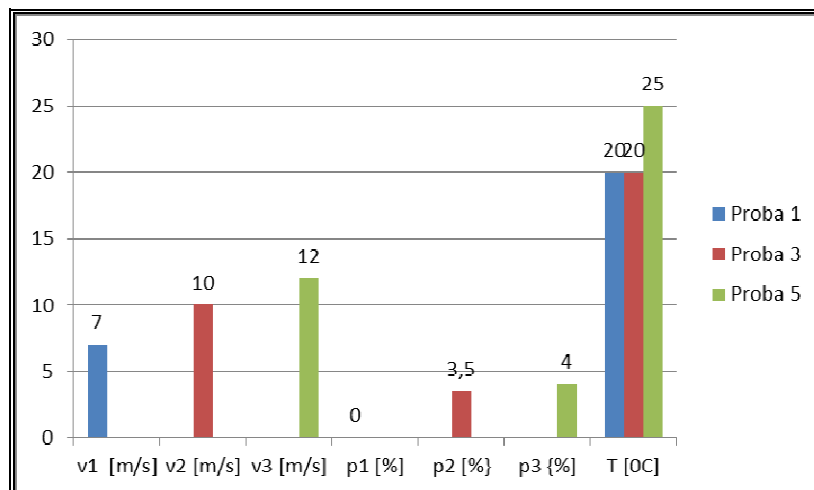


Fig. 5.19. Reprezentarea grafică în diagrame de tip coloană a parametrilor dominanți în funcție de temperatură

După stabilirea parametrilor de lucru și reglarea utilajelor s-a trecut la execuția lucrărilor de reciclare cu reciclatorul Wirttgen 2200. Pe baza acestor parametrii au fost realizate 3 sectoare experimentale cu lungimi cuprinse între 70 și 100 ml. Prelevarea probelor s-a realizat după 36 de ore de la terminarea celui de-al treilea sector experimental.

### 5.1.5. Determinarea rezistențelor la compresiune pe probe

La evaluarea rezistențelor mecanice a materialului reciclat cu deșeuri din fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice s-a respectat standardul procedurii Duriez. Compactarea stratului reciclat s-a realizat uniform pe toate cele trei sectoare experimentale, prin 12 treceri succesive ale compactorului cu tamburi metalici având greutatea de 12 to. Conținutul de apă al probelor nu a depășit 5%. În tabelul de mai jos sunt prezentate toate rezultatele determinărilor pe probe maturate:

Tabelul 5.7. Reprezentarea rezistențelor la compresiune pe probe de reciclat

Nr. probă	Masa la decofrare (g)	Masa (g)	Înălțimea (mm)	Densitatea aparentă (g/h)	Reparti-zarea probelor	w (%)	Diame-tru (mm)	R (Mpa)
P-1	985,3	958,1	87,3	2,18	dens.hidro	0,13	80,2	4.71
P-2	987,5	961,7	87,3	2,19	dens.hidro	0,11	80,5	4.78
P-3	991,2	962,1	87,2	2,17	dens.hidro	0.12	80,3	5.10

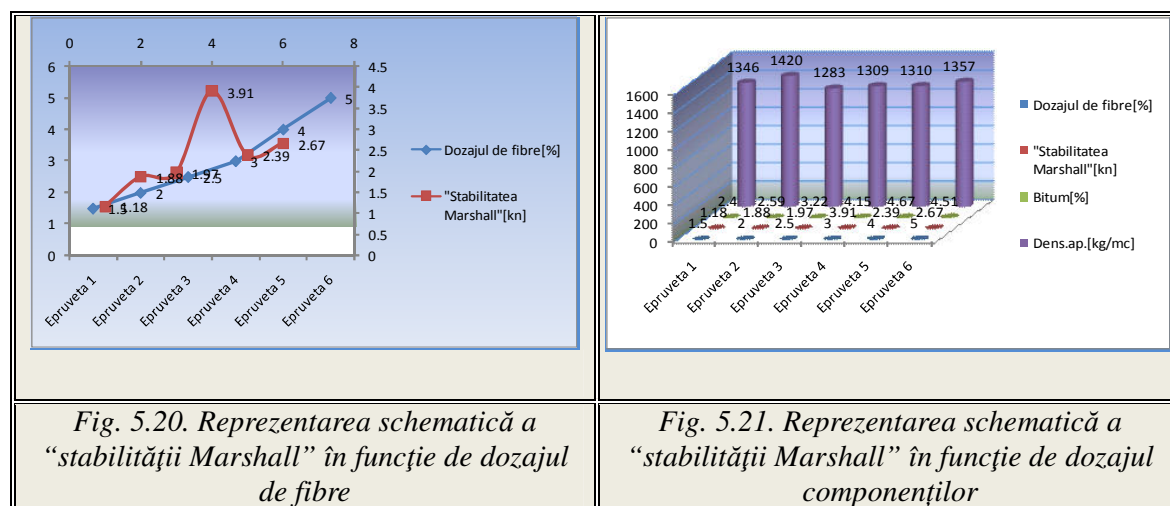


Determinarea rezistențelor mecanice prin această procedură este relevantă pentru confirmarea îndeplinirii funcției de armare a fibrelor adăugate la reciclarea la rece cu bitum spumat a structurilor rutiere degradate. Compactarea uniformă, conținutul de bitum și procentul masic de deșeuri din fibre de sticlă au dus la obținerea unor valori ridicate a coeficienților Duriez ( $r/R$ ).

În concluzie, putem afirma cu certitudine că rezultatele obținute prin încercarea Duriez demonstrează performanțele superioare ale anrobateelor rezultate din reciclarea la rece “*in situ*” cu bitum spumat, ciment, apă și fibre în dispersie, comparativ cu alte tipuri de mixturi similare. Dacă vom lua în considerare și faptul că acest tip de material reciclat poate fi utilizat ca strat de fundație la drumuri de orice categorie și că deșeurile din fibre de sticlă utilizate reduc total potențialul lor poluant, atunci putem propune această tehnologie ca fiind o alternativă serioasă la tehnologiile actuale de reabilitare a drumurilor din România.

### 5.1.6. Legătura dintre conținutul de fibre și stabilitatea Marshall

O asemenea determinare experimentală este aceea care afirmă că există o legătură directă între conținutul de fibre în dispersie și rezistența epruvetelor la încercarea “Marshall”, până la procentul volumic de circa 5%. Peste aceasta rezistența nu mai crește, fiind evident faptul că s-a ajuns la valoarea de saturație a umpluturii disperse. La valori mai mari de 5% a procentului volumic de fibre adăugate în masă, rezistențele tind să scadă accentuat, acest lucru însemnând că apar defecte de structură datorită anrobării insuficiente a componentilor și tendinței de aglomerare în fascicule masive a fibrelor. Mai jos, în reprezentarea grafică din Fig. 5.20 se evidențiază acest fenomen. “Stabilitatea Marshall” în funcție de dozajul componentilor și densitatea aparentă a acestora, este evidențiată în Fig. 5.21.



Prin aceste determinări s-a încercat găsirea unei metode cât mai simple care să evidențieze influența adaosului de fibre sau deșeurilor din fibre de sticlă, la reciclarea la rece “*in situ*” a structurilor rutiere, cu ajutorul reciclatorului “Wirtgen 2200”.

În concluzie, fibrele sau deșeurile din fibre de sticlă cu funcție de armare, dispersate în complexul reciclat, sub acțiunea liantului, formează cu agregatele existente în structura rutieră, o mixtură asfaltică asimilată cu anrobatul bituminos de tip AB25, însă cu proprietăți fizico-mecanice mult îmbunătățite. Acesta poate fi utilizat ca strat de fundație pentru drumuri de orice categorie și este o nouă compoziție verde (ecologică) datorită reciclării deșeurilor din fibre de sticlă cu potențial poluant ridicat.

### 5.1.7. Legătura între numărul de treceri la compactare, volumul de goluri și densitatea aparentă

O legătură directă între numărul de treceri la compactare, volumul de goluri și densitatea aparentă este reprezentată în diagramele de tip coloană din Fig. 4.22. La un număr constant de 12 treceri avem rezultatele pentru cele două determinări, astfel:

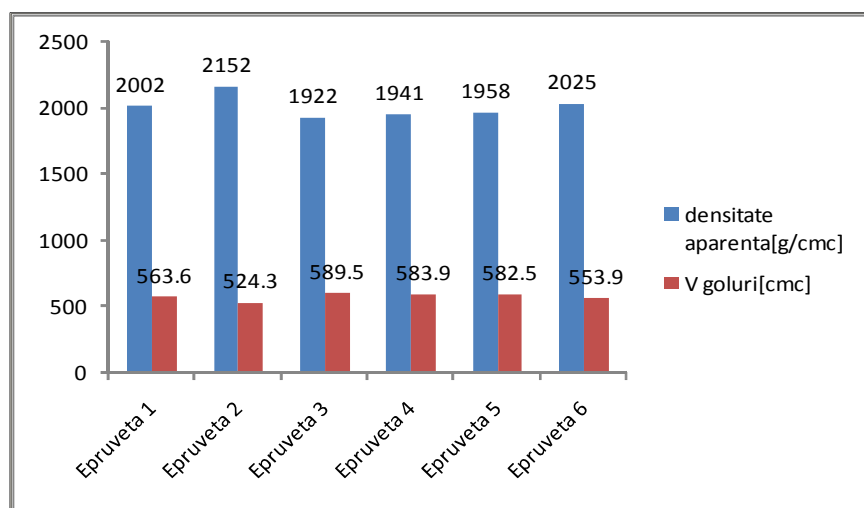


Fig. 5.22. Reprezentarea schematică a volumului de goluri și densității aparente pe probe

Analizând această dependență vom observa că, până la un număr de 12 - 14 treceri, volumul de goluri scade accentuat odată cu scăderea densității aparente, după care se reduce corespondența directă între numărul de treceri, numărul de goluri, densitatea aparentă și distribuția în masă a golurilor.

## 5.2. Caracteristicile macroscopice ale reciclatului cu fibre. Geometrii de fibre

Fibrele sau deșeurile din fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice în amestec cu granule din aceste rășini rezultate după măcinare au fost înglobate în masa de reciclat cu ajutorul reciclatorului Wirtgen 2200 și anrobate de bitumul spumat împreună cu agregatele din structura rutieră existentă și cu cele de aport. Cementul adăugat în masă sub formă de suspensie apoasă parțial hidratată a avut rolul de favorizare a procesului de maturare a amestecului. Materialul rezultat nu este un compozit ci un sistem polidispers format din diverse faze de agregare care are caracteristici similare compozitelor polimerice clasice. În ingineria civilă această tehnologie de reciclare cu fibre în dispersie se poate aplica mai ales în domeniul drumurilor care au structuri rutiere elastice și semielastice.

Utilizarea pe scară largă a acestei tehnologii de reciclare la rece necesită înțelegerea mecanismului de armare a umpluturilor fibroase și realizarea de determinări suplimentare pe materialul reciclat care să evidențieze caracteristicile mecanice și fizice ale acestuia. Pe sectoarele experimentale realizate pe drumul județean DJ 109, lim. jud. Cluj – Dragu între km: 39+700 - 40+500 din județul Sălaj, acest material reciclat a fost utilizat ca strat de fundație peste care s-au așternut două straturi de îmbrăcămiți bituminoase, unul de legătură cu grosimea de 5 cm și unul de uzură cu grosimea de 4 cm.

Unele rezultate teoretice obținute la nivel macroscopic sau în laborator care evidențiază caracteristicile structurale ale reciclatului au dus la ideea formulării unor concluzii practice care vor sta la baza unor dezvoltării ulterioare a acestei tehnologii.

Au fost observate în regim dinamic anumite aspecte comportamentale ale reciclatului înainte și după generarea fisurilor în masa acestuia. Fibrele de sticlă utilizate pentru armare dispersă sunt rezistente la întindere dar și casante. Rolul lor în masă este multiplu.

Enumerând câteva dintre funcțiile de bază ale fibrelor de sticlă și ale granulelor de poliesteri adăugate în masa de reciclat putem afirma că acestea sunt:

- funcția de armare (ranforsare) a sistemului;
- funcția de consolidare;
- funcția de inhibare a propagării fisurilor;
- funcția de preluare a unei părți din tensiunile deformatoare din sistem;
- funcția de bariere anticapilare;
- funcția de redistribuire a tensiunilor locale;
- funcția granulelor de poliesteri de umplere a golurilor cu potențial generator de microfisuri.

Caracteristicile fizico-mecanice ale acestui tip de material pot fi descrise suficient de bine prin similitudine cu cele ale compozitelor ceramice sau ale betoanelor de ciment armate dispers cu fibre. Mecanismele de propagare a fisurilor locale sunt împiedicate de prezența fibrelor care absorb parțial energia necesară propagării acestora și împiedică fenomenul de multifisurare a sistemului ce duce întotdeauna la degradări ireversibile. Capacitatea portantă a structurii rutiere scade accentuat la nivel local și pe zone izolate cu tendință de extindere continuă, însoțită de fisurare și rupere. Prezența fibrelor și a fasciculelor de fibre în masă conferă acesteia creșteri semnificative ale capacității portante atât la nivel local cât și în întreaga structură rutieră reciclată a drumului. Fibrele de sticlă adăugate în masă, în procent volumic de 2,50 - 3%, sunt de 3 - 5 ori mai rigide decât sistemul polifazic reciclat și de 300 - 500 de ori mai rezistente la deformații permanente decât acesta.

Caracteristicile macroscopice ale reciclatului determinate prin metode optice cu ajutorul Stereolupei “*Olympus SZ*” sunt diferite de cele ale materialelor plastice sau ale rășinilor poliesterice armate continuu cu fibre de sticlă.

Macroscopic se poate observa o structură poroasă ce se modifică odată cu timpul de maturare. Mărimea porilor și gradul (procentul) porozității sunt dependente de viteza de reciclare, conținutul de bitum și gradul de compactare. Stabilitatea Marshall variază în funcție de porozitate dar și de microfisurile de contracție ce apar inevitabil la compactare și uscare (eliminarea apei din suspensia de ciment adăugată la reciclare). Adezivitatea bitumului, aderența parțială la interfață a componentilor, prezența particulelor de ciment nehidratate sau a granulelor de agregate neanrobate determină apariția, mărimea și densitatea microfisurilor de interfață. Fenomenele de îngheț-dezghet și contracția la uscare sub acțiunea temperaturilor extreme apărute în ultimii ani pot crește considerabil fenomenul de microfisurare în masa de reciclat, uneori neprotejată corespunzător perioade mai îndelungate.

Fenomenul de cedare ireversibilă la interfață urmat de ruperea structurii apare atunci când microfisurile fuzionează și apare fisura ce se propagă prin secțiune până la suprafață. La efectele descrise mai sus, se cumulează efectul golurilor și incluziunilor din masă ce fac ca relația tensiune-deformație să devină neliniară iar direcția de rupere a sistemului imprevizibilă. Este evidentă concluzia că masa de reciclat armat nu are o curbă stabilă tensiune-deformație, nici valori bine definite ale stabilității Marshall, ci există variații considerate admisibile în comparație cu cele ale anrobatelor bituminoase clasice. Fibrele de sticlă au modulul lui Young clar definit, deformația la alungire este liniară până la punctul de rupere. Ceea ce trebuie menționat este faptul că metoda de înglobare a fibrelor de sticlă prin reciclare cauzează unele degradări (ruperi,

---

răsuciri) ale acestora, care din practică au fost evaluate ca fiind între 1 și 5%. Acestea nu pot fi considerate ca având funcție de armare.

Caracteristicile de legare la interfață a fibrelor de sticlă cu ceilalți componenți ai sistemului determină comportamentul general al reciclului solicitat la deformații dinamice permanente (Fig. 5.23.).

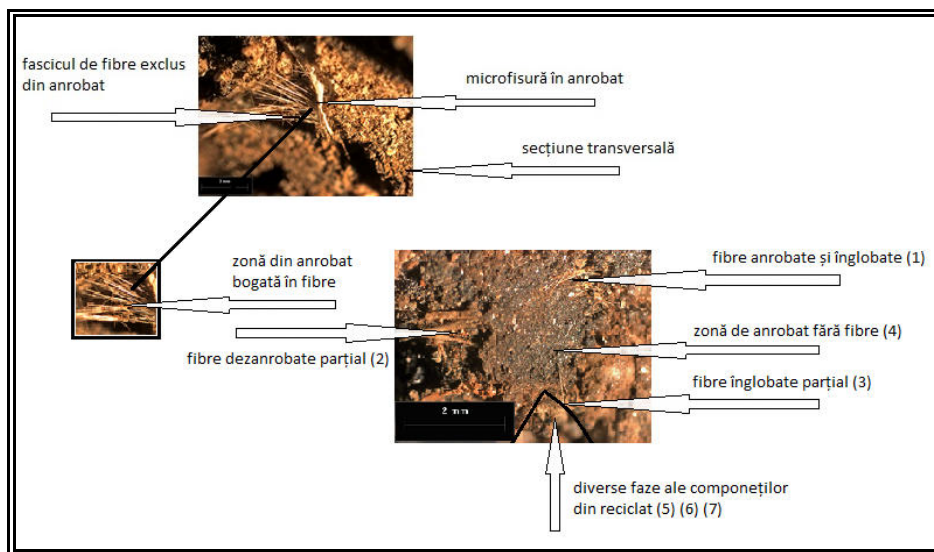


Fig. 5.23. Structura macroscopică a reciclului cu fibre

Legăturile la interfață într-un material reciclat după o perioadă minimă de maturare de 28 zile sunt predominant prin adeziune sub acțiunea liantului (bitumului spumat). Cu trecerea timpului acestea se degradează și rămân însoțite parțial de cele de frecare, urmate uneori de alunecare, desprindere și rupere a sistemului. Se poate observa că până la 1 - 3 ani puterea liantă a bitumului se menține constantă iar legăturile la interfață între componenții sistemului nu se degradează semnificativ. În Fig. 5.23. sunt prezentate microfotografiile ce diferențiază acest tip de macrostructură de cele ale matricilor ceramice, polimerice sau din beton de ciment. În punctele de referință se observă fibrele anrobate și înglobate (1), dezanrobate parțial (2), înglobate parțial (3), zone de reciclat fără fibre (4) și diversele faze ale componentelor din reciclat (5) (6) (7). Deoarece granulele de agregate, suspensia de ciment și particulele de liant nu pot pătrunde total în spațiile interstițiale dintre fibre, unele din acestea rămân grupate în fascicule sau sunt separate de straturi din amestecul reciclat. Zonele din reciclat bogate în fibre uniform dispersate au forme ovale iar fibrele sunt unidirecționale sau multidirecționale. Cu toate acestea, în multe dintre microfotografiile s-a observat orientarea preferențială a fibrelor pe anumite direcții, cea dominantă fiind cea orizontală. De asemenea, s-a observat pe parcursul determinărilor optice schimbarea

continuă a macrostructurii reciclatului, aceasta fiind o altă caracteristică ce depinde atât de vârsta acestuia, de tipul componentelor sistemului și de condițiile de reciclare. Fasciculele de fibre tind să acționeze ca un singur element de armare izolat în sistem dar creează și zone de reciclat supraarmate.

Parametrii macrostructurali, cum ar fi fracțiile de volum, lungimea fibrelor, distanța dintre fibre etc., sunt insuficienți pentru a descrie la nivel teoretic o macrostructură de tipul unui reciclat cu fibre ca cel din Fig 5.23.

### 5.2.1. Factorul de dispersie al fibrelor din materialul reciclat

Vom defini un nou parametru pentru descrierea structurii macroscopice a reciclatului cu fibre care prin variația sa poate descrie o gamă largă de macrostructuri identificate cu ajutorul Stereolupei "Olympus SZ". Acesta este factorul de dispersie al fibrelor  $f_d$  ce poate fi exprimat cu ajutorul relației [52]:

$$f_d = \frac{V_{sf}}{V_f} \quad (5.1)$$

în care:  $V_{sf}$  - este volumul din reciclat saturat în fibre;

$V_f$  - este fracția totală de volum de fibre din reciclat.

Factorul de dispersie  $f_d$  indică gradul de dispersie al fibrelor în masa totală de reciclat și variază de la 1,00 la 1,10.

Fibrele formate din filamente și fasciculele de fibre înglobate în reciclat au funcție de armare unitară dacă atât filamentele fibrei cât și fibrele componente ale fasciculelor acționează unitar ca o singură fibră de armare (unifilament). Dacă acestea acționează separat ele se află într-o stare non-unitară de armare sau non-filament. În funcție de gradul de anrobare și de legare la interfață, fibrele se află întotdeauna între cele două extreme descrise mai sus. O fibră atinge starea non-filamentară de armare pe direcția longitudinală când nu este legată pe cel puțin 98% din lungime în sistem. În cazul fasciculelor, între fibre există goluri și fisuri care le face funcția de armare ineficientă. S-a observat că dispersia fibrelor singulare în reciclat favorizează funcția de armare unifilament și determină starea optimă de armare a sistemului. Îndeplinirea funcției de armare a fasciculelor de fibre sau fibrelor singulare rupte la o lungime mai mică decât cea minimă sub acțiunea cuțitelor reciclatorului depinde de gradul lor de anrobare și funcția de transfer a tensiunilor între fibre. Factorul de eficiență de armare a unui fascicul de fibre poate fi definit ca:  $f_d$ .

### 5.2.2. Factorul de eficiență de armare al fibrelor

Pentru a exprima eficiența armării cu fibre în dispersie la reciclarea structurilor rutiere cu bitum spumat, am identificat un factor de eficiență de armare,  $f_e$ , ce este definit ca raportul dintre aria legată a tuturor filamentelor fibrei cuprinse într-un fascicul de lungime egală cu raza fibrei ( $r$ ) și aria secțiunii transversale a tuturor filamentelor portante ale fibrei din acel fascicul [52].

$$f_e = \frac{\left( \sum_{i=1}^N a_{q_i} \right) \pi r}{N \pi r^2} \quad (5.2)$$

$N$  - este numărul total de filamente ale fibrei luat ca parametru ce exprimă fracțiunea din suprafața fibrei în al "i" - lea element, legată în anrobat. Valorile lui  $N$  sunt:

$N=2$  dacă filamentul fibrei este complet legat în anrobat;

$N=1$  dacă filamentul fibrei este jumătate legat în anrobat;

$N=0$  dacă filamentul fibrei este complet nelegat în anrobat.

Factorul de eficiență de armare al fibrelor crește odată cu durata de maturare a reciclatului.

Fibrele, deși sunt dispersate în general într-un mod aleatoriu în două dimensiuni, ar putea fi aliniată sau preferențial orientate în orice direcție, caz în care se poate îmbunătăți armarea în reciclat pe aceea direcție.

A fost identificată macroscopic, în unele volume finite din reciclat, o orientare preferențială a fibrelor iar în alte volume finite orientarea fibrelor a fost aleatorie.

Parametrul  $P(\theta)$  din relația (5.3) reprezintă orientarea fasciculelor de fibre într-un volum finit de reciclat și exprimă probabilitatea ca o fibră să fie găsită în orice punct al acestuia orientată în direcția  $\theta$  în raport cu o axă aleasă [52].

$$\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} P(\theta) d\theta = 1.0 \text{ unde } P(\theta) \geq 0.0 \quad (5.3)$$

Pentru o orientare perfect aleatorie  $P(\theta)$  este constant pentru  $-\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$  și este  $\frac{1}{\pi}$ .

### 5.2.3. Fisurarea macroscopică

Desprinderea fibrelor la capete, urmată de alunecare și fisurare la interfață, cu dislocare din sistem, sunt două mecanisme posibile și observabile la nivel macroscopic, de degradare a reciclatului în faza de utilizare ca fundație de drum supusă solicitărilor dinamice de trafic. În timpul fenomenului de smulgere, prin fenomenul de frecare se produce o redistribuire a

tensiunilor în zona adiacentă fibrei (manșonul de reciclat în care fibra este înglobată) pe o lungime a acesteia egală cu lungimea de transfer de sarcină.

Datorită faptului că procentul masic de fibre din reciclat este ca pondere mult mai mic decât masa totală a acestuia, iar fibrele sunt de 1.000 – 10.000 ori mai lungi decât lățimea fisurii pe care o traversează la smulgerea acestora, modulul lui Young (alungirea specifică a fibrelor) se modifică insesizabil la scara microscopică. Microfisurile traversate de fibre au efect pronunțat de degradare a reciclatului iar acestea la nivel macroscopic se propagă în zonele armate de către tot mai multe fibre, putând cuprinde întreaga secțiune. Această descriere este valabilă numai pentru microfisurile ce apar la interfața bimaternal din reciclat. În cazul fisurilor mari (macrofisurile) ce depășesc în dimensiune  $\frac{1}{4}$  din diametrul fibrei, în zonele traversate de acestea se formează punți de armare (Fig. 5.23.) ce au o rezistență sporită deoarece o parte din energia produsă de tensiunile deformatoare este preluată și disipată prin frecare iar energia rămasă pentru crearea de noi fisuri se diminuează.

