

CONSOLIDAREA LA ÎNCOVOIERE A GRINZILOR DIN BETON ARMAT UTILIZÂND MATERIALE COMPOZITE POLIMERICE ȘI DIFERITE SISTEME DE ANCORARE

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

Ing. Dan Diaconu

Conducător științific:
Referenți științifici:

prof.univ.dr.ing. Valeriu Stoian
prof.univ.dr.ing. Nicolae Țăranu
prof.univ.dr.ing. Cornelia Măgureanu
prof.univ.dr.ing. Corneliu Bob

Ziua susținerii tezei: 28.09.2011

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

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

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

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2006

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

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

Cuvânt înainte

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

Mulțumiri deosebite se cuvin conducătorului de doctorat prof.dr.ing. Valeriu Stoian, pentru contribuția sa la pregătirea mea profesională, la formarea mea ca cercetător și proiectant, pentru îndrumarea, sfaturile și sprijinul acordate la elaborarea tezei.

Mulțumesc foarte mult colegilor, cadrelor didactice și personalului tehnic pentru ajutorul acordat în anii doctoratului la efectuarea programului de încercări experimentale, pentru sfaturile și discuțiile purtate.

Mulțumesc călduros referenților oficiali: prof. dr. ing. Corneliu Bob, prof. dr. ing. Nicolae Țăranu și prof. dr. ing. Cornelia Măgureanu pentru faptul că au acceptat să facă parte din comisia de doctorat și pentru atenția deosebită acordată la recenziile tezei.

Mulțumesc părinților mei pentru toate sacrificiile făcute, pentru sprijin și încurajare.

Timișoara, septembrie 2011

Dan Diaconu

Diaconu, Dan

**CONSOLIDAREA LA ÎNCOVOIERE A GRINZILOR DIN BETON
ARMAT UTILIZÂND MATERIALE COMPOZITE POLIMERICE
ȘI DIFERITE SISTEME DE ANCORARE**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 5, Nr. 81, Editura Politehnica,
2011, 196 pagini, 102 figuri, 20 tabele.

ISSN: 1842-581X

ISBN: 978-606-554-339-3

Cuvinte cheie: consolidare, încovoiere, grinzi din beton armat,
ancoraje, materiale compozite, FRP, rășini epoxidice, țesătură,
lamele

Rezumat, Teza cuprinde 9 capitole, bibliografie și o anexă. În capitolul 1 intitulat "Introducere.Scopul și obiectul tezei" se prezintă un scurt istoric al evoluției materialelor compozite în lume. În capitolul 2 intitulat "Materiale compozite - prezentare generală" se pune accentul pe nuanțarea componentilor și caracteristicile acestor materiale relativ noi în domeniul construcțiilor. Capitolul 3 intitulat „Cercetări anterioare pe tema studiată” prezintă cercetările experimentale realizate la nivel mondial care au condus la diverse metode de proiectare ce au stat la baza întocmirii normativelor specifice. Capitolul 4 „Teste premergătoare pe materiale” cuprinde încercările efectuate pe materialele utilizate în cadrul studiului experimental propriu-zis. Capitolul 5 intitulat „Studiu teoretic. Modelare numerică asistată de calculator” prezintă în prima parte modalitatea de calcul a diverselor sisteme de consolidare cu materiale compozite a unei grinzi din beton supusă la încovoiere. Partea a doua a fost atribuită modelărilor numerice care au drept scop familiarizarea cu modul de comportare a grizilor din beton armat studiate atât neconsolidate cât și cu diferite sisteme de consolidare cu materiale compozite. Acest lucru ajută la alegerea și dimensionarea sistemului de încercare propriu-zis. În capitolul 6, „Studiu experimental”, este prezentată realizarea încercărilor, cu pregătirea celor 14 grinzi din beton armat, consolidarea acestora cu soluțiile propuse și încercarea lor în stand. Capitolul 7 denumit „Rezultate” cuprinde datele obținute în urma încercărilor, interpretarea și analizarea lor. În capitolul 8 intitulat "Aplicarea rezultatelor în practică" este arătat un studiu de caz asupra unei lucrări de consolidare pregătită și executată de doctorand prin firma proprie, aplicand astfel în practică rezultatele obținute în urma cercetării. În capitolul 9 intitulat "Concluzii finale.Contribuții personale" se prezintă o sinteză a rezultatelor cercetărilor efectuate fiind subliniate contribuțiile personale și valorificarea rezultatelor obținute.

CUPRINS

Lista figurilor	
Lista tabelelor	
1. INTRODUCERE. SCOPUL ȘI OBIECTUL TEZEI.....	1
1.1. Introducere.....	1
1.2. Scopul și obiectul tezei.....	3
2. MATERIALE COMPOZITE – PREZENTARE GENERALĂ.....	5
2.1. Generalități.....	5
2.2. Fibrele de armare.....	6
2.2.1. Scurtă prezentare.....	6
2.2.2. Tipuri de fibre de armare.....	7
2.2.3. Rezistența fibrelor.....	9
2.3. Matrice utilizate în compozite.....	11
2.3.1. Matrice polimerice termorigide.....	13
2.3.2. Matrice polimerice termoplaste.....	13
2.4. Compozitele polimerice.....	14
2.4.1. Proprietățile fizice.....	15
2.4.2. Proprietățile mecanice și de comportare.....	16
2.5. Consolidări cu materiale compozite polimerice.....	17
2.5.1. Utilizarea materialelor compozite polimerice.....	19
2.5.2. Avantaje și dezavantaje.....	19
3. CERCETĂRI ANTERIOARE PE TEMA STUDIATĂ.....	23
3.1. Introducere.....	23
3.2. Încovoiere.....	23
3.3. Forfecare.....	38
4. TESTE PREMERGĂTOARE PE MATERIALE.....	47
4.1. Introducere.....	47
4.2. Betonul și armătura.....	47
4.3. Compozitele.....	49
4.4. Bulioanele ancorate chimic.....	50
4.5. Consolidarea la presiune pe gaură.....	50
5. STUDIU TEORETIC. MODELARE NUMERICĂ ASISTATĂ DE CALCULATOR.....	59
5.1. Studiu teoretic.....	59
5.1.1. Calculul conform <i>fib</i> TG 9.3 – verificarea la încovoiere.....	59
5.1.1.1. Considerarea cedării prin curgerea armăturii și zdrobirea betonului (la S.L.U.).....	61
5.1.1.2. Considerarea cedării prin curgerea armăturii și ruperea compozitului (la S.L.U.).....	62
5.1.1.3. Considerarea cedării prin desprindere cauzată de fisurile din forță tăietoare (la S.L.U.).....	63
5.1.1.4. Considerarea cedării prin desprindere cauzată de fisurile din încovoiere sau desprinderea ancorării de capăt (la S.L.U.).....	64
5.1.1.5. Considerarea cedării prin forfecare la capătul compozitului (la S.L.U.).....	68
5.1.1.6. Claculul în starea limită a exploatării normale (S.L.E.N.).....	69
5.1.2. Calculul conform ACI 440.2R-02 – verificarea la încovoiere.....	74
5.1.2.1. Claculul în starea limită ultimă (S.L.U.).....	75
5.1.2.2. Claculul în starea limită a exploatării normale (S.L.E.N.).....	77
5.2. Modelare numerică asistată de calculator.....	78
5.2.1. Principiul de încercare.....	78

5.2.2. Modelarea numerică pentru grinda martor RB.....	80
5.2.3. Modelarea numerică pentru grinda martor RB2.....	80
5.2.4. Modelarea numerică pentru grinda consolidată cu țesătură din fibre de carbon R-2W.....	81
5.2.5. Modelarea numerică pentru grinda consolidată cu lamelă din fibre de carbon R-1S-0.....	82
5.2.6. Modelarea numerică pentru grinda consolidată cu lamele din fibre de carbon în șanțuri tăiate în beton R-2NSMS.....	83
6. PROGRAMUL EXPERIMENTAL.....	85
6.1. Introducere.....	85
6.2. Măsurarea datelor experimentale.....	85
6.3. Derularea programului experimental.....	86
6.3.1. Elementul martor RB.....	86
6.3.2. Elementul martor RB2.....	87
6.3.3. Elementul R-2W.....	89
6.3.3.1. Etapele consolidării grinzii R-2W.....	89
6.3.3.2. Încercarea grinzii R-2W.....	90
6.3.4. Elementul R-2W-A.....	92
6.3.4.1. Etapele consolidării grinzii R-2W-A.....	92
6.3.4.2. Încercarea grinzii R-2W-A.....	95
6.3.5. Elementul R-2W-MA.....	96
6.3.5.1. Etapele consolidării grinzii R-2W-MA.....	97
6.3.5.2. Încercarea grinzii R-2W-MA.....	98
6.3.6. Elementul RL-2W-A.....	100
6.3.6.1. Etapele consolidării grinzii RL-2W-A.....	100
6.3.6.2. Încercarea grinzii RL-2W-A.....	102
6.3.7. Elementul R-2S-W.....	103
6.3.7.1. Etapele consolidării grinzii R-2S-W.....	104
6.3.7.2. Încercarea grinzii R-2S-W.....	104
6.3.8. Elementul R-2S-W-2.....	107
6.3.8.2. Încercarea grinzii R-2S-W-2.....	107
6.3.9. Elementul R-2NSMS.....	108
6.3.9.1. Etapele consolidării grinzii R-2NSMS.....	109
6.3.9.2. Încercarea grinzii R-2NSMS.....	110
6.3.10. Elementul R-1S-0.....	111
6.3.10.1. Etapele consolidării grinzii R-1S-0.....	112
6.3.10.2. Încercarea grinzii R-1S-0.....	112
6.3.11. Elementul R-1S.....	113
6.3.11.1. Etapele consolidării grinzii R-1S.....	114
6.3.11.2. Încercarea grinzii R-1S.....	115
6.3.12. Elementul R-1S-AS.....	116
6.3.12.1. Etapele consolidării grinzii R-1S-0.....	117
6.3.12.2. Încercarea grinzii R-1S-0.....	119
6.3.13. Elementul R-1S-SP.....	121
6.3.13.1. Etapele consolidării grinzii R-1S-SP.....	121
6.3.13.2. Încercarea grinzii R-1S-SP.....	123
6.3.14. Elementul R-1S-CA.....	125
6.3.14.1. Etapele consolidării grinzii R-1S-CA.....	125
6.3.14.2. Încercarea grinzii R-1S-CA.....	126
7. REZULTATE.....	129
7.1. Elementul martor RB.....	129

7.2. Elementul martor RB2.....	130
7.3. Elementul R-2W.....	131
7.4. Elementul R-2W-A.....	132
7.5. Elementul R-2W-MA.....	134
7.6. Elementul RL-2W-A.....	135
7.7. Elementul R-2S-W.....	136
7.8. Elementul R-2S-W-2.....	137
7.9. Elementul R-2NSMS.....	138
7.10. Elementul R-1S-0.....	140
7.11. Elementul R-1S.....	141
7.12. Elementul R-1S-AS.....	142
7.13. Elementul R-1S-SP.....	143
7.14. Elementul R-1S-CA.....	145
8. APLICAREA REZULTATELOR ÎN PRACTICĂ.....	147
8.1. Consolidare centură-buiandrug.....	147
8.2. Consolidare cadre din beton armat.....	148
8.3. Consolidarea nervurilor unui planșeu modular.....	155
9. CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE.....	161
9.1. Concluzii privind consolidarea grinzilor din beton armat cu materiale compozite și sistemele de ancorare.....	161
9.2. Contribuții personale.....	165
Bibliografie.....	167
Anexe.....	179
A1 PROGRAMUL EXPERIMENTAL	
A2 SINTEZA REZULTATELOR PROGRAMULUI EXPERIMENTAL	
A3 DIAGRAMA FORȚĂ-DEFORMAȚIE PENTRU TOATE ELEMENTELE ÎNCERCATE	

LISTA FIGURILOR

Figura 2.1.	Fibra înconjurată de matrice și starea de tensiune în fibră.....	10
Figura 4.1.	Diagrama caracteristică pentru armăturile Ø8.....	48
Figura 4.2.	Diagrama caracteristică pentru armăturile Ø16.....	48
Figura 4.3.	Verificarea la smulgere a buloanelor.....	50
Figura 4.4.	Consolidarea lamelelor din fibre de carbon la presiune pe gaură.....	52
Figura 4.5.	Încercarea la tracțiune pentru lamelele consolidate.....	54
Figura 4.6.	Curba forță-deformație pentru epruvetele martor.....	55
Figura 4.7.	Curba forță-deformație pentru epruvetele consolidate cu țesătură în patru straturi.....	55
Figura 4.8.	Curba forță-deformație pentru epruvetele consolidate prin înfășurare cu țesătură în două straturi.....	56
Figura 4.9.	Curba forță-deformație pentru epruvetele consolidate cu plăcuțe metalice pe o față.....	56
Figura 4.10.	Curba forță-deformație pentru epruvetele consolidate cu plăcuțe metalice pe două fețe.....	57
Figura 5.1.	Principiul de încercare a grinzilor [cm]	78
Figura 5.2.	Principiul de armare [m]	79
Figura 5.3.	Locația tăieturilor pe armătura din mijloc [cm]	79
Figura 5.4.	Diagrama forță-deplasare pentru elementul martor RB.....	80
Figura 5.5.	Diagrama forță-deplasare pentru elementul martor RB2.....	81
Figura 5.6.	Diagrama forță-deplasare pentru elementul consolidat R-2W.....	82
Figura 5.7.	Diagrama forță-deplasare pentru elementul consolidat R-1S-0.....	83
Figura 5.8.	Diagrama forță-deplasare pentru elementul consolidat R-2NSMS.....	84
Figura 6.1.	Standul experimental [cm]	85
Figura 6.2.	Grinda RB pregătită pentru încercare.....	86
Figura 6.3.	Grinda RB după încercare.....	87
Figura 6.4.	Grinda RB2 pregătită pentru încercare.....	88
Figura 6.5.	Grinda RB2 după încercare.....	88
Figura 6.6.	Consolidarea cu țesătură din fibre de carbon – R-2W.....	90
Figura 6.7.	Grinda R-2W pregătită pentru încercare.....	91
Figura 6.8.	Grinda R-2W după încercare. Modul de cedare.....	91
Figura 6.9.	Detaliu ancoraj tijă compozită cu capăt floare (Anchor Spike) [cm].....	92
Figura 6.10.	Confecționarea ancorajelor gen tije compozite cu capăt floare.....	94
Figura 6.11.	Consolidarea cu țesătură din fibre de carbon ancorată la capete cu tije compozite cu capăt floare – R-2W-A.....	94
Figura 6.12.	Grinda R-2W-A pregătită pentru încercare.....	95
Figura 6.13.	Grinda R-2W-A după încercare.....	96
Figura 6.14.	Grinda R-2W-A - modul de cedare.....	96

Figura 6.15.	Pregătirea ancorajelor metalice – grinda R-2W-MA.....	97
Figura 6.16.	Consolidarea cu țesătură din fibre de carbon ancorată la capete cu conexpanduri și discuri metalice – R-2W-MA.....	98
Figura 6.17.	Grinda R-2W-MA pregătită pentru încercare.....	99
Figura 6.18.	Grinda R-2W-MA după încercare.....	99
Figura 6.19.	Grinda R-2W-MA - modul de cedare.....	100
Figura 6.20.	Consolidarea cu țesătură din fibre de carbon aplicată pe fețele laterale și ancorată la capete cu tije compozite cu capăt floare – RL-2W-A.....	101
Figura 6.21.	Grinda RL-2W-A pregătită pentru încercare.....	102
Figura 6.22.	Grinda RL-2W-A după încercare.....	103
Figura 6.23.	Grinda RL-2W-A - modul de cedare.....	103
Figura 6.24.	Grinda R-2S-W pregătită pentru încercare.....	105
Figura 6.25.	Grinda R-2S-W după încercare.....	106
Figura 6.26.	Grinda R-2S-W - modul de cedare.....	106
Figura 6.27.	Grinda R-2S-W-2 pregătită pentru încercare.....	107
Figura 6.28.	Grinda R-2S-W-2 după încercare.....	108
Figura 6.29.	Grinda R-2S-W-2 - modul de cedare.....	108
Figura 6.30.	Consolidarea cu lamele din fibre de carbon aplicate în șlițuri tăiate în beton pe fața inferioară a grinzii – R-2NSMS.....	110
Figura 6.31.	Grinda R-2NSMS pregătită pentru încercare.....	110
Figura 6.32.	Grinda R-2NSMS după încercare.....	111
Figura 6.33.	Grinda R-2NSMS - modul de cedare.....	111
Figura 6.34.	Grinda R-1S-0 pregătită pentru încercare.....	112
Figura 6.35.	Grinda R-1S-0 după încercare.....	113
Figura 6.36.	Grinda R-1S-0 - modul de cedare.....	113
Figura 6.37.	Detaliu ancoraj – grinda R-1S.....	114
Figura 6.38.	Grinda R-1S pregătită pentru încercare.....	115
Figura 6.39.	Grinda R-1S după încercare. Modurile de cedare.....	116
Figura 6.40.	Detaliul zonei de ancorare – grinda R-1S-AS.....	117
Figura 6.41.	Consolidarea cu lamelă ancorată la capăt cu Anchor Spikes – R-1S-AS.....	119
Figura 6.42.	Grinda R-1S-AS pregătită pentru încercare.....	120
Figura 6.43.	Grinda R-1S-AS după încercare.....	120
Figura 6.44.	Grinda R-1S-AS - modul de cedare.....	121
Figura 6.45.	Consolidarea cu lamelă ancorată la capăt cu plăcuțe metalice – R-1S-SP.....	123
Figura 6.46.	Grinda R-1S-SP pregătită pentru încercare.....	123
Figura 6.47.	Grinda R-1S-SP după încercare.....	124
Figura 6.48.	Grinda R-1S-SP - modul de cedare.....	124
Figura 6.49.	Detaliu ancoraj – grinda R-1S-CA.....	125

Figura 6.50.	Consolidarea lamelei la presiune pe gaură.....	126
Figura 6.51.	Grinda R-1S-CA pregătită pentru încercare.....	127
Figura 6.52.	Grinda R-1S-CA după încercare.....	127
Figura 6.53.	Grinda R-1S-CA - modul de cedare.....	128
Figura 7.1.	Diagrama forță-deplasare pentru grinda martor RB.....	129
Figura 7.2.	Diagramele forță-deplasare pentru grinzile RB2 și RB.....	130
Figura 7.3.	Diagramele forță-deplasare pentru grinzile R-2W și RB2.....	132
Figura 7.4.	Diagramele forță-deplasare pentru grinzile R-2W-A și RB2.....	133
Figura 7.5.	Diagramele forță-deplasare pentru grinzile R-2W-MA și RB2.....	134
Figura 7.6.	Diagramele forță-deplasare pentru grinzile RL-2W-A și RB2.....	135
Figura 7.7.	Diagramele forță-deplasare pentru grinzile R-2S-W și RB2.....	137
Figura 7.8.	Diagramele forță-deplasare pentru grinzile R-2S-W-2 și RB2.....	138
Figura 7.9.	Diagramele forță-deplasare pentru grinzile R-2NSMS și RB2.....	139
Figura 7.10.	Diagramele forță-deplasare pentru grinzile R-1S-0 și RB2.....	141
Figura 7.11.	Diagramele forță-deplasare pentru grinzile R-1S și RB2.....	142
Figura 7.12.	Diagramele forță-deplasare pentru grinzile R-1S-AS și RB2.....	143
Figura 7.13.	Diagramele forță-deplasare pentru grinzile R-1S-SP și RB2.....	144
Figura 7.14.	Diagramele forță-deplasare pentru grinzile R-1S-CA și RB2.....	145
Figura 8.1.	Starea structurală după înlăturarea buiandrugului.....	147
Figura 8.2.	Pașii consolidării centurii.....	148
Figura 8.3.	Starea structurală dinaintea consolidării.....	149
Figura 8.4.	Schema de consolidare a cadrelor din beton armat.....	153
Figura 8.5.	Starea structurală după consolidare.....	154
Figura 8.6.	Soluții propuse pentru consolidarea nervurilor.....	157
Figura 8.7.	Schema de consolidare a nervurilor [cm]	158
Figura 8.8.	Consolidarea nervurilor cu țesătură din fibre de carbon.....	159
Figura 8.9.	Planșeul modular consolidat.....	160
Figura 9.1.	Diagramele forță-deplasare pentru grinzile consolidate cu lamele pultrudate din fibre de carbon.....	162
Figura 9.2.	Diagramele forță-deplasare pentru grinzile consolidate cu țesătură din fibre de carbon.....	162
Figura 9.3.	Randamentul sistemelor de consolidare.....	163
Figura 9.4.	Randamentul sistemelor de ancorare.....	164
Figura 9.5.	Capacitatea portantă ultimă pentru elementele încercate.....	164
Figura 9.6.	Forța la fisurare pentru elementele încercate.....	165
Figura A3.	DIAGRAMA FORȚĂ-DEFORMAȚIE PENTRU TOATE ELEMENTELE ÎNCERCATE	

LISTA TABELELOR

Tabelul 2.1.	Proprietățile fibrelor de carbon.....	7
Tabelul 2.2.	Proprietățile fibrelor de sticlă.....	8
Tabelul 2.3.	Proprietățile fibrelor de aramidă.....	9
Tabelul 2.4.	Particularități ale matricelor polimerice.....	12
Tabelul 2.5.	Principalele proprietăți ale matricelor polimerice.....	12
Tabelul 2.6.	Proprietățile unor matrice termorigide.....	13
Tabelul 2.7.	Proprietățile unor matrice termoplaste.....	14
Tabelul 2.8.	Densitatea materialelor compozite, comparativ cu oțelul (kg/m^3)....	15
Tabelul 2.9.	Coeficienții de dilatare termică ai unor materiale FRP tipice, unidirecționale, respectiv ai betonului și oțelului.....	15
Tabelul 2.10.	Proprietățile la întindere ale laminatelor FRP cu un conținut de 40-60% fibre.....	17
Tabelul 2.11.	Consolidarea cu lamele de carbon, comparativ cu lamelele de oțel.....	18
Tabelul 4.1.	Caracteristicile armăturilor.....	49
Tabelul 4.2.	Caracteristicile materialelor compozite Sika.....	49
Tabelul 4.3.	Verificarea rășinii și a buloanelor.....	50
Tabelul 4.4.	Rezultatele încercării la tracțiune pe lamelele consolidate.....	57
Tabelul 5.1.	Factori de siguranță γ_f	60
Tabelul 5.2.	Factorul de mediu C_E	74
Tabelul 5.3.	Rezistența compozitului la fluaaj.....	78
Tabelul A1.	PROGRAMUL EXPERIMENTAL	
Tabelul A2.	SINTEZA REZULTATELOR PROGRAMULUI EXPERIMENTAL	

1. INTRODUCERE. SCOPUL ȘI OBIECTUL TEZEI

1.1. Introducere

De-a lungul timpului diferite elemente structurale din beton armat au fost reabilitate din cauza anumitor modificări structurale cum ar fi: deteriorarea structurii sub acțiunea mediului înconjurător (de exemplu corodarea armăturii), modificarea rigidității structurii sau exploatarea necorespunzătoare a acesteia, suplimentarea (creșterea) încărcărilor datorită unor modificări structurale sau de funcționalitate, schimbarea normelor de proiectare, creșterea cerințelor de siguranță. Toate acestea au condus la dezvoltarea în timp de diferite metode de consolidare de genul: refacerea acoperirii cu beton cu mortare de înaltă rezistență cu adaos de fibre din oțel sau armături respectiv lipirea pe suprafața betonului a unor lamele din oțel.