Pentru a stabili modul în care fibrele și geometria dispunerii lor influențează fenomenul de microfisurare vom analiza mecanica ruperii în zona unei fisuri din manșonul de reciclat situată între două fascicule de fibre (Fig. 5.24.). Factorul de influență  $k$  determină schimbarea de intensitate a tensiunii deformatoare. Golurile dintre fasciculele de fibre fac să existe neomogenități în masă, pe direcția de armare, iar fisura în acest caz s-ar putea comporta ca fiind într-o bandă laminată din rășini poliesterice armate continuu cu fibre. Pe de altă parte, rigiditatea fibrelor dintr-o zonă de reciclat bogată în fibre, pe direcția normală la planul de fisurare poate exercita o presiune pe vârful fisurii ce tinde să se închidă. Studiul microfisurării în zonele de reciclat cu lățimi finite a pornit de la considerentul că lățimea elementului de volum din reciclat este egală cu distanța dintre fibre.

Straturile de reciclat cu fascicule de fibre au fost ulterior suprapuse pe fiecare parte a fisurii pentru evaluarea funcției lor de armare și a efectului de rigidizare ce tinde să stopeze fisurarea. Factori de intensitate de tensiuni,  $K_i$  s-au găsit atât pentru cazurile arătate mai sus printr-o analiză cu elemente finite – m – cât și în cazuri de distorsionare a factorilor de intensitate de tensiuni în volume de reciclat narmate cu fibre (Fig. 5.24. – curba tensiune-deformație 1).

Rezultatele ce pot fi obținute prin metoda elementelor finite sunt similare celor obținute prin metodele optice de analiză utilizate în această lucrare.

Din cauza efectului de rigidizare a fasciculelor de fibre coliniare perpendiculare pe planul fisurii, coeficientul  $k$  scade iar intensitatea tensiunii de fisurare crește. Diferența între modulii de



elasticitate ai componentilor la interfața bimaternal și distanța mare dintre fibre sunt considerate cauzele principale ale apariției microfisurilor în volumele de reciclat analizate.

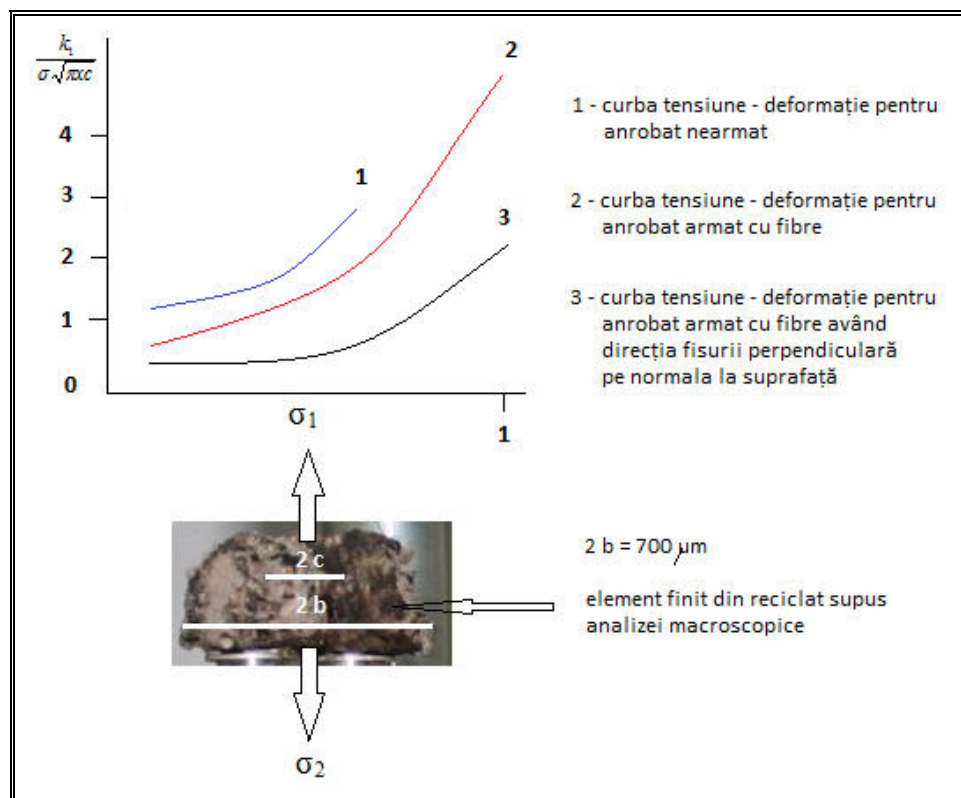


Fig. 5.24. Reprezentarea curbelor tensiune – deformație pentru 3 tipuri de reciclat

Evoluția unei fisuri existente între fasciculele de fibre nu este influențată de rigiditatea fibrelor, ci de rigiditatea volumului de reciclat ce înglobează acel fascicul. Efectul de lățime finită reduce tensiunile de fisurare și propagarea fisurii de la 1% la 10%. Efectul este atât de predominant încât se manifestă și la crăpături de mari dimensiuni.

Cu toate acestea, neomogenitățile, aglomerările de fibre sau golurile de armare din reciclat pot acționa ca bariere în calea avansării fisurii sau diminuării tendințelor de apariție a fisurilor multiple.

Datorită apariției microfisurării se reduce panta curbei tensiune-deformație (Fig. 5.24. – curba tensiune-deformație 2) iar schimbarea pantei depinde de mărimea și densitatea de fisurare. Fisurile izolate ar putea apărea în reciclat la valori foarte scăzute ale tensiunilor, când curba tensiune-deformație are mici modificări ale nivelurilor de pantă (Fig. 5.24. – curba tensiune-deformație 3). Limita de proporționalitate se modifică în cazul în care intensitatea tensiunii de rupere este suficient de mare pentru o schimbare importantă de pantă.

Limita de proporționalitate (LP) poate fi determinată prin găsirea tensiunii la care începe fenomenul de fisurare multiplă intensă în sistemul reciclat.

În cazul în care fasciculele de fibre au axele paralele cu planul fisurii, acestea nu îndeplinesc funcția de armare. Ca urmare, în acest tip de fisurare, fibrele opun cea mai mică rezistență la fenomenul de propagare a fisurilor și de apariție a unui volum de reciclat cu fisuri multiple.

Pentru acest tip de fisură, teoria Griffiths ajunge la o relație ce exprimă tensiunea de fisurare care se poate scrie astfel [52]:

$$\sigma = \eta(c) \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi(1-\nu^2)C}} \quad (5.4)$$

în care:  $\eta(c)$  - este reducerea tensiunii din cauza efectului lățime finită obținut din Fig. 5.24. pentru o fisură de lungime  $2c$ . Considerând energia de suprafață  $\gamma$  ca  $4\text{J/mm}^2$ , lungimea fisurii de  $1,05$  mm, raportul dintre lungime și lățimea fisurii de  $0,85$  și  $\eta(c)$  ca  $0,49$ , se poate arăta că fisura se propagă în mod normal în reciclul nearmat la  $11,38 \text{ N/mm}^2$ , dar datorită efectului lățimii finite aceasta se va propaga la  $5,58 \text{ N/mm}^2$ . Pe măsură ce tensiunea crește, procese de fisurări similare se vor produce în reciclat între diverse straturi neomogene. Procesul de generare a microfisurilor este oprit de fibrele singulare iar cel de fisurare și crăpare este oprit de toate geometriile de fibre din reciclat. În zonele nearmate din reciclat, procesul de microfisurare continuă până la suprafață concomitent cu fisurarea multiplă în volum.

Din cauza variabilității lui  $\gamma$ , dimensiunii fisurilor, densității de apariție a acestora și distanței dintre ele, curba variației tensiunilor diferă față de limita de proporționalitate (LP) a acestora.

Analizele efectuate pe o probă prelevată din structura rutieră aflată sub acțiunea apei freatică mai mult de 1 an, ne arată că efectul de lățime finită nu mai există iar efectul de multifisurare este mărit prin procesul de derigidizare a fibrelor.

În concluzie, atât macrostructura cât și microstructura sistemului polifazic reciclat și armat dispers cu fibre este foarte complexă. Modelele convenționale de studiu ale fibrelor singulare înserate în reciclat nu sunt reprezentative pentru toate caracteristicile macrostructurale observate prin metode optice cu ajutorul Stereolupei “*Olympus SZ*”. Geometriile de fibre, factorul de dispersie, funcțiile de orientare influențează în mod determinant proprietățile fizico-mecanice ale reciclului. Atât la fisurarea simplă cât și la cea multiplă fasciculele de fibre acționează ca bariere în propagarea fisurilor la nivel macroscopic. Toate tipurile de fisurare sunt localizate iar curba tensiune-deformație devine mult mai stabilă. Funcția de armare a fibrelor la

reciclare este dovedită prin rolul important al acestora în a determina caracteristicile curbei efort-deformație pe domeniul elastic inițial, astfel încât aceste tipuri de structuri rutiere pot fi proiectate să reziste în condiții de siguranță pe o durată de exploatare mai mare cu cel puțin 50% față de structurile rutiere clasice.

## CAPITOLUL 6

### ***APLICAȚII PRACTICE ALE TEHNOLOGIEI DE RECICLARE “IN SITU” CU FIBRE ÎN DISPERSIE***

#### **6.1. Tehnologia de reciclare cu deșeuri din fibre de sticlă, bitum spumat și suspensie de ciment**

Tehnologia de reciclare se realizează utilizând un tren de reciclare după modelul de mai jos (Fig. 2.5.), special conceput pentru această operație.

Se impun câteva precizări referitoare la această tehnologie de reciclare. Utilizarea cimentului cu rol determinant de “filer activ” și nu cu rol de liant face ca stratul reciclat să nu prezinte nicio similitudine cu betonul de ciment sau cu balastul stabilizat.

Literatura tehnică internațională asimilează în acest caz cimentul utilizat ca fiind “filer activ” cu rolul de a asigura o maturare mai rapidă a mixturii și de a reduce sensibilitatea la apă a acesteia. În locul cimentului se poate folosi varul stins sau cenușa de termocentrală [61].

Prezența acestui adaos între componenții granulometrici trebuie luată în considerare la determinarea curbei granulometrice specifice, iar conținutul de filer activ nu trebuie să depășească în niciun caz 2%. Când este necesar un aport suplimentar de componenți cu parte fină se adaugă filer de calcar. Cimentul nu aduce îmbunătățiri semnificative caracteristicilor masei de reciclat (asimilată cu un anrobat bituminos de tip AB25) și nu influențează sensibil rezistența la compresiune, fluaj și stabilitate Marshall.

Influențele date de conținutul de filer activ sunt evidențiate la evaluarea modulelor de rigiditate, încercarea triaxială, rezistența la oboseală și la deformații permanente.

În cazul armării disperse cu deșeuri de fibre din sticlă peliculizate cu rășini poliesterice a structurilor rutiere reciclate la rece, eforturile tehnologice au fost îndreptate către tehnici noi de dozare, amestecare și dispersie în masă a fibrelor, pentru a asigura orientarea optimă în vederea realizării adeziunii de interfață fibre-liant și materialul reciclat (agregate minerale), în prezența apei.

#### **6.1.1. Fazele procesului de reciclare “in situ” utilizând tehnologia mixturii cu bitum spumat și fibre**

Reciclarea la rece “in situ” cu bitum spumat constă în frezarea și reciclarea straturilor degradate din structura rutieră, din mixtură ori din beton de ciment, stratul rutier obținut fiind

---

utilizat ca un strat nou în structură. Stratul rezultat poate înlocui toate straturile din structura rutieră, funcție de clasa tehnică a drumului, în afara celui de uzură.

În principiu, procedeul de reciclare “*in situ*”, constă în frezarea straturilor rutiere aflate într-o stare avansată de degradare, malaxarea și umidificarea materialului frezat cu apă sau suspensie de apă cu ciment, în paralel cu injecția bitumul spumat (Fig. 2.5.) [45].

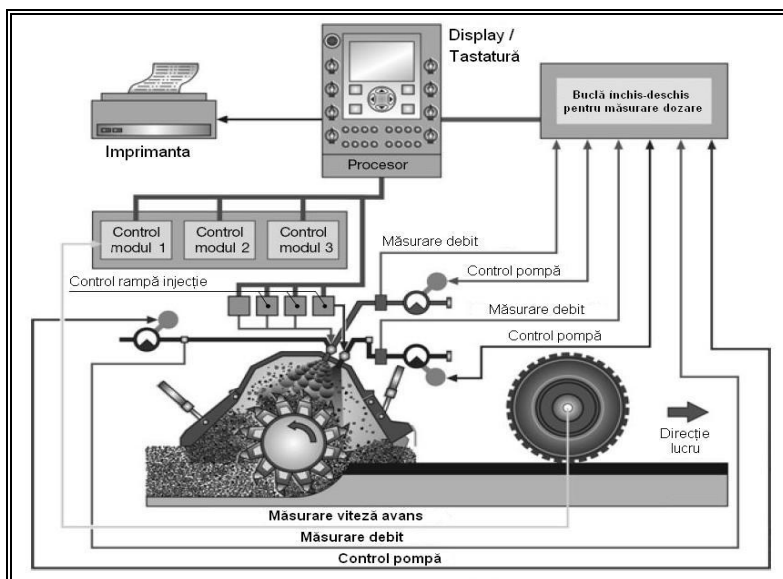


Fig. 6.1. Schema tehnică de funcționare la reciclatorul WR. 2000, 2200, 2500 (frezare - pulverizare lianți și malaxare pe tamburul de frezare)

Toate fazele procesului sunt realizate cu ajutorul utilajelor ce formează un tren de reciclare:



Fig. 6.2. Tren reciclator utilizat în tehnologia de reciclare cu bitum spumat și fibre de sticlă pe DJ 109, limita jud. Cluj – Dragu format din Autogreder, Compactator 12 to, Reciclator WR 2200, Dozator ciment WM1000, Cisternă de bitum cald

### 6.1.2. Tehnologia de dozare a fibrelor

Fibrele se adaugă prin dozare prealabilă și se aștern într-un strat uniform în fața reciclatorului. Dozarea a fost asigurată de furnizorul S.C. FIBREX CO S.R.L. Crasna, județul Sălaj cu ajutorul unei instalații de dozare ce asigură stropirea cu rășină poliesterică, având rol de liant, și așternerea pe o folie din polietilenă a unui strat cu grosime uniformă din fibre de sticlă sau deșeuri de fibre în amestec cu granule de rășini poliesterice. Grosimea stratului este determinată prin calcule legate de procentul volumic de fibre necesare pentru armarea eficientă a unui metru cub de reciclat.



*Fig. 6.3. Fixarea rolei de folie din polietilenă în instalația de dozare*



*Fig. 6.4. Tăierea fibrelor și așternerea lor în strat uniform pe folia întinsă*



*Fig. 6.5. Uniformizarea stratului de fibre cu ajutorul tamburilor rotative*



*Fig. 6.6. Înfășurarea covorului de fibre fixate cu rășină poliesterică pe folia din polietilenă*

Reciclarea la rece “*in situ*” a structurilor rutiere este o tehnologie relativ nouă în domeniul ingineriei drumurilor. Utilizarea metodelor clasice, consacrate în construcția de drumuri au fost puse la încercare în ultimele decenii de tendințele de creștere ale prețurilor produselor petroliere.

Acest lucru a condus la dezvoltarea unor tehnologii alternative, care să conducă la performanțe superioare ale drumurilor, acestea fiind printre cele mai utilizate căi de comunicație.

Liantul de bază este bitumul spumat. Cimentul utilizat are rol de filler activ ce favorizează maturarea amestecului și poate fi înlocuit cu varul stins sau cenușa de termocentrală (“fly ash”) [59].

Prezența acestui adaos între componentii granulometrici trebuie luată în considerare la determinarea curbei de granulozitate specifică iar conținutul de filler activ nu trebuie să depășească în niciun caz 2%. Când este necesar un aport suplimentar de componente cu parte fină, se adăugă filler de calcar. Cimentul nu are rol de liant și nu aduce îmbunătățiri semnificative caracteristicilor masei de reciclat (asimilată cu un anrobat bituminos clasic de tip AB25) și nu influențează sensibil rezistența la compresiune, stabilitate și fluaj Marshall.

Influențele date de conținutul de filler activ sunt evidențiate la evaluarea modurilor de rigiditate, încercarea triaxială, rezistența la oboseală și la deformații permanente.

În Fig. 2.11. sunt prezentate schematic și simplificat etapele procesului tehnologic de reciclare și distribuția tensiunilor generate de forța de frânare înainte și după reciclare:

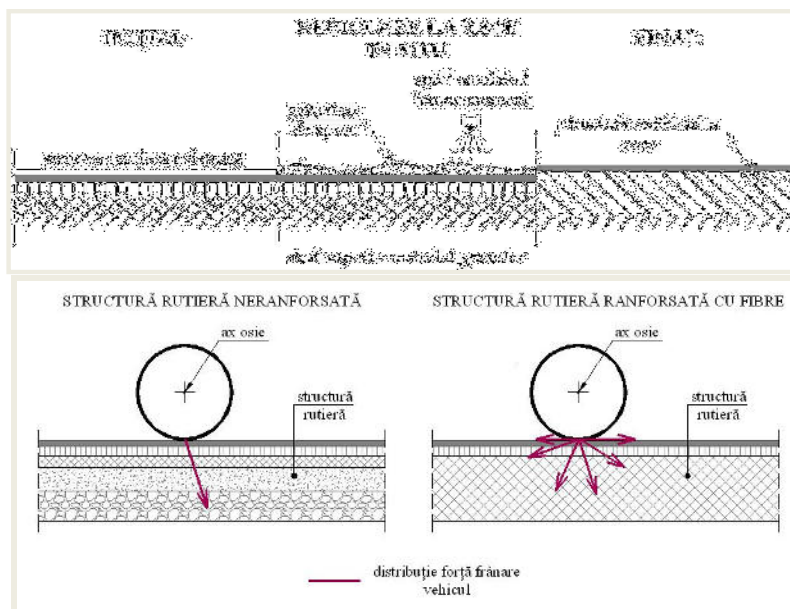


Fig. 6.7. Fazele reciclării și distribuția forței de frânare în structura rutieră

Evoluția tehnologică a adus după sine încercări de utilizare a unor materiale noi cu scop de armare, precum deșeurile din fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice, cu scopul de a obține performanțe cât mai bune ale structurilor reciclate, la costuri minime. Utilizarea tehnicii



de reciclare “*in situ*” este condiția obligatorie ce oferă posibilitatea realizării unor sisteme complexe de tipul agregate minerale – lianți – fibre – apă și îndeplinește condițiile de recuperare a unor componente din sistem, cum ar fi agregatele pe diferite tipuri de structuri rutiere și reciclare a altora cum sunt deșeurile din fibre de sticlă. Prezentăm mai jos câteva tipuri de structuri rutiere ce pot fi reciclate și armate dispers cu deșeuri din fibre de sticlă (Fig. 2.12.):

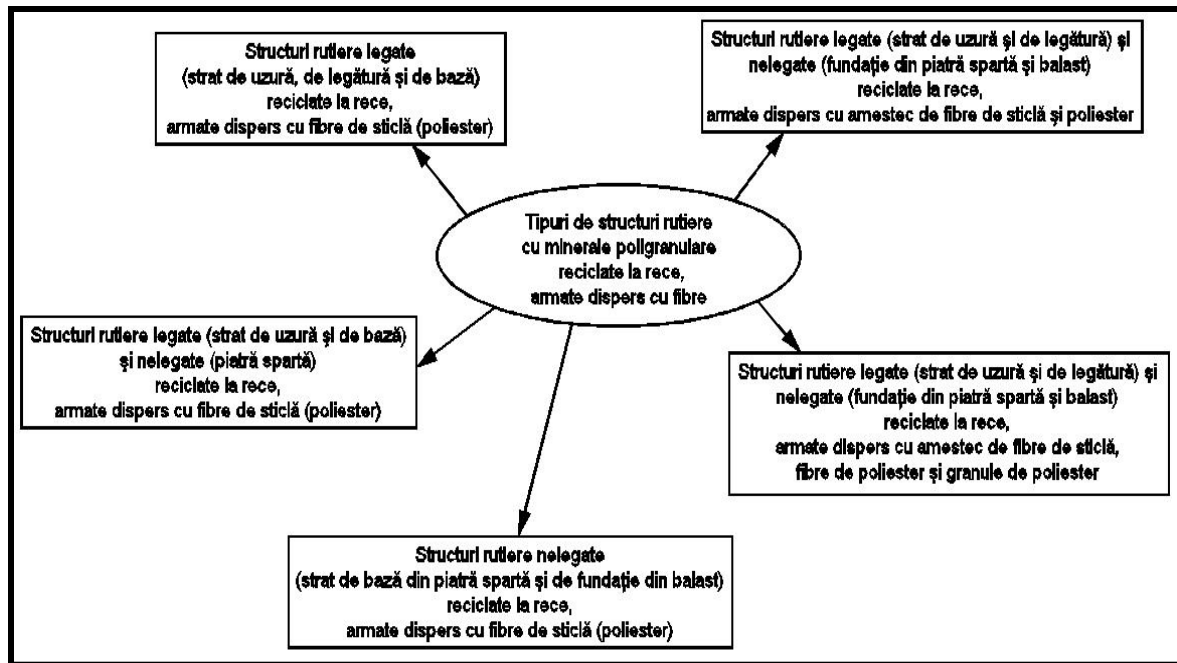


Fig. 6.8. Tipuri de sisteme rutiere cu minerale poligranulare ce pot fi reciclate și armate dispers cu fibre

Se poate observa la nivel național o creștere semnificativă a utilizării tehnologiilor de reciclare în cadrul lucrărilor de reabilitare/modernizare a drumurilor naționale și județene. Tehnologiile de reciclare au o pondere semnificativă și în țările dezvoltate unde infrastructura rutieră este puternic dezvoltată. Cu toate acestea, nici în țările dezvoltate și nici în România, reciclarea structurilor rutiere cu bitum spumat, ciment și armarea cu fibre nu a fost realizată până în prezent.

Utilizarea Tehnologiei de reciclare la rece cu bitum spumat, ciment și fibre este recomandată în funcție de:

- caracteristicile componentilor și dozajele acestora;
- detaliile tehnologice de execuție;
- condițiile de realizare;
- tehnologia de operare specifică utilajelor.



Rezistența și stabilitatea stratului rutier obținut prin reciclare la rece este în funcție de natura și compoziția granulometrică a materialului frezat, procentul de bitum spumat (3,5 - 5,5%), procentul de apă de adaos (5 - 15%), procentul de fier sau ciment (1,5 - 4,0%) și procentul de agregate de adaos (5 - 25 cm) strat echivalent, considerând adâncimea maximă de reciclare de 30 cm acceptată tehnologic.

### 6.1.3. Execuția lucrărilor de reciclare cu deșuri din fibre de sticlă

O etapă preliminară reciclării dar obligatorie, este studiul de laborator care se realizează pe carote și material frezat pentru stabilirea oportunității soluției de reciclare, a adâncimii și a omogenității sectorului, a granulozității și a umidității optime de compactare. Este imperios necesară încadrarea în domeniul de granulozitate specific tehnologiei (domeniul Rukel). Din amestecul reciclat se prelevează probe cilindrice cu  $d = 8$  cm, în vederea stabilirii caracteristicilor fizico-mecanice a stratului reciclat, funcție de conținutul de bitum și umiditatea amestecului.

Etapile de execuție a reciclării sunt:

- curățirea părții carosabile cu peria mecanică sau cu jet de aer;
- întinderea în fața reciclatorului a rolor din folie de polietilenă având stratul predozat de fibre sau deșuri din fibre de sticlă așternut în grosime constantă;
- așternerea stratului predozat de liant hidraulic (ciment);
- frezarea stratului existent ce urmează a fi reciclat (frezarea se realizează cu tamburii de frezare ai reciclatorului, eventual cu freze suplimentare în cazul materialelor dure), și adăugarea concomitentă a bitumului spumat (în valori ale procentului volumic cuprinse între 3,5 - 5,0%) și a apei (5-15%) predozate cu ajutorul sistemelor de dozare din componența reciclatoarelor de tip Wirtgen 2000, 2200, 2500;
- omogenizarea amestecului în camera de amestec sub acțiunea tamburului de mărunțire și amestecare pe care sunt montate cuțite speciale. La înaintarea reciclatorului, tamburul se rotește în sens invers acelor de ceasornic, sfărâmând materialul din structura rutieră existentă (Fig. 2.8.);
- așternerea și pre-compactarea materialului reciclat cu ajutorul grindei finisoare;
- reprofilarea cu autogrederul a materialului reciclat;
- compactarea finală a stratului reciclat;
- controlul compoziției granulometrice și a umidității materialelor (prin prelevarea de probelor de material frezat în timpul execuției).

O condiție esențială este asigurarea umidității optime de compactare care se calculează pornind de la valoarea umidității obținută cu încercarea Proctor modificat pe materialul frezat –  $[W]_{opt}$  (fără adaosul de spumă). După ce se pulverizează bitumul spumat peste acest amestec, se compactează stratul obținut și se acoperă cu un strat de mixtură asfaltică, după ce conținutul de apă a scăzut cu 25 – 30%.

Adâncimea de reciclare recomandată în acest caz este de 10 - 30 cm. Lățimea de lucru de referință este de 2,20 m, dar ea poate fi modificată în timpul execuției. Bitumul se injectează în camera de expansiune în stare fierbinte (170 - 180°C), iar în contact cu apa și aerul sub presiune, expandează, mărindu-și volumul de peste 8 ori și devenind bitum spumat. Are loc astfel:

- peliculizarea agregatelor din stratul rutier reciclat degradat, a celor din materialul de aport și adsorbția pe suprafața fibrelor a lianților introduși în masă odată cu omogenizarea întregului amestec;
- dispersia în masă a deșeurilor de fibre din sticlă peliculizate cu rășini poliesterice care vor îndeplini funcția de armare;
- adeziunea la interfață a componentelor sub acțiunea liantului;
- maturarea amestecului sub acțiunea “catalizatoare” a suspensiei de ciment în apă cu rol de “filer activ”.

Structura rutieră obținută va avea denumirea de Structură Rutieră Reciclată la Rece, Armată cu Fibre (S.R.R.R.A.F.) și va fi definită ca “amestec de materiale din structurile rutiere elastice reciclate la rece, cu adaos de agregate minerale de aport, ciment, bitum spumat și deșeuri din fibre de sticlă”.

Structura obținută va avea proprietăți mult îmbunătățite față de cele ale anrobatului bituminos de tip AB25, urmare a interacțiunii dintre fibre și agregate sub acțiunea puterii liante a bitumului, în prezența suspensiei apoase de ciment cu rol de “filer activ”.

## **6.2. Determinarea cantităților de lucrări cu ajutorul aplicației de proiectare drumuri „ADVANCED ROAD DESIGN”**

Cu ajutorul acestei aplicații au fost luate în studiu numai cantitățile de lucrări continue și omogene cu prețuri unitare similare pentru asigurarea corectitudinii analizei comparative a costurilor.

Alegerea variantei optime de reabilitare prin reciclare “*in situ*” cu bitum spumat, ciment și deșeuri din fibre de sticlă în dispersie pe sectorul experimental de drum județean DJ 109 lim. jud. Cluj – Dragu, între km: 39+700 – 40+080, are la bază mai multe criterii tehnico-economice ce

pot fi asociate după cum urmează:

- criteriu unic - ce constă în compararea variantelor de reabilitare pe baza unui singur criteriu, considerat preponderent și corespunzător scopului esențial urmărit;
- criterii parțiale - ce constă în compararea variantelor de reabilitare pe baza a două sau trei criterii selectate și corespunzătoare scopului esențial urmărit;
- criterii totale - ce constă în compararea variantelor cunoscute de reabilitare și selectarea celor corespunzătoare scopului esențial urmărit.

În cele ce urmează, am optat pentru simplificarea calculelor, la compararea variantelor de reabilitare pe baza unui singur criteriu, acesta fiind volumele de materiale transformate în cantități de lucrări care înmulțite cu prețuri unitare generează costuri totale atât în varianta clasică de reabilitare cât și în varianta de reabilitare prin reciclare “*in situ*” cu bitum spumat și fibre în dispersie.

La alegerea opțiunii de reabilitare a unui tronson de drum județean în lungime totală de 380 m, pe DJ 109 lim. jud. Cluj – Dragu, între km: 39+700 – 40+080 prin soluția clasică de ranforsare sau cu soluția de ranforsare prin reciclare la rece “*in situ*” cu bitum spumat, ciment și fibre în dispersie. La determinarea cantităților de lucrări am avut în vedere studiul comparativ realizat cu ajutorul aplicației de proiectare drumuri „**ADVANCED ROAD DESIGN**”. Pentru lucrările care sunt continue pe lungimea acestui tronson de drum (structura rutieră pe partea carosabilă, pe acostamente precum și șanțurile pe ambele părți ale drumului), vom realiza calcule de estimare a costurilor de reabilitare necesare la realizarea celor două soluții alternative propuse.

Celelalte categorii de lucrări care se realizează pe tronsonul de drum, dar nu sunt continue pe fiecare kilometru, de exemplu: podețe, poduri, semnalizări, ziduri de sprijin etc. vor fi excluse, datorită neomogenității structurii costurilor și imposibilității comparării acestora.

### **6.2.1. Scopuri**

Principalele scopuri urmărite sunt:

- reducerea costurilor de reabilitare pe drumuri naționale județene sau de interes local;
  - reducerea timpului de parcurs;
  - reducerea costurilor prin diminuarea consumului de carburanți;
  - creșterea capacității portante și a durabilității acestora;
  - reducerea nivelului de poluare a mediului.
-

### 6.2.2. Obiective de referință

Cele două obiective de referință ale analizei sunt:

- analiza dispersiei costurilor unitare pe categorii de lucrări în funcție de cantități determinate pe fiecare opțiune de reabilitare;
- reducerea costului total al investiției.

### 6.2.3. Configurația geometrică și caracteristicile tehnice ale drumului

Caracteristicile tehnice ale sectorului de drum sunt:

- lățimea părții carosabile: 2 benzi x 3,00 m;
- lățimea acostamentelor: 2 x 1,00 m;
- lățimea platformei drumului: 8,0 m;
- structura rutieră existentă: 7 cm straturi asfaltice degradate;  
20 – 30 cm amestec neomogen de piatră spartă și balast.

### 6.2.4. Situația proiectată

Pornim de la situația proiectată în care avem:

- elementele geometrice proiectate vor corespunde celor reglementate tehnic pentru un drum de clasa tehnică III, IV sau V, în funcție de nivelul traficului;
- realizarea unor suprafețe de rulare cu planeitate corespunzătoare;
- creșterea capacității portante corespunzător nivelului de trafic;
- păstrarea traseului existent cu caracteristicile următoare:
  - lățimea părții carosabile: 2 x 3,00 m;
  - lățimea acostamentelor: 2 x 1,00 m;
  - lățimea platformei drumului 8,0 m;
  - panta transversală a părții carosabile 2,5% simetric față de axa drumului;
  - panta transversală a acostamentelor 4%;
  - clasa de trafic ușor: nivel de trafic de 0,25 m.o.s. (milioane osii standard - 11.5 tone).

#### a) Structură rutieră propusă în varianta clasică de reabilitare:

- frezarea îmbrăcăminții pe grosime de cca. 7 cm;
- așternerea unui strat de balast în grosime de 20 cm;
- așternerea unui strat din piatră spartă în grosime de 15 cm;
- așternerea unui strat de legătură din beton asfaltic deschis (binder) cu grosime de

5 cm, de tip BAD 20;

- așternerea unui strat de uzură din beton asfaltic cu grosime de 4 cm, de tip BA 16;

- realizarea de șanțuri cu secțiune naturală 100%.

**b) Structură rutieră propusă în varianta de reabilitare prin reciclare “*in situ*” cu bitum spumat și fibre în dispersie:**

- reciclarea în profunzime a structurii rutiere pe grosime de cca. 15 cm cu bitum spumat, ciment și fibre, rezultând un material asimilat cu un anrobat bituminos de tip AB25;

- așternerea unui strat de legătură din beton asfaltic deschis (binder) cu grosime de 5 cm de tip BAD 20;

- așternerea unui strat de uzură din beton asfaltic, cu grosime de 5 cm, de tip BA 16;

- realizarea de șanțuri cu secțiune naturală 100%.

**6.3. Realizarea rapoartelor de volume pe picheți cu ajutorul “ADVANCED ROAD DESIGN”**

**6.3.1. Etapele de referință**

Etapele de referință sunt următoarele:

- stabilirea lungimii sectorului experimental de drum -  $L = 380$  m;

- generarea suprafeței de teren;

- crearea axului în plan și proiectarea planului de situație;

- proiectarea profilului longitudinal pe cele două tipuri de structuri (clasică și reciclată);

- aplicarea profilului transversal tip pe cele două tipuri de structuri (clasică și reciclată);

- generarea rapoartelor.

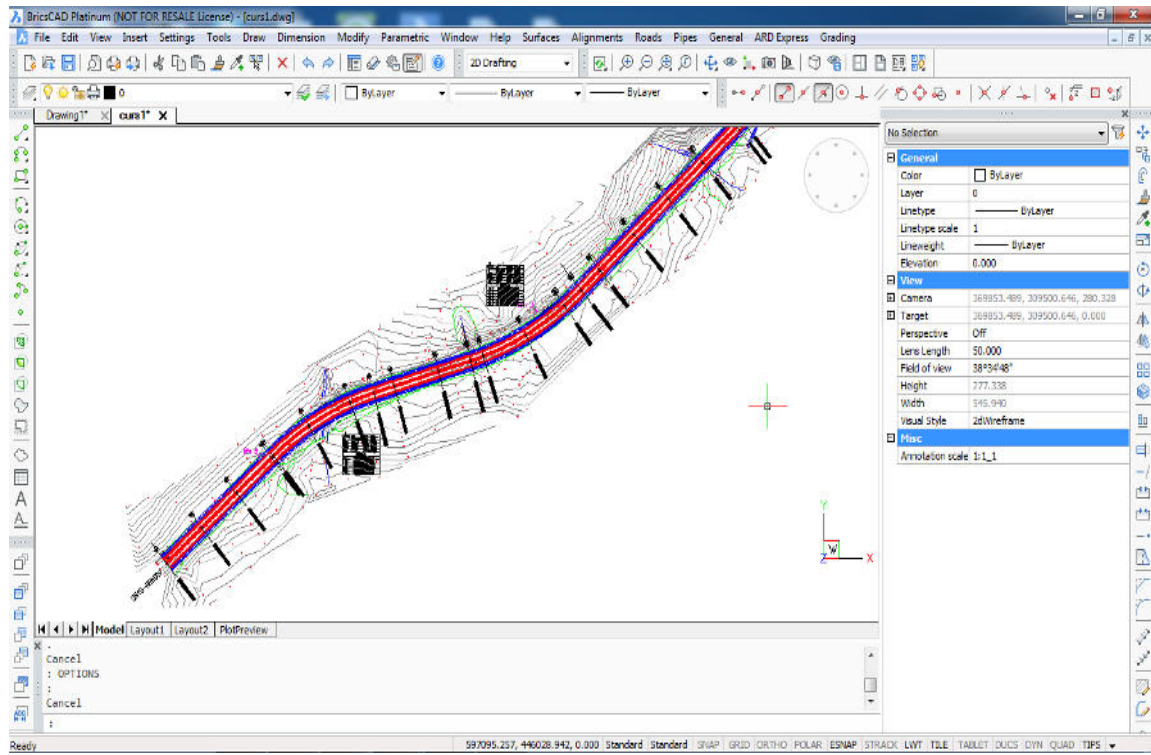


Fig. 6.9. Suprafața de teren cu axul în plan și planul de situație proiectat pentru o lungime prestabilită de drum

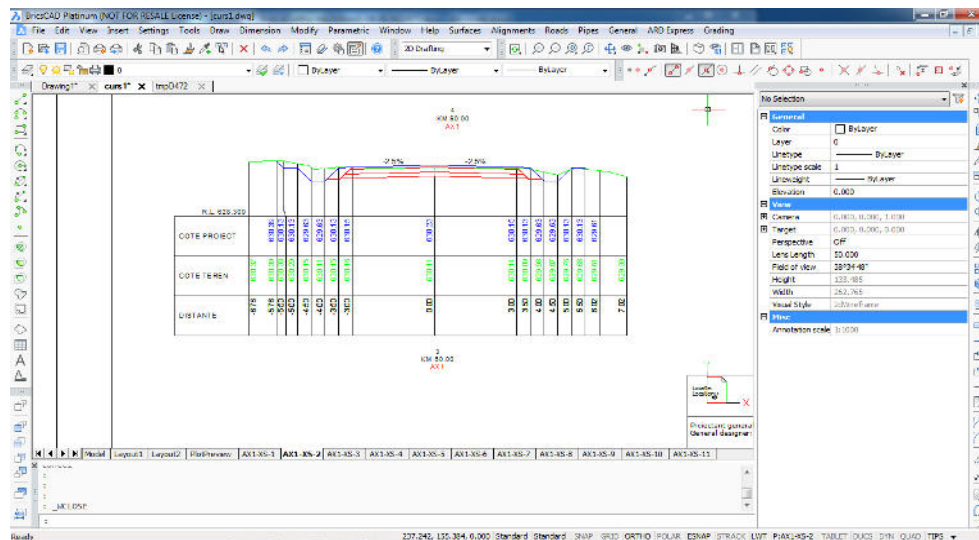


Fig. 6.10. Aplicarea profilului transversal tip pe structură reciclată în picheți prestabiliți

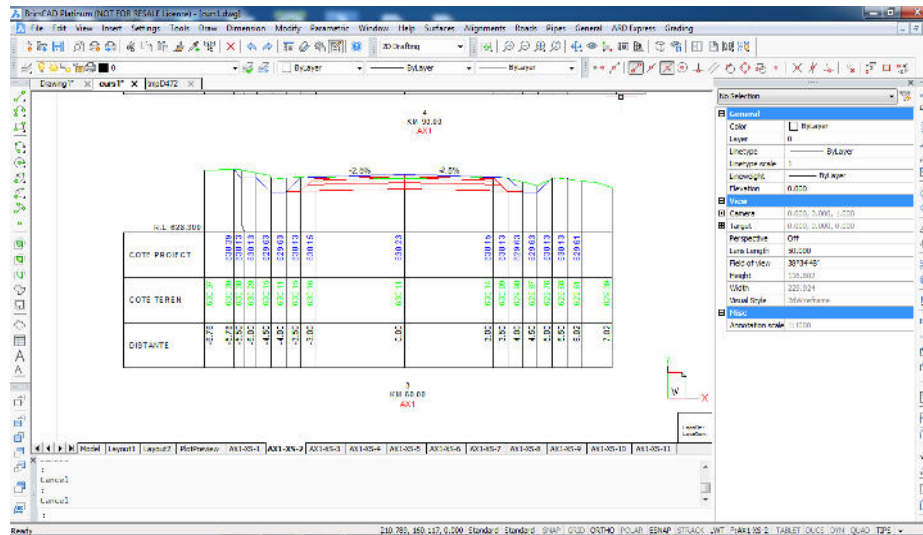


Fig. 6.11. Aplicarea profilului transversal tip pe structură clasică în picheți prestabiliți

### 6.3.2. Raportarea terasamentelor și a cantităților de materiale pe poziții kilometrice

Raportarea terasamentelor se face rulând comanda: (*Roads – Reports – Volumes*) în care se vor bifa toate cele 3 opțiuni și va rezulta un fișier complex ce cuprinde:

- cantitățile totale de terasamente;
- cantitățile de materiale pe poziții kilometrice și cantitățile totale de materiale.

Dacă se va bifa (*Section by Section report for Bulk Earthworks*) vor fi raportate volumele de terasamente pe poziții kilometrice.

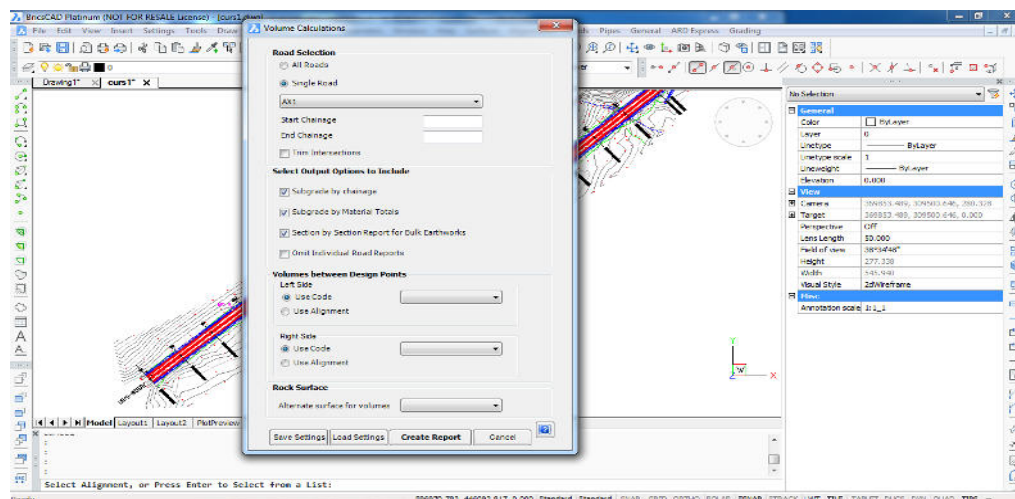


Fig. 6.12. Modul de aplicare a comenzii “Section by Section report for Bulk Earthworks”

Raportul se găsește și în format “numedrum-vol.txt” dar și în format .csv in folderul \*-Data – Temp. sub denumirea “CSVVolumes-numedrum.csv”. Din acest tabel vom extrage următoarele coloane de interes și vom cita astfel:

- KM1/arie săpătură 1 /volum săpătură 1 / arie umplutură 1/ volum umplutură 1 - care reprezintă arii și volume de săpături și umpluturi pe picheți, pentru varianta clasică (1) de reabilitare.

- KM2/arie săpătură 2 /volum săpătură 2 / arie umplutură 2 / volum umplutură 1 - care reprezintă arii și volume de săpături și umpluturi pe picheți, pentru varianta cu reciclare (2) de reabilitare.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

Fig. 6.13. Tabel reprezentând ariile și volumele de săpătură și umplutură

### 6.3.3. Raportarea materialelor pe poziții kilometrice în format “csv”

Pentru o mai ușoară utilizare a datelor corespunzătoare cantităților de materiale, se va rula comanda: “ARD Express – Sopecial Reports – Materials by Chainage”.

Acesta va genera următorul format de fișier pe poziții kilometrice:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

Fig. 6.14. Fișierul de date pentru structura proiectată în varianta clasică de reabilitare





În fereastra de mai jos vom putea exclude anumite materiale din raportarea finală (*Materials to exclude*).

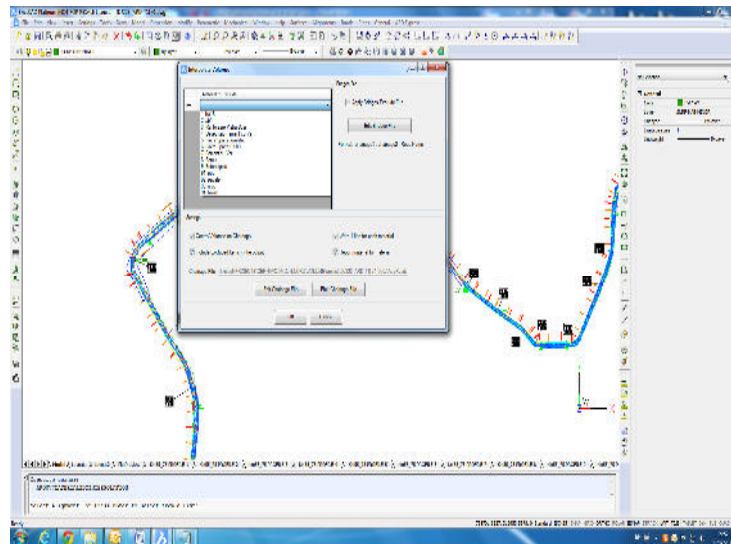


Fig. 6.17. Modul de aplicare a comenzii (*Materials to exclude*)

Se va edita un fișier cu pozițiile podurilor existente pe zona cărora vor fi scoase din calcul materialele corespunzătoare (*Apply Bridges Exclude File*).

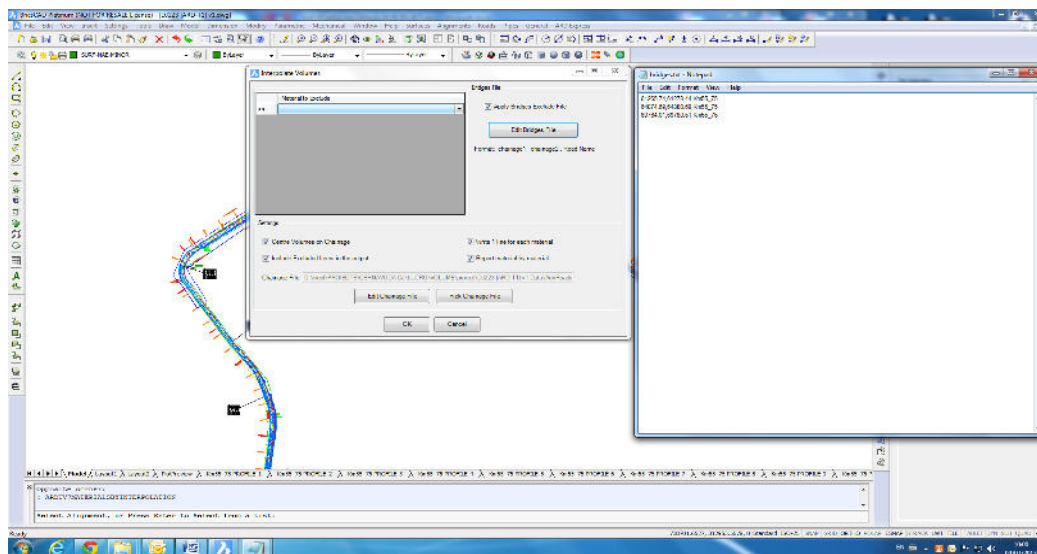


Fig. 6.18. Modul de aplicare a comenzii (*Apply Bridges Exclude File*)

De asemenea, pot fi raportate materialele pe picheti alegând fișierul de pichetare “numedrum - ProfileChNumber” ce se găsește în folderul “-Data”. Acest fișier a fost generat anterior cu comanda (*Roads – Multi Object Setout*) pentru afișarea pichetilor pe planul de situație.

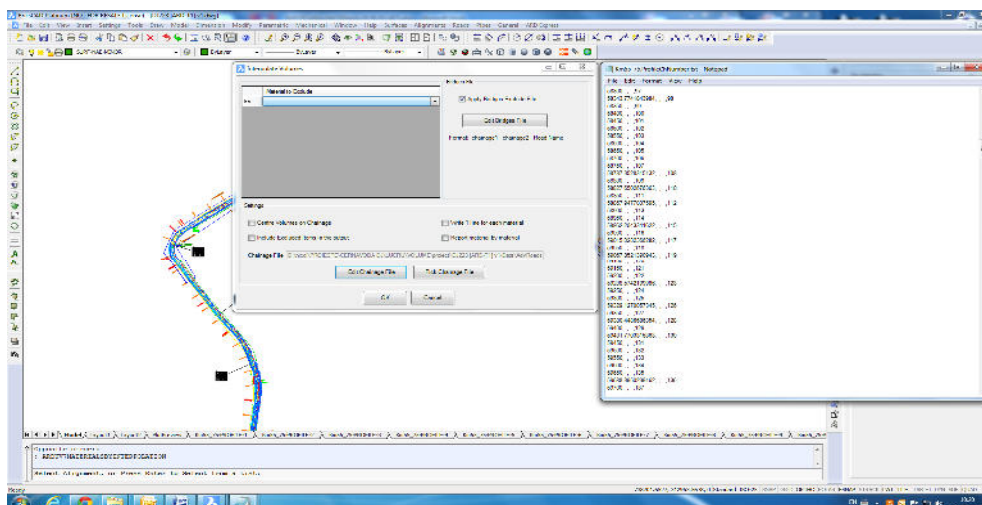


Fig. 6.19. Modul de aplicare a comenzii (numedrum - ProfileChNumber)

Se va alege fișierul (*numedrum - ProfileChNumber*) de la butonul (*Pick Chainage File*) ce va putea fi editat cu opțiunea (*Edit Chainage File*).

Va rezulta un fișier de volume cu denumirea “*numedrum-interpvols.txt*” în care raportarea este făcută pe pozițiile kilometrice corespunzătoare pichetilor.

#### 6.4. Reprezentarea datelor printr-o diagramă coloană

Datele aranjate în coloane vor fi reprezentate în diagrame de tip coloană – cilindru (Fig. 6.18, Fig. 6.19, Fig. 6.20). Acestea sunt grupate, nestratificate și reprezentate în 3-D. Diagramele coloană au fost utilizate pentru ilustrarea unor comparații pe diferite tipuri de materiale, reprezentate în valori absolute.

Seria de reprezentare include și etichetele coloanei cu valori pe tipuri de materiale din structurile rutiere în cele două variante de reabilitare.