În ultimii ani, în multe centre de cercetare din toată lumea au fost dezvoltate și testate noi tehnici de consolidare care presupun folosirea materialelor compozite armate cu fibre polimerice (fibre reinforced polymer – FRP) sub formă de lamele, țesături sau armături. Astfel s-a obținut o creștere în rezistență respectiv în rigiditate pentru elementele structurale. Printre primii care au studiat aplicarea materialelor compozite polimerice a fost Urs Meier în 1987 în Elveția. În 1990 a fost urmat de Ladner și Weder, ca apoi să cunoască un interes la nivel mondial.

La început consolidarea elementelor structurale din beton armat cu FRP s-a făcut prin lipirea de suprafața betonului prin intermediul unei rășini epoxidice a unei țesături din fibre polimerice (FRP fabric). S-au dezvoltat două metode de aplicare: una umedă, când țesătura era preimpregnată cu rășină și apoi aplicată pe suprafața de beton, și alta uscată, când rășina era aplicată pe suprafața suport iar apoi țesătura era așezată și impregnată. Apoi, pentru a simplifica procedeul și a obține o calitate ridicată la impregnarea compozitului, s-a dezvoltat un sistem nou care presupunea folosirea unor lamele din fibre polimerice de carbon preimpregnate și uscate în fabrică (C-FRP strips).

Deoarece materialele compozite au o cedare casantă s-a conceput un alt sistem de consolidare ce implică așezarea compozitului (fie lamele fie armături compozite) în șlițuri tăiate în suprafața betonului și lipirea lor cu rășină epoxidică (near surface mounted reinforcement – NSMR), ceea ce asigură de altfel și o protecție mai bună în mediu coroziv și păstrează nemodificată secțiunea elementului consolidat.

Pentru a avea o legătură (aderență) cât mai bună între suprafața elementului consolidat (betonul) și materialul compozit s-au dezvoltat unele metode de ancorare, ca de exemplu: ancoraje chimice de tipul unor tije din material compozit preimpregnat la un capăt (parte care va fi introdusă în beton) iar partea de compozit rămasă fiind neimpregnată și lipită ulterior de materialul folosit la consolidare (anchor spikes); prin lipirea la cele două capete ale compozitului, transversal pe acesta, de țesătură din fibre compozite; ancorarea capetelor compozitului cu ajutorul unor plăcuțe metalice prinse și strânse pe compozit prin intermediul unor șuruburi (tije filetate) fixate chimic în beton.

Cele mai noi metode de consolidare presupun prinderea mecanică a compozitului cu bolțuri împușcate în beton (powder-actuated fasteners). Bank și

2 INTRODUCERE - 1

Lamanna au caracterizat această metodă de consolidare ca fiind una rapidă și eficientă în cazul consolidării la încovoiere a elementelor structurale din beton.

Principalele avantaje ale compozitelor folosite ca soluții de consolidare sunt:

- rezistență mare în raport cu greutatea – asigură o bună armare în aplicații în care se cere o greutate redusă;
- necorozive – nu vor coroda sub expunerea unei varietăți mari de factori corozivi inclusiv ionii de clor;
- neconductive – asigură o izolare electrică și termică excelentă;
- excelentă rezistență la oboseală – se comportă foarte bine în cazul încărcărilor ciclice;
- rezistență bună la impact – rezistă la încărcări punctuale bruște și violente;
- transparentă magnetică – nu sunt afectate de câmpurile electromagnetice; excelente pentru aplicații ale MAI și ale altor tipuri de centre de cercetare electronică;
- stabilitate dimensională sub încărcări termice – se reduce astfel dilatarea și contracția din betonul supus la variații de temperatură;
- greutate mică – ușor de transportat și de asamblat la fața locului fără a avea nevoie de utilaje speciale de ridicat.

Dezavantajele potențiale ale consolidărilor cu materiale compozite sunt următoarele :

- prețul relativ mare, care însă scade de la an la an odată cu producția în volume mai mari și cu o creștere a concurenței dintre firmele producătoare;
- sensibilitate la radiații ultraviolete, astfel că în locurile expuse acestea trebuie protejate;
- rezistența la foc scăzută, așa încât la temperaturi care depășesc temperatura de tranziție sticloasă a rășinei, trebuie luate măsuri de protecție;
- modul de elasticitate câteodată mai mic decât al oțelului;
- alungire la rupere mai mică decât a oțelului și rupere casantă;
- sensibilitate la umiditate ridicată a rășinii;
- probleme de ancorare la precomprimare.

Modificările structurale la care se recomandă utilizarea acestor consolidări cu materiale compozite sunt următoarele:

- deteriorări structurale cauzate de acțiunea mediului (ex. coroziunea armăturilor);
- rigiditatea sau exploatarea inadecvată a structurii;
- suprasolicitarea apărută ca urmare a schimbărilor structurale sau funcționale;
- schimbarea condițiilor, (înnoirea) normelor de proiectare;
- creșterea cerințelor de siguranță;
- modificarea sarcinilor de utilizare sau a încărcărilor, alinierea la încărcările noi;
- capacitatea inadecvată la deformații.

Consolidările cu materiale compozite se mai pot utiliza cu succes atunci când se cere scurtarea duratei reparațiilor, respectiv în locuri cu acces limitat și când nu se permite adăugarea unor încărcări semnificative structurii.

În țările dezvoltate aceste soluții sunt folosite de peste 15 ani, și în ultimii ani din ce în ce mai intens. Există numeroase aplicații și proiecte de cercetare, care încearcă să perfecționeze calculele și să elaboreze norme de calcul și de execuție.

Consolidarea unei clădiri nu trebuie tratată parțial, în sensul de a proiecta și executa lucrări numai acolo unde apar degradări, ci pe întreg ansamblul clădirii, asigurându-se în final cel puțin rezistența și stabilitatea avute anterior.

La proiectarea și executarea lucrărilor de consolidare este necesar să se aibă în vedere o serie de principii, a căror respectare constituie o garanție a asigurării rezistenței, stabilității și rigidității în exploatarea în continuare a construcției consolidate și care constau în:

- depistarea tuturor degradărilor și stabilirea exactă a cauzelor care le-au provocat;
- suprimarea, în cazurile în care este posibil, a cauzelor care au condus la degradarea clădirii;
- stabilirea celei mai indicate soluții de consolidare din punct de vedere tehnico-economic;
- la proiectare să se țină seama de dotarea, posibilitățile și experiența constructorilor la executarea acestor categorii de lucrări;
- să se asigure o asistență tehnică permanentă acestor lucrări, folosind specialiști cu experiență în acest domeniu;
- lucrările să se execute cu muncitori calificați, specializați în aceste categorii de lucrări;
- colaborarea între proiectant și constructor să fie cât mai perfectă, pe întreaga perioadă de executare a lucrărilor de consolidare;
- evaluarea costului lucrărilor de consolidare să fie cât mai aproape de realitate, astfel încât organele de resort ale beneficiarului să aibă posibilitatea să aprecieze amploarea lucrărilor de consolidare, precum și oportunitatea executării lor din punct de vedere tehnico-economic;
- alegerea materialelor și a utilajelor necesare executării lucrărilor de consolidare trebuie făcută cu multă atenție, pentru ca ele să corespundă întrutotul scopului urmărit;
- la o lucrare de consolidare se caută să se păstreze echilibrul stabilit în timpul cedării, echilibru ce nu trebuie deranjat prin încercări de a readuce elementele în poziția inițială, decât în cazuri cu totul speciale, când nu mai există alte soluții și atunci cu multă precauție.

Cu toate că materialele compozite și implicit soluțiile de consolidare ce presupun utilizarea lor nu sunt un înlocuitor total al metodelor tradiționale de consolidare, totuși au importante avantaje care le impun a fi folosite acolo unde pot da rezultate notabile și sunt eficiente din punct de vedere al costului.

1.2. Scopul și obiectul tezei

Scopul acestei teze de doctorat constă în studierea și clarificarea unor aspecte referitoare la influența diferitor tipuri de consolidări și ancoraje cu materiale compozite polimerice asupra comportamentului grinzilor din beton armat supuse la încovoiere. Programul experimental cu elementele încercate și soluțiile de consolidare propuse este găsit în anexă.

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

- studiu documentar cu privire la situația cercetării în domeniul care face subiectul prezentei teze;
- cercetări experimentale asupra materialelor folosite în derularea programului experimental;

- studiul teoretic și modelarea numerică asistată de calculator pentru diferitele soluții de consolidare și ancorare propuse;
- realizare elementelor experimentale (a grinzilor din beton armat) prin contractarea unei firme specializate în domeniul prefabricatelor din beton armat și/sau precomprimat, obținându-se astfel elemente similare din punct de vedere al materialelor utilizate (beton și armătură);
- consolidarea grinzilor din beton armat conform soluțiilor adoptate;
- efectuarea testelor experimentale;
- aplicarea în practică a rezultatelor obținute.

2. MATERIALE COMPOZITE – PREZENTARE GENERALĂ

2.1. Generalități

Noțiunea de material compozit există încă din antichitate când oamenii acelor timpuri foloseau la contruirea locuințelor cărămizi realizate din argilă și pleavă, paie, resturi lemnoase, sau suluri din trestie lipite cu lut. În timp, odată cu evoluția speciei umane au fost descoperite noi materiale și prin urmare noi compozite, culminând cu cele moderne care utilizează matrice polimerice armate cu fibre de diferite tipuri (FRP – fiber-reinforced polymer). Avantajele acestora din urmă sunt semnificative din prisma rezistenței și rigidității ridicate coroborate cu o greutate mică, față de materialele tradiționale din oțel.

Deși conceptul de compozit există de mii de ani, implementarea tehnologiei de producere a compozitului de tip FRP și utilizarea lui industrială este recentă, fiind prezentă abia de la începutul secolului 20. Astfel la începutul anilor 1930 se menționează folosirea materialelor compozite polimerice la construcția bărcilor într-un program experimental, când coca acestora s-a construit din fibre de sticlă impregnate cu o rășină poliesterică.

Explozia utilizării compozitelor s-a atins în timpul celui de-al doilea război mondial când industria de război și-a deschis interesul spre noi produse cu proprietăți și caracteristici superioare, implementându-le în proiecte nucleare, spațiale și aeronautice, nautice, de construcții etc., fiind ușoare, necorozive, rezistență ridicată și prezentând transparentță radar. Acest lucru a condus la realizarea vestei antiglonț din kevlar, avioane invizibile radar, vapoare rezistente la corziunea apei sărate, mai ușoare și cu un consum de combustibil redus semnificativ, clădiri și buncăre armate și/sau consolidate cu materiale compozite conferindu-le o rezistență superioară la explozii și impact direct etc..

După război a continuat utilizarea pe scară largă în industrii ca nautică, aeronautică și chimică și din anii 1970 în industria de automobile.

În construcții, primele utilizări apar menționate la mijlocul anilor 1950 prin folosirea barelor din materiale compozite la armarea elementelor din beton aflate în medii corozive. Abia începând cu anii 1980 apare diversificarea folosirii compozitelor atât ca armare a elementelor din beton, cât și ca reabilitare și consolidare a monumentelor istorice și clădirilor de locuit sau industriale. Tot în această perioadă a fost construit, în Germania, primul pod rutier utilizând armături precomprimate din compozite, urmându-i o serie de alte poduri, pasaje, podețe în țări ca Elveția, Suedia, Japonia, SUA, Canada etc..

În perioada actuală, marii producători de materiale și sisteme compozite polimerice își axează producția pe produse proprii industriei de construcții, fiind considerată principala piață care le va absorbi aceste produse în viitor.

Materialele compozite polimerice se obțin prin combinarea următoarelor componente:

- **matricea polimerică** (o rășină termoplastică sau termorigidă de tipul: poliesterică, isopoliesterică, vinilesterică, epoxidică și fenolică);
- **fibrele de armare** (realizate din sticlă, carbon, aramidă ș.a.);

- fileri,
- aditivi și modificatori.

Cheia utilizării eficiente a materialelor compozite constă în folosirea unor fibre corespunzătoare scopului urmărit, dispunerea fibrelor în pozițiile și orientările potrivite, realizarea unei proporții optime de fibre în asociere cu matricea adecvată [59].

2.2. Fibrele de armare

2.2.1. Scurtă prezentare

Componenta de bază a materialului compozit o reprezintă fibra. Obținerea ei se realizează în urma unor procese tehnologice de o complexitate ridicată ceea ce face ca prețul fibrei să fie destul de mare. Forma și tipul fibrei se răsfrâng în proprietățile acesteia care influențează în mod hotărâtor proprietățile compozitului.

Secțional dimensiunile fibrelor sunt în general foarte mici, de ordinul micronilor, preponderent între 3 -10 μm .

Raportându-ne la lungime și diametru, fibrele pot fi clasificate în două tipuri:

- fibre continue (dacă raportul dintre lungime și diametru $l/d > 1000$);
- fibre discontinue (care la rândul lor se clasifică în: fibre lungi, când $l/d = 300 \dots 1000$; fibre scurte, când $l/d = 100$; fibre foarte scurte).

Alinind mai multe unități de material de bază pe direcția proprietăților superioare, obținem un fir lung numit fibră. Așezându-se ușor pe o direcție datorită caracterului lor unidirecțional, fibrele pot astfel arma alt material, care în cazul de față este constituit de matrice. Rezistențele fibrelor sunt foarte variabile. Testând 10000 de fibre vom obține 10000 de rezultate diferite. Dar fiindcă rezistențele medii și împrăștierea (dispersia) sunt date foarte importante pentru descrierea proprietăților fibrelor, mulți cercetători utilizează metode probabilistice pentru studiul rezistenței materialelor compozite.

Având diametre secționale foarte mici, în special fibrele din carbon, este mult mai convenabil testarea lor grupată în manunchi care poartă denumirea de câlț și este alcătuit din sute și sute de mii de fibre. Ca și comparație, câlțul este asemeni unei frânghii din fibre, dar spre deosebire de aceasta câlțul nu este răsucit sau împletit.

În funcție de scopul urmărit, cele mai frecvente dispuneri ale fibrelor au următoarea formă:

- mănunchiuri de filamente nerăsucite,
- mănunchiuri de filamente toarse,
- benzi unidirecționale – care pot fi de două feluri: neșesute (realizate din mănunchiuri întinse și păstrate în poziție prin impregnare) și șesute (realizate din mănunchiuri dispuse ca urzeală, menținute prin fire de bătătură, distanțate);
- țesături bidimensionale, respectiv bidirecționale.

Luând în considerare materialul din care sunt confecționate, fibrele pot fi din: carbon, sticlă, aramidă (polimerice).

2.2.2. Tipuri de fibre de armare

Cele mai utilizate tipuri de fibre ca armături în compozitele cu matrice din polimeri sunt:

- fibrele pe bază de carbon,
- fibrele pe bază de sticlă,
- fibrele de aramidă (din polimeri sintetici).

Fibre pe bază de carbon

La producerea fibrei pe bază de carbon este nevoie înainte de toate de un precursor. Fibrele precursori se împart în:

- fibre precursori obținute din mătase artificială (vîscoză – rayon),
- fibre precursori obținute din poli-acrilo-nitril (PAN),
- fibre precursori obținute din gudron,
- fibre precursori obținute din fenolice,
- fibre precursori obținute din poliamidici,
- fibre precursori obținute din polivinilalcoolice.

Cele mai utilizate fibre precursori sunt cele obținute din poli-acrilo-nitril (PAN), iar orientarea legăturilor atomice pe direcția dorită a avea rezistență ridicată se face prin întinderea fibrelor în stadii variate ale procesului de producție. Astfel că rezultatul acestor întinderi este o mai bună aliniere a straturilor plane de grafit pe direcția axială a fibrei, mărind rigiditatea și rezistența pe această direcție.

Firmele producătoare livrează fibrele de carbon în câteva sortimente, adeseori marcate prin următoarele simboluri: HS (high strength) – cu rezistență ridicată, IM (intermediate modulus) – cu modul intermediar, HM (high modulus) – cu modul ridicat, UHM (ultra high modulus) – cu modul foarte ridicat, XA – cu alungire ridicată.

Tabelul 2.1. Proprietățile fibrelor de carbon

Proprietăți	PAN			Gudron (Pitch) Tipul-P	Rayon (mătase artificială)
	IM	HM	UHM		
Diametru (μm)	8-9	7-10	7-10	10-11	6.5
Densitate (kg/m^3)	1780-1820	1670-1900	1860	2020	1530-1660
Modul de elasticitate ($10^3 \times \text{N/mm}^2$)	228-276	331-400	517	345	41-393
Rezistența de întindere (N/mm^2)	2410-2930	2070-2900	1720	1720	620-2200
Alungirea (%)	1,0	0,5	0,3-0,4	0,4-0,9	1,5-2,5
Coef. de dilatare termică ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)					
În direcția fibrei	-0,1...-0,5	-0,5...-1,2	-1,0	-0,9...-1,6	-
Perpendicular pe fibră	7-12	7-12	-	7,8	-
Conductivitate termică ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	20	70-105	140	-	38

În general, fibrele cu modul de elasticitate scăzut au greutate specifică redusă și preț mai mic, dar rezistența și alungirea la rupere mai mari decât fibrele cu modulul ridicat.

Proprietățile mecanice și fizice ale fibrelor pe bază de carbon comerciale sunt prezentate în tabelul 2.1. Diferența condițiilor, dozările și tehnologiile diferite conduc la o mare varietate de proprietăți de la un producător la altul, de la o fibră la alta.

Responsabilitatea producătorilor este reducerea acestor variații în proprietățile materialelor pentru a putea fi folosite în aplicațiile ingineresti.

Lângă acestea fiecare producător de fibre de grafit investește în metode noi și îmbunătățite pentru a produce cu mai mare eficiență, cu rezistențe și module de elasticitate cât mai mari, cu densități cât mai mici.

Fibre pe bază de sticlă

Ca și performanțe, fibrele pe bază de sticlă sunt considerate a fi ceva mai inferioare decât fibrele de grafit, dar au avantajul unui cost considerabil mai redus.