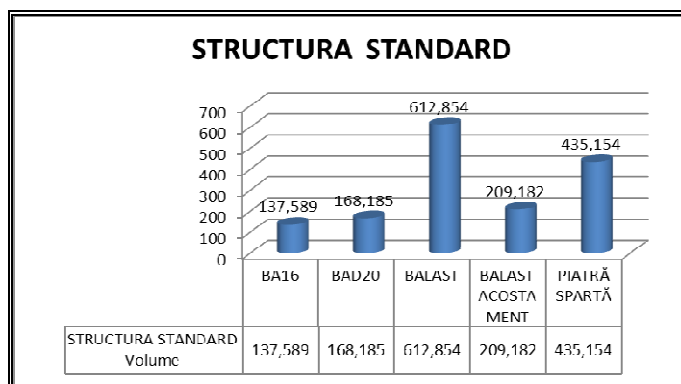


Fig. 6.20. Reprezentarea în diagrame de tip coloană-cilindru a materialelor pe tipuri în valori absolute pentru structura standard

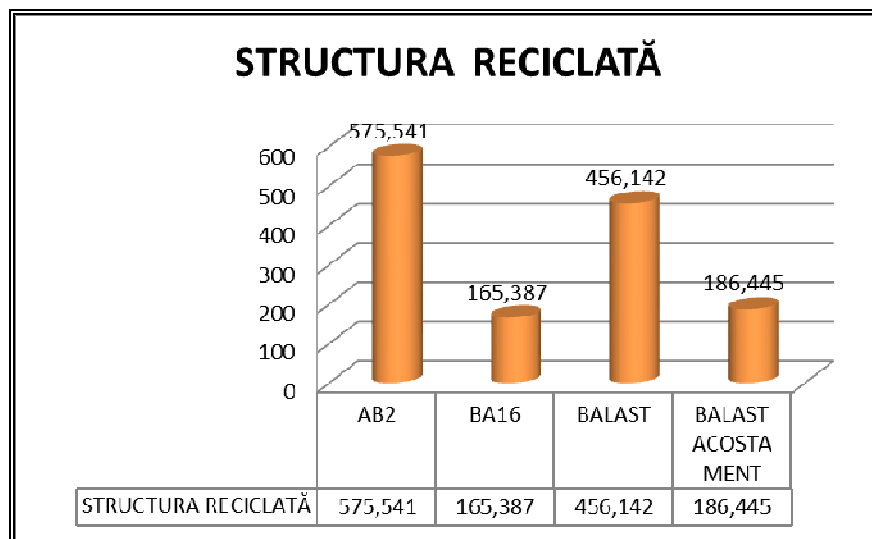


Fig. 6.21. Reprezentarea în diagrame de tip coloană-cilindru a materialelor pe tipuri în valori absolute pentru structura reciclată

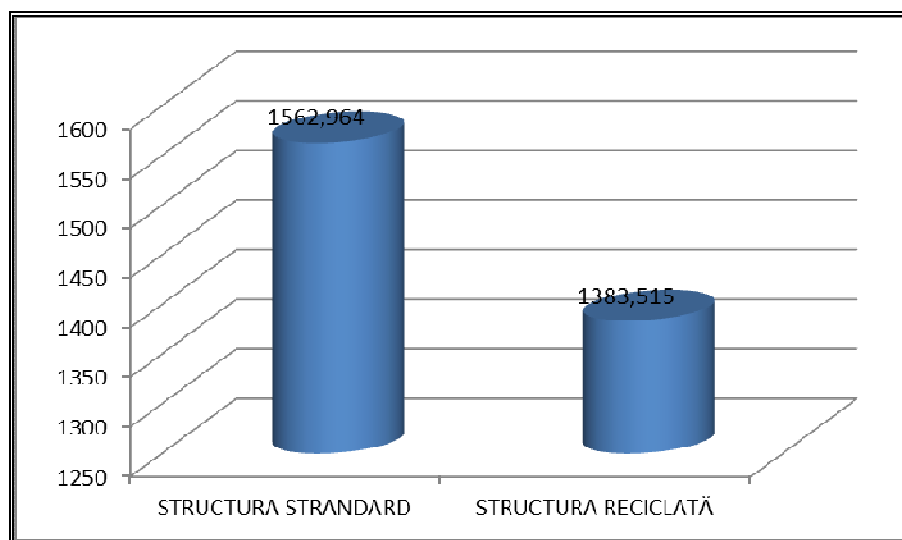


Fig. 6.22. Reprezentarea în diagrame de tip coloană-cilindru a cantităților totale de materiale pe tipuri de structuri

Diagramele de mai sus de tip coloană-cilindru în 3-D, afișează volumul total de materiale încorporate pe cele două tipuri de structuri.

Au fost luate în calcul trei alternative:

- fără investiție “Do nothing”, reprezintă alternativa în care nu se realizează nimic;
- alternativa în care se utilizează soluția clasică de reabilitare sub denumirea “structură rutieră propusă în varianta clasică de reabilitare”;

- alternativa în care se utilizează soluția de reabilitare sub denumirea “structură rutieră propusă în varianta de reabilitare prin reciclare “*in situ*” cu bitum spumat și deșeuri din fibre de sticlă în dispersie”.

Identificarea variantei optime de investiție se bazează pe comparația a două variante, cea clasică cu costuri operaționale și de mentenanță ridicate și o a doua utilizând soluția reciclării “*in situ*” cu bitum spumat, ciment și fibre în dispersie, având costuri mai mici de implementare și durabilitate sporită.

Varianta selectată este cea descrisă tehnic sub denumirea de “structură rutieră propusă în varianta de reabilitare prin reciclare “*in situ*” cu bitum spumat și fibre în dispersie” deoarece avantajele implementării acestei variante pe termen lung, arată recuperarea în timp mai scurt a costurilor cu investiția, iar impactul asupra mediului înconjurător este pozitiv prin utilizarea agregatelor existente și a deșeurilor de fibre de sticlă cu potential poluant. Analiza incrementală va urmări numai modificările datorate implementării proiectului față de varianta fără proiect.

Analiza financiară ce s-a realizat pe principiul incremental, presupune utilizarea a două scenarii întrucât există suficientă informație financiară pentru fiecare.

Vom calcula în scop strict comparativ numai costurile necesare realizării - **Investiției de bază** - pentru cele două scenarii:

- lucrări pe ampriza drumului și “structură rutieră propusă în varianta clasică de reabilitare”;
- lucrări pe ampriza drumului și “structură rutieră propusă în varianta de reabilitare prin reciclare “*in situ*” cu bitum spumat, ciment și fibre în dispersie”.

## **6.5. Calculul costurilor necesare realizării - Investiției de bază**

Alegerea opțiunii de reabilitare pentru drumuri din orice categorie de importanță se bazează pe calculul costurilor estimative pe diverse variante tehnologice de lucru. În acest sens, vor exemplifica mai jos, două variante de calcul a costurilor pentru reabilitarea drumului județean DJ 109 lim. județ Cluj – Dragu care au stat la baza selectării opțiunii de reabilitare a drumului.

### **6.5.1. Calculul costurilor necesare realizării - Investiției de bază - pentru lucrări pe ampriza drumului și “structură rutieră propusă în varianta clasică de reabilitare”**

Calculul pentru varianta clasică de reabilitare este evidențiat în tabelul de mai jos:

**Tabelul 6.1. Calculul costurilor pe cantități de lucrări în varianta clasică de reabilitare a drumului DJ 109 lim. județ Cluj – Dragu – tronson din sectorul experimental km: 39+700 - 40+080**

1	1. TERASAMENTE					
Aducere la profil	Suprafata [ml]	Pret/mp[Lei]	Total[Lei]			
			0			
Santuri de pamant	Lungime [ml]	Pret/ml[Lei]	Total[Lei]			
	380,00	5,05	1.919,00			
Sapatura	Lungime [ml]	Parti	Latime[ml]	Grosime[ml]	Pret/mc[Lei]	Total[Lei]
	190,00	2	6,00	0,37	21,00	17.667,72
Umplutura	Lungime [ml]	Parti	Latime[ml]	Grosime[ml]	Pret/mc[Lei]	Total[Lei]
	190,00	2	6,00	0,14	15,00	4.924,80
Casete	Lungime [ml]	Parti	Latime[ml]	Grosime[ml]	Pret/mc[Lei]	Total[Lei]
						0,00
Trepte de infratire	Lungime [ml]	Parti	Latime[ml]	Grosime[ml]	Pret/mc[Lei]	Total[Lei]
						0,00
Strat de balast pe acostament	Lungime [ml]	Parti	Latime[ml]	Grosime[ml]	Pret/mc[Lei]	Total[Lei]
	380,00	2	1,00	0,25	37,00	7.030,00
Strat de piatra sparta pe acostament	Lungime [ml]	Parti	Latime[ml]	Grosime[ml]	Pret/mc[Lei]	Total[Lei]
	380,00	2	1,00	0,19	71,00	10.252,40
	<b>TOTAL</b>					<b>41.793,92</b>
1	2. SUPRASTRUCTURA					
Balast pentru reprofilare	Lungime [ml]	Latime[ml]	Grosime[ml]	Pret/mc[Lei]		Total[Lei]
						0,00
Strat de balast	Lungime [ml]	Latime[ml]	Grosime[ml]	Pret/mc[Lei]		Total[Lei]
	380,00	6,00	0,20	41,00		18.696,00
Strat de piatra sparta	Lungime [ml]	Latime[ml]	Grosime[ml]	Pret/mc[Lei]		Total[Lei]
	380,00	6,00	0,15	77,00		26.334,00
Piatra sparta pentru reprofilare	Lungime [ml]	Latime[ml]	Grosime[ml]	Pret/mc[Lei]		Total[Lei]
						0,00
Strat de baza	Lungime [ml]	Latime[ml]	Grosime[ml]	Densitate [to/mc]	Pret/to	Total[Lei]
	380,00	6,00	0,05	2,3	330,00	86.526,00
Strat de legatura	Lungime [ml]	Latime[ml]	Grosime[ml]	Densitate [to/mc]	Pret/to	Total[Lei]
						0,00
Uzura	Lungime [ml]	Latime[ml]	Grosime[ml]	Densitate [to/mc]	Pret/to	Total[Lei]
	380,00	6,00	0,04	2,35	410,00	87.871,20
	<b>TOTAL</b>					<b>219.427,20</b>

<b>TERASAMENTE</b>	<b>41,794</b>	<b>41.793,92</b>
Aducere la profil	0,000	0,00
Santuri de pamant	1,919	1.919,00
Sapatura	17,668	17.667,72
Umplutura	4,925	4.924,80
Casete	0,000	0,00
Trepte de infratire	0,000	0,00
Strat de balast pe acostament	7,030	7.030,00
Strat de piatra sparta pe acostament	10,252	10.252,40
<b>SUPRASTRUCTURA</b>	<b>219,427</b>	<b>219.427,20</b>
Balast pentru reprofilare	0,000	0,00
Strat de balast	18,696	18.696,00
Strat de piatra sparta	26,334	26.334,00
Piatra sparta pentru reprofilare	0,000	0,00
Strat de baza	86,526	86.526,00
Strat de legatura	0,000	0,00
Uzura	87,871	87.871,20
<b>TOTAL</b>	<b>266,146</b>	<b>266.145,92</b>

**6.5.2. Calculul costurilor necesare realizării - Investiției de bază - pentru lucrări pe ampriza drumului și “structură rutieră propusă în varianta de reabilitare prin reciclare “in situ” cu bitum spumat, ciment și fibre în dispersie”**

În varianta a doua de calcul a costurilor a fost abordată o estimare privind cantitățile de lucrări și prețurile materialelor utilizate la tehnologia de reciclare la rece “in situ” cu bitum spumat și deșeuri din fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliestrice în dispersie.

**Tabelul 6.2. Calculul costurilor pe cantități de lucrări în varianta de reabilitare prin reciclare a DJ 109 lim. județ Cluj – Dragu – tronson din experimental km: 39+700 - 40+080**

2	1. TERASAMENTE					
Aducere la profil	Suprafata [ml]	Pret/mp[Lei]	Total[Lei]			
			0			
Santuri de pamant	Lungime [ml]	Pret/ml[Lei]	Total[Lei]			
	380,00	5,05	1.919,00			
Sapatura	Lungime [ml]	Parti	Latime[ml]	Grosime[ml]	Pret/mc[Lei]	Total[Lei]
						0,00
Umplutura	Lungime [ml]	Parti	Latime[ml]	Grosime[ml]	Pret/mc[Lei]	Total[Lei]
						0,00
Casete	Lungime [ml]	Parti	Latime[ml]	Grosime[ml]	Pret/mc[Lei]	Total[Lei]
						0,00
Trepte de infratire	Lungime [ml]	Parti	Latime[ml]	Grosime[ml]	Pret/mc[Lei]	Total[Lei]
						0,00

<b>Strat de balast pe acostament</b>	Lungime [ml]	Parti	Latime[ml]	Grosime[ml]	Pret/mc[Lei]	Total[Lei]
	380,00	2	1,00	0,25	37,00	<b>7.030,00</b>
<b>Strat de piatra sparta pe acostament</b>	Lungime [ml]	Parti	Latime[ml]	Grosime[ml]	Pret/mc[Lei]	Total[Lei]
	380,00	2	1,00	0,19	71,00	<b>10.252,40</b>
	<b>TOTAL</b>					<b>19.201,40</b>
<b>2</b>	<b>2. SUPRASTRUCTURA</b>					
<b>Balast pentru reprofilare</b>	Lungime [ml]	Latime[ml]	Grosime[ml]	Pret/mc[Lei]		Total[Lei]
						<b>0,00</b>
<b>Strat de balast</b>	Lungime [ml]	Latime[ml]	Grosime[ml]	Pret/mc[Lei]		Total[Lei]
						<b>0,00</b>
<b>Strat de piatra sparta</b>	Lungime [ml]	Latime[ml]	Grosime[ml]	Pret/mc[Lei]		Total[Lei]
						<b>0,00</b>
<b>Piatra sparta pentru reprofilare</b>	Lungime [ml]	Latime[ml]	Grosime[ml]	Pret/mc[Lei]		Total[Lei]
						<b>0,00</b>
<b>Asimilat AB25 + fibre de sticlă</b>	Lungime [ml]	Latime[ml]	Grosime[ml]	Densitate [to/mc]	Pret/to	Total[Lei]
	380,00	6,00	0,15	23	90,00	<b>707.940,00</b>
<b>Strat de legatura</b>	Lungime [ml]	Latime[ml]	Grosime[ml]	Densitate [to/mc]	Pret/to	Total[Lei]
						<b>0,00</b>
<b>Uzura</b>	Lungime [ml]	Latime[ml]	Grosime[ml]	Densitate [to/mc]	Pret/to	Total[Lei]
	380,00	6,00	0,06	2,35	410,00	<b>131.806,80</b>
	<b>TOTAL</b>					<b>839.746,80</b>
<b>TERASAMENTE</b>			<b>19,201</b>			<b>19.201,40</b>
Aducere la profil				0,000		0,00
Santuri de pamant				1,919		1.919,00
Sapatura				0,000		0,00
Umplutura				0,000		0,00
Casete				0,000		0,00
Trepte de intrare				0,000		0,00
Strat de balast pe acostament				7,030		7.030,00
Strat de piatra sparta pe acostament				10,252		10.252,40
<b>SUPRASTRUCTURA</b>			<b>839,747</b>			<b>839.746,80</b>
Balast pentru reprofilare				0,000		0,00
Strat de balast				0,000		0,00
Strat de piatra sparta				0,000		0,00
Piatra sparta pentru reprofilare				0,000		0,00
Asimilat AB 2 + fibre de sticlă				707,940		707.940,00
Strat de legatura				0,000		0,00
Uzura				131,807		131.806,80
<b>TOTAL</b>				<b>858,948</b>		<b>858.948,20</b>



### **6.6. Beneficii economice**

Principalele beneficii economice ale implementării proiectului, prin aplicarea soluției “structură rutieră propusă în varianta de reabilitare prin reciclare “*in situ*” cu bitum spumat, ciment și fibre în dispersie” sunt:

- reducerea costurilor cu 20,55% față de aplicarea soluției “structură rutieră propusă în varianta clasică de reabilitare”;
- reducerea timpului de realizare a investiției cu până la 70%;
- reducerea costurilor de mediu prin reciclarea materialelor granulare și a deșeurilor de fibre de sticlă.

### **6.7. Concluzii privind aplicațiile practice ale tehnologiei cu bitum spumat, ciment și fibre în dispersie**

Sintetizând datele putem afirma că utilizarea soluției “structură rutieră propusă în varianta de reabilitare prin reciclare “*in situ*” cu bitum spumat, ciment și fibre în dispersie” aduce următoarele avantaje:

- tehnologia nu este agrementată sau standardizată iar aplicarea soluției de reciclare “*in situ*” cu bitum spumat, ciment și fibre în dispersie cu proceduri specifice duce la avantaje semnificative tehnico-economice și de mediu;
- din analiza datelor, observăm că elementul critic ce diferențiază cele două alternative de reabilitare prezentate anterior, este volumul de materiale necesare realizării lucrărilor care generează costuri, acestea fiind semnificativ mai mici în cazul reciclării “*in situ*” cu bitum spumat, ciment și fibre în dispersie;
- în condițiile variate de aplicare a soluției s-a obținut în final un strat în structura rutieră cu capacitatea portantă proiectată;
- analiza costurilor pe cele două alternative de reabilitare, prezintă reduceri semnificative ale acestora, în cazul reciclării, pe toate categoriile de lucrări.

## CAPITOLUL 7

### ***CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE, PERSPECTIVE ȘI DIRECȚII DE CERCETARE***

#### **7.1. Concluzii**

Performanța propusă pentru structurile rutiere reciclate la rece “*in situ*” cu bitum spumat și deșeuri din fibre de sticlă în dispersie este aceea că acestea trebuie să aibă capacitatea de a suporta încărcările de trafic, transmițându-le straturilor rutiere inferioare și terenului de fundare al drumului, fără producerea de fisuri și deformații permanente. Ranforsările cu fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice a structurilor rutiere reciclate la rece au ca scop final sporirea considerabilă a capacității portante a structurilor rutiere fără adăugarea de straturi suplimentare.

La noi în țară nu s-au înregistrat până în prezent preocupări privind această tehnologie de reciclare.

Opțiunea de consolidare a unui drum prin reciclare și alegerea momentului optim de intervenție sunt decizii care pot fi luate în urma analizelor de laborator a materialelor existente în structura rutieră și a determinărilor privind degradările de tip structural ce trebuie efectuate în teren.

Caracteristicile acestor tipuri de structuri pot fi impuse prin calcule de dimensionare ce pornesc de la solicitările de trafic, durata de viață reziduală a straturilor rutiere existente și tipurile de straturi bituminoase ce vor fi așternute în vederea protecției și sporirii capacității portante.

A fost abordată și problema dozajului de fibre prin calcule, care ulterior au fost confirmate prin realizarea sectoarelor experimentale, punându-se bazele constituirii unui criteriu suplimentar de dimensionare ce trebuie avut în vedere la proiectarea acestor categorii de structuri. A fost determinată prin calcule și influența adăugării de fibre ca material de umplură asupra capacității portante a acestor tipuri de structuri rutiere.

În prezenta lucrare au fost abordate problemele privind stările de tensiune axial simetrice ce apar în zonele de interfață bimaterial și trimaterial (agregate – fibre, agregate – lianți – fibre) pentru stabilirea răspunsului la întrebările privind compatibilitatea componentelor din sistemul polizafic reciclat.

De asemenea, au fost realizate analize cu ajutorul microscopiei de înaltă performanță care au evidențiat atât compatibilitatea structurală între fibre și reciclat, cât și modul în care acestea

---

își îndeplinesc funcția de armare. Concluzia ce se poate desprinde este aceea că utilizarea deșeurilor din fibre de sticlă în dispersie la ranforsarea structurilor rutiere reciclate la rece cu bitum spumat duce la îmbunătățirea proprietăților fizico-mecanice a acestora, a comportării în exploatare și crește rezistența la transmiterea fisurilor urmate de degradarea lor ireversibilă.

Conceptul de reciclare a diverșilor componenți a dus la stabilirea diferenței de costuri pentru reabilitare între varianta clasică comparativ cu cea prin reciclare și la recomandarea de a alege varianta optimă de intervenție din punct de vedere tehnico-economic, adică cea prin reciclare.

## **7.2. Concluzii privind siguranța în exploatare a drumurilor reabilite prin reciclare**

Gradul de siguranță al unei structuri rutiere nu depinde numai de dimensionarea acesteia la proiectare ci și de particularitățile metodei de calcul, evaluarea corectă a zestrei existente, condițiile de execuție (materiale, tehnologii), condițiile de exploatare, precum și datorită modificării în timp a caracteristicilor de mediu.

Studiul siguranței rutiere și a durabilității drumurilor conduce la concluzia că nu pot fi estimate integral condițiile ce determină comportarea acestora pe durata de utilizare.

Gradul de risc acceptat, exceptând greșelile în execuție, se datorează unor evenimente imprevizibile datorate proiectării sau exploatării necorespunzătoare.

Aprecierea performanțelor drumului trebuie să țină cont de faptul că particularitățile de comportare în sistemul real de aplicare al încărcărilor și apariția deformațiilor sunt legate de conlucrarea spațială a elementelor structurale, proprietățile reologice ale lianților modelate matematic deocamdată aleatoriu [26].

Studiul comportării drumurilor aflate în exploatare arată că durabilitatea lor se reduce în timp față de cea estimată fiind influențată de numeroși parametri necunoscuți în fazele inițiale de proiectare (greutatea pe osie, datele de trafic etc.).

În prezent, se recunoaște faptul că, la un anumit moment  $t_n$  al existenței unui drum, acesta are un nivel de siguranță diferit de cel preconizat, mai ales dacă nu se acționează în sensul reducerii efectelor negative, degradante.

Reducerea siguranței în exploatare este cauzată de:

- erorile în execuție și exploatare;
- condițiile de mediu;
- suprasolicitările accidentale.

Accentuarea gravității și ireversibilității degradărilor de structura rutieră poate avea loc și

---

ca urmare a neasigurării unei protecții primare în etapele de execuție sau chiar renunțarea nejustificată la aplicarea acestora.

Lucrările de întreținere și reparații curente neefectuate sau întârziate riscă să aibă consecințe grave și să genereze cheltuieli exagerate.

Analiza stării de degradare a drumurilor pe întreaga durată de serviciu se face ținând cont de condițiile de realizare și exploatare pe o lungă perioadă de timp, cum ar fi:

- riscul seismic;
- calitatea materialelor de construcții;
- lipsa unui sistem riguros de asigurare a calității lucrărilor;
- exploatarea nerațională a unor drumuri sau sectoare de drum peste limita luată în considerare în faza de proiectare.

Pentru structurile rutiere reciclate la rece “*in situ*” cu bitum spumat și armate dispers cu deșeuri din fibre de sticlă în dispersie, diminuarea durabilității este produsă de fenomenul de degradare chimică și ruperea fibrelor cu funcție de armare, ce apare atât sub influența agenților chimici cât și sub acțiunea cuțitelor reciclatorului.

Procesul de coroziune al fibrelor este însoțit de:

- reducerea diametrului fibrelor și a funcției lor de armare;
- reducerea capacității portante a structurii rutiere;
- apariția microfisurilor în vecinătatea fibrelor provocată de reducerea forțelor liante între sistemul reciclat și fibre.

Acest proces are loc în lanț, astfel:

- atacul chimic al fibrelor cu acumularea de noi produși (silicați de Ca sau Mg), cu creștere de volum;
- reducerea secțiunii fibrelor;
- ruperea parțială a fibrelor în diverse secțiuni;
- apariția microfisurilor;
- continuarea degradărilor și apariția fisurilor;
- fisurarea și desprinderea totală pe zone izolate a structurii.

În țara noastră, acțiunea alunecărilor de teren ce antrenează corpul drumului constituie factorul natural cel mai important de degradare a drumurilor, prin mărimea teritoriului afectat, intensitate și frecvență de apariție.

### 7.3. Contribuții personale

Contribuțiile personale ale autorului sunt următoarele:

- definește, analizează și confirmă experimental pentru prima dată în România, posibilitatea utilizării deșeurilor din fibră de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice la reciclarea structurilor rutiere degradate;
- elaborează un model de calcul pentru dozarea deșeurilor din fibre de sticlă utilizate în tehnologia de reciclare la rece “*in situ*” cu bitum spumat și ciment în suspensie, realizată cu ajutorul reciclatorului Wirtgen 2200;
- inițiază aplicarea pentru prima dată în România a tehnologiei de dozare a deșeurilor din fibre de sticlă în straturi uniforme determinate prin calcule de dozaj, așternute pe folie de polietilenă și fixate cu rășini poliesterice în colaborare cu furnizorul S.C. Fibrex Co S.R.L.;
- realizează pentru prima dată o analiză structurală a materialului reciclat și armat dispers cu deșeurii din fibre de sticlă prin scanare cu ajutorul microscopului electronic “Jeol – JSM – 5510 LV”;
- identifică și definește pentru prima dată diverse tipuri de armare dispersă apărute în materialul reciclat, ce sunt realizate de fibre sau de fascicule de fibre, precum și defectele de armare;
- realizează sectoare experimentale pe drumul județean DJ 109, limita județ Cluj – Dragu și pe drumul comunal DC 4 A în localitatea Șamșud – județul Sălaj;
- efectuează determinări specifice pe anrobatul obținut prin aplicarea tehnologiei reciclării la rece, cu adaos din fibre de sticlă;
- formulează clar concluzii pe baza observațiilor experimentale și a determinărilor de laborator realizate pe probele prelevate, care pot conduce la agrementarea acestui tip de material reciclat și la aplicarea tehnologiei de reciclare “*in situ*” cu bitum spumat și deșeurii din fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice în dispersie.

### 7.4. Perspective și direcții de cercetare

Armarea dispersă a diverselor materiale de construcții cu fibre capabile să absoarbă energia generată de forțele deformatoare dinamice sau statice nu mai este o noutate. Este de actualitate însă preocuparea pentru consolidarea betoanelor cu fibre din metal sau din sticlă cu scopul de a dezvolta o alternativă la armarea dispersă cu fibre de azbest care a fost utilizată în

---

trecut pe scară largă.