La baza acestor fibre stă bioxidul de siliciu în formă de polimer $(\text{SiO}_2)_n$, care nu este o topitură, dar gradual se înmoaie înainte de a ajunge la temperatura de 2000°C, după care începe să se descompună, iar o încălzire prelungită peste 1200°C va produce cristalizarea. Apare însă inconvenienta temperaturii ridicate în procesele de fabricație, prin urmare în timp au fost dezvoltate diferite tipuri de sticle pentru a reduce complexitatea proceselor de fabricație și pentru a crește comercializarea sticlei în formă de fibră. Au rezultat următoarele tipuri de sticlă:

- tipul A este o sticlă calcosodică obișnuită,
- tipul C numit sticla chimică - folosită în aplicațiile unde se cere o rezistență la coroziune mai ridicată,
- tipul E numit sticla electrică - folosită în aplicațiile generale cu compozite,
- tipul S numit sticla structurală - folosită în structuri și aplicații de mare performanță. Aceasta are o rezistență specifică mare, modul de elasticitate mărit și o rigiditate specifică importantă.

În tabelul 2.2. sunt prezentate caracteristicile fizice și mecanice ale fibrelor de sticlă tipice. Dintre acestea cel mai des folosite în compozite sunt sticla E și S.

Tabelul 2.2. Proprietățile fibrelor de sticlă

Proprietăți	Tipul de sticlă		
	E	C	S
Diametru (μm)	8-14	-	10
Densitate (kg/m^3)	2540	2490	2490
Modul de elasticitate ($10^3 \times \text{N}/\text{mm}^2$)	72,4	68,9	85,5
Rezistența de întindere (N/mm^2)	3450	3160	4590
Alungirea (%)	1,8-3,2	4,8	5,7
Coef. de dilatare termica ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	5,0	7,2	5,6
Conductivitate termica ($\text{W}/\text{m}/^\circ\text{C}$)	1,3	-	-

Fibre din aramidă (polimerice)

Aramidăle sunt poliamide aromatice (ARomatic poliAMIDE). Această clasă de fibre relativ nouă se utilizează din ce în ce mai des în materiale compozite armate cu fibre. Fibrele polimerice, folosind o metodă de fabricare convenabilă, pot ajunge la rezistență și rigiditate mari. Aceasta fiind rezultatul aliniamentului legăturilor polimerului de-a lungul axei fibrei. Diverse fibre polimerice comerciale sunt deja utilizabile și multe sunt în curs de dezvoltare.[59]

Cele mai cunoscute tipuri de fibre polimerice sunt:

- **Kevlar** este un poliamid aromatic și probabil cea mai cunoscută fibră polimerică, inelele sale aromatice făcând fibra destul de rigidă;
- **Spectra** este o fibră polietilenă orientată, cu rezistențe chimice bune și densitate redusă, dar temperatura maximă de folosire relativ mică (100°C);
- alte tipuri de polimeri: copoliesteri aromatici, polimeri heterociclici aromatici și poliimide (**Avimid** - poliimidă cu posibilității de utilizare la temperaturi ridicate peste 300°C).

Fibrele de polimer sunt caracterizate în general de densități reduse, rezistențe chimice bune și rezistențe de întindere ridicate. În tabelul 2.3. sunt prezentate câteva proprietăți fizice și mecanice ale fibrelor polimerice comerciale.

Tabelul 2.3. Proprietățile fibrelor de aramidă

Proprietăți	Tipul de fibră		
	Kevlar-29	Kevlar-49	Spectra 900
Diametru (μm)	12	12	38
Densitate (kg/m ³)	1440	1479	970
Modul de elasticitate (10 ³ x N/mm ²)	62	131	117
Rezistența de întindere (N/mm ²)	2760	2800-3792	2580
Alungirea (%)	3-4	2,2-2,8	4-5
Coef. de dilatare termică (10 ⁻⁶ /°C)			
În direcția fibrei	-2,0	-2,0	-
Perpendicular pe fibră	59	59	-
Conductivitate termică (W/m/°C)	-	0,04-0,5	-

2.2.3. Rezistențele fibrelor

Alegerea tipului de fibră se face ținând cont de influența pe care aceasta o are asupra proprietăților compozitului. Fibrele trebuie să asigure următoarele proprietăți [59]:

- greutate specifică scăzută,
- coeficient de dilatare mic,

- modul de elasticitate ridicat,
- rezistența la rupere ridicată,
- diametru uniform,
- păstrarea rezistenței în timpul manipulării și fabricării,
- comportare bună la oboseală.

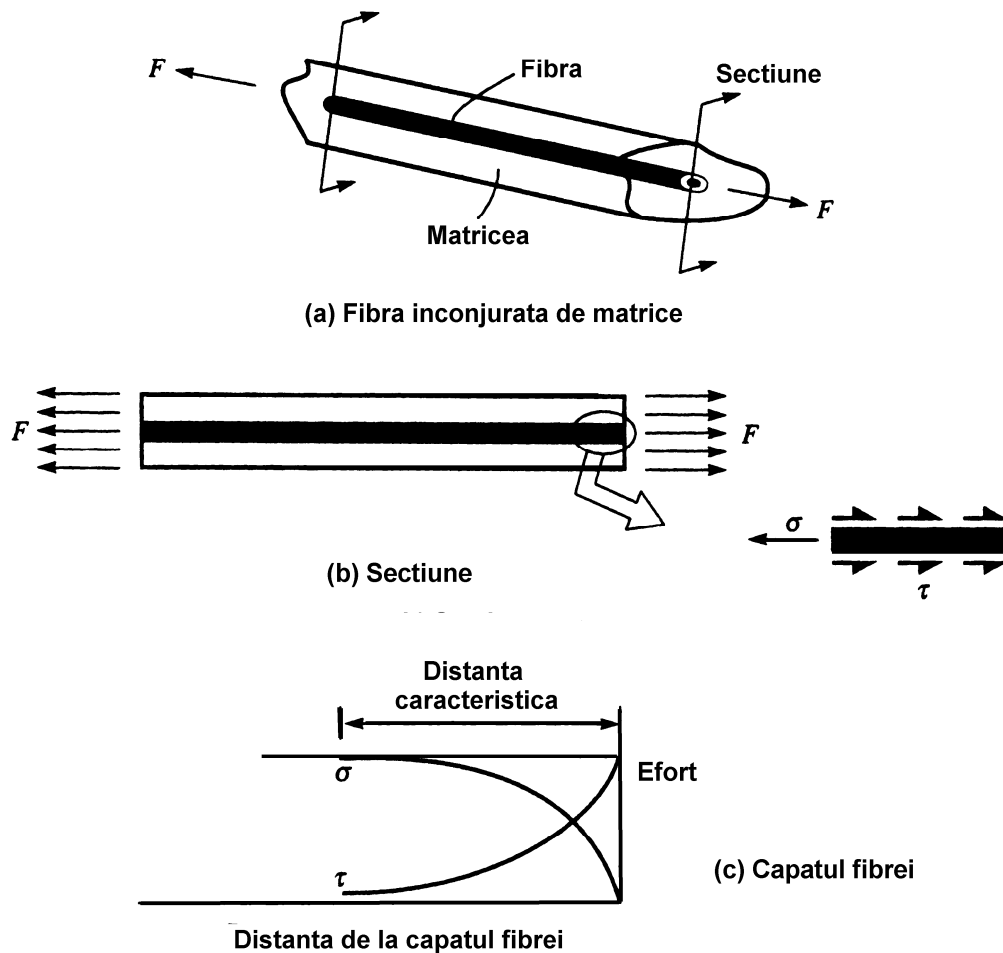


Figura 2.1. Fibra înconjurată de matrice și starea de tensiune în fibră

Când se poate produce un material rezistent și rigid se pune imediat problema folosirii lui. Fibrele trebuie aliniate după direcția încărcării, încărcările trebuie transferate până la fibre și apoi preluate de acestea. În esență, aceasta se realizează prin înglobarea, înconjurarea și legarea de un alt material. Materialul, care de obicei este mai moale și mai slab, nu numai înconjoară câlții, ci îi și penetrează înconjurând fiecare fibră din câlț (figura 2.1 a). Materialul de îmbibare este matricea. Aceasta transmite eforturile fibrei prin efortul tangențial, ceea ce se poate vedea prin secțiunea din figura 2.1 b, de-a lungul fibrei. Datorită forțelor, eforturile tangențiale se aplică pe suprafața fibrei. Acest efort cauzează efortul de întindere în fibră. În apropierea extremităților fibrei efortul tangențial pe suprafața

fibrei este mare și efortul de întindere este mic (figura 2.1 c). Cu creșterea distanței de la capătul fibrei efortul tangențial scade, iar efortul de întindere crește. După o anumită lungime, numită și distanța caracteristică, efortul tangențial devine foarte mic și efortul de întindere ajunge la valoarea maximă. Această stare de eforturi continuă de-a lungul fibrei.

La efortul de compresiune trebuie dată atenție flambajului fibrei. Dacă efortul tangențial din capătul fibrei este inversat (figura 2.1 c), atunci efortul din fibră devine compresiune și atinge valoarea maximă la o anumită distanță de la capăt. Acest caz de efort este foarte diferit față de efortul de compresiune și cauzează flambajul fibrelor. Rezistența la compresiune a celor mai multe fibre este ca și o sfoară încărcată la compresiune, sau un stâlp foarte subțire. Pentru a preveni flambajul fibrelor datorită compresiunii, acestea trebuie împiedicate lateral, rol care îi revine matricei [59].

2.3. Matrice utilizate în compozite

Componenta de bază a materialului compozit este matricea, în care sunt înglobate fibrele de armare. Indiferent de tipul matricei și de structura materialului compozit, matricea trebuie să îndeplinească următoarele funcții [59]:

- să lege fibrele între ele,
- să protejeze suprafața fibrelor în timpul manipulării, fabricării și a duratei de serviciu a compozitului;
- să mențină fibrele în poziții în care să evite propagarea fisurilor, care conduc la distrugerea compozitului;
- să transfere tensiunile apărute în exploatare la fibre, prin adeziune și/sau frecare între fibră și matrice;
- să fie compatibilă din punct de vedere chimic și termic cu fibrele,
- să îmbunătățească proprietățile transversale ale compozitului,
- să îmbunătățească rezistența la șoc și la rupere a compozitului.

Pe lângă aceste funcții importante, matricea trebuie să asigure și proprietăți tehnologice care să permită fabricarea, în condiții de siguranță și cu costuri cât mai reduse, a compozitului.

Cele mai uzuale matrice în industria de construcții sunt cele polimerice, având avantajul unei greutate specifice mici și a unei prelucrări facile, dar prezentând dezavantajul unei temperaturi de utilizare reduse.

Ca și clasă de materiale, polimerii se caracterizează prin următoarele proprietăți :

- **densitate** mică, în general cuprinsă între 800 – 1500 kg/m³;
- **modul de elasticitate** scăzut, dar anizotropie puternică, datorată posibilității de obținere de legături moleculare orientate;
- **conductibilitate termică și electrică** scăzute - polimerii se utilizează ca izolatori electrice, iar conductibilitatea termică este de până la patru ori mai mică decât cea a cuprului;
- **rezistența și durabilitatea** sunt reduse la temperaturi ridicate, în timp ce la temperaturi scăzute se înregistrează o fragilitate accentuată;
- **coeficientul de dilatare** este cuprins între limitele 60 – 200x10⁻⁶ K⁻¹;
- **rezistența chimică** poate să fie foarte bună și depinde de natura polimerului. Rezistența la coroziune este complementară cu cea a metalelor (majoritatea polimerilor rezistă la acizi și soluții alcaline care corodează metalele, dar unii polimeri nu rezistă la uleiuri). Rezistența la coroziune este

afectată negativ de prezența unor tensiuni de natură mecanică suprapuse peste cele chimice;

- **comportarea la foc** este dependentă de tipul polimerului. Deși toți polimerii pot fi distruși prin ardere, unii dintre ei se comportă mai bine decât alții. Viteza de ardere depinde de natura polimerului, de raportul dintre suprafață și volum, de temperatura și de natura expunerii la foc. O bună parte din polimeri emit gaze toxice la ardere și din această cauză au utilizare limitată la aplicații care necesită o siguranță ridicată (de exemplu mijloacele de transport);
- **prelucrabilitatea** este ușoară datorită curgerii plastice la temperaturi ridicate.

Comportarea materialelor polimerice este influențată de următorii factori :

- mărimea forțelor de legătură dintre atomi,
- numărul de legături chimice pe unitatea de volum,
- rezistența la degradare a legăturilor sub acțiunea unor agenți externi.

În realizarea materialelor compozite se folosesc mai multe tipuri de matrice polimerice. O clasificare a acestor tipuri împarte matricele polimerice în trei grupe :

- termorigide,
- termoplaste (predominant cristaline),
- elastomeri (nu se folosesc în construcții).

Cu precădere, în prezent, se utilizează matricele termorigide (aproximativ trei sferturi din piață) și matricele termoplaste. Principalele particularități și proprietăți ale acestor matrice sunt prezentate în tabelele 2.4 și 2.5.

Tabelul 2.4. Particularități ale matricelor polimerice

	Termoplaste	Termorigide	Elastomeri
Structură	Necristalină, până la parțial cristalină	Necristalină	Încolăcită și slab reticulară
Prelucrare	Formarea prin creșterea temperaturii	După reticulare poate fi prelucrată numai prin măcinare și reciclare	Numai prin formare elastică
Rezistență chimică	Foarte bună	Foarte bună	Moderată

Tabelul 2.5. Principalele proprietăți ale matricelor polimerice

Proprietăți	Termorigide	Termoplaste
Densitate (kg/m³)	1100 - 1500	900 - 1200
Modul de elasticitate (kN/mm²)	1,3 - 6,0	1,0 - 4,8
Rezistența de întindere (N/mm²)	20 - 180	40 - 190
Temperatura max. de utilizare (°C)	50 - 450	25 - 230

2.3.1. Matrice polimerice termorigide

Aceste matrice sunt de tipul rășinilor care își formează legăturile în cursul unui proces de întărire. Aceasta poate avea loc fie prin încălzire și presare, fie prin adăugarea unor agenți de întărire.

Matricele termorigide uzuale folosite la fabricarea materialelor compozite sunt:

- rășinile poliesterice,
- rășinile epoxidice,
- rășinile vinilesterice,
- rășinile fenolice,
- rășinile bismalmeidice,
- rășinile poliimide.

Proprietățile lor sunt prezentate în tabelul 2.6.

Tabelul 2.6. Proprietățile unor matrice termorigide

Proprietăți	Poliester	Vinilester	Epoxi	Bismalmeid	Poliimid
Densitate (kg/m ³)	1100-1500	1150	1100-1400	1320	1430-1890
Modulul de elasticitate (kN/mm ²)	1,2-4,5	3-4	2-6	3,6	3,1-4,9
Rezistența la întindere (N/mm ²)	40-90	65-90	35-130	48-78	70-120
Rezistența la compresiune (N/mm ²)	90-250	127	100-200	200	-
Alungire (%)	2-5	1-5	1-8,5	1-6,6	1,5-3
Coef. de dilatare termică (10 ⁻⁶ /°C)	60-200	53	45-70	49	90
Temperatura de tranziție sticloasă (°C)	50-110	100-150	50-250	250-300	280-320

Temperatura de utilizare este un criteriu de selecție a matricelor termorigide. Valorile prezentate în tabel sunt temperaturile de serviciu ale matricelor, respectiv, în unele cazuri, temperaturile maxime la care pot să fie încălzite pentru durate scurte.

2.3.2. Matrice polimerice termoplaste

Sub tensiune la temperaturi ridicate matricele termoplaste curg și astfel se permite fabricarea lor în forma dorită. Prin răcire la temperatura ambiantă acestea devin iar solide și rețin forma. Acești polimeri pot să fie încălziți repetat, fabricați și răciți astfel că resturile pot fi reciclate (apare totuși o ușoară degradare a proprietăților, din cauza reducerii greutatei moleculare).

- Avantajele termoplastelor sunt:
- tenacitate mare,
 - fabricare ușoară,
 - posibilitate de reutilizare a deșeurilor, rebuturilor și a resturilor.
- Principalele materiale termoplaste utilizate ca și matrici sunt:
- poliamide (PA),
 - policarbonat (PC),
 - polietersulfon (PES),
 - polietereterchetona (PEEK),
 - polieterchetona (PEK),
 - polipropilen (PP),
 - polipropilen-sulfid (PPS).

Tabelul 2.7. Proprietățile unor matrice termoplaste

Proprietăți	PA (Torlon)	Nylon 6.6	PC	PEEK	PES	PP	PPS
Densitate (kg/m ³)	1400	1140	1150	1320	1240	900	1340
Modulul de elasticitate (x10 ³ N/mm ²)	5	1,4-2,8	2,2-2,4	-	2,5	1,0-1,4	3,3
Rezistența la întindere (N/mm ²)	95-185	60-75	45-70	92-100	70-75	25-38	70-75
Rezistența la compresiune (N/mm ²)	276	34	80	-	-	-	110
Alungire (%)	12-18	40-80	50-80	150	50-100	300	3
Coef. de dilatare termică (10 ⁻⁶ /°C)	36	90	70	-	56-100	110	54-100
Temperatura de tranziție sticloasă (°C)	243-275	50-60	130	143	190	-20...-5	85
Absorbție de apă (în 24h la 20°C)	0,3	1,3	0,1	0,1	0,2	0,03	0,2

2.4. Compozitele polimerice

Materialele compozite apar într-o gamă largă de forme și combinații, datorită diversității de fibre și de matrice, dar și datorită posibilităților de combinare a acestora sub aspect cantitativ, calitativ sau structural. Este de așteptat ca și proprietățile materialului rezultat să depindă în mare măsură de factorii menționați, rolul inginerului fiind de a găsi combinațiile optime care să asigure cerințele funcționale ale produselor realizate cu materiale compozite.

Compozitele polimerice sunt segmentul de compozite cu cea mai largă utilizare datorită, în principal, tehnologiei de fabricare relativ simplă, care permite un preț convenabil.

Componentele sunt alese astfel încât să asigure proprietățile de utilizare dorite, principalele probleme fiind legate de compatibilitatea fibră-matrice, temperatura de serviciu, caracteristicile mecanice urmărite și stabilitatea dimensională obținută.

Relativa ușurință de fabricare a compozitelor de acest tip permite dispunerea facilă a fibrelor în arhitecturile dorite și astfel este posibilă determinarea prin calcul, cu aproximație suficient de bună, a proprietăților.

Funcție de tipul fibrelor folosite la armarea matricelor polimerice, se folosesc următoarele denumiri:

- polimeri armați cu fibre de carbon, având prescurtarea CFRP (Carbon Fibre-Reinforced Polymer);
- polimeri armați cu fibre de sticlă, având prescurtarea GFRP (Glass Fibre-Reinforced Polymer);
- polimeri armați cu fibre de aramidă, având prescurtarea AFRP (Aramid Fibre-Reinforced Polymer).

Principalele proprietăți ale compozitelor polimerice se împart în două grupe principale:

- proprietăți fizice,
- proprietăți mecanice și de comportare.

2.4.1. Proprietățile fizice

Densitatea

Materialele compozite polimerice au densitatea cuprinsă între 1200 și 2100 kg/m³, care este de 4-6 ori mai mică decât a oțelului (tabelul 2.8). Greutatea redusă conduce la costuri de transport și manipulare mai mici și încărcări permanente mai reduse în structuri.

Tabelul 2.8. Densitatea materialelor compozite, comparativ cu oțelul (kg/m³)

Oțel	GFRP	CFRP	AFRP
7900	1200 – 2100	1500 – 1600	1200 – 1500

Coeficientul de dilatare termică

Coeficientul de dilatare termică al materialelor FRP unidirecționale diferă pe direcțiile longitudinală și transversală, și depinde de tipul fibrei, de fracțiunea volumică a acesteia și de rășina utilizată (tabelul 2.9).

Coeficientul negativ de dilatare termică indică faptul că materialul se contractă odată cu creșterea temperaturii, și se dilată cu scăderea temperaturii.

Tabelul 2.9. Coeficienții de dilatare termică ai unor materiale FRP tipice, unidirecționale, respectiv ai betonului și oțelului

		Coeficientul de dilatare termică (10 ⁻⁶ /°C)				
		GFRP	CFRP	AFRP	Beton	Otel
Direcția	Longitudinală	6 ... 10	-1 ... 0	-6 ... -2	7 ... 11	11,7
	Transversală	19 ... 23	22 ... 50	60 ... 80		

*Fracțiunea volumică a fibrelor din FRP este de 0,5-0,7

Efectul temperaturii

Temperatura la care polimerul se înmoaie este cunoscută ca și temperatura de tranziție sticloasă (T_g). Peste aceasta, modulul de elasticitate al polimerului se reduce semnificativ, datorită schimbării structurii moleculare. Temperatura T_g depinde de tipul rășinii, dar normal este între 60 - 80°C. În materialul compozit, fibrele, care au proprietăți termice mai bune ca și rășina, în continuare mai pot prelua niște eforturi pe direcția longitudinală, până când se atinge temperatura de prag a fibrei. Aceasta se poate întâmpla la temperaturi apropiate de 100°C pentru fibra de sticlă și 175°C pentru fibra de aramidă. Fibrele de carbon sunt capabile să reziste la temperaturi care depășesc 275°C. Din cauza reducerii transferului de forțe dintre fibre prin rășină, se reduc proprietățile de întindere ale întregului compozit. Rezultatele testelor au indicat temperatura de 250°C, mult mai înaltă decât temperatura T_g a rășinii, la care rezistențele de întindere ale materialelor GFRP și CFRP se reduc cu peste 20%.