În ceea ce privește aplicațiile armării disperse în fabricarea de materiale compozite, utilizarea fibrelor sintetice este în mare parte reglementată atât pe considerente de tehnice cât și economice. Această lucrare prin aplicațiile realizate recent dechide posibilitatea realizării armării disperse cu fibre de sticlă sau deșeuri din fibre de sticlă a structurilor rutiere reciclate la rece cu bitum spumat și ciment. Potențialul de dezvoltare al acestei tehnologii este unul promițător din ambele punctele de vedere, atât al performanței tehnice cât și al celei economice.

Luând act de această realizare credem că este de interes, pentru cei din acest domeniu, evaluarea și dezvoltarea conceptului armare dispersă cu fibre de înaltă rezistență a structurilor rutiere reciclate. Subiectul nu a cunoscut o abordare în literatura de specialitate în ultimul deceniu. Romualdi și Batson [67] au arătat că există în mecanica ruperii betoanelor armate dispers cu fibre o dependență între distanța dintre fibre și geometria dispunerii lor și că atunci când sunt încorporate în beton, fibre cresc atât rigiditatea acestuia cât și valoarea tensiunilor la care apar primele fisuri. Acest efect are o explicație diferită, formulată de Aveston, Cooper și Kelly [67]. Aceștia afirmă ca acest efect se datorează unei cantități mai mici de energie deformatoare eliberată de sistem atunci când diametrul fibrelor este foarte mic iar fracția de volum fibre este constantă. Cele mai multe lucrări în domeniu afirmă că eficiența armării cu fibre în dispersie a compozitelor este dependentă de aspectul, lungimea, forma și orientarea acestora.

Puterea de legătură interfacială a fibrelor cu ceilalți componenți ai sistemului sub acțiunea liantului a fost analizată la nivel microscopic și macroscopic în această lucrare din considerente practice, cum ar fi: compatibilitatea fibrelor cu ceilalți componenți ai sistemului, dozajul de fibre necesar îndeplinirii funcției de armare, degradarea fibrelor sub acțiunea cuțitelor reciclatorului și a altor factori de mediu.

Vom arăta mai jos trei posibile direcții majore de cercetare în acest domeniu:

A. Elaborarea de studii și cercetări privind eficiența armării cu fibre în dispersie a structurilor rutiere degradate reciclate la rece “*in situ*” cu bitum spumat și ciment pornind de la următoarele considerații:

- Asigurarea dozajului optim de fibre în materialul reciclat.

Această problemă în prezent este doar parțial rezolvată prin mai multe tehnici între care cea utilizată de S.C. FIBREX Co S.R.L. Crasna, județul Sălaj și prezentată în Capitolul 2 al lucrării. Cu toate acestea nu s-a atins valoarea optimă a procentului de fibre, asociată cu fenomenul de rupere al acestora în procesul tehnologic de reciclare. Deficiențele tehnologiei de dozare și încorporare în reciclat a fibrelor împiedică atingerea concentrațiilor optime astfel încât

apar în zone izolate ale structurii rutiere reciclate cu fibre zone cu concentrații ridicate de fibre asociate cu diminuarea rezistențelor acestuia sau zone izolate fără fibre cu funcție de armare. Considerăm că este necesară dezvoltarea și îmbunătățirea soluțiilor de dozare a fibrelor prin mai multe tehnici încă neaplicate în practică.

- Metodele sunt găsite pentru valorificarea rezistențelor mari la rupere a fibrelor.

Acestea au fost abordate în lucrare dar ele trebuie îmbunătățite prin identificarea multitudinii forțelor de extragere, de rupere ce acționează asupra fibrelor ce duc până la efectul de smulgere și anularea funcției de micro-armare. Abordarea analitică realizată în Capitolul 3, bazată pe prezumția că mecanismul de fisurare poate fi descris de o ecuație, trebuie confirmată în viitor de alte rezultate experimentale.

- Comportarea reciclatului cu fibre de sticlă în dispersie după apariția fisurilor și timpul de utilizare rămas până la cedarea completă este o altă posibilă direcție de cercetare în acest domeniu.

Pornind de la ceea se știe în prezent despre fibre, faptul că acestea întârzie fenomenul de apariție a fisurilor și cresc durata de utilizare a reciclatului după apariția fisurilor în sistem o altă direcție de cercetare poate fi în viitor studierea legăturii între lungimea fibrelor, modul de înglobare a acestora în reciclat, tipul de liant și caracteristicile agregatelor și durata perioadei de post-fisurare și a celei de cedare completă.

- Studiul efectului de ranforasare cu fibre al reciclatului observat experimental.

O altă direcție de cercetare poate fi studiul variațiilor morfologice ale sistemului cu particulele din rășini poliesterice disperse ce au legături ale rețelelor lor interioare de tip elastomeric. De asemenea, trebuie elucidat efectul de umplere a golurilor potențial generatoare de microfisuri, cu aceste particule, însoțit de diminuarea efectului de microfisurare în materialul reciclat.

- Aglomerarea fibrelor în fascicule în materialul reciclat.

Acest fenomen a fost identificat pe probele prelevate pe toată perioada realizării sectoarelor experimentale cu ajutorul determinărilor optice realizate cu microscopul electronic. Cauzele apariției acestor aglomerări și efectelele lor merită studiate în viitor.

- Apariția de tensiuni reziduale în reciclat datorate variațiilor termice.

Determinarea coeficienților de contracție sau expansiune ai reciclatului supus la fenomenul îngheț-dezghet sau la temperaturi extreme este o altă direcție posibilă de cercetare. Se știe că aceste fenomene sunt responsabile de apariția tensiunilor reziduale ce rămân în structurile rutiere reciclate după maturare.

---

- Adeziunea la interfața bimaterial, liant – fibre.

Atât în această lucrare cât și în literatura de specialitate se acordă o atenție specială efectului adeziunii la interfață între componente [32]. În ingineria este necesară reinterpretarea noțiunilor de adeziune bună sau slabă într-o realitate în care mecanismul de transmitere a tensiunilor la interfață este extrem de complex, fiind necesară o diferențiere între tensiunile normale active la interfață și tensiunile tangențiale. Putem începe studiul acestui fenomen de la faptul evident că în lipsa adeziunii, la o tensiune foarte mică aplicată sistemului are loc desprinderea fibrei la interfață, eforturile nu mai pot fi preluate de aceasta și are loc formarea de goluri potențial generatoare de degradări.

- Fenomene fizico-chimice la suprafața de separare a componentelor.

Umectarea corespunzătoare a suprafeței fibrelor este condiția necesară pentru obținerea unei bune adezivități a liantului la suprafața acestora. Este o necesitate continuarea cercetărilor privind adezivitatea liantului la fibrele de sticlă și la deșeurile din fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice și la granulele de rășini în calitatea lor de material de umplură.

- Modificarea legăturilor la limita de separare liant – fibre.

Deoarece zona de interfață este cea mai supusă tensiunilor trebuie studiat în continuare efectul de scădere a concentrărilor de tensiuni prin introducerea granulelor de rășini poliesterice, precum și, dacă acestea au un modul de elasticitate intermediar între cel al fibrelor și cel al liantului.

- Tratamentul la suprafață al fibrelor de sticlă cu rășini poliesterice.

Pornind de la compozițiile chimice ale rășinilor poliesterice și de la faptul că acestea realizează o tratare a suprafeței deșeurilor din fibre de sticlă rezultate de la fabricarea obiectelor sanitare și utilizate ca material de ramforsare în reciclat, este necesară abordarea unei cercetări privind rolul acestora ca agent de cuplare la interfața liant – agregate – fibre.

- Estimarea încadrării în valori admisibile ale incertitudinilor determinărilor de laborator.

Într-o posibilă direcție de cercetare se poate trece la evaluarea abaterilor standard pentru fiecare din determinările de laborator realizate, pornind de la un factor de încredere  $i = 1$ .

- Alte posibilități de aplicare în domeniul ingineriei drumurilor a materialului reciclat cu bitum spumat, ciment și deșeurii din fibre de sticlă în dispersie.

Pornind de la primele ipoteze legate de structura anrobotului reciclat cu bitum spumat și fibre și confirmarea lor cu ajutorul imaginilor luate prin scanare cu microscopul electronic și cu Stereolupa, considerăm că trebuie continuate cercetările pentru identificarea de soluții practice ce pot duce la îmbunătățirea structurii reciclatului cu fibre și găsirea raportului optim între

---



compenți.

Această lucrare a evidențiat posibilitatea aplicării tehnologiei de reciclare “*in situ*” a structurilor rutiere degradate cu bitum spumat, ciment și fibre în dispersie și a demonstrat că materialul reciclat obținut poate fi utilizat cu succes ca strat de fundație, de bază sau de legătură pentru toate categoriile de drumuri, datorită calităților sale superioare față de oricare anrobat bituminos clasic. Extinderea utilizării acestei tehnologii pentru alei pietonale, trotuare, spații de parcare sau chiar aeroporturi este o provocare în sensul dezvoltării unor alte direcții de cercetare pentru fiecare din aceste domenii ale infrastructurii din România. Putem afirma că aceasta este doar o tehnologie de tranziție spre tehnologiile “half-warm” ale viitorului în care bilanțul energetic din timpul reciclării va fi determinat pentru a obține lucrări de reabilitare a drumurilor la un înalt nivel de calitate cu costuri economice și de mediu cât mai reduse.

B. Realizarea cu ajutorul metodelor alternative de verificare sau măsurare în laborator a unor caracteristici ale materilului reciclat cu fibre.

Studiul performanțelor anrobatului bituminos rezultat din reciclarea structurilor rutiere degradate cu bitum spumat, ciment și deșeuri din fibre de sticlă peliculizate cu rășini poliesterice în amestec cu granule din aceste rășini poate fi dezvoltat cu ajutorul altor metode de analiză în laborator cum ar fi:

- a. Teste fundamentale:
  - modulul de deformație;
  - rezistența la oboseală;
  - fluajul dinamic;
  - compresiunea diametrală;
- b. Teste de simulare:
  - ornierajul;
  - compactare simulată în etape;
- c. Metode de stabilire a compoziției:
  - metode empirice;
  - metode analitice;
  - metode volumetrice.

C. Dezvoltarea conceptului de armare dispersă cu fibre a structurilor rutiere reciclate.

- În viitor se poate dezvolta o clasificare a tipurilor de structuri funcție de varietatea materialelor componente la care se poate aplica această tehnologie de reciclare.
- Se pot identifica și experimenta alte tehnologii și alte materiale reciclabile de armare ce pot fi încorporate în structura drumurilor, în cadrul lucrărilor de reabilitare.
- Pot fi elaborate alte procese tehnologice complexe de reabilitare a drumurilor cu

reciclarea integrală a materialelor utilizând scheme de flux etapizate.

- Pot fi analizate, selectate și implementate pe baze multicriteriale tehnologiile de lucru bazate pe reciclare în amplasament sau în stații centralizate.
- Elaborarea unor analize de cost pentru tehnologii alternative simple și complexe realizate pe 3 categorii de drumuri în diferite variante de reabilitate prin reciclare.
- Modelarea matematică pe operații tehnologice realizate de utilajele componente ale trenului de reciclare.
- Reducerea costurilor de reabilitare prin optimizarea procesului de lucru și înlocuirea cimentului cu filer de calcar, var sau cenușă de termocentrală.
- Studii parametrice de caz privind stabilirea unor matrice pentru determinarea cantităților de materiale de aport necesare la reciclare.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] Acott, S.M., Myburgh, P.A., “Design and performance study of sand bases treated with foamed asphalt”, Low-volume roads: third international conference. Washington, DC (Transportation Research Record; 898), 1983
- [2] Akeroyd, F.M.L., Hicks B.J., “Foamed Bitumen Road Recycling Highways”, Volume 56, Nr. 1933, 1988
- [3] Anderson, T.L., “Fracture Mechanics”, CRC Press, Florida, 1991
- [4] Andrei, R., “Metode statistice aplicate la drumuri”, Editura Tehnică, București, 1983
- [5] Argon, A.S. și Shack W.J., “Theories of fibre cement and fibre concrete”, Rilem Symposium 1975, The Construction Press LTD, 1975
- [6] Balut A., Nechita, R., Stelea, L., “Recycling of Deteriorated Old Bitumen Pavements”, Conference on Recycling of Asphalt”, Spier, 2005
- [7] Berlin, A.A., Volfson, St.A, Enikilopian, N.S., Negmatov, S.S., “Principles of Polymer Composites”, Akademic-Verlag, Berlin, 1985
- [8] Cassidy, P.E., Yager, B.J., “Coupling Agents As Adhesion Promoters in Reviews in Polymer Technology”, I. Skeist (ed.), vol.1, Marcel Dekker Inc., New York, 1972
- [9] Castedo-Franco, L.H., Beaudoin, C.C., Wood, E.L., Altschaeffl, A.G., “Durability characteristics of foamed asphalt mixtures”, Proceedings of the 29th Annual Canadian Technical Asphalt Association Conference, Montreal, 1984
- [10] Castedo-Franco, L.H., Wood, E.L., “Stabilisation with foamed asphalt of aggregates commonly used in low volume roads” Low-volume roads: 3-rd international conference, Washington, DC, Transportation Research Board. (Transportation Research Record; 898), 1983
- [11] Cazacliu, B., Peticila, M., Guieysse, B., Colange, J., Leroux, C., Bonvallet, J., Blaszczyk, R., “Effect of Process Parameters on Foam Bitumen-Based Road Material Production”, Road Materials And Pavement Design, Vol. 9, Issue 3/2008
- [12] B. Cazacliu, “Matériaux granulaires du génie civil, malaxage, rhéologie, Mémoire d’Habilitation à Diriger des Recherches”, LCPC - 2009

- [13] Ciucu, G., Craiu, V., "Introducere în teoria probabilităților și statistică matematică", Editura Didactică și Pedagogică, București, 1971
- [14] Comninou, M., "The Interface Crack", J. Appl. Mech., 1977
- [15] Corrigan, M., "Warm Mix Asphalt technology", AASHTO Standing Committee on Highways technical Meeting, Nashville, 2005
- [16] Csanyi, L.H., "Foamed Asphalt in Bituminous Paving Mixes", Highway Research Board Bulletin, Vol.10 No.160, 1957
- [17] Dally, J.W., Riley, W.F., "Experimental Stress Analysis", McGraw-Hill Book Company, 1991
- [18] Diaconu, E., Burlacu, A., "Locul și rolul geocompozitelor în structurile rutiere, Simpozionul Tehnologie și siguranță", UT Cluj-Napoca, Cluj-Napoca, 4-5 noiembrie 2004
- [19] Diaconu, E., Răcănel, C., "The study of geocomposite influence on wearing course asphalt mixture behavior at permanent deformation", Computational Civil Engineering, International Symposium, Iași, Ed. Societății Academice Matei-Teiu Botez, July 2005
- [20] Diaconu, E., Romanescu, C., Răcănel, C., Lazăr, Ș.M., Burlacu, A., "Ranforsarea straturilor asfaltice cu materiale geocompozite", Lucrările celei de-a III-a Sesiuni Științifice Construcții-Instalații CIB 2007, Universitatea Transilvania din Brașov și CANAM STEEL România, Brașov, 15-16 noiembrie 2007
- [21] Dicu, M., Albu, A.M., "Unele probleme apărute la utilizarea soluțiilor de reciclare a straturilor rutiere uzate", Drumuri Poduri, nr. 90/2005
- [22] Eller, A., Olson, R., "Recycled Pavements Using Foamed Asphalt in Minnesota" - Final Report, Office of Materials and Road Research - Minnesota Department of Transportation, 2009
- [23] Erdogan, F., "Stress Distribution In Bonded Dissimilar Materials With Cracks", J. Appl. Mech., 1965
- [24] Finlayson, E.F., "Stress Intensity Factor Distributions in Bimaterial Systems - a three - Dimensional Photoelastic Investigation", Blacksburg, Virginia, 1998
- [25] Gutesen, A.K., Dundurs, J., "The Interface Crack In A Tension Field," J. Appl. Mech., 1987
- [26] Gemănar, C., Florea, N., "Siguranța structurală a construcțiilor din beton armat", Editura Tehnică, Științifică și Didactică, CERMI, Iași, 2005
- [27] Grigoraș, A., "Optimizarea consolidării sistemelor rutiere la sporuri de sarcini", Teză de
-

- doctorat, Universitatea Tehnică de Construcții București, 2004
- [28] Halle, D.K., “Fibre pull-out in multiply-cracked discontinuous fibre composites”, National Physical Laboratory, United Kingdom, 1975
- [29] Halles, F. A., Thenoux, G. Z., “Degree of Influence of Active Fillers on Properties of Recycled Mixes with Foamed Asphalt”, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board – TRB, 2009
- [30] Hutchinson, J.W., Suo, Z., “Mixed-Mode Cracking In Layered Materials”, Adv. In Appl. Mech., 1992
- [31] Hutchinson, J.W., Mear, M.E., Rice, J.R., “Crack Paralleling An Interface Between Dissimilar Materials”, J. Appl. Mech., 1987
- [32] Ibănescu, C., “Ingineria materialelor compozite polimerice si procese de prelucrare a acestora”, Curs, 2010
- [33] Ionescu, I., Ispas, T., “Proprietățile și tehnologia betoanelor”, Editura Tehnică, București, 1997
- [34] Jenkins, K.J., “Mechanical Properties of Foamed Bitumen Stabilised Materials, Road Recycling and Rehabilitation”, 1998
- [35] Jenkins, K.J., “Mechanical Properties of Foamed Bitumen Stabilised Materials, Road Recycling and Rehabilitation”, Convegno EXPO, Roma, 2007
- [36] Jenkins, K.J., JLA de Groot\*\* , MFC van de Ven, Molenaar, A., “Half-Warm Foamed Bitumen Treatment, a New Process”, 7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, 1999
- [37] Katz, H.S., Milewski, J.V., “Handbook of Fillers and Reinforcements for Plastics”, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1978
- [38] Kim, V.S., Skacicov, V.V., “Dispersarea și amestecarea în procesele de producție și prelucrare a maselor plastice”, Himiia, Moskva, 1988
- [39] Krenchel, H., “Fibre spacing and specific fibre surface”, Rilem Symposium 1975, The Construction Press LTD, 1975
- [40] Lee, D.Y., “Treating Marginal Aggregates and Soil with Foamed Asphalt”, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 50, 1981
- [41] Liechti, K.M., Chai, Y.S., “Asymmetric Shielding In Interfacial Fracture Under In-Plane Shear”, EMRL Report No. 89/4, 1989
- [42] Lipatov, Yu.S., “Fiziceskaia himiia napolnennih polimerov”, Izd. Himiia, Moskva, 1977

- [43] Loizos, A., Collings, D., Jenkins, K.J., “Rehabilitation of a Major Greek Highway by Recycling/Stabilising with Foamed Bitumen”, 8TH Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, 2004
- [44] Lugmayr, R., Jamek, M., Tschegg, E.K., “Mechanical and fracture mechanical properties of asphalt geosynthetic interlayer systems”, 6th Int. Conference on Maintenance and Rehabilitation of pavements and technological Control, Mairepav6, Torino, Italy, 2009
- [45] Manual de reciclare la rece – Wirtgen 2012
- [46] McHale, M., “Cold In-situ Recycling of Bound and Unbound Layers of the A9 Trunk Road”, TRL Report, 1998
- [47] Mihai, I., “Curs de beton și beton armat”, Vol. I, Partea a 2-a, Atelier de Reprografie al Institutului de Construcții București, 1979
- [48] Moen, O., “Asphalt production at lower operating temperatures as an environmental friendly alternative to HMA”, APC - Environmental Inovation in Asphalt - Kolo Veidekke
- [49] Morton, B. S., Visser, A.T., Horak, E., “Foamed Tar Technology: An Innovation In Pavement Stabilization”, The 2002 Federal Aviation Administration Airport Technology Transfer Conference, 2002
- [50] Multhen, K., “Foamed Asphalt Mixes Mix Design Procedure”, Contract Report CR-98/077-CSIR TRANSPORTEK, 1999
- [51] Muthen, K. M., “Foamed Asphalt Mixes - Mix Design Procedure”, Contract Report CR-98/077 - SABITA Ltd & CSIR Transportek, 1998
- [52] Nair, N.G., “Mechanics of glass fibre reinforced cement”, Rilem Symposium 1975, The Construction Press LTD, 1975
- [53] Nicolau, V., ș.a., “Introducere în teoria betoanelor”, vol. I, E.S.P.A.C., 1954
- [54] Niculescu, Lazăr, “Betoane hidrotehnice pentru lucrări de îmbunătățiri funciare”, Editura Ceres, București, 1987
- [55] Oneț, T., “Durabilitatea betonului armat”, Editura Tehnică, București, 1994
- [56] Oneț, T., “Modelarea comportării betonului armat”, Litografia Institutului Politehnic Cluj-Napoca, 1992
- [57] Paharenko, V.A., Zverlin, V.G., Kirienko, E.M., “Termoplastice umplute - Îndreptar”, Tehnika, Kiev, 1986
- [58] Pepenar, E., Teodorescu, D., Pepenar, I., “Comportarea la coroziune a armăturilor din oțel și mijloace de protecție anticorozivă”, Revista Construcții, Nr. 9, 1982
- [59] Peticila, M., “Considerații privind tehnologia de reciclare bazată pe bitumul spumat”,
-

- Drumuri Poduri, 85, 2004
- [60] Peticila, M., Cazacliu, B., “Studiu parametric aplicat procesului de fabricare a mixturii cu bitum spumat”, Drumuri Poduri, nr. 24/2005
- [61] Peticila, M., Teză de doctorat “Studiul caracteristicilor fizico-mecanice ale mixturilor cu bitum spumat și tehnologiile de punere în operă”, București, 2009
- [62] Reus, S, Seleş, L., “Analiza sistematică a cauzelor avariilor și îmbunătățirea calității lucrărilor de construcții”, Revista Construcții, București, Nr. 8/1990
- [63] Revista Construcții, Nr. 1/1992 - Asigurarea calității construcțiilor prin proiectare
- [64] Rice, J.R., “Elastic Fracture Mechanics Concepts For Interfacial Cracks”, J. Appl. Mech., 1988
- [65] Rice, J.R., Sih, G.C., “Plane Problems Of Cracks In Dissimilar Media”, J. Appl. Mech., 1965
- [66] Romanoschi, S. A., Hossain, M., Heitzman, M., Gisi, A.J., “Foamed Asphalt Stabilized Reclaimed Asphalt Pavement: A Promising Technology for Mid-Western Roads”, Proceedings of the 2003 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, 2003
- [67] Romualdi, J.P., Batson, G.B., “Mechanics of crack arrest in concrete”, Journal of Engineering Mechanics, 1963
- [68] Ruckel, P.J., Acott, S.M., Bowering, “Foamed-asphalt paving mixtures: preparation of design mixes and treatment of test specimens”, Asphalt materials, mixtures, construction, moisture effects and sulfur. Washington, DC: Transportation Research Board. (Transportation Research Record; 911), 1982
- [69] Ruckel, P.J., Kole, L., Abel, F., Zator, R., Button, J.W., Epps, J., “Foamix Asphalt Advances”, Asphalt Pavement Construction: New Materials and Techniques, Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials (ASTM STP; 724)
- [70] Soalca, L., Peticila, M., “Aplicații informatice pentru procesare specifică datelor din laboratorul de drumuri”, Al XI-lea Congres de Drumuri și Poduri, Timisoara, 2002
- [71] Sunarjono, S., “Tensile Strength and Stiffness Modulus of Foamed Asphalt Applied to a Grading Representative of Indonesian Road Recycled pavement materials”, Dinamika TEKNIK SIPIL, Volume 7, No. 1, 2007
- [72] Tardy, M.L.N., “Methode Practique D’Examende Measure de la Birefringence Des Verres D’Optique”, 1929
- [73] Theocaris, P.S., “The Concept of Mesophase. Mechanisms of Crack Propagation, in Metal-
-

- Filled Polymers - properties and applications”, S.K. Bhattacharya (ed.), Marcel Dekker Inc., New York, 1986
- [74] Theyse, H., Long, F., Harvey, J. T., Monismith, C. L., “Discussion of Deep In-Situ Recycling Technical Memorandum” - TM-UCB-PRC-2004-6 - California Department of Transportation, 2004
- [75] TRL 386 – “Design guide and specification for structural maintenance of highway pavements by cold in-situ recycling”, (www.trl.co.uk), 1999
- [76] Williams, M.L., “The Stress Around A Fault Or Crack In Dissimilar Media”, Amer. Soc. Of Seismol., 1959
- [77] Xu, L., Tippur, H.V., “Interface Crack Tip Fields Studied Using Optical And Finite Element Methods”, SEM Conf. Proc., 1993

**Agremente tehnice și normative:**

- [78] Agreement Tehnic 004-07/1253-2010, FORTA FI HMA - fibre din polipropilenă pentru mixturi asfaltice
- [79] Agreement Tehnic 005-07/104-2004 - Procedeu de reciclare „in situ” a straturilor de mixtură asfaltică utilizând tehnologia bazată pe bitum spumat
- [80] Agreement Tehnic 005-07/136-2005 - Procedeu de reciclare „in situ” a straturilor rutiere utilizând tehnologia bazată pe spumă de bitum și utilajul Wirtgen 2500S
- [81] Agreement Tehnic 005-07/099-2004 (Prelungire AT 005-07/097-2003) - Procedeu de reciclare la rece
- [82] Normativ pentru determinarea prin deflectografie și deflectometrie a capacității portante a drumurilor cu structuri rutiere suple și semirigide cu deflectograful Lacoix și deflectometrul cu pârghie tip Benkelman, CD 31-2002
- [83] Normativ pentru dimensionarea sistemelor rutiere suple și semirigide. (Metoda analitică), ind. PD 177-2001
- [84] Normativ pentru dimensionarea straturilor bituminoase de ranforsare a sistemelor rutiere suple și semirigide. (Metoda analitică), ind. AND 550-99
- [85] Normativ pentru evaluarea stării de degradare a îmbrăcămintei bituminoase pentru drumuri cu structuri rutiere suple și semirigide, indicativ AND 540-2003