Pentru sistemele FRP, lipite pe partea exterioară a elementelor structurale, proprietatea esențială a polimerului de pe interfața fibră-element este menținerea legăturii între FRP și element. La temperatura apropiată de T_g , proprietățile mecanice ale compozitului sunt reduse semnificativ, și polimerul începe să piardă abilitatea lui de a transfera eforturile de la element spre fibre.

2.4.2. Proprietățile mecanice și de comportare*Comportarea la întindere*

Materialul FRP, dacă este întins, nu prezintă deformații plastice (curgere) înaintea ruperii. Comportarea la întindere a acestuia, alcătuit dintr-un singur fel de fibră, este caracterizată de o relație efort-deplasare linear elastică.

Rezistența la întindere și rigiditatea materialului FRP sunt dependente de mai mulți factori. Fiindcă fibrele din materialul FRP sunt principalii constituenți care preiau eforturi, tipul fibrei, orientarea fibrelor și cantitatea fibrelor sunt cele care decid proprietățile compozitului. Datorită rolului principal al fibrelor și metodelor de aplicare, proprietățile sistemelor compozite sunt date, câteodată, pe baza ariei nete a fibrelor, și/sau pe baza ariei globale a laminatului.

Aria brută a laminatului dintr-un sistem FRP se calculează folosind aria totală a secțiunii transversale a sistemului întărit, incluzând toate fibrele și rășina. Aria brută este folosită în cazul sistemelor FRP prefabricate (de exemplu lamele), unde grosimea întărită este constantă și proporția fibrelor și a rășinii este controlată.

Aria netă a fibrelor dintr-un sistem FRP se calculează folosind aria cunoscută a fibrelor, neglijând lățimea totală și grosimea sistemului întărit, astfel rășina este exclusă. Aria netă a fibrelor este folosită la sistemele de aplicare umedă, care utilizează foi de fibre fabricate industrial sub forma unor țesături și rășini aplicate la fața locului. Acest proces de instalare conduce la un conținut de fibre controlat și un conținut de rășină variabil.

Note cu privire la conținutul tabelului 2.10:

- compozitele au o proporție volumică fibră-rășină de aproximativ 1:1 și grosimea compozitului de 2,5 mm;
- 0° reprezintă o orientare a fibrelor unidirecțională,
- 0/90 și +45/-45 reprezintă fibre în două direcții ortogonale,
- efortul este aplicat pe direcția de 0°,
- în general, sistemele preîntărite (lamelele) au volumul de fibre între 40-60%, în timp ce sistemele cu aplicare umedă au 25-40%. Fiindcă volumul

fibrelor influențează proprietatea laminatului brut, laminatele prefabricate au proprietăți mecanice mai mari decât cele realizate cu aplicare umedă.

Tabelul 2.10. Proprietățile la întindere ale laminatelor FRP cu un conținut de 40-60% fibre

Sistemul FRP (orientarea fibrelor)	Modulul de elasticitate		Rezistența la întindere ultimă		Alungirea la rupere la 0° [%]
	Proprietatea la 0°	Proprietatea la 90°	Proprietatea la 0°	Proprietatea la 90°	
	[10 ³ xN/mm ²]	[10 ³ xN/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	
Carbon de mare rezistență/epoxi 0 0/90 +45/-45	100 - 145	2 - 7	1025 - 2075	35 - 70	1,0 - 1,5
	55 - 75	55 - 75	700 - 1025	700 - 1025	1,0 - 1,5
	14 - 28	14 - 28	175 - 275	175 - 275	1,5 - 2,5
Sticla E/epoxi 0 0/90 +45/-45	20 - 40	2 - 7	525 - 1400	35 - 70	1,5 - 3,0
	14 - 34	14 - 35	525 - 1025	525 - 1025	2,0 - 3,0
	14 - 21	14 - 20	175 - 275	175 - 275	2,5 - 3,5
Aramidă de înaltă performanță/epoxi 0 0/90 +45/-45	48 - 68	2 - 7	700 - 1725	35 - 70	2,0 - 3,0
	28 - 34	28 - 35	275 - 550	275 - 550	2,0 - 3,0
	7 - 14	7 - 14	140 - 205	140 - 200	2,0 - 3,0

Comportarea la compresiune

Modul de distrugere a compozitelor FRP la compresiune se poate întâmpla prin tensiuni transversale, prin microflambajul fibrelor sau prin tăiere. Modul de distrugere depinde de tipul fibrelor, de fracțiunea volumică a fibrelor și de tipul rășinii.

În general rezistența la compresiune este mai mare la materialele cu rezistența la întindere mai mare, cu excepția compozitelor AFRP, la care fibrele au un comportament nelinier la compresiune deja la un nivel al efortului relativ scăzut.

2.5. Consolidări cu materiale compozite polimerice

În construcții compozitele se pot folosi în mai multe moduri, dar domeniile principale de utilizare sunt consolidările și armările, iar în ultimul timp au apărut și aplicații cu profile compozite și cabluri.

Consolidările cu materiale compozite polimerice au deja un trecut în utilizarea lor în construcții. De mai mult de 15 ani mulți cercetători se ocupă cu acest domeniu cu rezultate foarte bune. Există multe soluții în aplicare, într-o varietate mare de forme, caracteristici și mod de aplicare. Se utilizează, preponderent fibre de carbon și sticlă dar nu lipsesc nici aramidele. Rășinile folosite

sunt de toate tipurile, dar în majoritatea cazurilor sunt alcătuite din mai multe componente, care sunt secrete industriale (de firmă).

Procedeul de consolidare cu materiale compozite FRP (Fiber-Reinforced Polymer) constă în lipirea unor materiale fibroase, impregnate cu rășini, pe suprafața diferitelor elemente, pentru a reface sau a mări capacitatea portantă a acestora. Fibrele folosite în aplicațiile de consolidare pot fi fibre de sticlă, aramidă și carbon. Compozitele au forme diferite, putând fi: lamele pultrudate, foi preimpregnate, țesături impregnate sau uscate și impregnate în timpul lipirii. Elementele consolidate pot fi din beton, cărămidă, lemn, oțel și piatră, iar structural grinzi, pereți, stâlpi și planșee.

Fezabilitatea betoanelor legate cu rășini epoxi a fost demonstrată în anii '40. Începând cu anii '50 adezivii au devenit materiale din ce în ce mai utilizate în construcțiile civile. Deși industria de construcții reprezintă una din cele mai mari utilizatoare a materialelor adezive, multe dintre aplicații au fost nestructurale, în sensul că legăturile dintre elemente nu erau folosite pentru a transmite sau a prelua eforturi (ex. injectarea fisurilor și închiderea acestora, legarea betonului vechi de cel nou, etc.).

La mijlocul anilor '80 au fost propuse spre utilizare lamelele din fibre plastice armate, care au proprietăți superioare benzilor de oțel, folosite în aplicațiile de atunci. Față de oțel, compozitele FRP nu sunt afectate de deteriorări electrochimice și rezistă la efectele corozive ale acizilor, alcaliilor, ale sărurilor și soluțiilor similar agresive, pe o scară largă a temperaturii.

Tabelul 2.11. Consolidarea cu lamele de carbon, comparativ cu lamelele de oțel

Criterii	Fixare cu lamele de carbon	Fixare cu lamele de oțel
Greutatea proprie	Mică	Mare
Rezistența la tracțiune	Foarte mare	Medie
Coroziunea	Nu există	Există
Modificarea secțiunii elementului consolidat	Foarte redusă	Redusă
Lungimea lamelei	40 metri	Limitată
Manipularea	Flexibilă, ușoară	Greoaie, rigidă
Preluarea forței	Numai în lungime	În orice direcție
Comportarea la oboseală	Deosebită	Suficientă
Costurile pentru materiale	Mari	Reduse
Costurile de punere în operă	Reduse	Mari
Aplicarea	Fără mijloace ajutătoare	Cu aparate de ridicat și presare
Încrucișările	Ușoare	Greoaie

Fibrele de consolidare trebuie introduse în poziția, în procent de volum și în direcția matricei, astfel încât să se obțină eficiența maximă, permițând tăierea la forme și dimensiuni specificate. Materialele rezultante sunt nemagnetice, neconductive și au o înaltă rezistență și rigiditate pe direcția fibrelor, cu greutatea mult mai mică decât a oțelului. Ele sunt ușor de transportat și manipulat, necesită susțineri reduse, se pot folosi pe locuri cu acces limitat și când nu se pot adăuga încărcări semnificative structurii.

Materialelor compozite polimerice în general, cu excepția celor din fibră de sticlă, li s-a demonstrat proprietatea excelentă la oboseală și rupere. Necesită mai puțină energie pe kilogram la fabricare și transport decât metalele, din care rezultă o utilizare mai ușoară, mai rapidă, mai economică în comparație cu oțelul.

Caracterul multilateral general al materialelor compozite a făcut să fie o alternativă viabilă în aplicațiile de consolidare, rezultând economisiri de scurtă și de lungă durată.

2.5.1. Utilizarea soluțiilor de consolidare cu compozite

Deficiențele structurale când se recomandă a se utiliza aceste consolidări cu materiale compozite polimerice sunt următoarele:

- coroziunea armăturilor din elementul de beton armat,
 - capacitatea inadecvată la deformații,
 - pierderea tensiunii din armătură datorită coroziunii, în betonul precomprimat;
 - rigiditatea sau exploatarea inadecvată a structurii de beton armat,
 - suprasolicitarea apărută din schimbări structurale,
 - schimbarea pretențiilor,
 - schimbarea (înnoirea) normelor de proiectare,
 - creșterea cerințelor de siguranță,
 - deteriorări structurale cauzate de efectele mediului,
 - modificarea stării de folosință sau a încărcărilor, alinierea la încărcările noi;
 - creșterea încărcării podurilor datorită creșterii greutatei mașinilor și a intensității circulației.
- Alte cauze când compozitele se pot utiliza cu succes sunt:
- necesitatea scurtării timpului de închidere sau de întrerupere pe durata reparațiilor,
 - prelungirea duratei de viață, minimizând cheltuielile;
 - evitarea ruperii bruște din fisurare a elementelor din oțel,
 - creșterea capacității structurale a lemnului,
 - sporirea capacității la forfecare.

2.5.2. Avantaje și dezavantaje

Câteva avantaje ale compozitelor:

- **Rezistența:** Rezistența ultimă a compozitelor diferă funcție de tipul fibrelor, dar este de cel puțin trei ori rezistența ultimă a oțelului cu aceeași arie a secțiunii transversale.
- **Greutatea:** Densitatea compozitelor FRP este doar 20% din densitatea oțelului, așadar pot avea mai puțin de 10% din greutatea oțelului, la aceeași rezistență ultimă.
- **Transportul:** Greutatea lamelor, țesăturilor sau a armăturilor este așa de mică, încât una de 20 m lungime poate fi manipulată de un singur om.
- **Varietatea de proiectare a sistemului:** Pot avea o lungime infinită, pot fi fixate în straturi pentru a îmbrăca elementul solicitat, fiind așa de subțiri, încât se pot suprapune prin încrucișare doar variind grosimea adezivului.

- **Prepararea ușoară și sigură a suprafeței:** Compozitele utilizate la consolidări sunt produse cu o folie de protecție, strat care poate fi dat jos foarte ușor înainte de aplicarea adezivului.
- **Reducerea fixării mecanice:** Compozitele folosite la consolidări sunt foarte subțiri, fapt ce reduce efectul de exfoliere de la capete, așadar reduce necesitatea fixării la capete. Din cauza grosimii mici de consolidare se mărește înălțimea liberă a încăperii.
- **Durabilitatea:** Atât sistemele de consolidare cu FRP, cât și sistemele de armare care utilizează compozite sunt foarte durabile la diferite acțiuni ale mediului înconjurător.
- **Întreținerea sistemului de consolidare:** Lamelele compozite nu necesită întrețineri, reducând astfel costul pe toată viața acestui sistem.
- **Reducerea perioadei de construcție:** În afara multelor avantaje amintite, consolidările cu compozite pot fi aplicate într-un timp foarte redus, astfel costul din întreruperile de trafic se minimizează. Instalarea pe platforme mobile devine posibilă și se poate practica la lucrări cu limitări din cauza circulației, sau în timpul nopții.
- **Abilitatea de precomprimare:** Abilitatea de precomprimare deschide o nouă direcție de aplicare a acestor compozite. La consolidări se pot utiliza pentru a reda capacitatea portantă și de tăiere a secțiunii, poate fi oprită formarea fisurilor, prin aceasta crescând capacitatea de serviciu a structurii. La armături compozite precomprimarea are aceleași avantaje ca și în cazul armăturilor din oțel.

Dezavantajele potențiale ale consolidărilor cu materiale compozite sunt următoarele:

- **Costul compozitelor:** Compozitele armate cu fibre sunt de 4-20 de ori mai scumpe decât oțelul pe unitatea de volum (sau la aceeași capacitate de încărcare). Însă în proiectele de reabilitare, unde costul materialelor rareori depășește 20% din costul total al proiectului, economisirile la instalare pot compensa costul înalt al materialului. Comparațiile făcute cu consolidările cu benzile de oțel lipite, în afară de faptul că materialul în sine este mai scump, manopera și costul echipamentelor se reduce, timpul de construcție se micșorează și durabilitatea crește. A fost arătat că 2 kg de FRP reprezintă 47 kg de oțel pentru a realiza aceeași rezistență, iar dacă instalarea o luăm de valoare egală, întreruperile de trafic și costul de întreținere pot cauza o diferență de 17,5% față de oțel. În perspectivă diferența de preț dintre cele două materiale probabil că va scădea cu producția în volume mai mari și cu creșterea concurenței dintre firmele producătoare.
- **Deteriorarea mecanică:** Compozitele FRP sunt mult mai susceptibile la deteriorare decât oțelul, cauzată de un atac cu un obiect ascuțit. De aceea în locurile cu acces public acest risc se poate elimina prin protejarea compozitelor cu tencuieli sau profile. Dacă din nefericire aceste deteriorări s-au produs deja, corectarea lor în cazul acestora este mai ușoară.
- **Durabilitatea fibrelor de sticlă:** Sticla E este atacată de alcalii din beton, dacă aceștia vin în contact direct cu fibra de sticlă. În același timp sticla mai are probleme și la încărcări mari de lungă durată. Datorită acestor cauze și fiindcă rezistența ei este inferioară carbonului, avantajul principal îl constituie costul mai scăzut.
- **Efectul radiațiilor ultraviolete:** Razele solare pot cauza îngălbenirea și degradarea superficială dacă nu sunt protejate contra radiațiilor ultraviolete.

În cazul armăturilor nu se pune aceasta problemă, ele fiind înglobate în beton.

- **Efectul umidității:** Polimerii absorb apa, care afectează proprietățile acestora, deci și a compozitului, pe durata când matricea este umedă. Efectul nu este important, dar nici nu se poate neglija la proiectare.
- **Rezistența la foc:** Fibrele se comportă relativ bine la acțiunea temperaturii, însă rășinile se înmoaie la temperaturi înalte. De aceea este important ca temperatura de proiectare să fie compatibilă cu temperatura de tranziție sticloasă, iar la valori mai mari trebuie luate măsuri de protecție.
- **Modulul de elasticitate mai mic, de obicei, decât al oțelului;**
- **Alungirea la rupere mai mică, comparativ cu oțelul;**
- **Rupere fragilă;**
- **Probleme de ancorare la elemente precomprimate.**

3. CERCETĂRI ANTERIOARE PE TEMA STUDIATĂ

3.1. Introducere

O latură a preocupărilor actuale în domeniul consolidărilor o reprezintă și consolidarea grinzilor de beton armat, folosind materiale compozite polimerice. În cele ce urmează sunt prezentate o serie de articole privind două tipuri de solicitări avute în vedere: încovoiere și tăiere.

3.2. Încovoiere

Prin diverse norme de proiectare sunt impuse o serie de limitări în ceea ce privește consolidările cu materiale compozite. Ele se pot referi fie la tipul de beton sau tipul de element pe care se pot aplica acest consolidări, fie la tipul și proprietățile materialelor compozite ce urmează a fi aplicate.

Anul 1998

„Strengthening of RC Elements By CFRP Plates. Local Failure” – Mazen M. Almakht, György L. Balázs, Kypros Pilakoutas. [1]

Concluzii:

- Lipirea lamelor de CFRP poate mări capacitatea portantă a grinzilor în interiorul anumitor limite.
- Eforturile de tăiere și concentrațiile de eforturi lângă punctul terminus al lamelor, precum și fisurile din încovoiere – toate trebuiesc luate în considerare în calculul grinzilor consolidate cu lamele de CFRP lipite cu rășini epoxidice. Aceste tipuri de eforturi pot conduce la diverse tipuri de cedări, cum ar fi desprinderea sau dezlipirea lamelor, ori fisuri în stratul de acoperire cu beton.
- Au fost realizate mai multe investigații asupra eforturilor de la interfața beton-FRP și au fost dezvoltate soluții pentru compensarea concentrării de eforturi. Autorul urmează a analiza aceste rezultate și le va compara cu teste experimentale înainte de a le folosi la dezvoltarea unor prescripții de calcul.

Anul 1999

„Static And Fatigue Performance Of RC Beams Strengthened With CFRP Laminates” – Mohsen Shahawy, Thomas E. Beitelman. [4]

Concluzii:

- Studiul demonstrează fezabilitatea metodei de consolidare a elementelor de beton armat folosind țesături de CFRP, atât în ceea ce privește performanțele statice cât și cele de oboseală. Acest lucru se aplică și pentru grinzile sever afectate.
- Din rezultatele testelor statice efectuate, este clar că soluția înfășurării complete a secțiunii este preferată celei cu înfășurare parțială. Oricum, în acest moment, numărul limitat de teste experimentale nu permite formularea unei concluzii definitive.

- Analiza de bază, folosind elemente finite, poate fi folosită pentru prezicerea cu precizie a comportării grinzilor consolidate cu materiale compozite.

Anul 2000

„Repair and Retrofit of Wooden Members using Advanced Composites” – Ayman S. Mosallam. [10]

Concluzii:

- Pe baza încercărilor experimentale efectuate în cadrul acestui program, este evident că materialul compozit FiberBond s-a comportat excepțional atât în ceea ce privește refacerea capacității portante a elementului de lemn afectat, cât și în ceea ce privește creșterea acestei capacități portante. Rezultatele experimentale sunt prezentate sub formă tabelară și grafică.

„Bond Of FRP Laminates To Concrete” – Laura De Lorenzis, Brian Miller, Antonio Nanni. [11]

Concluzii:

- Specimenele pentru testarea la încovoiere au fost pregătite pentru a clarifica anumiți factori ce ar putea afecta aderența. Cedarea s-a produs la interfața beton-adeziv, cu mici semne de cedare, dacă nu deloc, pe suprafața betonului. Lungimea de ancorare nu a afectat încărcarea ultimă, confirmându-se astfel o anumită lungime după care nu se mai transmit eforturi până în momentul dezlipirii. Datorită modului de cedare, rezistența betonului nu a afectat încărcarea ultimă. Numărul de fâșii folosite la crearea laminatului CFRP a influențat cedarea prin pierderea aderenței, dar media eforturilor ultime ale Seriei II (2 straturi) a fost numai de 1.5 ori decât cea a Seriei I (1 strat). Lățimea laminatului nu a influențat aderența.

- În final, performanța specimenului cu suprafața buceardată a fost mult mai bună decât cea a specimenului cu suprafața sablată. În cazul ultimei variante, cedarea s-a produs prin ruperea FRP la o încărcare destul de mare. Concluzia la care s-a ajuns este că pregătirea suprafeței poate avea o influență semnificativă asupra valorii medii a aderenței.

- O abordare din punctul de vedere al tăierii, împreună cu un model de calcul simplu la tăiere, a fost folosit pentru modelarea distribuției deformațiilor specifice la un nivel mediu al încărcărilor. O corelare rezonabilă cu rezultatele experimentale a fost obținută, în special pentru speciamentele cu un strat.

- În final, expresiile pentru încărcarea de dezlipire și lungimea efectivă de ancorare au fost prezentate. O ecuație de calcul a fost propusă pentru determinarea deformației specifice maxime din FRP ce ar putea fi folosită în prescripțiile de proiectare, ținând cont de modul de cedare prin desprinderea laminatului.

- Se pare că rigiditatea laminatului influențează semnificativ încărcarea maximă la care se produce cedarea prin desprinderea laminatului. Studii viitoare sunt necesare pentru a cuantifica influența pregătirii suprafeței asupra performanței aderenței.