**Adrese de internet:**

---



[86] “Machines de Recyclage à Froid In-Situ”, No 25 – 2005, <http://www.guides-gallois.com>

[87] <http://www.wirtgen.de/en/>

[88] French PIARC Committee Annual Report 2003”, XXIIInd World Road Congress In Durban, [www.piarc.org/library](http://www.piarc.org/library)

[89]“Road and Road Transport Operations”, Network Operations (C16) PIARC Activity Report 2000 – 2003, <http://publications.piarc.org/fr>

[90] <http://www.directindustry.com/prod/wirtgen/product-41149-344688.html>

[91] <http://autoline.info/sf/construction-equipment-recycler-WIRTGEN-2200-CR--12031319462749292500.html>

[92] [http://www.kirby-smith.com/new\\_vehicle\\_detail.asp?veh=292479](http://www.kirby-smith.com/new_vehicle_detail.asp?veh=292479)

[93] <http://www.wirtgen-group.com>

## ANEXE

## ANEXA 1

Rezultatele determinărilor de capacitate portantă realizate pe sectorul experimental realizat pe DC 4A, DN 1F – Șamșud, km : 3+000 – 4+300

SC DRUM CONSTRUCT SRL		Cod D 06/0							
Laborator grad II - Autorizație nr. 2686 din 13.02.2014		pag 1 din 1							
<b>OFFICIAL REPORT OF TESTING / RAPORT DE ÎNCERCARE</b>									
<b>BEARING CAPACITY TEST BY BENKELMAN BEAM /</b>									
<b>DETERMINAREA PORTANTEI CU DEFLECTOMETRUL TIP BENKELMAN</b>									
No./ Nr.: 1700 / 2		Date/Data: 30,09.2013							
<b>Work / Lucrarea: Reabilitare DC 4 A, DN 1F - SAMSUD ,KM: 3+000 - 4+300</b>									
Road section / Sector de drum (poz.km.): Platforma Axa 1- longitudinal									
Side / Parte: DREAPTA									
Type of Layer / Tipul stratului: RECICLAT									
Axel load / Sarcina pe osia din spate:		P = 128,66	[kN]						
Tyre pression / Presiunea în pneuri: 6.5 at		k = 115/P							
Fulkrun ratio / Raportul părghieii: 2:1		A = 1,9							
Test date / Data încercării: 19,12.2014		B = 1,6	CD 31-2002						
Average deflexion / Deflexiunea medie, 1/100 mm		$d_{BM} = Sd_i/n$	89,7 $d_{BM admis} = 250$						
Average deviation / Abaterea medie, 1/100 mm		$SB = \sqrt{(\sum di^2 - n \times d_{2BM}^2)/n}$	#NUM!						
Coefficient of variation / Coeficientul de variație, %		$C_v = 100 \times SB/d_{BM}$	#NUM! $C_v admis = 35$						
<b>Chainage</b>									
No./Nr.	Overseer / Pichet	Poziție / km.	C <sub>2,4</sub>	C <sub>5,0</sub>	d <sub>2,4</sub> =A+BxC <sub>2,4</sub>	d <sub>5,0</sub> =A+BxC <sub>5,0</sub>	d=2xd <sub>5,0</sub> -d <sub>2,4</sub>	d <sub>i</sub> =115 x d/P	d <sup>2</sup>
1		3+000	36	32	59,5	53,1	46,7	41,7	1742,4
2		0+050	32	36	53,1	59,5	65,9	58,9	3469,6
3		3+100	34	36	56,3	59,5	62,7	56,0	3140,8
4		3+200	30	34	49,9	56,3	62,7	56,0	3140,8
5		3+300	34	36	56,3	59,5	62,7	56,0	3140,8
6		3+400	30	34	49,9	56,3	62,7	56,0	3140,8
7		3+500	32	36	53,1	59,5	65,9	58,9	3469,6
8		3+600	36	38	59,5	62,7	65,9	58,9	3469,6
9		3+700	34	36	56,3	59,5	62,7	56,0	3140,8
		3+800	30	36	49,9	59,5	69,1	61,8	3814,7
		3+900	32	36	53,1	59,5	65,9	58,9	3469,6
		4+000	38	40	62,7	65,9	69,1	61,8	3814,7
		4+100	36	40	59,5	65,9	72,3	64,6	4176,2
		4+200	34	38	56,3	62,7	69,1	61,8	3814,7
n=	9						Total	807,48	46.945,10
Rezultatele Raportului de încercare se refera doar la proba supusa încercării /The Test Report results are regarding only the analyzed samples.									
Raportul de încercare nu poate fi utilizat sau multiplicat în alte scopuri fara aprobarea emitentului / The Test Report cannot be multiplied or used in other purposes without the approval of the issuer.									

**ANEXA 2**

Rezultatele determinărilor de laborator pe probele prelevate de pe sectorul experimental realizat pe DC 4A, DN 1F – Șamșud, km : 3+000 – 4+300

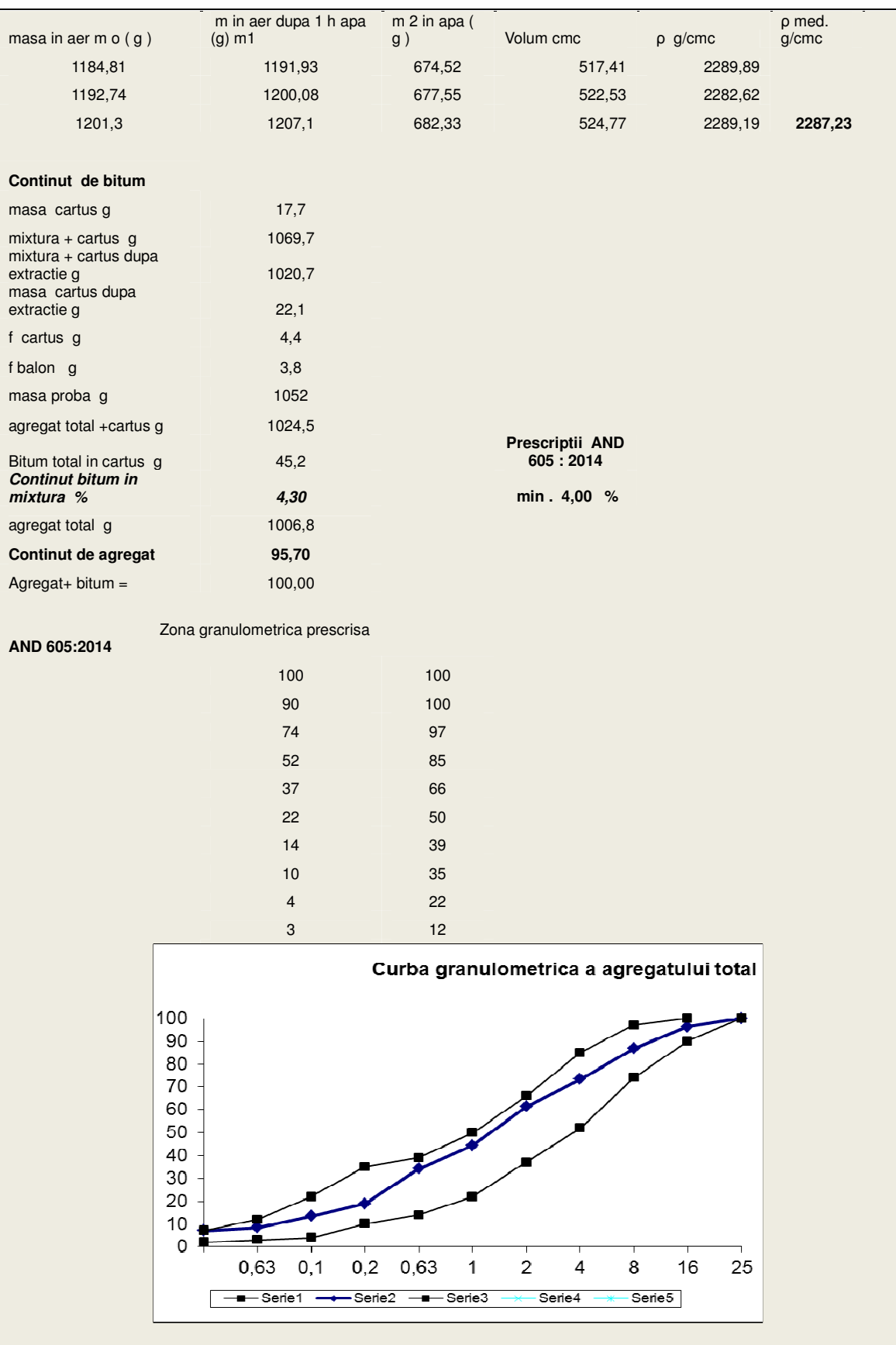
RI 679 din 19.06.2013		Cod FL 042			
<b>DC 4 A, DN 1F- SAMSUD RECILAT CU FIBRE DE STICLA</b>					
KM:3+100, STANGA					
<b>SR 174/1/2:2012</b>					
Caracteristici cilindri Marshall	<b>Proba EB31,5 baza 50/70-AB 25</b>	<b>AB 25(asim)</b>			
(S) Stabilitatea Marshall (kn)	<b>8,01</b>	<b>6,5 - 13,0</b>			
(I)Indice de curgere ,fluajul (mm)	<b>3,72</b>	<b>1.5 - 4.0</b>			
Raport S / I ( kn / mm)	<b>2,15</b>	<b>1,6 - 4,3</b>			
Densitatea aparenta min (kg/mc)	<b>2284,64</b>				
Absorbția de apă (%)	<b>1,78</b>	<b>1,5 - 6,0</b>			
Granulozitatea prin spalare si cernere conform SR EN 933-1/2002					
Masa uscata totala ( g)					
M 1					
1147,4					
Masa uscata dupa spalare (g)					
M 2					
1097,8					
Masa uscat partilor fine spalate					
M 1 - M 2 (g)					
49,6					
		Procente de refuz	Procente cumulate	<b>Zona granulometrica AND 605: 2014</b>	Dozaj AB 25
<b>AB 25</b>					
Site ochiuri patrate (mm)					
31,5	0	0	<b>100,00</b>	100	<b>100,00</b>
25	0	0,00	<b>100,00</b>	90 - 100	<b>100,00</b>
16	207	18,04	<b>81,96</b>	74 - 97	<b>82,90</b>
8	266,5	23,23	<b>58,73</b>	52 - 85	<b>58,80</b>
4	219,4	19,12	<b>39,61</b>	37 - 66	<b>39,20</b>
2	88,5	7,71	<b>31,90</b>	22 - 50	<b>31,90</b>
1	155,6	13,56	<b>18,34</b>	14 - 39	<b>18,40</b>
0,63	54,1	4,72	<b>13,62</b>	,10 - 35	<b>13,60</b>
0,2	64,9	5,66	<b>7,97</b>	.4 - 22	<b>8,00</b>
0,1	23,6	2,06	<b>5,91</b>	.3 - 12	<b>5,90</b>
0,63	18,2	1,59	<b>4,32</b>	.2 - 7	<b>,4,30</b>
Material ramas fund Pi trece 0.63+ret.	0	0,00			
Filtru+rezid bitum	49,6	4,32			
	1147,4	100,00			
Procentul de cernut al partilor fine pe sita de 0.063 mm					
procent parti fine= $[(M1-M2)/M1] \times 100$		4,32			
validare rezultate = $[(M2-M2+Pi)/M2] \times 100=$		0			

nr.de fibre	m in aer dupa 1 h apa (g) m1	m 2 in apa ( g)	Volum cmc	$\rho$ g/cmc	$\rho$ med. g/cmc
masa in aer m o ( g )					
1184,81	1191,93	672,62	519,31	2281,51	
1192,74	1200,08	678,78	521,3	2288,01	
1201,3	1207,1	681,23	525,87	2284,40	<b>2284,64</b>
<b>Continut de bitum</b>					
masa cartus g	17,1				
mixtura + cartus g	1215,9				
mixtura + cartus dupa extractie g	1161,2				
masa cartus dupa extractie g	19,8				
f cartus g	2,7				
f balon g	3,3				
masa proba g	1198,8				
agregat total +cartus g	1164,5				
Bitum total in cartus g	51,4				
<b>Continut bitum in mixtura %</b>	<b>4,29</b>				
agregat total g	1147,4				
<b>Continut de agregat</b>	<b>95,71</b>				
Agregat+ bitum =	100,00				
<b>AND 605:2014</b>		<b>Prescriptii AND 605 : 2014</b>			
Zona granulometrica prescisa		<b>min . 4,00 %</b>			
		<b>Dozaj AB 25 - BITUM 4.90 %</b>			
		<b>Abateri fata de dozaj</b>			
100	100	100	100	100	
90	100	95	95	100	
74	97	78,75	78,75	87,05	
52	85	55,86	55,86	61,74	
37	66	37,63	37,63	40,77	
22	50	30,94	30,94	32,86	
14	39	17,84	17,84	18,95	
10	35	13,19	13,19	14,01	
4	22	7,84	7,84	8,16	
3	12	5,81	5,81	5,99	
2	7	4,25	4,25	4,34	

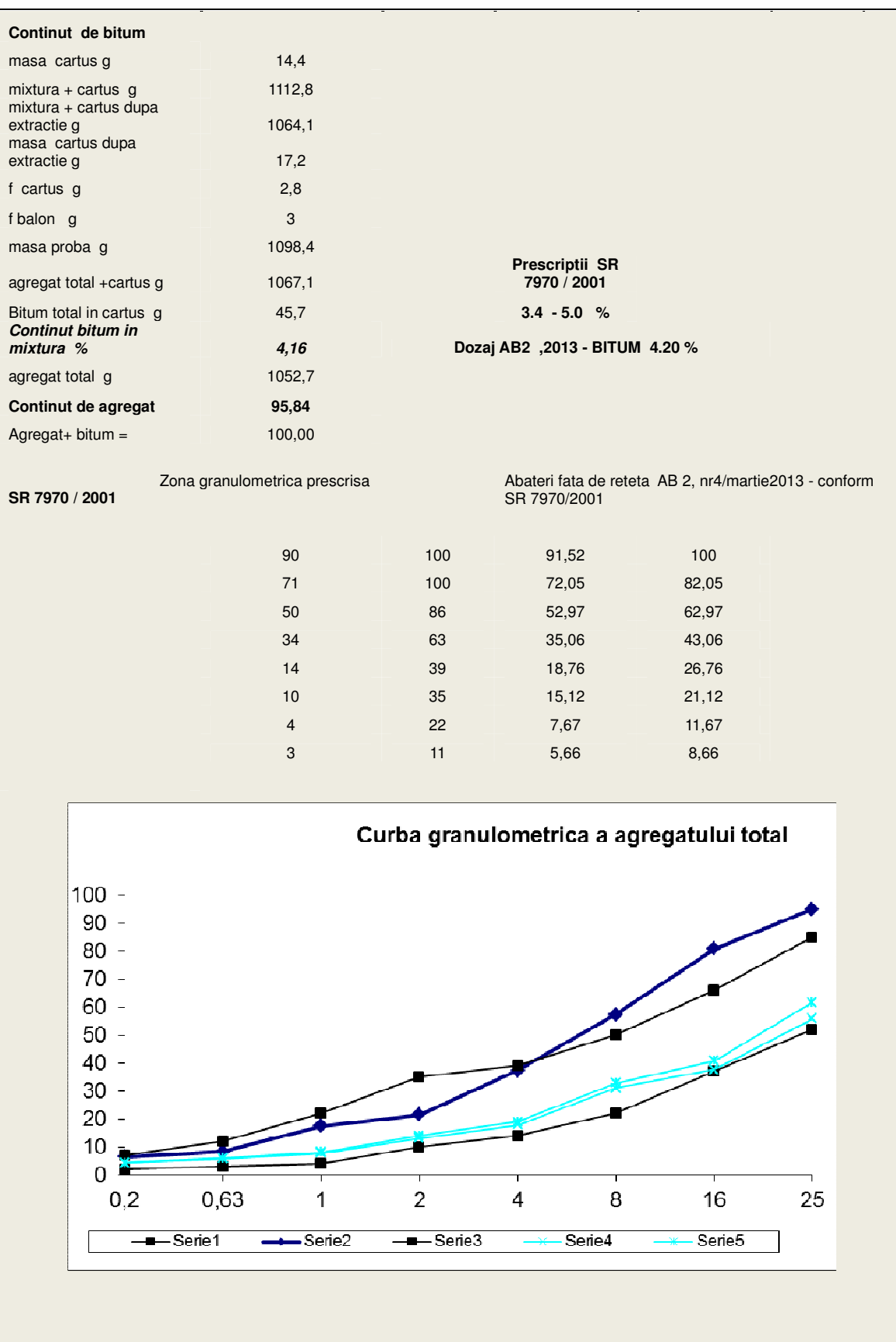
  

**Curba granulometrica a agregatului total**

	RI 756 din 19,06,2013	Cod FL 042		
DC 4 A, DN 1F- SAMSUD <b>RECILAT CU FIBRE DE STICLA</b>	KM:3+200, STANGA	<b>AND 605:2014</b>		
Caracteristici cilindri Marshall	<b>Proba EB31,5 baza 50/70-AB 25</b>	<b>AB 25(asim)</b>		
(S) Stabilitatea Marshall (kn)	<b>8,2</b>	<b>6,5 - 13,0</b>		
(I)Indice de curgere ,fluajul (mm)	<b>3,72</b>	<b>1.5 - 4.0</b>		
Raport S / I ( kn / mm)	<b>2,20</b>	<b>1,6 - 4,3</b>		
Densitatea aparenta min (kg/mc)	<b>2287,23</b>			
Absorbția de apa ( %)	<b>3,26</b>	<b>1,5 - 6,0</b>		
Granulozitatea prin spalare SR EN 933-1/2002	si cernere conform			
	Masa uscata totala ( g)			
	M 1			
	1006,8			
	Masa uscata dupa spalare (g)			
	M 2			
	935,9			
	Masa uscat partilor fine spalate			
	M 1 - M 2 (g)			Zona granulometrica SR 7970 / 2001
	70,9	Procente de refuz	Procente cumulate	
Site ochiuri patrate (mm)			<b>100,00</b>	
25	36,5	3,63	<b>96,37</b>	<b>90 - 100</b>
16	97,1	9,64	<b>86,73</b>	<b>74 - 97</b>
8	134,5	13,36	<b>73,37</b>	<b>52 - 85</b>
4	121,8	12,10	<b>61,27</b>	<b>37 - 66</b>
2	170,5	16,93	<b>44,34</b>	<b>22 - 50</b>
1	102,4	10,17	<b>34,17</b>	<b>14 - 39</b>
0,63	152,6	15,16	<b>19,01</b>	<b>,10 - 35</b>
0,2	56,8	5,64	<b>13,37</b>	<b>.4 - 22</b>
0,1	49,6	4,93	<b>8,44</b>	<b>.3 - 12</b>
0,063	14,1	1,40	<b>7,04</b>	<b>.2 - 7</b>
Material ramas fund Pi trece 0.063+ret.	0	0,00		
Filtru+rezid bitum	70,9	7,04		
	1006,8	100,00		
Procentul de cernut al partilor fine pe sita de 0.063 mm				
procent parti fine= $[(M1-M2)/M1] \times 100$		7,04		
validare rezultate = $[(M2-M2+Pi)/M2] \times 100 =$		0		

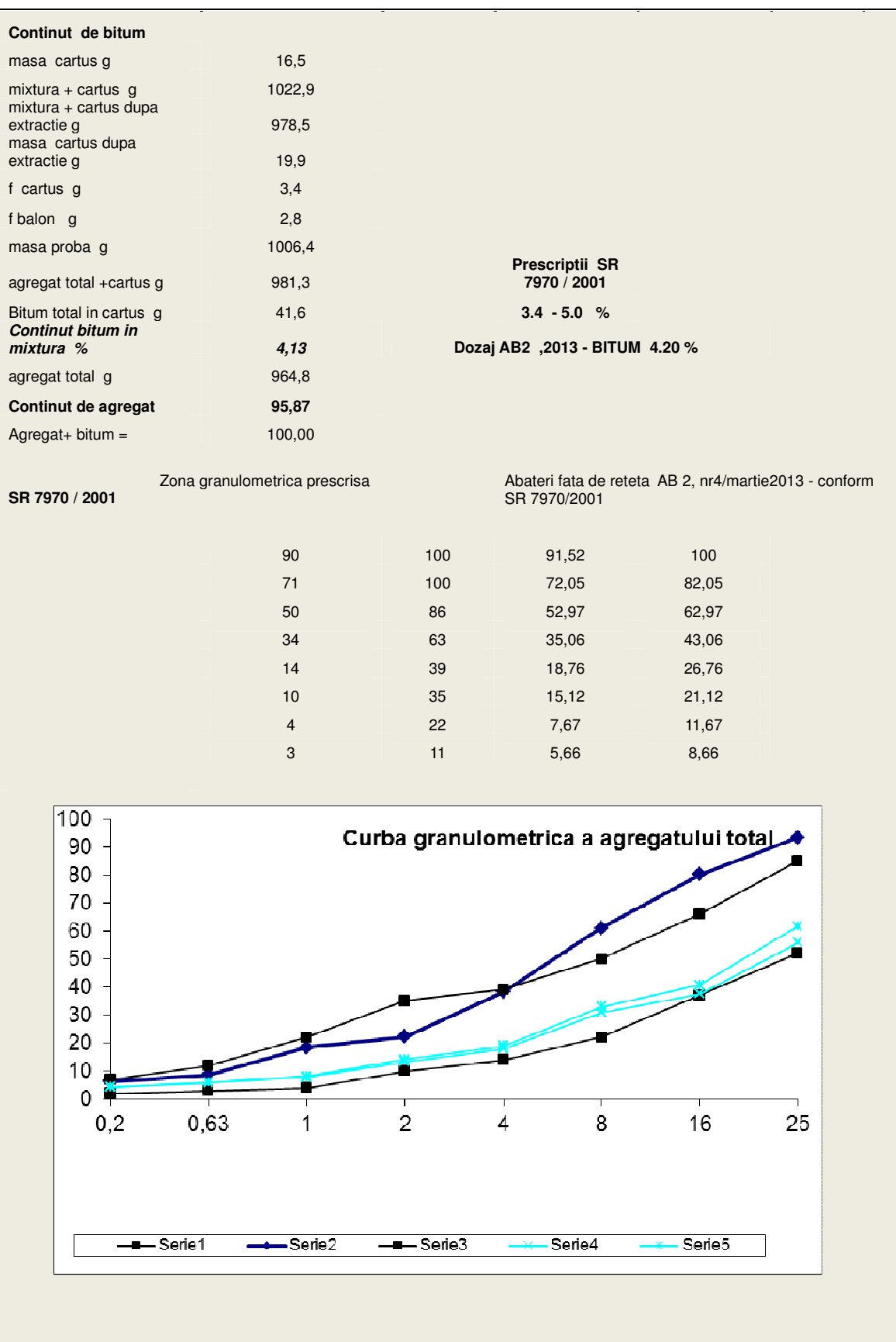


RECILAT CU FIBRE DE STICLA	RI 202 din 19.06.2013	Cod FL 042			
DC 4 A, DN 1F- SAMSUD	KM:3+300, STANGA				
		<b>SR 7970 / 2001</b>			
Caracteristici cilindri Marshall	<b>Proba AB 2</b>	<b>AB 25(asim)</b>			
(S) Stabilitatea Marshall (kn)	<b>10,66</b>	<b>min 5.0</b>			
(I)Indice de curgere ,fluajul (mm)	<b>3,6</b>	<b>1.5 - 4.0</b>			
Densitatea aparenta min (kg/mc)	<b>2285,33</b>	<b>2200</b>			
Absorbția de apă (%)	<b>3,48</b>	<b>2.00 - 8.00</b>			
Granulozitatea prin spalare și cernere conform SR EN 933-1/2002					
	Masa uscata totala ( g)				Dozaj AB 2 nr. 4 / martie 2013
	M 1				
	1052,7				
	Masa uscata dupa spalare (g)				
	M 2				
	984				
	Masa uscat partilor fine spalate				
	M 1 - M 2 (g)			Zona granulometrica SR 7970 / 2001	
	68,7	Procente de refuz	Procente cumulate		
Site ochiuri patrate (mm)					
				<b>100,00</b>	AB 2 <b>100</b>
25	51,2	4,86	<b>95,14</b>	<b>90 - 100</b>	<b>96,52</b>
16	149,6	14,21	<b>80,93</b>	<b>71 - 100</b>	<b>77,05</b>
8	248,7	23,62	<b>57,30</b>	<b>50 - 86</b>	<b>57,97</b>
4	210,6	20,01	<b>37,29</b>	<b>34 - 63</b>	<b>39,06</b>
1	165,8	15,75	<b>21,54</b>	<b>14 - 39</b>	<b>22,76</b>
0,63	42,9	4,08	<b>17,47</b>	<b>.10 - 35</b>	<b>18,12</b>
0,2	96,7	9,19	<b>8,28</b>	<b>.4 - 22</b>	<b>9,67</b>
0,1	18,5	1,76	<b>6,53</b>	<b>.3 - 11</b>	<b>.7.16</b>
Material ramas fund Pi trece 0.10+ret. Filtru+rezid bitum	0	0,00			
	68,7	6,53			
	1052,7	100,00			
Procentul de cernut al partilor fine pe sita de 0.063 mm					
procent parti fine= $[(M1-M2)/M1] \times 100$	6,53				
validare rezultate = $[(M2-M2+Pi)/M2] \times 100 =$	0				
masa in aer m o ( g )	m in aer dupa 1 h apa (g) m1	m 2 in apa ( g )	Volum cmc	p g/cmc	p med. g/cmc
1203,61	1209,41	681,52	527,89	2280,04	
1205,44	1213,4	686,39	527,01	2287,32	
1201	1207,89	683,12	524,77	2288,62	<b>2285,33</b>