„Strengthening of Reinforced Concrete Structures with Near Surface Mounted FRP Rods” – Laura De Lorenzis, Antonio Nanni, Antonio La Tegola. [12]

Concluzii:

- Armăturile NSM FRP sunt o metodă promițătoare pentru creșterea capacității portante la încovoiere pentru grinzile de beton armat. În testele efectuate s-a obținut o creștere a capacității portante între 25.7 – 44.3%, raportat la elementul de control. A fost obținută o creștere remarcabilă și în ceea ce privește

rigiditatea grinzilor. Oricum, se pare că legătura dintre armătură și beton este de importanță critică pentru eficiența acestei tehnici. În cazul în care criteriul de cedare este dictat de ancorare, creșterea cantității sau calității armăturilor nu conduce la o creștere semnificativă a capacității portante. Acest lucru se desprinde din testele efectuate asupra grinzilor BFC3 și BFC4. BFC4 a avut de două ori mai multă armătură compozită (ca și arie de armătură) decât BFC3, însă numai cu 11% mai mare capacitate portantă.

- Următorul pas în cercetare va fi analiza tuturor datelor obținute, referitoare la deplasări și deformații specifice. Pentru a putea prezice comportarea grinzilor consolidate, teste de ancorare vor fi analizate, pentru a putea înțelege mecanica adeziunii dintre armăturile NSM FRP și beton.

„An Assessment Of In-Situ FRP Shear And Flexural Strengthening Of Reinforced Concrete Joists” – Annaiah Raghu, John J. Myers, Antonio Nanni. [13]

Rezultatele testelor efectuate demonstrează fezabilitatea folosirii înfășurărilor compozite de formă U pentru creșterea capacității portante la forfecare a grinzilor de beton armat. Pe baza comportării observate, se pot trage următoarele concluzii:

- Reabilitarea sau consolidarea capacității portante la forfecare a grinzilor de beton armat, folosind înfășurări U compozite, poate rezulta în creșterea portanței la forfecare printr-o îmbunătățire a efectului de împănare a agregatelor, datorită contribuției materialului compozit.

- Elementele consolidate au prezentat creșteri ale capacității portante la forfecare între 11 – 34 %, raportat la specimenul de test (neconsolidat), ea fiind în funcție de sistemul de consolidare și metoda folosite pentru consolidare.

- Creșterea numărului de straturi nu a condus la o creștere a capacității portante la forfecare, pentru speciemenele cu sau fără sisteme suplimentare de ancoraj.

- Sistemul cu înfășurare simplă U, cu ancoraj, a depășit în performanțe cu aproximativ 17% sistemul cu înfășurare U dublă, fără ancoraj.

- Sistemul cu înfășurare simplă U, cu ancoraj, a depășit în performanțe cu aproximativ 4% sistemul cu înfășurare U dublă, cu ancoraj.

„Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates” – D. Kachlakeva, D.D. McCurry. [14]

Concluzii:

- Reabilitarea structurală folosind compozite FRP poate conduce la o creștere cu până la 150% a capacității portante, în funcție de modul de cedare, geometrie și proprietățile de material.

- Grinzile podului Horsetail Creek, consolidate numai la încovoiere, vor ceda totuși din întindere diagonală la o încărcare cu 31% mai mare. Din moment ce CFRP a fost prevăzut pentru consolidarea la moment încovoietor, el este unidirecțional pe orizontală. CFRP a fost înfășurat într-o cantitate suficientă pe laturi, pentru a avea opune rezistență fisurarea din întinderea diagonală. În plus, rigiditatea crescută adusă de CFRP a condus la limitarea deformațiilor și a propagării fisurilor, prin reducerea deformațiilor specifice din grindă.

- Adăugarea de GFRP pentru forfecare a fost suficientă pentru a compensa lipsa etrierilor și pentru a conduce la un mod de cedare convențional, prin intrarea în curgere a armăturii întinse. Aceasta a permis ca deformațiile ultime să fie cu 200%

mai mari decât grinda etalon (cu deficiențe de armare la forfecare), care a cedat prematur datorită fisurilor înclinate.

- Grinzile podului Horsetail Creek, consolidate cu GFRP la tăiere și cu CFRP la încovoiere ar trebui să depășească noile cerințe de trafic (658 kNm), ele suportând un moment aplicat de până la 868 kNm.

- Încărcarea la apariția primei fisuri a crescut cu 23%, datorită rigidității crescute din adăugarea de CFRP pentru încovoiere. Rigiditatea adițională a redus deplasările verticale, ceea ce, în schimb, a condus la o reducere a deformațiilor specifice din secțiune.

- Adăugarea de CFRP pentru încovoiere a condus la creșterea capacității la încovoiere cu 33%, la momentul intrării armăturii întinse în curgere.

- O lipire imperfectă a fost evidențiată din diferența dintre deformația specifică reală din CFRP și cea teoretică (obținută prin presupunerea că secțiunile plane rămân plane). Datorită dimensiunii mici a programului experimental (4 specimene, fiecare cu diverse armări), o cercetare viitoare se impune pentru a vedea influența acestui efect asupra analizei structurale și a siguranței în exploatare.

Anul 2001

„Concrete Beams Strengthened with Misaligned CFRP Laminates” – Xinbao Yang, Antonio Yang. [25]

Pe baza cercetării experimentale asupra grinzilor de beton armat, consolidate cu lamele CFRP aliniate greșit, sunt prezentate următoarele concluzii:

- Deprecierea rezistenței odată cu nealinierea lamelor arată o comportare diferită. Când unghiul de rotire este mic, stabilitatea grinzii poate fi asigurată la un nivel acceptabil, în comparație cu grinda reper. Deformația descrește foarte încet la început, dar din ce în ce mai repede, odată cu nealinierea accentuată a lamelei, ceea ce este în corelare cu degradarea rigidității CFRP odată cu alinierea sa greșită.

- Ruperea CFRP poate fi un mod de cedare controlabil, dacă suprafața betonului este bine pregătită. Delaminarea poate apărea în laminatul de CFRP, dar nu este modul de control în acest program de cercetare.

„LRFD Flexural Provisions For PSC Bridge Girders Strengthened With CFRP Laminates” – Sherif El-Tawil, Ayman M. Okeil. [26]

Sumar și concluzii:

- Este investigată performanța structurală a grinzilor pretensionate, din beton armat, consolidate la încovoiere cu lamele CFRP. A fost dezvoltat un model neliniar de analiză, ce ține cont de neliniaritatea materialului și de cronologia construcției. Simulări (cu Monte Carlo) au fost făcute, pentru a determina rezistența modelelor, în cazul diferitelor tipuri de secțiuni de grinzi pretensionate, consolidate cu CFRP. Modelele de calcul obținute sunt folosite apoi pentru calibrarea prescripțiilor ASHTO-LRFD, folosind metoda fiabilității de ordinul întâi. A fost propusă o ecuație pentru factorul de siguranță ϕ , ceea ce a condus la rezultate fiabile acceptabile, în ceea ce privește o varietate mare de combinații de încărcări permanente și utile. Din moment ce ecuația respectivă a fost calibrată folosind o varietate mică de teste, se recomandă efectuarea unor încercări suplimentare pentru a avea confirmarea generalității sale.

- Acest studiu s-a axat doar pe studierea comportării la încovoiere a secțiunilor consolidate cu CFRP. Cercetări viitoare sunt necesare pentru a investiga probabilitatea apariției și a altor moduri de cedare, inclusiv rezistența la forfecare a grinzilor consolidate cu CFRP, precum și probleme legate de dezlipirea sau desprinderea laminatelor.

„Interfacial stresses in reinforced concrete beams bonded with a soffit plate: a finite element study” – J.G. Teng, J.W. Zhang, S.T. Smith. [27]

Această lucrare a prezentat un calcul atent cu elemente finite pentru studierea eforturilor de contact la grinzile consolidate cu lamele compozite. Rezultatele au permis o abordare mai simplă a înțelegerii performanțelor soluției analitice propuse de Smith și Teng, reprezentativă și pentru alte ecuații de calcul, și au permis identificarea anumitor aspecte ce nu sunt reflectate de aceste soluții analitice. În continuare sunt prezentate concluziile:

- Puncte de inflexiune există în grinzile consolidate cu lamele. De aceea, dorind determinarea cât mai precisă a eforturilor de contact, o discretizare fină a fost folosită, pentru ca efectul unei discretizări mai fine să nu fie resimțit decât într-o zonă restrânsă, lângă capătul lamelei.

- Analiza cu elemente finite arată o variație mare a eforturilor în stratul adeziv, eforturile de la interfața adeziv-beton fiind mult diferite de cele de la interfața lamelă-adeziv. În particular, lângă capătul lamelei, efortul de contact normal este de tensiune la interfața cu betonul și de compresiune la interfața cu lamela, astfel explicându-se de ce desprinderea de lamelă a fost observată foarte rar, dacă nu deloc. Acest fenomen a fost observat și comentat și de Rabinovich și Frostig. Distribuții uniforme în stratul de adeziv pot fi găsite la mică distanța de capătul lamelei.

- Rezultatele obținute cu soluția analitică propusă de Smith și Teng sunt comparabile cu eforturile secțiunii mediane din stratul adeziv. Soluția analitică aproximativă, bazându-se pe presupunerea unei distribuții uniforme a eforturilor pe grosimea stratului de adeziv, poate conduce la un fel de predicție medie a eforturilor de contact.

- Un studiu parametric de comparație între predicțiile modelului Smith și Teng și soluția obținută din analiza cu elemente finite, pentru eforturile din stratul median al adezivului, arată o bună corespondență între ele. Corespondențe mai bune au fost obținute pentru straturi de adeziv mai groase, dar nu au fost identificați alți parametri ce influențează semnificativ performanțele soluției analitice. Eforturile de contact descresc odată cu reducerea grosimii adezivului sau cu creșterea modului de elasticitate al adezivului, grosimii sau modului de elasticitate al lamelei. Localizarea eforturilor de întindere și forfecare maxime depinde foarte mult de grosimea stratului adeziv. Aceeași tendință a fost identificată și de Rabinovich și Frostig.

- Efectul completării cu adeziv la capătul lamelei, folosind rășina în exces, poate reduce eforturile de contact locale. Completarea concavă se dovedește cea mai eficientă, din acest punct de vedere, urmându-i cea liniară și apoi cea convexă.

- Deoarece soluția analitică propusă de Smith și Teng aduce niște expresii simple și intuitive pentru eforturile de contact, se poate considera că ea asigură un instrument important pentru înțelegerea fenomenelor de la suprafața de contact și constituie o bază utilă pentru crearea de prescripții de calcul împotriva desprinderii, în ciuda unor inexactități lângă capătul lamelei. Prescripții de proiectare pot folosi aceste expresii, cu ajustările aferente din încercări experimentale.

„Finite Element Modeling Of Reinforced Concrete Structures Strengthened With FRP Laminates” – Damian Kachlakev, Thomas Miller, Solomon Yim, Kasidit Chansawat, Tanarat Potisuk. [28]

Concluzii privind modelarea cu elemente finite a grinzilor la scară naturală:

- Comportarea generală a modelului de calcul cu elemente finite reprezentate prin diagramele efort-deplasare la mijlocul grinzii, arată o corelare

bună cu datele experimentale din testele la scară reală. Oricum, modelele cu elemente finite prezintă o rigiditate puțin mai mare decât testele experimentale, atât în domeniul liniar cât și neliniar.

Efectul pierderii aderenței armăturii din beton, precum și microfisurile ce pot apărea în grinzile reale sunt două aspecte ce nu au fost luate în considerare în modelarea cu elemente finite, contribuind la rigiditatea mai mare a modelelor cu elemente finite.

- Diagramele efort-deplasare pentru anumite puncte din analiza cu elemente finite arată o bună corespondență cu rezultatele experimentale. Din diagramele efort de întindere-deplasare din armăturile întinse, la mijlocul deschiderii, se poate vedea corelarea ce există în domeniul linear, iar alura în domeniul neliniar este în general comparabile. Diagramele încărcare-compresiune (la mijlocul feței superioare) din grinzile la scară reală au arătat o corelare bună cu cele din analiza cu elemente finite, în special pentru grinda de control.

- Încărcările ultime din analiza cu elemente finite sunt mai mici decât încărcările ultime din teste cu aproximativ 5% - 24%. Aceasta se datorează, parțial, neglijării armăturii înclinate; neglijării efectului mecanismului întăririi betonului; și folosirii unor proprietăți de material teoretice, și nu măsurate.

- Capacitatea portantă a grinzii consolidate la Încovoiere/Tăiere obținută pe baza analizei cu elemente finite este mai mare cu 105% decât a grinzii de control, ceea ce este într-o foarte bună corelare cu calculele manuale ce arată că grinda consolidată cu FRP are o capacitate portantă mia mare cu 104% decât grinda de control.

- Direcția fisurilor la finalul ciclului de încărcare din analiza cu elemente finite are o bună corespondență cu modurile de cedare observate la grinzile experimentale, iar direcția fisurilor, prezisă de analiza cu elemente finite a grinzii consolidate la încovoiere, este în corelație cu calculele manuale ce arată cedarea din încovoiere a grinzii.

„Design Recommendations For Concrete Structures Prestressed With FRP Tendons” – Charles W. Dolan, H.R. Hamilton III, Charles E. Bakis, Antonio Nanni. [29]

Schimbările ce se recomandă a fi operate în prescripțiile AASHTO sunt prezentate sub formă tabelară, cu referință directă la subpunctele vizate. Ele sunt aranjate pe numerele secțiunilor specificațiilor AASHTO LRFD Pentru Poduri, Versiunea SI, Prima Ediție, 1994. Sugestiile pentru încorporarea tendoanelor din FRP sunt plasate ori în Specificații ori în Secțiunea de Comentarii, depinzând de care este mai potrivită. Recomandările sunt bazate pe materialele prezentate în acest raport final. Unde este cazul, numerotarea secțiunilor din Raportul Final sunt menționate, pentru a ajuta la evaluarea scopului recomandărilor.

„Mechanics of Bonds in an FRP Bonded Concrete Beam” – K.T. Lau, P.K. Dutta, L.M. Zhou, D. Hui. [30]

Concluzii:

- În studiul de față s-a luat în considerare doar cazul unei grinzi de beton simplu, de formă rectangulară. Prin acest studiu, putem concluziona că modelul teoretic propus este capabil să determine eforturile de tăiere și dezlipire din stratul de rășină, precum și forța axială din lamela FRP, pentru elementul consolidat. Calculele teoretice sunt comparabile cu cele făcute cu elemente finite, validate pe cale experimentală. Diferite metode de aranjare a fibrelor în interiorul materialului compozit sunt luate în considerare în evaluarea mecanismului de transmitere a

eforturilor în elementul consolidat. Modulul efectiv al lamelei de FRP crește odată cu creșterea numărului de fibre aliniat cu direcția longitudinală a grinzii. Eforturile de tăiere și dezlipire în rășină cresc odată cu creșterea modulului lamelei și a rășinii și descresc odată cu reducerea grosimii stratului de rășină.

- Calculul elementului de beton, consolidat cu FRP ar trebui să ia în considerare rezultanta eforturilor de forfecare și dezlipire din adeziv, efortul axial din lamelă și factorul de intensitate al efortului din grindă, datorat încărcărilor aplicate, și de asemenea, ar trebui să optimizeze orientarea fibrei și dispunerea laminatului, pentru atingerea capacității maxime a elementului consolidat.

- Recent, s-a descoperit că desprinderea lamelor la interfața dintre beton/rășină/lamelă este, într-adevăr, foarte rară, datorită legăturii adezive puternice a materialelor pe beton. Acest mod de cedare este atribuit aplicării defectuoase. Oricum, un efort mare de dezlipire poate cauza separarea lamelei și betonului, ca și un tot unitar, de pe armăturile de rezistență.

- În viitor, cercetări sunt necesare pentru a rezolva problemele legate de rezistența la foc, vandalism și degradărilor din oboseală la interfața beton-lamelă a structurilor consolidate cu FRP.

„Anchorage of externally bonded reinforcements subjected to combined shear/bending action” – K. Brosens, D. Van Gemert. [31]

Concluzii:

- Proiectarea corectă a ancorajului de capăt este esențială pentru succesul unei armături lipite din exterior. Eforturi mari de încoviere și tăiere, concentrate în zona de capăt, pot cauza o cedare prematură prin delaminare. Încărcarea corespunzătoare delaminării poate fi determinată folosind un criteriu de cedare, prin prevederea unei combinații de eforturi de tăiere și întindere la capătul lamelei compozite. Din analizele teoretice și experimentale, se pare că riscul delaminării este mult crescut pentru plăcile de oțel mai groase, decât pentru fâșiile subțiri de CFRP. Dacă avem o capacitate insuficientă a ancorajului, poate fi prevăzut un ancoraj mecanic adițional, cum ar fi bolțuri sau etrieri externi.

Anul 2002

„Simplified Load-Deflection Calculations Of FRP Strengthened RC Beams Based On A Rigorous Approach” – Hasan Charkas, Hayder A. Rasheed, Hani Melhem. [42]

Concluzii:

- În acest studiu, metode de calcul simplificat sunt dezvoltate pentru trasarea cât mai exată a curbelor efort-deplasare pentru grinzile de betona armat, consolidate cu lamele FRP. Această simplificare se bazează pe o procedură analitică, ce presupune o variație triliniară a relației moment-rotire și folosește integrarea momentului de inerție pentru a obține expresii precise ale deformațiilor. Pe baza unor teste experimentale, o curbă încărcare-deplasare triliniară este luată în considerare, pentru a simplifica procedura de dimensionare. Ecuații simple sunt deduse pentru calculul momentului de inerție al grinzii la orice nivel de încărcare. Un studiu parametric extensiv a fost efectuat pentru a afla relații liniare între momentul de inerție al secțiunii fisurate și momentul de inerție efectiv la începutul curgerii, luându-se în considerare toți parametrii geometrici și de material posibili. O relație liniară similară este și între momentul de inerție al secțiunii la nivelul momentului ultim și între valoarea corespunzătoare pentru întreaga grindă. Acest lucru simplifică mult calculele, deoarece săgeata este calculată pe baza unor ecuații elastice, după

determinarea proprietăților secțiunii, de care, oricum, proiectantul ar avea nevoie în calcule.

„Strength and Ductility of Concrete Beams Reinforced with Carbon FRP and Steel” – Dat Duthinh, Monica Starnes. [43]

Concluzii:

- Aplicarea laminatelor FRP este foarte eficientă pentru consolidarea la încovoiere a grinzilor de beton armat, dacă se asigură o ancorare corespunzătoare. Pe măsură ce crește procentul de armare cu oțel, descrește capacitatea portantă adițională adusă de lamelă.

- Ancorarea cu sisteme mecanice sau prin înfășurarea cu țesătură de FRP se poate dovedi o metodă eficientă de îmbunătățire a ancorajului, peste nivelul asigurat prin simpla lipire cu rășini epoxidice.

- Dacă se asigură o ancorare corespunzătoare (mechanic sau prin înfășurare cu țesătură), limita efectivă a deformației specifice impusă în ACI440 poate fi exploatată la maximum folosind aceste tipuri de lamele. Pentru grinzile slab armate, efortul de calcul din FRP poate crește substanțial rezistența grinzii, într-o manieră destul de economică.

- Rotirea grinzii de beton armat consolidată cu FRP, la încărcarea maximă, variază între 1.43 – 1.86 ori mai mult decât cea pentru o grindă neconsolidată, cu procentul de armare egal cu 75% din procentul optim (recomandat de ACI). De aceea, grinzile de beton armat, consolidate cu FRP au suficientă capacitate de rotire, deși au moduri de cedare casante (zdrobirea betonului, dezlipirea laminatului, desprinderea lamelei).

- Codul Canadian de Calcul al Podurilor de Autostrăzi (CHBDC 2000) are criterii rezonabile în ceea ce privește ductilitatea. Toate grinzile (4b, 7N și 8N) ce au cedat prin zdrobirea betonului, au satisfăcut aceste criterii, în timp ce grinzile ce au cedat prin dezlipire sau deprimare nu au îndeplinit aceste cerințe (grinzile 4a, 5 și 6).

- Sunt rezonabile recomandările făcute de Naaman și alții în 1999, prin care se permitea o creștere a momentului capabil prin consolidare cu până la 20%, raportat la grinda inițială ce are un procent de armare egal cu cel maxim permis de normele ACI.

- O procedură de dimensionare clară pentru consolidarea cu FRP aplicată la exterior ar trebui să țină cont de creșterea capacității ancorajului prin ancorarea mecanică, înfășurarea cu țesătură sau alte metode. Cu aceste lucruri bine puse la punct și cu datele despre ancoraje existente, se poate realiza o proiectare eficientă.

„Static and dynamic behaviour of RC beam model strengthened by CFRP-sheets” – R. Capozucca, M. Nilde Cerri. [44]

Este studiată comportarea grinzilor de beton armat, deteriorate, consolidate cu țesătură CFRP, pe baza a două încercări experimentale. Rezultatele acestor teste la încovoiere, precum și valorile frecvențelor naturale în diferite faze al încărcării, conduc la următoarele concluzii:

- consolidarea grinzilor deteriorate, din beton armat, folosind țesături de CFRP, conduce la creșterea capacității portante, prin reducerea săgeții. Pe de altă parte, luând în considerare și datele experimentale, rigiditatea la încovoierea grinzilor consolidate crește raportat la situația grinzilor neconsolidate.

- Modelul B2, consolidat cu două straturi de CFRP prezintă o mai mare rezistență, dar o ductilitate redusă.

- Când este folosit doar un strat de țesătură CFRP, diagrama Moment – deformată arată un nivel bun al ductilității în grinda supusă la încovoiere.

- În final, pe baza testelor experimentale dinamice, autorii sugerează că măsurarea frecvențelor de oscilație s-ar putea dovedi o metodă nedistructivă convenabilă pentru controlul grinzilor de beton armat consolidate cu CFRP. De fapt, variațiile frecvențelor în timpul exploatării grinzii consolidate poate fi cauza schimbării stării grinzii.

„Strengthening Prestressed Concrete Beams with Carbon Fiber Reinforced Polymer Plates” – Peter F. Takács, Terje Kanstad. [45]

Concluzii:

- Consolidarea grinzilor folosind lamele CFRP s-a dovedit eficientă. Cantitatea de 108 mm² și 216 mm² de lamelă CarboDur S au condus la creșteri ale capacității portante de 28%, respectiv 37%. Tehnologia are câteva avantaje în raport cu tehnologiile tradiționale: lamelele sunt ușor de instalat și de manevrat, lamelele nu sunt afectate de coroziune, iar soluția este economică. Pe de altă parte, cedarea casantă trebuie avută în vedere – așa cum s-a întâmplat în cazul testului nr.3.

- Capacitățile portante la încovoiere și forfecare a elementului neconsolidat au fost cu 23%, respectiv 106% mai mari decât cele calculate folosind prescripțiile din codul norvegian NS 3473.

- Deformația specifică maximă, bazată pe modelul de cedare, s-a dovedit a fi potrivită pentru modelarea betonului prin metoda fisurării aleatorii. O concordanță bună a fost obținută între modelare și teste, în ceea ce privește capacitățile portante la încovoiere și la forfecare. Modelul găsit s-a dovedit a fi stabil la rulare.

„FRP Strengthening of RC Flexural Members - Ductility Issues” – R . Delpak. [46]

Concluzii:

- Consolidarea cu FRP este mai potrivită pentru planșee solide de beton armat, grinzi T și grinzi rectangulare simplu armate.

- Ductilitatea grinzilor consolidate, dacă sunt calculate și detaliate corespunzător, este acceptabilă în raport cu comportarea normală a structurilor de beton armat.

- Rezistența mare a FRP (mai mare de 2000 MPa) este eficientă dacă modulul de elasticitate al materialului este și el ridicat (mai mare de 200 kN/mm²).

- Producătorii de FRP ar trebui să-și construiască un nivel de credibilitate și să se străduiască să asigure o valoare consistentă a factorului de siguranță. Acest factor ar trebui limitat la o valoare de ordinul 1.5. Valori mai mari ale acestui factor pot conduce la supraarmări și, în consecință, cedări casante.

- Deoarece modulul de elasticitate al materialului compozit descrește ușor cu îmbătrânirea materialului, un factor de siguranță pentru modulul de elasticitate ar trebui aplicat, independent de factorul de siguranță al materialului. Această valoare ar trebui să fie în jur de 1.1.

- Consolidarea cu FRP nu este potrivită pentru secțiunile dublu-armate, deoarece, dacă se consolidează, nu va schimba decât cedarea ductilă într-o cedare fragilă, fără o creștere substanțială în capacitatea portantă.

- Consolidarea cu FRP se poate aplica, în particular, mai ales structurilor ce au un beton de calitate înaltă, în aceste cazuri, calitatea betonului putând fi mai bine utilizată.

- Grinzile de beton armat consolidate cu FRP pot avea și o cedare ductilă, dacă sunt dimensionate ca și secțiuni subarmate.

„Size of FRP laminates to strengthen reinforced concrete sections in flexure”

- A. F. Ashour. [47]

Concluzii:

- A fost introdusă o metodă analitică simplificată pentru calculul capacității portante la încovoiere a secțiunilor de beton armat consolidate cu laminate FRP aplicate lateral. Deși metoda descrisă aici a fost creată pentru secțiuni dreptunghiulare, ea are o formă generală și poate fi extinsă și la alte tipuri de secțiuni. Comparații dintre capacitatea la încovoiere și moduri de cedare obținute din analizele teoretice și experimentale sun într-o bună concordanță.

- Consolidarea secțiunilor de beton armat cu laminate FRP aplicate la exterior se dovedește eficientă mai ales în cazul elementelor cu un procent mic de armare cu oțel. Modul de cedare prin încovoiere este controlat de cantitatea de lamelă FRP folosită. Valori minime și maxime pentru procentul de armare cu compozit sunt propuse, pentru a asigura cedarea ductilă a elementelor consolidate. Sunt propuse ecuații de calcul pentru determinarea ariei de laminat folosite pentru creșterea capacității portante la încovoiere.

„FRP Strengthened Behaviour of RC Flexural Elements Subjected to Degradation Influences” – R. Delpak, D.B. Tann, E. Andreou, M. Abuwarda, D.K. Pugh. [48]

Concluzii privitoare la golurile de aer din compozit:

- Apariția bulelor de aer sub țesătura de material compozit are ca efect reducerea capacității portante, raportat cu elementul fără goluri de aer.

- S-ar părea că există o legătură între cantitatea de goluri de aer și nivelul de reducere a capacității portante.

- La diferite procente de bule de aer, curba moment-deformată nu se schimbă. Oricum, apare o cedare prematură, ce depinde de procentul de bule de aer.

În ceea ce privește încărcările ciclice:

- Grinzile consolidate au prezentat o capacitate la încovoiere mai mare și o întârziere a apariției fisurilor, însă au avut și săgeți mai mici la cedare.

- Încărcarea ciclică s-ar părea că afectează avantajele consolidării exterioare cu FRP, îmbunătățirea ductilității fiind mai puțin semnificativă decât în cazul grinzilor încărcate static.

În ceea ce privește agresivitatea mediului:

- Grinzile ce au sta în acid sulfuric 20 de zile nu au suferit nici un fel de degradare, deoarece acidul nu a reușit să pătrundă în beton.

- Grinzile consolidate cu aramidă au prezentat o ușoară creștere a rigidității.

- O perioadă de imersiune mai mare, pre-fisurarea grinzilor, sau încărcări în imersiune – ar putea fi cauze ale unei degradări mai rapide a grinzilor.

Rezultatele acestui raport au arătat că și în cazul elementelor degradate datorită diverșilor factori, consolidarea cu FRP este eficientă, iar elementele consolidate ating capacități portante mai mari, comparate cu elementele neconsolidate.

„Debonding in RC cantilever slabs strengthened with FRP strips ” – J. Yao, J.G. Teng, L. Lam. [49]

Concluzii:

- Toate plăcile testate au cedat prin dezlipirea completă a fâșiilor de FRP de pe beton.
- Plăcile consolidate prin aplicare umedă au arătat o comportare mult mai ductilă și un proces de dezlipire gradual, față de plăcile consolidate cu lamele.
- Eforturile maxime în fâșiile de FRP, la finalul procesului de dezlipire pot fi calculate eficient folosind modelul Chen și Teng, cu un coeficient modificat.

„Premature Failure of RC Continuous Beams Strengthened with CFRP Laminates” – A.A. El-Refaie, A.F. Ashour, S.W. Garrity. [50]

Concluzii:

- Toate grinzile consolidate au avut o capacitate portantă mai mare, dar o ductilitate mică, comparate cu cele ale grinzilor martor (neconsolidate).
- Cedarea fragilă, prin desprinderea stratului de acoperire cu beton, a fost criteriul de cedare în majoritatea cazurilor. Oricum, toate grinzile au fost aproape de atingerea capacității lor portante.
- Creșterea lungimii țesăturii CFRP peste zona de întindere din câmp sau de pe reazem nu a îmbunătățit cedarea prin dezlipirea materialului compozit.
- Creșterea lungimii laminatului s-a dovedit ineficientă atunci când modul de cedare a fost prin ruperea țesăturii CFRP.
- A existat un număr optim de straturi de țesătură, peste care capacitatea portantă a grinzii nu a fost îmbunătățită.

„Interfacial Stresses in Plated RC Beams Under Arbitrary Symmetric Loads: a High-Order Closed-Form Solution” – J. Yang, J.F.Chen, J.G. Teng. [51]

Concluzii:

- O ecuație detaliată de ordin superior a fost dezvoltată. Ea consideră distribuția neuniformă a eforturilor în rășină, satisface condițiile de solicitare la capătul lamelelor și poate fi aplicată și altor modele de structuri compozite.
- Eforturile de forfecare sunt aproape identice atât la interfața beton-rășină cât și la interfața rășină-lamelă.
- Atât eforturile rupere a aderenței la suprafață cât și cele de smulgere de la capătul lamelei sunt funcție de forța tăietoare și momentul încovoietor la capătul lamelelor.

„Strengthening Of Concrete Beams With Mechanically Fastened FRP Strips” – Anthony J. Lamanna, Lawrence C. Bank, David T. Borowicz, Dushyant Arora. [55]

Concluzii:

- Este posibil să consolidăm grinzi T prin alipirea de fâșii FRP, ancorate mecanic. Procedura de ancorare nu necesită pregătirea suprafeței. Grinda consolidată cu o fâșie a prezentat o creștere cu 8% a momentului de curgere și cu 14.4% a momentului corespunzător unei săgeți maxime de 63.5 mm. Grinda consolidată cu două fâșii a prezentat o creștere cu 11.7% a momentului de curgere, și o creștere cu 27.2% a momentului ultim. Modelul analitic a condus la obținerea unui moment de curgere de 1.09 ori mai mare decât momentul real de curgere, decât săgeata la intrarea în curgere a armăturii și decât momentul maxim corespunzător.
- Pentru viitoarele calibrări ale modelului analitic, alunecarea dintre țesătură și beton este luată în considerare, ceea ce va permite modelului să prevadă reducerea capacității portante odată cu atingerea capacității limită a ancorajului. Teste de oboseală vor fi conduse pentru a determina efectul încărcărilor ciclice asupra grinzilor consolidate cu materiale compozite.

„Effect of Flexural Cracking on Plate End Shear Stresses in FRP-Strengthened Beams” – Herman C.Y. LUK, Christopher K.Y. LEUNG. [56]

Concluzii:

- În momentul formării fisurilor la capătul lamelei, are loc o redistribuire a eforturilor, iar concentrarea de eforturi de la capătul lamelei nu mai există, așa cum ar fi fost prevăzută de analiza elastică.

- Conceptul de efort mediu de forfecare la capătul lamelei poate fi luat în considerare ca un parametru ce guvernează cedarea prin delaminare.

- Cercetările trebuie continuate pentru determinarea aplicabilității pe care o poate avea această nouă abordare a cedării prin delaminare.

„A New Prepreg Material Used In Conjunction With Concrete To Form A Structural Unit” – Jonathan Hulatt, Prof Len Hollaway, Anthony Thorne. [52]

Concluzii:

- Grinzile hibrid ce încorporează o combinație de APC și beton au fost construite cu succes.

- Realizarea lipirii dintre beton și compozit cu o rășină a prevenit cedarea prin forfecarea în adeziv.

- Flambajul a început la încărcări relativ mici, dar încărcarea critică de flambaj a fost mult mai mare.

- A trebuit crescut FoS în talpă pentru CFRP, pentru obținerea limitelor de deformabilitate.

„Characterization And Modeling Of Debonding In RC Beams Strengthened With FRP Composites” – Oral Buyukozturk, Oguz Gunes, Erdem Karaca. [53]

Concluzii:

- Rezultatele experimentale prezentate indică faptul că în cazul unei creșteri a energiei totale de rupere la nivelul interfeței, în grinzile consolidate cu FRP, în termeni de ancoraj, reflectă performanțele grinzii. De asemenea, performanțele grinzii sunt îmbunătățite datorită prevenirii dezlipirii locale din fisurile din încovoieretăiere, prin creșterea capacității portante la forfecare. Abordarea din modelările preliminare este folosită acum de autori pentru crearea unui model ce poate prevedea exact modelul cedării prin dezlipire, pentru grinzile consolidate cu FRP.

„A Fracture-Based Model For Debonding Of FRP Plate From Concrete Substrate” – Christopher K.Y. Leung, Yong Yang. [54]

Concluzii:

- În acest articol, dezlipirea FRP de stratul de beton este modelată printr-o abordare bazată spre energia de rupere. Au fost considerate cazuri cu și fără relaxări eforturilor de adeziune. Rezultatele analizei arată că capacitatea portantă efectivă la forfecare în cadrul zonei de ancoraj este o funcție de frecarea internă, frecarea la rupere, precum și modulul de forfecare și grosimea adezivului. În situații uzuale, rezistența efectivă poate să scadă sub rezistența la tăiere proprie a betonului. Eforturile de forfecare de contact foarte mari, deduse din măsurătorile experimentale pot astfel fi explicate. Oricum, în ciuda faptului că abordarea pe baza energiei este o abordare teoretic mai precisă în descrierea fizicii dezlipirii FRP, comportarea precisă a dezlipirii nu diferă semnificativ de rezultatele unei analize bazate pe rezistențe, având în vedere o rezistență la forfecare efectivă. Abordarea bazată pe rezistențe poate, deci, fi folosită pentru a crea modele simple pentru aplicații inginerești.

Anul 2003

„Design Approach for Carbon Fiber-Reinforced Polymer Prestressed Concrete Bridge Beams” – Nabil F. Grace, S.B. Singh. [67]

Concluzii:

- Ecuțiile de calcul derivate aici prezic deformațiile specifice din beton, eforturile de post-tensionare din toroanele nelipite, capacitatea portantă la încovoiere și săgeata grinzii, care sunt în legătură strânsă cu valorile experimentale. Valorile analitice și experimentale ale capacității portante la încovoiere ale grinzii DT sunt aproape identice, în timp ce diferența maximă (4.1%) este măsurată la cedarea grinzii.

- Ecuțiile de calcul vor ajuta proiectanții să estimeze ușor forțele din tendoanele lipite sau nelipite, și capacitatea la încovoiere a grinzilor de pod cu diferite secțiuni (DT, cheson, dublu T) armate cu tendoane pretensionate sau nu, cu tendoane lipite, pretensionate sau nu, cu orice combinație de caracteristici de material în tendoane sau beton.

- Procentul de armare are un efect important asupra săgeții, capacității la încovoiere și forțelor în tendoanele nelipite post-tensionate.

- Pentru o încărcare anume, săgeata este mai mare pentru procentul de armare mai mic și pentru forța de pretensionare mai mică. Curba efort-deplasare poate fi folosită pentru obținerea săgeții grinzii, corespunzătoare încărcării de exploatare, încărcării de fisurare și încărcării ultime, pentru asigurarea condițiilor de exploatare normală.

- Ductilitatea grinzii este îmbunătățită datorită creșterii nivelului de pretensionare. Combinația de niveluri de pretensionare lipite și nelipite (0.3 – 0.6) poate îmbunătăți capacitatea portantă la încovoiere și ductilitatea grinzii supraarmate.

„Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding” – J.F. Chen, J.G. Teng. [68]

Concluzii:

- Ruperea FRP și dezlipirea lui sunt două moduri principale de cedare identificate pentru grinzile de beton armat consolidate cu FRP aplicat pe exterior. Abordarea separată a celor două moduri de cedare este esențială pentru crearea unor modele de calcul pentru consolidarea la forfecare. Acest articol s-a axat pe crearea unor noi ecuații de calcul pentru grinzile de beton armat consolidate cu FRP, care cedează la tăiere prin dezlipirea FRP. O recapitulare a cercetărilor existente a fost prezentată la început, ceea ce a permis identificarea deficiențelor tuturor abordărilor anterioare. Bazându-se pe un model rațional pentru adeziunea dintre FRP și beton, o nouă metodă de calcul la forfecare a fost dedusă pentru cedarea prin dezlipire a grinzilor de beton armat consolidate la forfecare. Acest nou model face o recunoaștere explicită a distribuției neuniforme în FRP, în dreptul unei fisuri înclinate, așa cum a fost determinat de rezistența adeziunii dintre fâșiile FRP și beton. Acest nou model este comparabil cu datele experimentale obținute din literatură, pe baza unei documentări extensive. În final a fost prezentată o propunere de model de calcul ce poate fi folosit direct în proiectare.

„Deflection and crack-width prediction of concrete beams reinforced with glass FRP rods” – Houssam Toutanji, Yong Deng. [69]

Datele experimentale obținute din acest studiu au fost folosite pentru validarea acuațiilor din ACI440.1R-02 pentru calculul săgeților și deschiderilor de fisuri. Rezultatele acestui studiu sunt rezumate mai jos:

- Deformațiile din grinzile de beton armat cu armături GFRP pot fi descrise exact de ecuațiile din ACI440.1R-01. Rezultatele experimentale din acest studiu sunt comparabile cu cele calculate cu expresiile din ACI.

- Pentru un singur rând de bare FRP, ecuațiile din ACI 440.1R-01 calculează în mod satisfăcător deschiderea fisurilor. Pentru armăturile FRP așezate pe două rânduri, ecuațiile din ACI440.1R-01 subevaluează deschiderile de fisuri din grinzile de beton armate cu FRP. Prin schimbarea factorului k_b de la 1.2 la 1.4, această evaluare devine precisă.

- Mai multe studii sunt necesare pentru a verifica acuratețea modelului în calculul grinzilor de beton, armate cu mai multe rânduri de armături FRP.

„Finite element modelling of concrete cover separation failure in FRP plated RC beams” – Z.J. Yang, J.F. Chen , D. Proverbosc. [70]

Concluzii:

- Acest modela a prezentat un model de fisurare bazat pe analiza cu elemente finite a grinzilor armate cu lamele de FRP. A fost dezvoltat un program de calcul bazat pe mecanica cedării linear-elastice, care poate simula automat propagări multiple de microfisuri în timpul încărcării structurii, până la colaps.

- Un studiu preliminar a studiat cu succes cedarea grinzii consolidate cu FRP, prin desprinderea stratului de acoperire cu beton. Rezultatele numerice inițiale au arătat că fisurile sunt mai dese în cazul grinzilor consolidate cu lamele, decât în cazul celor neconsolidate. Pentru grinzile cu lamele aplicate, fisurile au avut un rol important în distribuția eforturilor în compozit. Distribuția eforturilor este uniformă numai în deschiderea cu moment constant și numai înainte de dezvoltarea unor fisuri importante.

- Lungimea lamelei are o influență importantă asupra modului de cedare. Modelul numeric a demonstrat că o grindă consolidată cu o lamelă mai scurtă are o probabilitate mai mare de cedare prin desprinderea acoperirii cu beton, cedare care va fi și fragilă.

„Behavior Of Historic Reinforced Concrete Bridge Retrofited For Flexure And Shear Deficiencies With Externally Applied FRP Composites: Testing, Strengthening Design Method, And Finite Element Modeling” – Damian I. KACHLAKEV. [71]

Concluzii:

- Grinzile inițiale HCB au avut deficiențe la forfecare înaintea consolidării, ele cedând undeva în jurul valorii de 238kN forță tăietoare. Încărcarea proprie normală și încărcarea utilă din vehicule (HS20) conduc la o forță tăietoare estimată la 397kN. S-a concluzionat că podul nu a preluat niciodată o încărcare utilă mai mare decât cea prevăzută prin norme pentru vehiculului HS20.

- Grinzile inițiale HCB, consolidate cu GFRP la tăiere și cu CFRP la încovoiere ar trebui să depășească cu mult noile cerințe statice. Grinda consolidată în întregime a depășit cerința de 720kNm, susținând un moment aplicat de 868kNm.

- Metoda cu elemente finite din programul ANSYS poate simula eficient comportarea generală a grinzilor de beton armat, atât înainte, cât și după consolidarea cu FRP, din stadiul comportării liniare, în stadiul neliniar și până la cedare.

- Încărcările ultime din modelarea cu elemente finite au fost mai mici decât cele experimentale cu 5%-24%, parțial și din cauza neincluserii în modelare a armăturii înclinate; efectul de întărire (toughening) al betonului este ignorat în modelare, iar proprietățile de material reale sunt imperfecte.

- Fisuri mai mici și mai scurte au fost observate în grinda consolidată, în comparație cu grinda de control. Propagarea fisurilor în grinzile consolidate cu FRP a fost mai lentă, în comparație cu grinda de control, datorită confinării aduse de FRP.