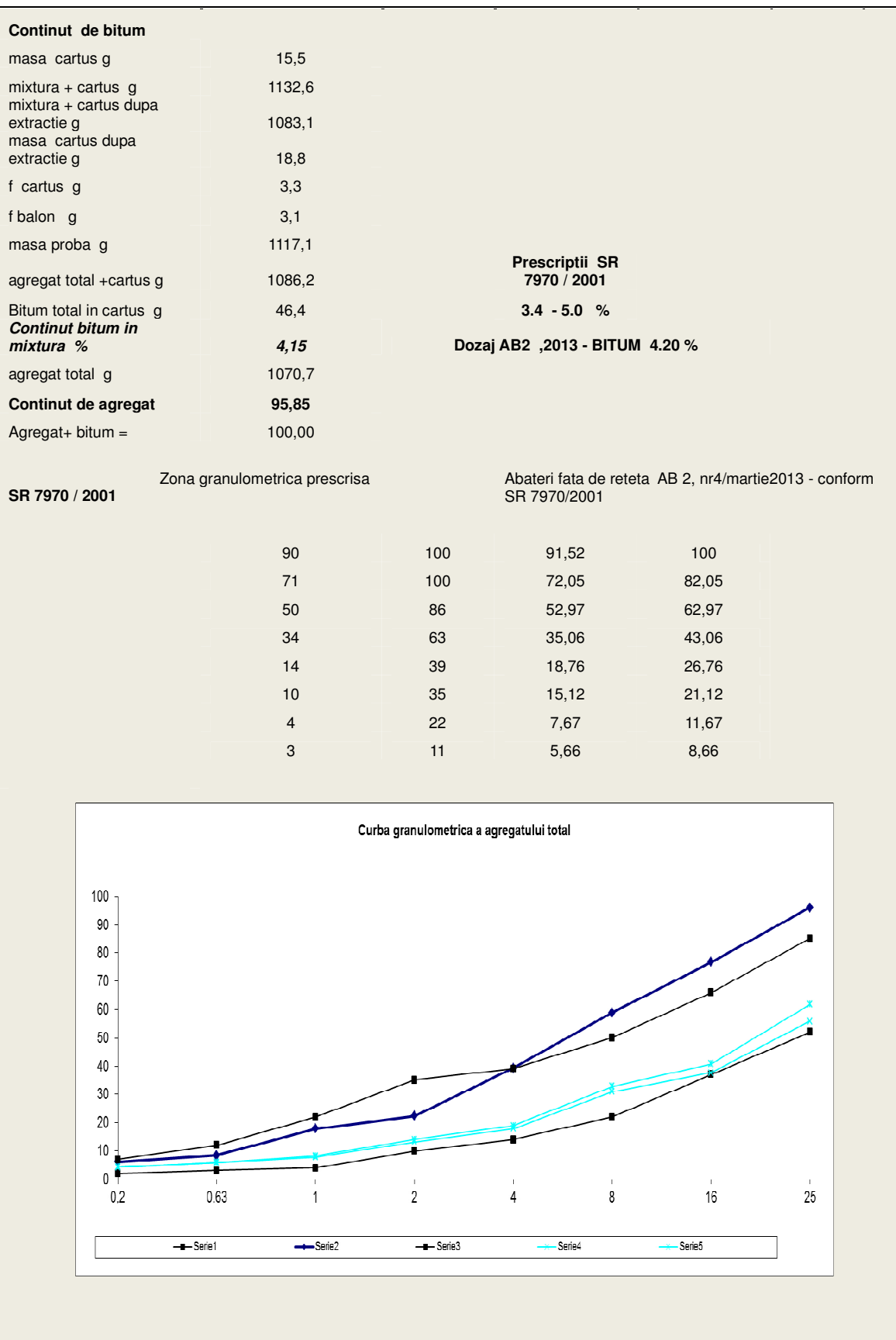




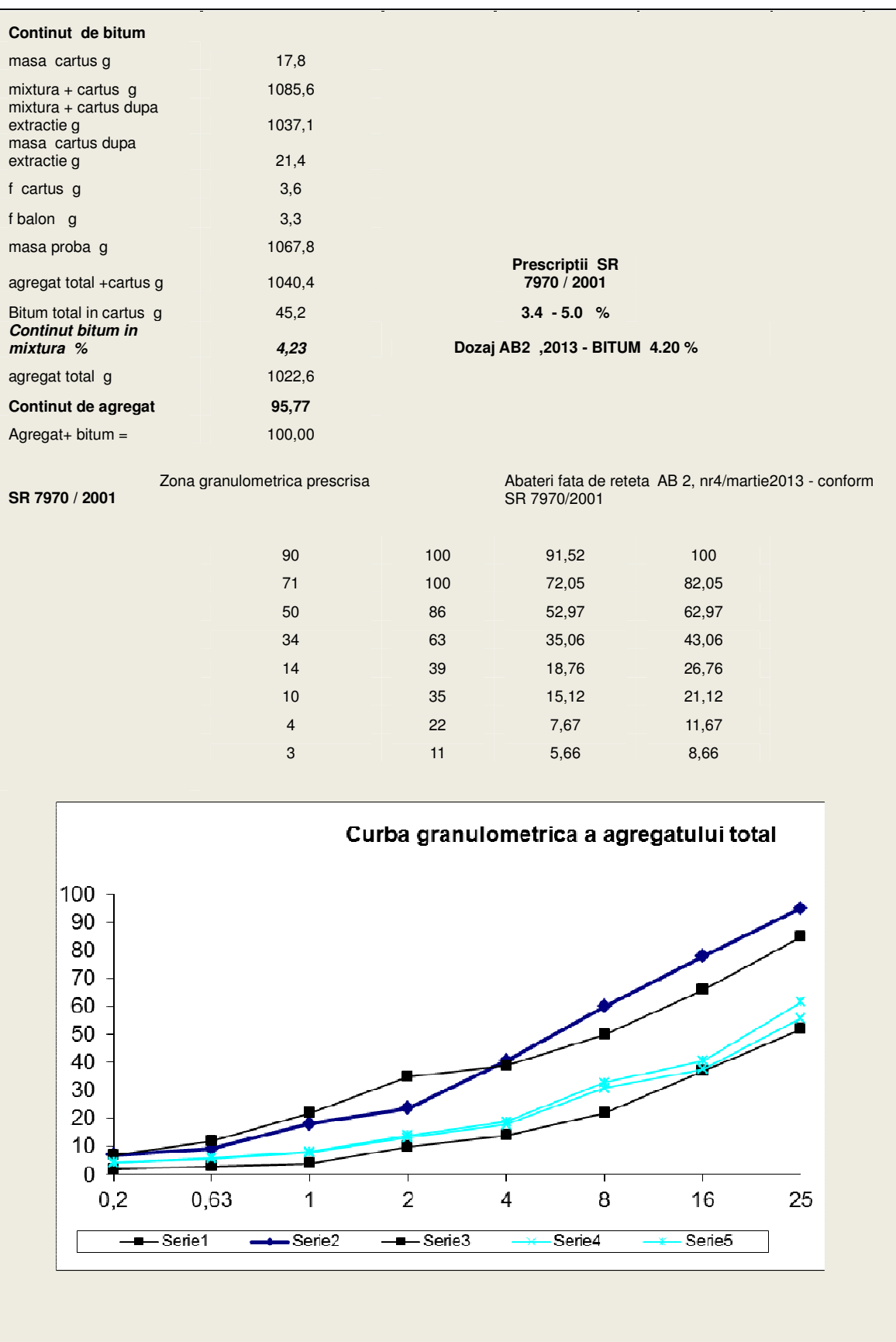
RECILAT CU FIBRE DE STICLA	RI 215 din 23.06.2013	Cod FL 042			
DC 4 A, DN 1F- SAMSUD	KM:3+400, STANGA				
		<b>SR 7970 / 2001</b>			
Caracteristici cilindri Marshall	<b>Proba AB 2</b>	<b>AB 25(asim)</b>			
(S) Stabilitatea Marshall (kn)	<b>10,98</b>	<b>min 5.0</b>			
(I)Indice de curgere ,fluajul (mm)	<b>3,36</b>	<b>1.5 - 4.0</b>			
Densitatea aparenta min (kg/mc)	<b>2288,73</b>	<b>2200</b>			
Absorbția de apă (%)	<b>3,94</b>	<b>2.00 - 8.00</b>			
Granulozitatea prin spalare și cernere conform SR EN 933-1/2002					
	Masa uscata totala ( g)				Dozaj AB 2 nr. 4 / martie 2013
	M 1				
	964,8				
	Masa uscata dupa spalare (g)				
	M 2				
	903,6				
	Masa uscat partilor fine spalate				
	M 1 - M 2 (g)			Zona granulometrica SR 7970 / 2001	
	61,2	Procente de refuz	Procente cumulate		
Site ochiuri patrate (mm)					
				<b>100,00</b>	AB 2
					<b>100</b>
25	63,3	6,56	<b>93,44</b>	<b>90 - 100</b>	<b>96,52</b>
16	128,2	13,29	<b>80,15</b>	<b>71 - 100</b>	<b>77,05</b>
8	184,2	19,09	<b>61,06</b>	<b>50 - 86</b>	<b>57,97</b>
4	220,8	22,89	<b>38,17</b>	<b>34 - 63</b>	<b>39,06</b>
1	153,5	15,91	<b>22,26</b>	<b>14 - 39</b>	<b>22,76</b>
0,63	36,4	3,77	<b>18,49</b>	<b>.10 - 35</b>	<b>18,12</b>
0,2	96,2	9,97	<b>8,52</b>	<b>.4 - 22</b>	<b>9,67</b>
0,1	21	2,18	<b>6,34</b>	<b>.3 - 11</b>	<b>.7.16</b>
Material ramas fund Pi trece 0.10+ret.	0	0,00			
Filtru+rezid bitum	61,2	6,34			
	964,8	100,00			
Procentul de cernut al partilor fine pe sita de 0.063 mm					
procent parti fine= $[(M1-M2)/M1] \times 100$		6,34			
validare rezultate = $[(M2-M2+Pi)/M2] \times 100 =$		0			
masa in aer m o ( g )	m in aer dupa 1 h apa (g) m1	m 2 in apa ( g )	Volum cmc	ρ g/cmc	ρ med. g/cmc
1194,88	1207,02	686,33	520,69	2294,80	
1187,44	1202,57	683,12	519,45	2285,96	
1191,32	1204,63	683,36	521,27	2285,42	<b>2288,73</b>



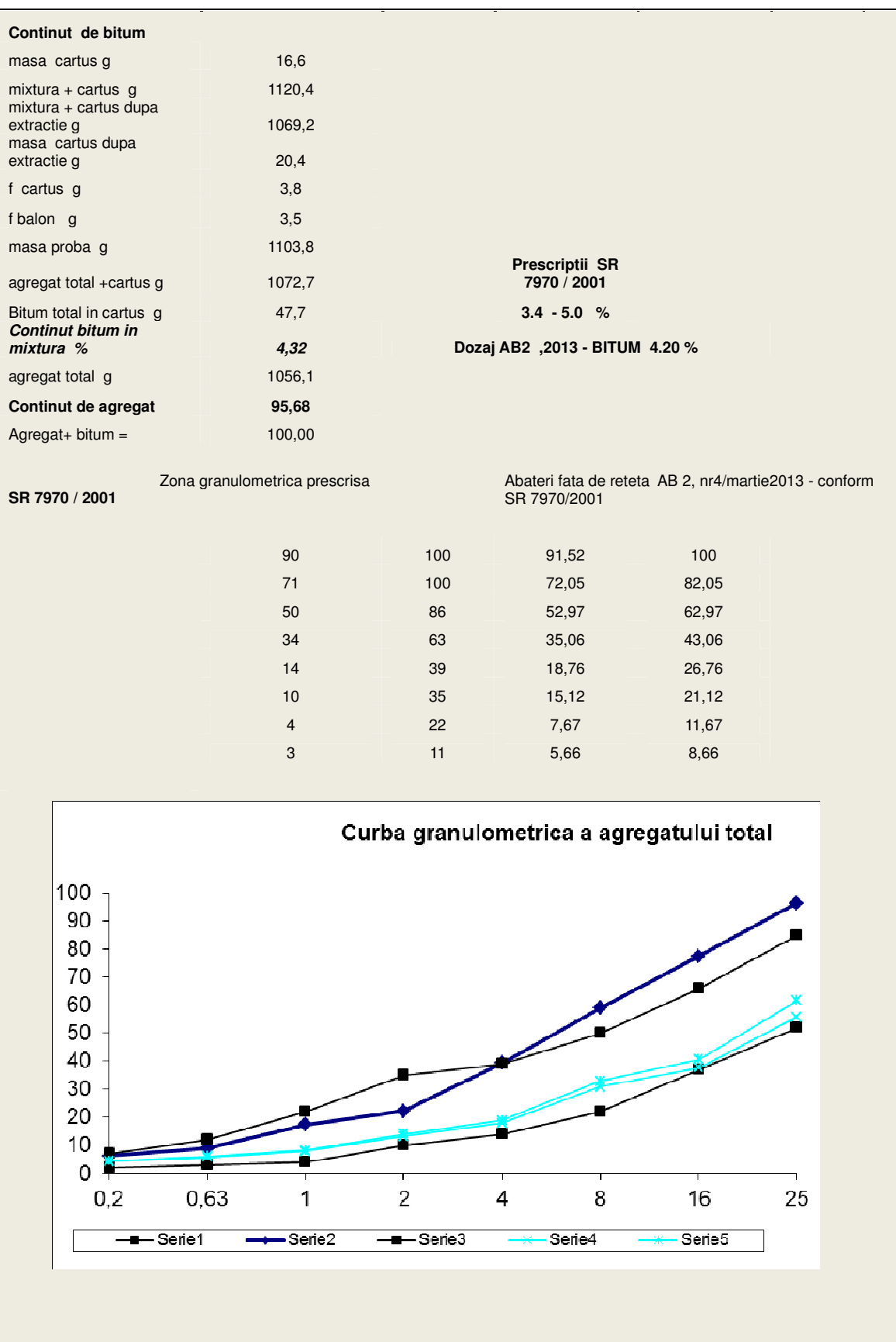
RECILAT CU FIBRE DE STICLA	RI 289 din 27.06.2013	Cod FL 042			
DC 4 A, DN 1F- SAMSUD	KM:3+500, DREAPTA				
		<b>SR 7970 / 2001</b>			
Caracteristici cilindri Marshall	<b>Proba AB 2</b>	<b>AB 25(asim)</b>			
(S) Stabilitatea Marshall (kn)	<b>11,2</b>	<b>min 5.0</b>			
(I)Indice de curgere ,fluajul (mm)	<b>3,54</b>	<b>1.5 - 4.0</b>			
Densitatea aparenta min (kg/mc)	<b>2286,55</b>	<b>2200</b>			
Absorbția de apă (%)	<b>4,02</b>	<b>2.00 - 8.00</b>			
Granulozitatea prin spalare și cernere conform SR EN 933-1/2002					
	Masa uscata totala ( g)				Dozaj AB 2 nr. 4 / martie 2013
	M 1				
	1070,7				
	Masa uscata dupa spalare (g)				
	M 2				
	1004,4				
	Masa uscat partilor fine spalate				
	M 1 - M 2 (g)	Procente de refuz	Procente cumulate	Zona granulometrica SR 7970 / 2001	
	66,3				
Site ochiuri patrate (mm)			<b>100,00</b>	AB 2	<b>100</b>
25	42,6	3,98	<b>96,02</b>	<b>90 - 100</b>	<b>96,52</b>
16	205,8	19,22	<b>76,80</b>	<b>71 - 100</b>	<b>77,05</b>
8	191,3	17,87	<b>58,93</b>	<b>50 - 86</b>	<b>57,97</b>
4	211,1	19,72	<b>39,22</b>	<b>34 - 63</b>	<b>39,06</b>
1	181,4	16,94	<b>22,28</b>	<b>14 - 39</b>	<b>22,76</b>
0,63	46,5	4,34	<b>17,93</b>	<b>.10 - 35</b>	<b>18,12</b>
0,2	101,2	9,45	<b>8,48</b>	<b>.4 - 22</b>	<b>9,67</b>
0,1	24,5	2,29	<b>6,19</b>	<b>.3 - 11</b>	<b>.7.16</b>
Material ramas fund Pi trece 0.10+ret. Filtru+rezid bitum	0	0,00			
	66,3	6,19			
	1070,7	100,00			
Procentul de cernut al partilor fine pe sita de 0.063 mm					
procent parti fine= $[(M1-M2)/M1] \times 100$	6,19				
validare rezultate = $[(M2-M2+Pi)/M2] \times 100 =$	0				
masa in aer m o ( g )	m in aer dupa 1 h apa (g) m1	m 2 in apa ( g )	Volum cmc	ρ g/cmc	ρ med. g/cmc
1202,44	1212,36	685,44	526,92	2282,02	
1191,42	1208,63	688,47	520,16	2290,49	
1199,73	1207,44	682,89	524,55	2287,16	<b>2286,55</b>





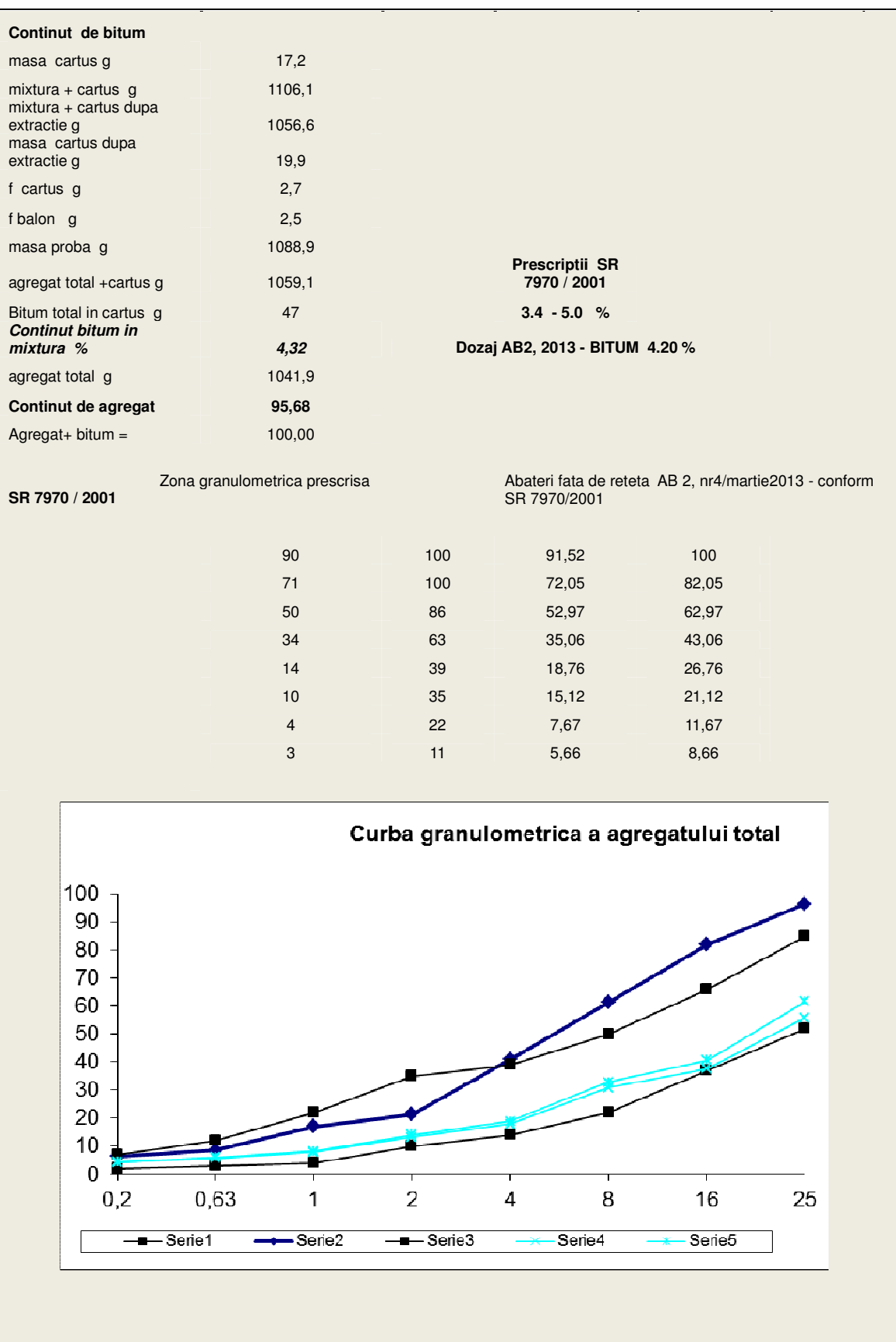


RECILAT CU FIBRE DE STICLA	RI 299 din 29.06.2013	Cod FL 042			
DC 4 A, DN 1F- SAMSUD	KM:3+700, DREAPTA				
		<b>SR 7970 / 2001</b>			
Caracteristici cilindri Marshall	<b>Proba AB 2</b>	<b>AB 25(asim)</b>			
(S) Stabilitatea Marshall (kn)	<b>10,69</b>	<b>min 5.0</b>			
(I)Indice de curgere ,fluajul (mm)	<b>3,44</b>	<b>1.5 - 4.0</b>			
Densitatea aparenta min (kg/mc)	<b>2281,62</b>	<b>2200</b>			
Absorbția de apă (%)	<b>3,9</b>	<b>2.00 - 8.00</b>			
Granulozitatea prin spalare și cernere conform SR EN 933-1/2002					
	Masa uscata totala ( g)				Dozaj AB 2 nr. 4 / martie 2013
	M 1				
	1056,1				
	Masa uscata dupa spalare (g)				
	M 2				
	989,8				
	Masa uscat partilor fine spalate				
	M 1 - M 2 (g)				Zona granulometrica SR 7970 / 2001
	66,3	Procente de refuz	Procente cumulate		
Site ochiuri patrate (mm)			<b>100,00</b>	AB 2	<b>100</b>
25	36,9	3,49	<b>96,51</b>	<b>90 - 100</b>	<b>96,52</b>
16	201,4	19,07	<b>77,44</b>	<b>71 - 100</b>	<b>77,05</b>
8	194,5	18,42	<b>59,02</b>	<b>50 - 86</b>	<b>57,97</b>
4	206,9	19,59	<b>39,43</b>	<b>34 - 63</b>	<b>39,06</b>
1	181,6	17,20	<b>22,23</b>	<b>14 - 39</b>	<b>22,76</b>
0,63	51,8	4,90	<b>17,33</b>	<b>.10 - 35</b>	<b>18,12</b>
0,2	88,3	8,36	<b>8,97</b>	<b>.4 - 22</b>	<b>9,67</b>
0,1	28,4	2,69	<b>6,28</b>	<b>.3 - 11</b>	<b>.7.16</b>
Material ramas fund Pi trece 0.10+ret. Filtru+rezid bitum	0	0,00			
	66,3	6,28			
	1056,1	100,00			
Procentul de cernut al partilor fine pe sita de 0.063 mm					
procent parti fine= $[(M1-M2)/M1] \times 100$	6,28				
validare rezultate = $[(M2-M2+Pi)/M2] \times 100 =$	0				
masa in aer m o ( g )	m in aer dupa 1 h apa (g) m1	m 2 in apa ( g )	Volum cmc	ρ g/cmc	ρ med. g/cmc
1190,58	1206,66	683,73	522,93	2276,75	
1195,72	1212,65	688,91	523,74	2283,04	
1191,32	1211,47	690,12	521,35	2285,07	<b>2281,62</b>