„Design And Evaluation Of Full-Size Beams Strengthened For Shear And Flexure With FRP Composites: Testing, Parametric Studies And FEM Analysis” – Damian I. KACHLAKEV. [72]

Concluzii:

- La același nivel de încărcare, săgețile grinzilor consolidate cu FRP sunt mai mici decât cele ale grinzilor neconsolidate (de control). Consolidarea cu FRP contribuie în mod semnificativ la creșterea rigidității structurii, mai ales în domeniul nelinier, producând deformații mai mici. În analiza cu elemente finite, rigiditatea grinzii S&F este cu 20% și 215% mai mare decât grinda de control înainte și respectiv după intrarea în curgere a armăturii întinse.

- Fisuri mai mici și mai puține au fost observate în grinda consolidată cu FRP, față de grinda de control, la același nivel de încărcare. Propagarea fisurilor, odată cu creșterea încărcării grinzii, este relativ lentă, datorată confinării aduse de FRP.

- Datorită combinației de laminate pentru încovoiere și forfecare, capacitatea portantă statică a fost mărită cu 49% peste capacitatea inițială. Capacitatea portantă la încovoiere a crescut cu 98%.

- Grinzile experimentale, consolidate doar la încovoiere, au cedat prin forfecare la o încărcare de 689kN, în comparație cu 476kN la care a cedat grinda neconsolidată.

- Adăugarea consolidării cu GFRP la forfecare a fost suficientă pentru schimbarea modului de cedare într-unul convențional, prin curgerea armăturii întinse, la mijlocul deschiderii. Acest lucru a permis deplasări mai mari cu 110% decât cele ale grinzii fără consolidare la forfecare, grindă care a cedat fragil prin deschiderea fisurilor înclinate.

- Consolidarea la încovoiere cu CFRP, adăugată la consolidarea la forfecare cu GFRP, a condus la creșterea încărcării la curgerea oțelului cu mai mult de 33%.

- Rigiditatea în stadiul fisurat a crescut cu 17%, și 21%, prin adăugarea GFRP la tăiere și respectiv CFRP la încovoiere. Adăugarea ambelor sisteme a condus la creșterea rigidității elementului fisurat cu 30%.

- Modelarea cu elemente finite poate simula eficient comportarea generală a grinzilor de beton armat atât înainte, cât și după aplicarea compozitelor FRP, din domeniul linear până în cel nelinier și până la cedare.

- Încărcările ultime din modelarea cu elemente finite au fost mai mici decât cele experimentale cu 5%-24%, parțial și din cauza neincluzării în modelare a armăturii înclinate; efectul de întărire (toughening) al betonului este ignorat în modelare, iar proprietățile de material reale sunt imperfecte.

- Direcțiile fisurilor la încărcarea maximă sunt similare în modelarea cu elemente finite și în încercările experimentale, iar calculele cu elemente finite ale fisurării sunt în corelație cu calculele manuale, care arată cedarea din încovoiere a grinzii.

- Studiile parametrice au condus la concluzia că nu se justifică aplicarea consolidării cu FRP la grinzile ce au ca mod de cedare zdrobirea betonului.

- Creșterea modului de elasticitate al compozitului FRP conduce la creșterea capacității elementului consolidat, însă, în același timp, compozitul este predispus la cedări prin dezlipire.

- Din toate investigațiile efectuate, înălțimea grinzii și rezistența la compresiune a betonului contribuie cel mai mult la capacitatea portantă la încovoiere a grinzii și la poziția axei neutre.

„Preservation Of Existing Bridges In Kentucky Using Advanced Composites” – Issam HARIK, Tong ZHAO, Ching Chiaw CHOO. [73]

Pe baza experienței practice descrisă anterior, pot fi observate următoarele avantaje ale folosirii materialelor compozite polimerice în conservarea podurilor existente:

- Se poate elimina sau minimiza efectul de întrerupere a traficului în timpul procesului de reabilitare.
- Elimină necesitatea folosirii de echipamente de mare tonaj. Doar unelte de mână și un număr mic de muncitori sunt necesare.
- Oferă o mare flexibilitate și precizie. Sun posibile reparațiile în zone unde nu se pot aplica alte metode de consolidare.
- Este o alternativă economică.

„Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites” – Oral Buyukozturk, Oguz Gunes, Erdem Karaca. [74]

Concluzii:

- Problemele legate de dezlipirea sau desprinderea materialelor compozite sunt principala limitare a folosirii materialelor compozite.
- O descriere atentă a problemelor de dezlipire sau desprindere, precum și includerea lor în codurile de proiectare sunt esențiale pentru folosirea pe scară largă a acestei proceduri.
- Este făcută și o recapitulare a progresului cercetărilor, la zi, asupra problemelor legate de dezlipirea sau desprinderea materialelor compozite, cu prezentarea rezultatelor recente și a discuțiilor, și sunt enunțate necesitățile cercetării viitoare asupra acestui aspect.

„Fiber-Section FE Of FRP-Strengthened RC Beam For Seismic Analysis” – Michele BARBATO, Giorgio MONTI, Federico SANTINELLI. [75]

Concluzii:

- Analiza cu elemente finite prezentată în acest articol a demonstrat simplitate și precizie în descrierea comportării mecanice a structurilor de beton armat, consolidate la încovoiere, forfecare sau confinare. Robustețea și eficiența sa vor fi verificate pe un cadru de beton armat, testat în cadrul unui proiect UE. Cadrul a fost proiectat să aibă o cedare ușoară de nivel, confirmată și de modelarea cu elemente finite. Procedura de consolidare ulterioară a fost proiectată pentru a evita o astfel de cedare. Modelul cu elemente finite a fost apoi folosit pentru prezicerea răspunsului cadrului consolidat cu materiale compozite, arătând capacitatea de a monitoriza mecanismele de cedare la încovoiere sau forfecare. Modelul cu elemente finite dezvoltat a fost confirmat a fi o unealtă viabilă pentru compararea diferitelor variante de consolidare cu materiale compozite.

3.3. Forfecare

Consolidarea grinzilor de beton armat cu deficiențe de forfecare se poate dovedi eficientă în anumite condiții. Prin diferite prescripții de proiectare sunt

impune limitări ale folosirii materialelor compozite în aceste tipuri de consolidări, pentru evitarea dezlipirii sau desprinderii materialului compozit, ceea ce ar putea duce la o cedare bruscă, fragilă a elementului

Anul 1998

„Strengthening of Shear-Damaged Reinforced Concrete T-Beam Bridges with CFRP Strips” – Riadh Al-Mahaidi, Geoff Taplin, John Susa. [2]

Concluzii:

- Acest articol prezintă cazul folosirii lamelelor L de carbon pentru reabilitarea grinzilor T, care au cedat din forță tăietoare. Aceste tipuri de grinzi pot fi găsite la poduri, unde sunt necesare creșteri ale încărcărilor utile, datorită creșterii traficului.

- Cercetarea literaturii a arătat că lamelele L de carbon sunt cele mai eficiente elemente pentru acest tip de reparații.

- A fost făcută o propunere privind consolidarea unor grinzi T din beton armat, la scară 1:2, cu un ante-calcul pentru obținerea valorilor minime și maxime pentru capacitatea grinzii consolidate. Reparații și teste experimentale bazate pe această propunere vor fi implementate în Februarie 1999.

„Strengthening of RC Elements By CFRP Plates. Local Failure” – Mazen M. Almakht, György L. Balázs, Kypros Pilakoutas. [1]

„Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of Flexural Members” – Ahmed Khalifa, William J. Gold, Antonio Nanni, Abdel Aziz M.I.. [3]

Concluzii:

- Pe baza rezultatelor experimentale și teoretice adunate de la alți cercetători, sunt prezentate două abordări privind calculul contribuției consolidării cu materiale compozite la capacitatea portantă la tăiere a grinzilor de beton armat.

- Prima abordarea are în vedere efortul efectiv din compozit, prezentată în acest studiu ca o funcție de rigiditatea sa și valoarea deformației specifice maxime. Această abordare a calculului este validă pentru fâșiile sau lamelele continue de CFRP, cu orice unghi de orientare. Este potrivită, însă, numai dacă modul de cedare este prin ruperea compozitului.

- A doua abordare se bazează pe mecanismul de legătură dintre CFRP și beton. Ea se referă la lățimea efectivă a laminatului la delaminare. Această abordare a calculului este validă doar pentru fâșii sau laminate continue, și este potrivită doar dacă modul de cedare este controlat de delaminarea materialului compozit.

- Cele două metode de calcul sunt prezentate cu exemple de calcul. Autorii sugerează aplicarea ambelor metode de calcul și considerarea în practică a valorii minime pentru V_f . Pentru a proba viabilitatea acestei abordări sunt necesare programe experimentale viitoare. Acestea trebuie să aibă în vedere următoarele:

- Majoritatea experimentelor au în vedere înfășurarea materialului compozit în jurul grinzii. Alte studii sunt necesare pentru verificarea aplicării sub formă de U (3 laturi) a materialului compozit.

- Încercări experimentale sunt necesare pentru studiul orientării fibrelor asupra capacității portante a consolidării.

- Trebuie verificat efectul aplicării unei țesături cu fibrele orientate la 0° peste o fâșie cu fibrele orientate la 90° .

- Cercetări analitice și experimentale sunt necesare pentru a studia adeziunea dintre FRP și beton. Trebuie aprofundat studiul asupra influenței

rezistenței betonului și orientării FRP asupra lungimii efective de ancorare și rezistenței medii a lipirii.

- Trebuie investigată comportarea consolidării la forfecare cu ancoraje mecanice.

- Un studiu trebuie făcut și asupra cantității armăturilor de forfecare asupra capacității totale a grinzii.

Anul 1999

„Shear Strengthening Of Continuous RC Beams Using Externally Bonded CFRP Sheets” – Ahmed Khalifa, Gustavo Tumialan, Antonio Nanni, Abdeldjelil Belarbi. [5]

Concluzii:

- Au fost studiate comportarea la forfecare și modurile de cedare a unei grinzi continue de beton armat, cu două deschideri, consolidată cu țesătură CFRP. Rezultatele experimentale au arătat că materialele compozite pot fi folosite pentru creșterea capacității portante la forfecare atât în zonele de moment pozitiv cât și în cele de moment negativ.

- În cazul grinzilor testate, creșterea în capacitatea la forfecare a variat între 22% și 135%.

- Rezultatele experimentale au arătat o creștere mai mare a capacității la forfecare în cazul grinzilor fără etrieri adecvați, decât în cazul grinzilor care au avut etrieri suficienți. Testele au fost folosite pentru validarea anumitor proceduri de calcul al contribuției țesăturii compozite. Valorile calculate au condus la rezultate conservative.

Anul 2000

„Strengthening of Reinforced Concrete Structures with Near Surface Mounted FRP Rods” – Laura De Lorenzis, Antonio Nanni, Antonio La Tegola. [12]

„Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates” – D. Kachlakeva, D.D. McCurry. [14]

„FRP Composites For Shear Strengthening Of RC Beams” – Ahmed Khalifa, Laura De Lorenzis, Antonio Nanni. [15]

Concluzii:

- A fost prezentat un studiu experimental asupra performanțelor la forfecare și asupra modurilor de cedare a grinzilor T, simplu rezemate, consolidate cu FRP. Au fost studiate două metode de consolidare: cu țesătură și cu armături aplicate pe suprafață.

- Din aceste teste nu a rezultat o influență semnificativă a rugozității suprafeței pe care a fost aplicat compozitul. De aceea, s-ar părea că simpla curățare cu jet de apă sau sablare cu nisip sunt suficiente. Mai mult, testele arată o proporționalitate directă între creșterea capacității la forfecare a grinzii consolidate și creșterea rigidității axiale a compozitului.

- Verificarea pe cale experimentală a arătat, de asemenea, aplicabilitatea tehnicii de consolidare folosind armături compozite aplicate pe suprafață.

„Improving Shear Capacity of Existing RC T-Section Beams Using CFRP Composites” – Ahmed Khalifa, Antonio Nanni. [16]

În cadrul acestui studiu a fost studiată comportarea grinzilor T consolidate la tăiere cu materiale compozite. Rezultatele experimentale au arătat că folosirea CFRP

la consolidarea la forfecare a grinzilor de beton armat este o soluție viabilă. Pentru grinzile testate în acest program, creșterea de capacitate a fost între 35% și 145%. În cadrul scopului declarat al studiului, se pot enunța următoarele concluzii:

- Performanțele compozitului aplicat la exterior pot fi îmbunătățite semnificativ printr-o ancorare adecvată.
- Sistemul U de ancorare ce a fost propus în acest articol este recomandat acolo unde lipirea și lungimea de ancorare sunt critice, conform procedurii de calcul.
- Aplicarea CFRP doar pe lateralele grinzii T este mai puțin eficientă decât aplicarea în formă de U (pe trei părți).
- Deși cantitatea de CFRP folosit în grinda BT4 a fost cu 40% mai mare ca în cazul grinzii BT2, a fost obținut același efect al consolidării. Aceasta înseamnă că există o cantitate optimă de FRP, peste care efectul de consolidare este incert.
- Fâșiile de CFRP nu sunt recomandate de autori pentru folosirea pe șantier, deși ar putea fi la fel de eficiente ca și țesătura CFRP. Țesătura continuă este mai sigură decât fâșiile, deoarece deteriorarea unei fâșii individuale poate avea efecte mai accentuate asupra capacității portante ultime.
- Nu a fost observată vreo contribuție la capacitatea portantă la tăiere a țesăturii cu fibrele orientate la 0°.
- Comparativ cu rezultatele experimentale, algoritmul de calcul la forfecare poate asigura estimări acceptabile și conservative.

Anul 2001

„Finite Element Modeling Of Reinforced Concrete Structures Strengthened With FRP Laminates” – Damian Kachlakev, Thomas Miller, Solomon Yim, Kasidit Chansawat, Tanarat Potisuk. [28]

„Design Recommendations For Concrete Structures Prestressed With FRP Tendons” – Charles W. Dolan, H.R. Hamilton III, Charles E. Bakis, Antonio Nanni. [29]

„Mechanics of Bonds in an FRP Bonded Concrete Beam” – K.T. Lau, P.K. Dutta, L.M. Zhou, D. Hui. [30]

„Shear Performances Of RC Beams Strengthened In Situ With FRP Composites” – Raghu H Annaiah, Francesco Micelli, Antonio Nanni. [32]

Un program experimental extensiv a fost condus pe 12 grinzi la scară reală la Spitalul Malcolm Bliss din St. Louis, USA. Variabilele din acest studiu au fost numărul de straturi de țesătură folosite pentru consolidarea la tăiere. În plus, un nou sistem de ancorare a fost validat pentru folosirea unei cât mai mare capacități a sistemului de consolidare. Testele descrise au arătat creșterea ce poate fi obținută în capacitatea la forfecare a grinzilor de beton armat, cu o eficiență dependentă de variabilele luate în calcul.

Pe baza rezultatelor experimentale, putem trage următoarele concluzii:

- Pentru creșterea capacității la forfecare, se pot folosi CFRP.
- Testele au arătat că metoda de consolidare la forfecare se poate aplica atât grinzilor rectangulare cât și celor cu secțiune T.
- Elementele consolidate cu unul sau două straturi, cu sau fără ancoraje de capăt, au prezentat un mod de cedare prin dezlipire prematură. Acest fapt poate fi pus pe seama unui procent mare de armare, și parțial pe seama condițiilor de pregătire a suprafeței de la fața locului, ce au condus la o lipire slabă între FRP și beton.

- Verificarea experimentală a sistemului de ancorare de capăt și-a arătat eficiența în creșterea capacității grinzilor de beton armat.

- Ancorarea este recomandată unde lipirea și/sau lungimea activă a FRP rezultă critice din calcul. Probele existente arată că sistemele de ancoraj pot face din consolidarea cu FRP o tehnică și mai atractivă și mai eficientă de consolidare. Această opțiune trebuie avută în vedere atunci când consolidarea se face în formă de U, pe suprafețe neregulate.

- Deformațiile specifice înregistrate în CFRP indică faptul că nivelul de încărcare la care apare cedare sistemului de consolidare este, de obicei, mai mic decât rezistența nominală a CFRP, datorită concentrărilor de eforturi sau dezlipirii CFRP de pe beton din cauza dezvoltării fisurilor în zona de intersecție inimă-talpă.

- Creșterea cantității de CFRP poate să nu conducă la o creștere proporțională a rezistenței la forfecare, mai ales dacă modul de cedare este prin dezlipirea CFRP. O creștere proporțională poate avea loc numai în cazul prevenirii desprinderii CFRP, prin prevederea de ancoraje suplimentare.

- Eficacitatea schemelor de consolidare la tăiere ar trebui verificată și pentru grinzi cu deschideri de forfecare mici, deoarece a fost observată o tendință de desprindere a grinzii de placă de-a lungul colțurilor.

„Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer Rods” – Laura De Lorenzis, Antonio Nanni. [33]

Concluzii:

- Folosirea armăturilor NSM FRP s-a dovedit o tehnică eficientă pentru creșterea capacității portante la forfecare a grinzilor de beton armat. În absența etrierilor de oțel, se poate atinge o creștere a capacității portante de până la 106%, raportat la grinda inițială.

- Dintre cele două grinzi identice, subarmate cu etrieri, conform ACI, cea consolidată a prezentat o creștere a capacității sale cu 35% față de cea neconsolidată. Putem astfel trage concluzia că barele NSM FRP sunt eficiente și în prezența etrierilor interni.

- Unul dintre modurile de cedare observate a fost desprinderea barelor de FRP, datorită fisurării în stratul de rășină. Rezultatele experimentale au arătat că acest mecanism de cedare poate fi prevenit prin creșterea lungimii de ancorare sau prin ancorarea barelor NSM în grindă sau folosind bare cu ciocuri la 45° suficient de dese.

- Odată eliminată posibilitatea cedării prin desprindere, modalitatea de cedare poate deveni desprinderea stratului de acoperire cu beton. Acest mecanism poate fi explicat prin diferența dintre armăturile interne și barele NSM. Spre deosebire de etrierii interni, barele NSM nu sunt capabile să exercite forțe de constrângere a armăturilor supuse efectului de dorn. Aceste forțe, în combinație cu efectul de despicare a armăturii deformate conduc la apariția unor eforturi de întindere în betonul adiacent, ceea ce ar putea conduce la desprinderea stratului de acoperire cu beton și, implicit, la desprinderea ancorajului.

- Modelul propus a calculat cu o precizie acceptabilă capacitatea portantă la forfecare a grinzilor testate. Cercetările ar trebui aprofundate pe viitor pentru includerea în formule a tuturor variabilelor semnificative.

„Anchorage of externally bonded reinforcements subjected to combined shear/bending action” – K. Brosens, D. Van Gemert. [31]

Anul 2002

„A New Prepreg Material Used In Conjunction With Concrete To Form A Structural Unit” – Jonathan Hulatt, Prof Len Hollaway, Anthony Thorne. [52]

„Characterization And Modeling Of Debonding In RC Beams Strengthened With FRP Composites” – Oral Buyukozturk, Oguz Gunes, Erdem Karaca. [53]

„A Fracture-Based Model For Debonding Of FRP Plate From Concrete Substrate” – Christopher K.Y. Leung, Yong Yang. [54]

„Shear Strengthening Of RC Beams Using Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips” – Zhichao Zhang, Cheng-Tzu Thomas Hsu. [57]

Concluzii:

- Grinda cu lamele CFRP și grinda cu țesătura CFRP prezintă modele de cedare total diferite. Cedarea lamelilor rezultă prin delaminarea betonului sub rășina epoxidică, în timp ce cedarea țesăturii se datorează ruperii fibrelor. În consecință, lamelele conduc la o creștere mai mare a capacității portante la forfecare decât țesătura.

- Testele prezentate arată și faptul că lamelele dispuse înclinat (45° și 135°) depășesc în performanță lamelele verticale, în ceea ce privește dezvoltarea fisurilor și forța tăietoare maximă.

- Metoda de calcul propusă conduce la un calcul destul de precis. Oricum, efectul ancorării lamelilor nu este încorporat în modelul de calcul, și asupra acestui aspect ar trebui făcute cercetări în continuare.

„Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites” – Ahmed Khalifa, Antonio Nanni. [58]

Concluziile pot fi rezumate astfel:

- Contribuția armării exterioare la capacitatea portantă la forfecare este influențată de raportul a/d.

- Creșterea cantității de CFRP nu conduce neapărat la o creștere a rezistenței la tăiere. Cantitatea de CFRP folosită pentru specimenul SO3-4 a fost cu 250% mai mare decât cea pentru specimenul SO3-2, și a condus la o creștere a capacității cu 10%. Este recomandată o ancorare la capătul lamelilor, dacă se dorește evitarea desprinderii lamelilor.

- Testele au arătat că raportul de creștere a capacității portante la forfecare este mai bun pentru grinzile nearmate la tăiere decât pentru cele cu armare corespunzătoare.

- Rezultatele seriei SO3 au arătat că dispunerea materialului compozit la un unghi de 0° a rezultat într-o îmbunătățire a capacității la tăiere, prin prevederea unei restrângeri orizontale.

- Algoritmii de calcul au condus la obținerea unor rezultate conservative pentru grinzile consolidate.