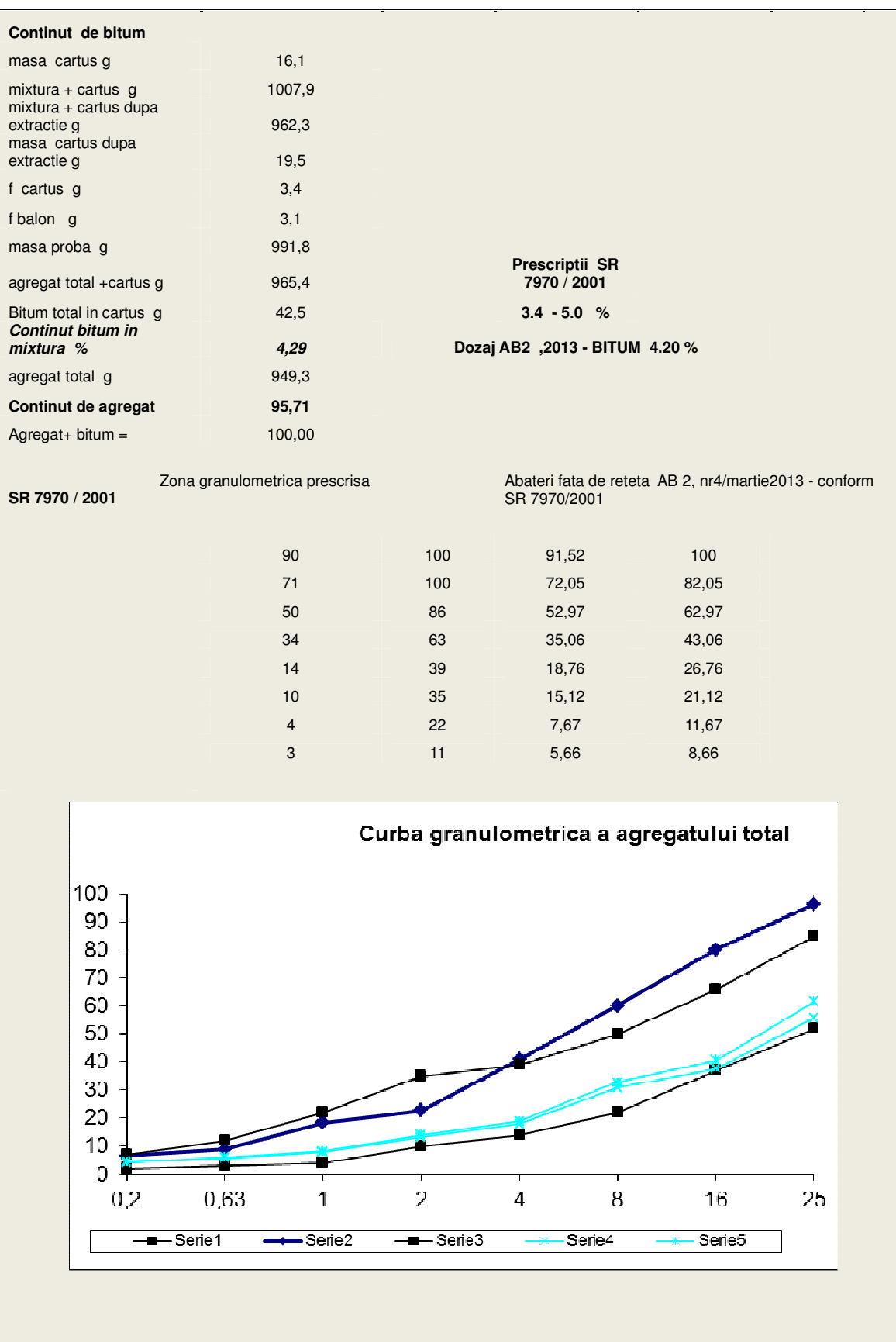




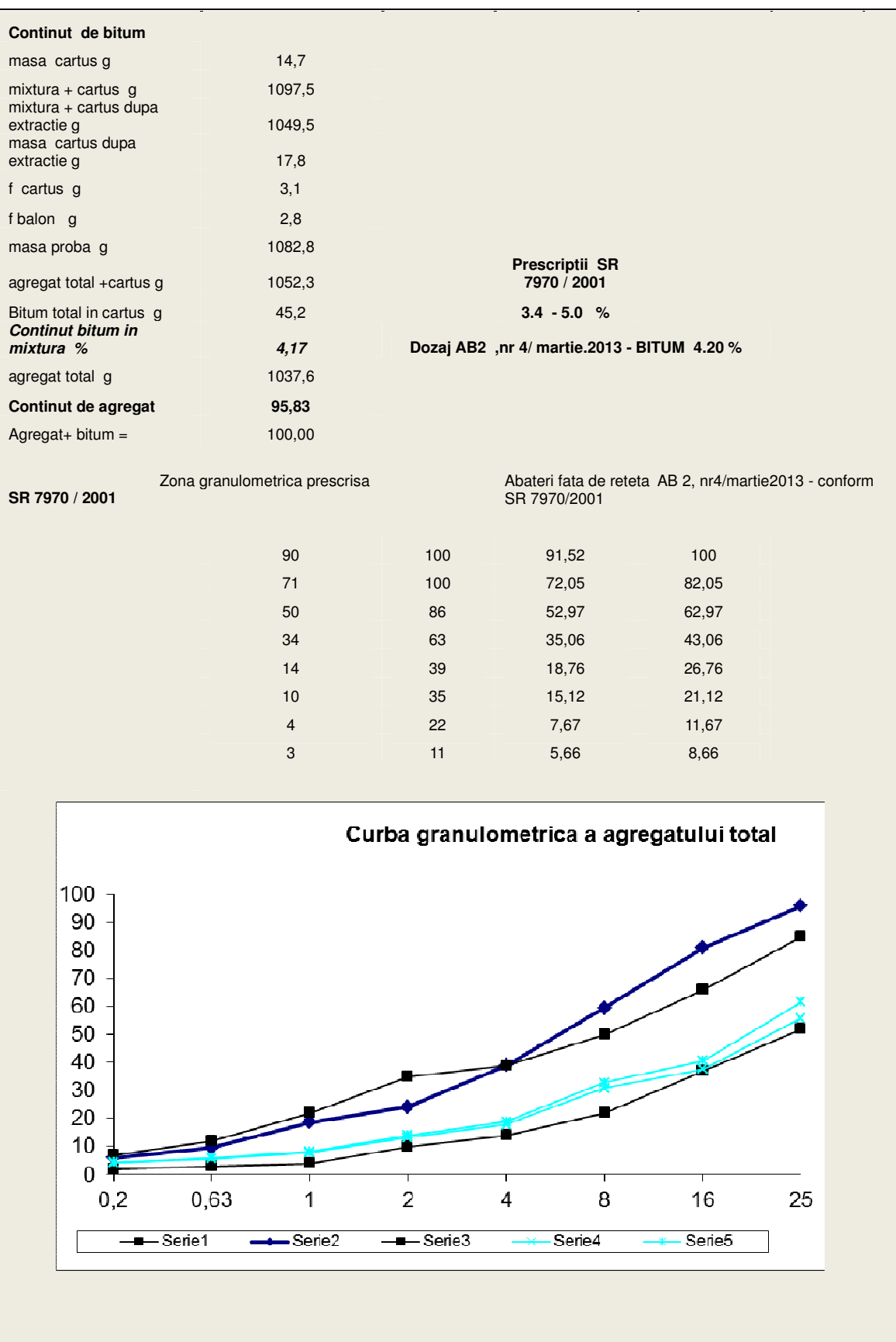
RECILAT CU FIBRE DE STICLA	RI 335 din 29.06.2013	Cod FL 042			
DC 4 A, DN 1F- SAMSUD	KM:3+800, DREAPTA				
		<b>SR 7970 / 2001</b>			
Caracteristici cilindri Marshall	<b>Proba AB 2</b>	<b>AB 25(asim)</b>			
(S) Stabilitatea Marshall (kn)	<b>10,85</b>	<b>min 5.0</b>			
(I)Indice de curgere ,fluajul (mm)	<b>3,65</b>	<b>1.5 - 4.0</b>			
Densitatea aparenta min (kg/mc)	<b>2291,12</b>	<b>2200</b>			
Absorbția de apă (%)	<b>3,7</b>	<b>2.00 - 8.00</b>			
Granulozitatea prin spalare si cernere conform SR EN 933-1/2002					
	Masa uscata totala ( g)				Dozaj AB 2 nr. 4 / martie 2013
	M 1				
	1041,9				
	Masa uscata dupa spalare (g)				
	M 2				
	976				
	Masa uscat partilor fine spalate				
	M 1 - M 2 (g)	Procente de refus	Procente cumulate	Zona granulometrica SR 7970 / 2001	
	65,9				
Site ochiuri patrate (mm)			<b>100,00</b>	AB 2	<b>100</b>
25	36,6	3,51	<b>96,49</b>	<b>90 - 100</b>	<b>96,52</b>
16	151,2	14,51	<b>81,98</b>	<b>71 - 100</b>	<b>77,05</b>
8	215,6	20,69	<b>61,28</b>	<b>50 - 86</b>	<b>57,97</b>
4	210,4	20,19	<b>41,09</b>	<b>34 - 63</b>	<b>39,06</b>
1	205,6	19,73	<b>21,36</b>	<b>14 - 39</b>	<b>22,76</b>
0,63	45,6	4,38	<b>16,98</b>	<b>.10 - 35</b>	<b>18,12</b>
0,2	86,9	8,34	<b>8,64</b>	<b>.4 - 22</b>	<b>9,67</b>
0,1	24,1	2,31	<b>6,32</b>	<b>.3 - 11</b>	<b>.7.16</b>
Material ramas fund Pi trece 0.10+ret.	0	0,00			
Filtru+rezid bitum	65,9	6,32			
	1041,9	100,00			
Procentul de cernut al partilor fine pe sita de 0.063 mm					
procent parti fine= $[(M1-M2)/M1] \times 100$			6,32		
validare rezultate = $[(M2-M2+Pi)/M2] \times 100 =$			0		
masa in aer m o ( g )	m in aer dupa 1 h apa (g) m1	m 2 in apa ( g )	Volum cmc	p g/cmc	p med. g/cmc
1196,33	1203,45	680,45	523	2287,44	
1201,52	1208,66	684,71	523,95	2293,20	
1202,31	1209,85	685,45	524,4	2292,73	<b>2291,12</b>



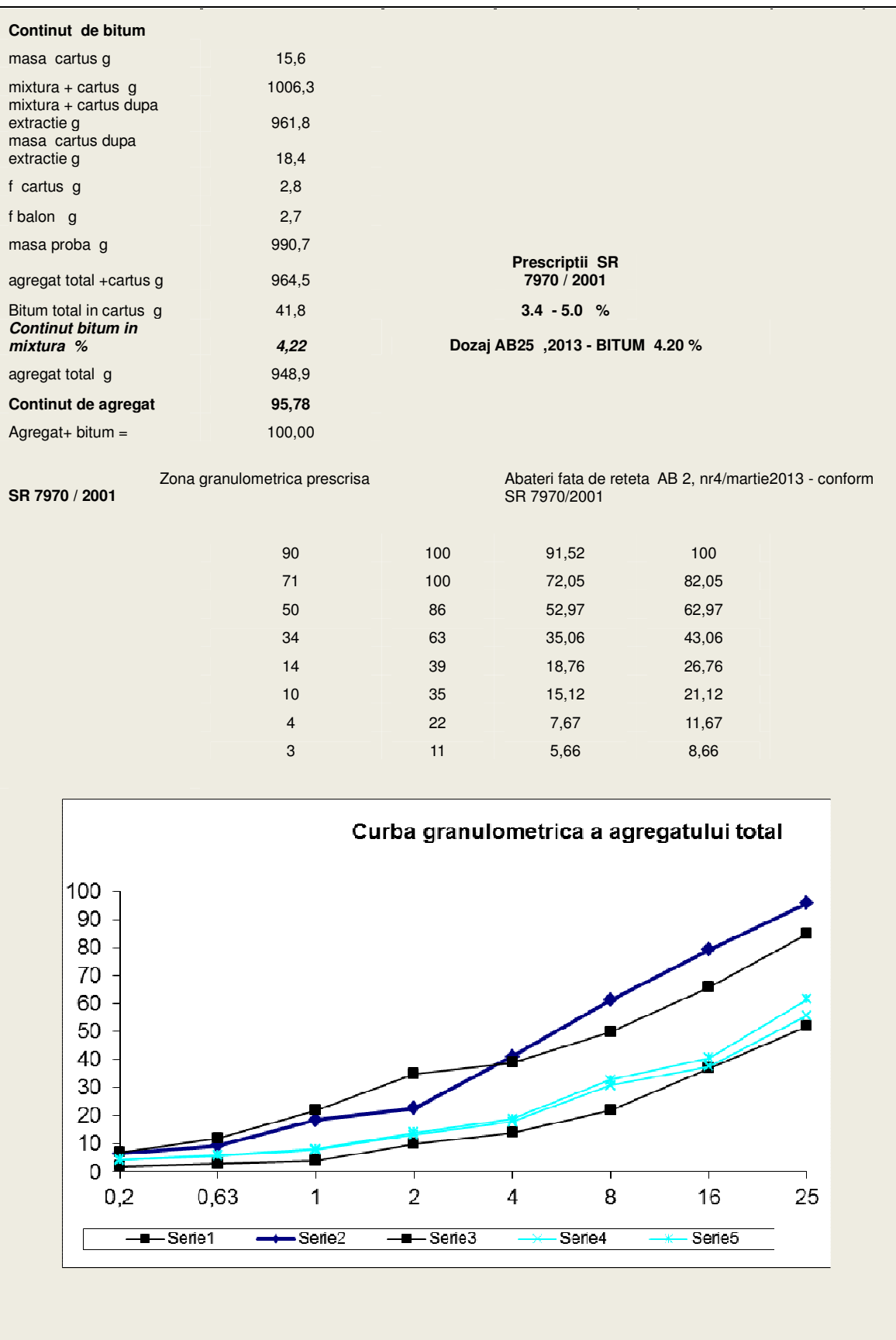
RECILAT CU FIBRE DE STICLA	RI 345 din 29.06.2013	Cod FL 042			
DC 4 A, DN 1F- SAMSUD	KM:3+900, DREAPTA				
		<b>SR 7970 / 2001</b>			
Caracteristici cilindri Marshall	<b>Proba AB 2</b>	<b>AB 25(asim)</b>			
(S) Stabilitatea Marshall (kn)	<b>10,52</b>	<b>min 5.0</b>			
(I)Indice de curgere ,fluajul (mm)	<b>3,71</b>	<b>1.5 - 4.0</b>			
Densitatea aparenta min (kg/mc)	<b>2285,43</b>	<b>2200</b>			
Absorbtia de apa (%)	<b>4</b>	<b>2.00 - 8.00</b>			
Granulozitatea prin spalare si cernere conform SR EN 933-1/2002					
	Masa uscata totala ( g)				Dozaj AB 2 nr. 4 / martie 2013
	M 1				
	949,3				
	Masa uscata dupa spalare (g)				
	M 2				
	886,7				
	Masa uscat partilor fine spalate				
	M 1 - M 2 (g)	Procente de refuz	Procente cumulate	Zona granulometrica SR 7970 / 2001	
	62,6				
Site ochiuri patrate (mm)			<b>100,00</b>	AB 2	<b>100</b>
25	33,1	3,49	<b>96,51</b>	<b>90 - 100</b>	<b>96,52</b>
16	155,1	16,34	<b>80,17</b>	<b>71 - 100</b>	<b>77,05</b>
8	190,3	20,05	<b>60,13</b>	<b>50 - 86</b>	<b>57,97</b>
4	181,2	19,09	<b>41,04</b>	<b>34 - 63</b>	<b>39,06</b>
1	174,2	18,35	<b>22,69</b>	<b>14 - 39</b>	<b>22,76</b>
0,63	41,2	4,34	<b>18,35</b>	<b>.10 - 35</b>	<b>18,12</b>
0,2	89,3	9,41	<b>8,94</b>	<b>.4 - 22</b>	<b>9,67</b>
0,1	22,3	2,35	<b>6,59</b>	<b>.3 - 11</b>	<b>.7.16</b>
Material ramas fund Pi trece 0.10+ret.	0	0,00			
Filtru+rezid bitum	62,6	6,59			
	949,3	100,00			
Procentul de cernut al partilor fine pe sita de 0.063 mm					
procent parti fine= $[(M1-M2)/M1] \times 100$	6,59				
validare rezultate = $[(M2-M2+Pi)/M2] \times 100 =$	0				
masa in aer m o ( g )	m in aer dupa 1 h apa (g) m1	m 2 in apa ( g )	Volum cmc	p g/cmc	p med. g/cmc
1195,21	1204,63	682,41	522,22	2288,71	
1200,36	1207,12	681,02	526,1	2281,62	
1197,45	1206,3	682,47	523,83	2285,95	<b>2285,43</b>



RECILAT CU FIBRE DE STICLA	RI 358 din 29.06.2013	Cod FL 042			
DC 4 A, DN 1F- SAMSUD	KM:4+000, DREAPTA				
		<b>SR 7970 / 2001</b>			
Caracteristici cilindri Marshall	<b>Proba AB 2</b>	<b>AB 25(asim)</b>			
(S) Stabilitatea Marshall (kn)	<b>10,96</b>	<b>min 5.0</b>			
(I)Indice de curgere ,fluajul (mm)	<b>3,54</b>	<b>1.5 - 4.0</b>			
Densitatea aparenta min (kg/mc)	<b>2280,11</b>	<b>2200</b>			
Absorbția de apă (%)	<b>3,6</b>	<b>2.00 - 8.00</b>			
Granulozitatea prin spalare si cernere conform SR EN 933-1/2002					
	Masa uscata totala ( g)				Dozaj AB 2 nr. 4 / martie 2013
	M 1				
	1037,6				
	Masa uscata dupa spalare (g)				
	M 2				
	975,4				
	Masa uscat partilor fine spalate				
	M 1 - M 2 (g)				Zona granulometrica SR 7970 / 2001
	62,2	Procente de refuz	Procente cumulate		
Site ochiuri patrate (mm)				AB 2	
			<b>100,00</b>		<b>100</b>
25	41,5	4,00	<b>96,00</b>	<b>90 - 100</b>	<b>96,52</b>
16	156,3	15,06	<b>80,94</b>	<b>71 - 100</b>	<b>77,05</b>
8	221,4	21,34	<b>59,60</b>	<b>50 - 86</b>	<b>57,97</b>
4	212,6	20,49	<b>39,11</b>	<b>34 - 63</b>	<b>39,06</b>
1	155,1	14,95	<b>24,16</b>	<b>14 - 39</b>	<b>22,76</b>
0,63	55,8	5,38	<b>18,78</b>	<b>.10 - 35</b>	<b>18,12</b>
0,2	96,3	9,28	<b>9,50</b>	<b>.4 - 22</b>	<b>9,67</b>
0,1	36,4	3,51	<b>5,99</b>	<b>.3 - 11</b>	<b>.7.16</b>
Material ramas fund Pi trece 0.10+ret. Filtru+rezid bitum	0	0,00			
	62,2	5,99			
	1037,6	100,00			
Procentul de cernut al partilor fine pe sita de 0.063 mm					
procent parti fine= $[(M1-M2)/M1] \times 100$			5,99		
validare rezultate = $[(M2-M2+Pi)/M2] \times 100 =$			0		
masa in aer m o ( g )	m in aer dupa 1 h apa (g) m1	m 2 in apa ( g )	Volum cmc	p g/cmc	p med. g/cmc
1202,33	1209,85	682,63	527,22	2280,51	
1206,41	1213,69	683,12	530,57	2273,80	
1197,44	1204,55	680,74	523,81	2286,02	<b>2280,11</b>



RECILAT CU FIBRE DE STICLA	RI 370 din 29.06.2013	Cod FL 042			
DC 4 A, DN 1F- SAMSUD	KM:4+200, DREAPTA				
		<b>SR 7970 / 2001</b>			
Caracteristici cilindri Marshall	<b>Proba AB 2</b>	<b>AB 25(asim)</b>			
(S) Stabilitatea Marshall (kn)	<b>10,35</b>	<b>min 5.0</b>			
(I)Indice de curgere ,fluajul (mm)	<b>3,84</b>	<b>1.5 - 4.0</b>			
Densitatea aparenta min (kg/mc)	<b>2277,55</b>	<b>2200</b>			
Absorbția de apă (%)	<b>3,85</b>	<b>2.00 - 8.00</b>			
Granulozitatea prin spalare si cernere conform SR EN 933-1/2002					
	Masa uscata totala ( g)				Dozaj AB 2 nr. 4 / martie 2013
	M 1				
	948,9				
	Masa uscata dupa spalare (g)				
	M 2				
	886				
	Masa uscat partilor fine spalate				
	M 1 - M 2 (g)			Zona granulometrica SR 7970 / 2001	
	62,9	Procente de refuz	Procente cumulate		
Site ochiuri patrate (mm)					
				<b>100,00</b>	<b>AB 2</b>
					<b>100</b>
25	37,5	3,95	<b>96,05</b>	<b>90 - 100</b>	<b>96,52</b>
16	157,8	16,63	<b>79,42</b>	<b>71 - 100</b>	<b>77,05</b>
8	171,3	18,05	<b>61,37</b>	<b>50 - 86</b>	<b>57,97</b>
4	191,6	20,19	<b>41,17</b>	<b>34 - 63</b>	<b>39,06</b>
1	175,4	18,48	<b>22,69</b>	<b>14 - 39</b>	<b>22,76</b>
0,63	39,9	4,20	<b>18,48</b>	<b>.10 - 35</b>	<b>18,12</b>
0,2	85,6	9,02	<b>9,46</b>	<b>.4 - 22</b>	<b>9,67</b>
0,1	26,9	2,83	<b>6,63</b>	<b>.3 - 11</b>	<b>.7.16</b>
Material ramas fund Pi trece 0.10+ret. Filtru+rezid bitum	0	0,00			
	62,9	6,63			
	948,9	100,00			
Procentul de cernut al partilor fine pe sita de 0.063 mm					
procent parti fine= $[(M1-M2)/M1] \times 100$	6,63				
validare rezultate = $[(M2-M2+Pi)/M2] \times 100 =$	0				
masa in aer m o ( g )	m in aer dupa 1 h apa (g) m1	m 2 in apa ( g )	Volum cmc	p g/cmc	p med. g/cmc
1200,33	1207,14	682,12	525,02	2286,26	
1205,63	1211,33	682,96	528,37	2281,79	
1207,71	1215,74	682,44	533,3	2264,60	<b>2277,55</b>





**ANEXA 3**

Imagini surprinse pe perioada realizării sectoarelor experimentale pe DJ 109, limita județ Cluj – Dragu, km: 39+700 - 40-200 și DC 4A, DN 1F – Șamșud, km: 3+000 – 4+200

		
<i>Foto 1. Drum existent nereabilitat</i>	<i>Foto 2. Lucrări pregătitoare pentru înlocuirea podețelor</i>	<i>Foto 3. Lucrări de compactare pe platforma drumului</i>
		
<i>Foto 4. Măsurători pe platforma drumului</i>	<i>Foto 5. Lucrări de terasamente</i>	<i>Foto 6. Lucrări de drenuri</i>
		
<i>Foto 7. Lucrări de colectare a apelor</i>	<i>Foto 8. Lucrări de aducere la profil a șanțurilor</i>	<i>Foto 9. Verificări de pantă</i>
		
<i>Foto 10. Verificări de grosimea straturilor</i>	<i>Foto 11. Verificarea pantei transversale</i>	<i>Foto 12. Compactarea înainte de reciclare</i>

		
<i>Foto 13. Așternere deșeurii de fibre</i>	<i>Foto 14. Strat din deșeurii de fibre de sticlă nereciclat</i>	<i>Foto 15. Fibre din sticlă tăiate din role cu lungimea de 12 cm</i>
		
<i>Foto 16. Limită între straturi pe tipuri de fibre</i>	<i>Foto 17. Fibre tăiate din role așternute în fața reciclatorului</i>	<i>Foto 18. Strat de ciment așternut pe carosabil înainte de reciclare</i>
		
<i>Foto 19. Alimentarea reciclatorului cu bitum spumat</i>	<i>Foto 20. Strat rutier obținut după reciclare "in situ" cu bitum spumat, ciment și fibre</i>	<i>Foto 21. Degradare marginală în stratul rutier reciclat</i>
		
<i>Foto 22. Alimentarea reciclatorului cu ciment</i>	<i>Foto 23. Imagine cu sectorul experimental și utilajul de reciclare Wirtgen 2000</i>	<i>Foto 24. Prelevarea probelor din amestecul reciclat</i>



		
<i>Foto 25. Pregătirea așternerii mixturei asfaltice</i>	<i>Foto 26. Așternerea cu repartizatorul a stratului de binder</i>	<i>Foto 27. Strat de binder după așternere și compactare</i>
		
<i>Foto 28. Verificarea temperaturii la așterne a mixturei asfaltice</i>	<i>Foto 29. Confirmarea temperaturii corecte de așternere</i>	<i>Foto 30. Verificarea grosimii stratului de binder</i>
		
<i>Foto 31. Confirmația grosimii proiectate a stratului de uzură</i>	<i>Foto 32. Așternerea stratului de uzură</i>	<i>Foto 33. Compactarea stratului de uzură</i>
		
<i>Foto 34. Racord cu stradă laterală</i>	<i>Foto 35. Bornarea kilometrică a traseului de drum</i>	<i>Foto 36. Drum reabilitat și marcat longitudinal</i>