Recomandări pentru cercetări viitoare:

- Investigații analitice și experimentale sunt necesare pentru determinarea legăturii dintre contribuția la tăiere a FRP și tipurile de încărcări. Aceste studii ar trebui să ia în calcul atât procentul de armare longitudinală cât și rezistența betonului. Specimenele de laborator ar trebui să mențină niște dimensiuni practice.

- Eficiența consolidării cu FRP ar trebui pusă sub semnul întrebării în cazul deschiderilor mici supuse la forfecare, deoarece aici cedarea este guvernată de efectul de boltă.

- Trebuie studiată interacțiunea dintre contribuția FRP aplicat la exterior și armătura internă.

- Pentru a putea optimiza algoritmul de calcul, și alte grinzi ar trebui testate, având diferite procente de armare cu CFRP și diverse configurații, putând astfel crea o bază de date mîia largă.

- Algoritmii de calcul ar trebui extinși și pentru alte materiale, cum ar fi aramida și sticla.

Anul 2003

„Behavior Of Historic Reinforced Concrete Bridge Retrofited For Flexure And Shear Deficiencies With Externally Applied FRP Composites: Testing, Strengthening Design Method, And Finite Element Modeling” – Damian I. KACHLAKEV. [71]

„Design And Evaluation Of Full-Size Beams Strengthened For Shear And Flexure With FRP Composites: Testing, Parametric Studies And FEM Analysis” – Damian I. KACHLAKEV. [72]

„Preservation Of Existing Bridges In Kentucky Using Advanced Composites” – Issam HARIK, Tong ZHAO, Ching Chiaw CHOO. [73]

„Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites” – Oral Buyukozturk, Oguz Gunes, Erdem Karaca. [74]

„Fiber-Section FE Of FRP-Strengthened RC Beam For Seismic Analysis” – Michele BARBATO, Giorgio MONTI, Federico SANTINELLI. [75]

„A Study On Mechanical Anchorage For Shear Rehabilitation Of RC Structures” – Paul SCHUMAN, Vistasp M. KARBHARI. [76]

În urma testelor experimentale se pot trage concluziile următoare:

- Ancorajul doar cu rășină aplicat pe grinda consolă T a avut un mic aport la încărcarea ultimă și la capacitatea de deplasare, și a creat un mod de cedare mai fragil.

- Toate sistemele CFRP au îmbunătățit capacitatea portantă la curgere a structurii.

- Sistemul de ancorare înclinat, destul de șubred și slab dimensionat, a putut ține lamela FRP după desprindere în testul precedent, dar nu a adus nici o îmbunătățire a încărcării ultime.

- Ancorajul mai adânc, cu diametru mai mic, a fost capabil să altereze puțin rigiditatea în jurul încărcării la începutul intrării în curgere a etrierilor de oțel în testul precedent.

- Combinarea acestui ancoraj adânc cu un singur etrier de CFRP a dus la creșterea încărcării la care a avut loc curgere pînă la valoarea inițială. Au asigurat astfel o creștere cu 35% a încărcării de curgere, raportat la pasul anterior.

- În momentul cedării ancorajelor adânci, elementul nu a putut prelua încărcarea adițională și a cedat într-o manieră fragilă.

- Ancorajele nu numai că au fost forfecate la cedare, dar au explodat spre exterior, indicând o porțiune de acumulare a eforturilor axiale.

- Ancoraje adânci și înclinate au adăugat 30% la capacitatea ultimă.

- Folosirea unor ancoraje bine prinse și dimensionate au permis lamelelor verticale să rămână intacte în momentul cedării și au forțat un mod de cedare mai ductil, din forfecare/încovoiere. Acest fapt a permis atingerea unei săgeți mai mari

cu 60%, comparat cu numai 23% cât a fost creșterea în cazul ancorajului adânc dar cu diametru mai mic.

- În final, acest proiect nu a determinat soluții de optimizare a diferitelor tipuri de ancoraje, pentru transferul forței tăietoare. Este important ca în cercetările viitoare să fie studiate toate tipurile de ancoraje, incluzând și înfășurările U, ancorajele mecanice înclinate și ancorajul orizontal continuu.

„Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets” – Björn Täljsten. [77]

Sumar și concluzii:

- Testele de laborator au arătat că grinzile de beton armat pot fi consolidate la tăiere și că laminatele sau țesăturile ar trebui dispuse perpendicular pe fisurile din forfecare, dacă este posibil.

- Este ușor de supraarmat un element, și, în acest caz, este aproape sigur că cedarea se va produce prin zdrobirea betonului comprimat.

- Măsurătorile deformațiilor specifice au arătat că fibra este mai eficient utilizată cu cât este mai subțire. Compararea dintre teorie și experimente a condus la rezultate echivalente, deși numai două grinzi au fost măsurate și evaluate. Oricum, teste adiționale și analize cu elemente finite mai sunt necesare pentru verificarea și controlul teoriei derivate privind folosirea unui raport de distribuție a deformațiilor specifice.

- Cu toate acestea, trebuie menținut un raport de 0.55 între deformația specifică maximă măsurată și valoarea folosită în calculele de dimensionare.

- Trebuie avut în vedere că în acest model nu este considerată cedarea ancorajului; în acest sens, teste adiționale sunt necesare.

- Aplicarea la fața locului, împreună cu noul sistem de ancorare prezentat demonstrează simplitatea cu care poate fi aplicată metoda consolidării cu CFRP.

„In-Service Evaluation of a Concrete Bridge FRP Strengthening System” – Osman Hag-Elsafi, Jonathan Kunin, Sreenivas Alampalli. [78]

Concluzii:

- În noiembrie 2001, podul peste care trece Ruta 378, peste Wynantskill Creek, în NY, a fost testat prin încărcare pentru a monitoriza schimbările din sistemul de consolidare, după o exploatare de 2 ani. Sistemul a fost instalat în anul 1999, pentru a preveni fisurile din cicluri de îngheț-dezghet, pentru îmbunătățirea capacității portante la încovoiere și forfecare a grinzilor T din tablierul podului.

- Au fost investigate schimbările ce ar fi putut să apară în calitatea stratului de rășină dintre laminatele FRP și beton, iar starea sistemului de ancorare a fost evaluată prin observarea schimbărilor din distribuția încărcărilor transversale, lățimea efectivă a tălpilor și poziția axei neutre.

- Testul de încărcare din 2001 a arătat că deformațiile specifice măsurate au fost în general mai mici decât cele obținute în testul din 1999. Rezultatul a demonstrat calitatea adeziunii dintre FRP și beton și a arătat că eficiența sistemului de consolidare nu s-a schimbat în cei doi ani de exploatare. Imaginile termografice au fost în sprijinul acestei concluzii privitoare la calitatea adeziunii.

„Strengthening Of Short Shear Span RC-T Joists With FRP Composites” – Francesco Micelli, Raghu H. Annaiah, Antonio Nanni. [79]

Pe baza rezultatelor experimentale se pot trage următoarele concluzii:

- Elementele consolidate cu unul sau două straturi de țesătură, cu sau fără ancoraje suplimentare, au cedat datorită dezlipirii premature, în comparație cu rezultatele așteptate pentru V_f .

- Creșterea cantității de CFRP poate să nu conducă la o creștere direct proporțională a capacității la forfecare, în special dacă cedarea este guvernată de desprinderea compozitului. O creștere direct proporțională poate fi obținută, dacă desprinderea compozitului este întârziată, ca în cazul folosirii unor ancoraje suplimentare.

- Verificarea pe cale experimentală a sistemului de ancorare de capăt a arăta eficiența acestuia în creșterea capacității la tăiere a grinzilor de beton armat. Valorile lui V_f pentru lamelele FRP ancorate arată eficacitatea acestui sistem. Testele probează faptul că acest sistem de ancorare poate contribui la creșterea eficienței acestei metode de consolidare.

- Comportamentul observat pentru grinzile perete a condiționat răspunsul structural al consolidării cu FRP: configurația cu deschiderea mică a condus la o capacitate mare la tăiere pentru grinda neconsolidată, în timp ce dezvoltarea fisurilor înclinate a condus la dezlipirea FRP sau la smulgerea ancorajelor.

- Geometria fisurilor, care a probat existența efectului de boltă, poate fi folosită în a explica comportarea diferită a grinzilor consolidate, în comparație cu rezultatele analitice obținute cu modelele analitice din diferite prescripții de proiectare.

- Eficacitatea schemelor de consolidare la forfecare trebuie probată și în cazul grinzilor cu deschidere de forfecare redusă, deoarece s-a observat posibilitatea desprinderii grinzii de placă la colțuri.

4. TESTE PREMERGĂTOARE PE MATERIALE

4.1. Introducere

Pentru a avea informații cât mai reale cu privire la materialele utilizate în cadrul programului experimental stabilit (care se găsește în Anexa 1), au fost făcute încercări suplimentare în laboratorul acreditat al Facultății de Construcții din Timișoara. Acest lucru a furnizat date importante privitoare la caracteristicile fizico-mecanice ale acestor materiale, care au stat la baza modelărilor (numerice) asistate de calculator ale elementelor propuse.

Astfel s-a pus accentul pe determinarea calității betonului turnat în grinzi, a mărcii armăturilor (etrieri și bare de montaj și de rezistență), a efortului maxim de întindere corespunzător materialelor compozite folosite ca soluții de consolidare și ancorare, a momentului de strângere pentru buloanele ancorate chimic, respectiv verificarea la presiune pe gaură în vederea alegerii soluției optime de consolidare.

4.2. Betonul și armătura

În vedea obținerii unor elemente cât mai omogene, realizate din materiale ale căror caracteristici să nu difere de la un element la altul, s-a optat pentru realizarea grinzilor din beton armat de către o firmă importantă pe piața locală a elementelor prefabricate. Prin urmare turnarea celor 14 grinzi care fac obiectul acestei teze s-a făcut dintr-o singură șarjă de beton, calitatea betonului turnat fiind verificată în laboratorul propriu al firmei pe cuburi prelevate la fața locului și păstrate în condițiile cerute de normativ. În urma testelor efectuate pe cuburile respective la 28 de zile de la turnare s-a obținut clasa **C 32/40** pentru betonul turnat în grinzi.

Întrucât la turnare s-au utilizat cofraje metalice, elementele finale nu au prezentat diferențe secționale și dimensionale.

De asemenea fasonarea mecanizată a armăturilor și montarea lor de către personal calificat și supravegheat, întăresc ideea similarității dintre grinzi.

Deoarece armătura utilizată a fost importată din Italia, pentru a avea siguranța unor caracteristici reale, s-au prelevat epruvete din cele două tipuri de armături folosite și apoi încercate la tracțiune în laboratorul acreditat al Facultății de Construcții din Timișoara.

S-au obținut curbele caracteristice efort-deformație pentru barele cu diametrul $\varnothing 8$ (etrieri și bare de montaj) respectiv $\varnothing 16$ (armăturile de rezistență), câte 3 pentru fiecare tip de armătură.

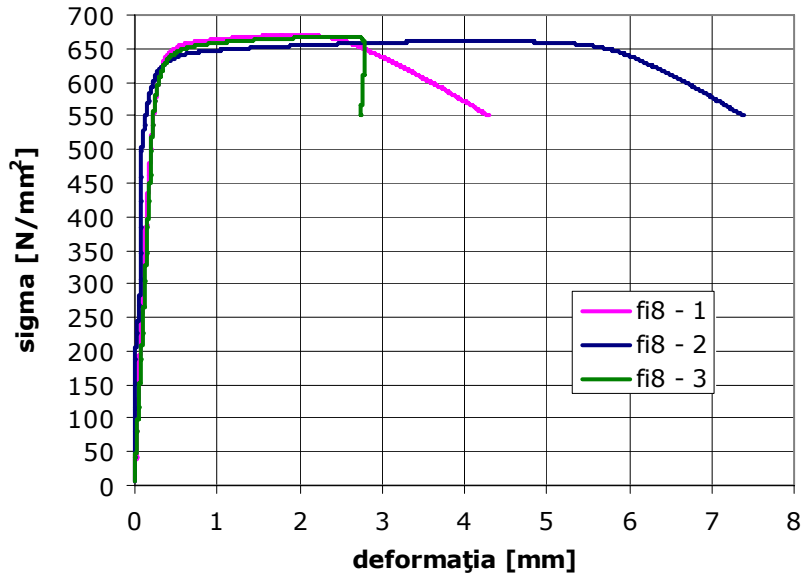


Figura 4.1. Diagrama caracteristică pentru armăturile Ø8

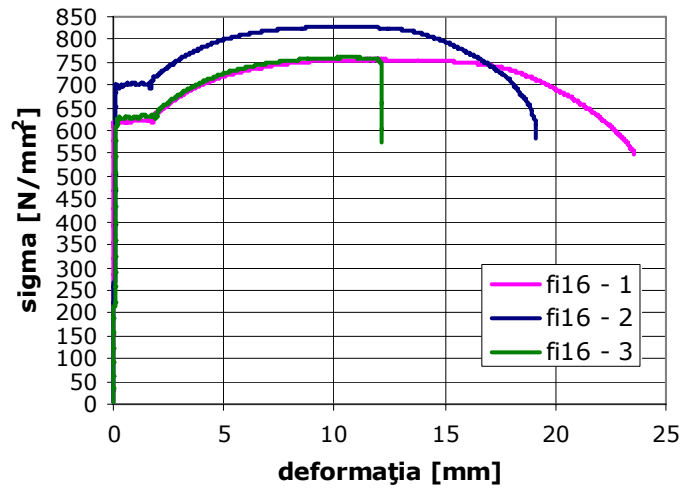


Figura 4.2. Diagrama caracteristică pentru armăturile Ø16

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} [N / mm^2]$$

$$f_{0,2d} = \frac{f_{0,2k}}{\gamma_s} [N / mm^2]$$

Unde:
 f_{yd} – limita de curgere de calcul
 f_{yk} – limita de curgere caracteristică
 $f_{0,2k}$ – efortul unitar corespunzător unei deformații remanente de 0,2%
 $f_{0,2d}$ – efortul unitar de calcul corespunzător unei deformații remanente de 0,2%
 γ_s – coeficient parțial de siguranță ($\gamma_s = 1,15$ pentru situații persistente și tranzitorii de proiectare)

Tabelul 4.1. Caracteristicile armăturilor

Tipul armăturii	Nr. epruvete	Limita de curgere reală $f_{0,2k}$ sau f_{yk} [N/mm ²]	Rezistența de rupere f_t [N/mm ²]	Limita de curgere de calcul $f_{0,2d}$ sau f_{yd} [N/mm ²]
Ø8	1	511	670	444,3
	2	591	661	513,9
	3	499	668	433,9
MEDIA		533,7	666,3	464,1
Ø16	1	629	756	547
	2	700	828	608,7
	3	632	760	549,6
MEDIA		653,7	781,3	568,4

4.3. Compozitele

La realizarea sistemelor de consolidare propuse s-au folosit, ca materiale compozite, cele distribuite de concernul SIKA în România și anume: țesătură din fibre de carbon SikaWrap Hex 230C, țesătură din fibre de sticlă SikaWrap Hex 230G, lamele din fibre de carbon SikaDur S512, rășini epoxidice bicomponente SikaDur 30 și SikaDur 330 și rășină epoxidică bicomponentă pentru ancoraje chimice AnchorFix.

Caracteristicile materialelor compozite utilizate la consolidarea elementelor au fost considerate cele permise de la producătorul Sika și sunt prezentate în tabelul următor.

Tabelul 4.2. Caracteristicile materialelor compozite Sika

Componenta sistemului	Țesătură din fibre de sticlă	Țesătură din fibre de carbon	Lamelă din fibre de carbon	Rășină epoxidică	
				SikaDur 30	SikaDur 330
Denumire produs	SikaWrap Hex 430G	SikaWrap Hex 230C	SikaDur S512	SikaDur 30	SikaDur 330
Modulul de elasticitate [N/mm ²]	76000	23100	165000	12800	12800
Rezistența la întindere [N/mm ²]	2300	4100	2640	24	24
Rezistența la compresiune [N/mm ²]	-	-	-	85	85
Deformația specifică ultimă [%]	2,8	1,7	1,6	-	-

4.4. Buloanele ancorate chimic

Pentru a alege rășina de ancorare a buloanelor în beton, s-au făcut o serie de teste la smulgere pentru două tipuri de rășini (Figura 4.3.).



Figura 4.3. Verificarea la smulgere a buloanelor

De asemenea s-a determinat și momentul de strângere cu ajutorul unei chei dinamometrice (Tabelul 4.2).

Tabelul 4.3. Verificarea rășinii și a buloanelor

Probe		Momentul de strângere [Nm]	Modul de cedare
SIKA	1	peste 54	smulgere bulon
	2	peste 54	rupere bulon
HILTI	1	peste 54	rupere bulon
	2	peste 54	rupere bulon

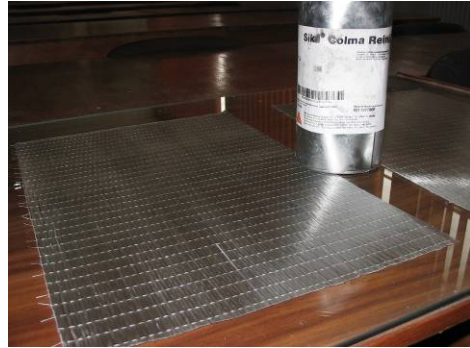
În urma testelor s-a ales rășina HILTI pentru executarea ancorajelor chimice, iar momentul de strângere a piulițelor cu cheia dinamometrică s-a considerat de 40 Nm.

4.5. Consolidarea la presiune pe gaură

Pentru consolidarea lamei la presiune pe gaură, s-au făcut în prealabil o serie de teste cu lamele simple (ca reper) și-apoi cu lamele prezentând diferite soluții de întărire a zonei din jurul găurii:

- cu plăcuțe din tablă de 2 mm grosime lipite cu rășină pe o singură față,
- cu plăcuțe din tablă de 2 mm grosime lipite cu rășină pe două fețe,
- cu țesătură din fibre de sticlă înfășurată în jurul lamei în dublu strat (pe ambele fețe),
- cu țesătură din fibre de sticlă lipite pe o singură față a lamei în 4 straturi (0°, 90°, 45°, 135°).

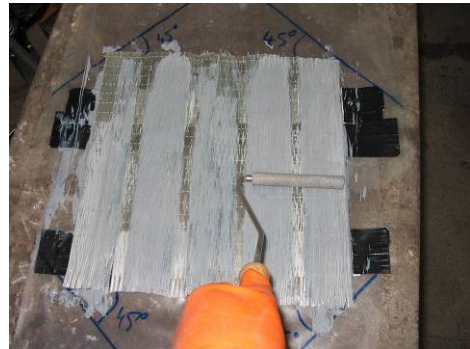
Pașii de consolidare a lamelelor sunt prezentați în figurile de mai jos.



Curățarea cu diluant a lamelor de carbon și țesăturii din fibre de sticlă



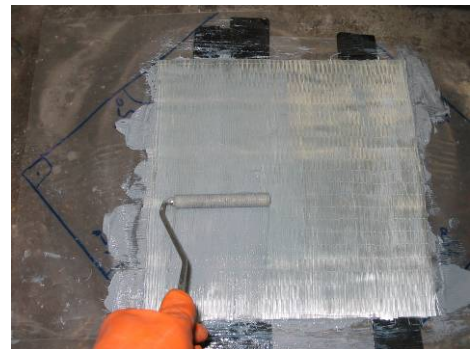
Aplicarea rășinii epoxidice



Așezarea țesăturii paralel cu lamela (0°) și impregnarea prin roluire



Aplicarea suplimentară de rășină epoxidică



Așezarea țesăturii perpendicular pe lamela (90°) și impregnarea prin roluire

Figura 4.4. Consolidarea lamelor din fibre de carbon la presiune pe gaură



Așezarea țesăturii la 45° față de lamelă și impregnarea prin roluire



Așezarea țesăturii la 135° față de lamelă și impregnarea prin roluire



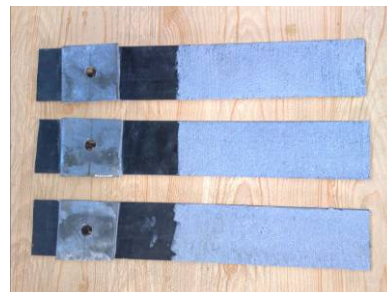
Lamele simple - martor



Lamele consolidate cu țesătură GFRP în 4 straturi



Lamele consolidate cu țesătură GFRP prin înfășurare dublu strat



Lamele consolidate cu plăcuțe din tablă pe o singură față



Lamele consolidate cu plăcuțe din tablă pe ambele fețe

Figura 4.4. Consolidarea lamelelor din fibre de carbon la presiune pe gaură

După întărirea rășinii, la 7 zile de la realizarea consolidărilor pe epruvetele din lamele de carbon, acestea au fost încercate la tracțiune pentru a determina forța la care cedează materialul la presiune pe gaură. Astfel s-au obținut curbele forță-deformație prezentate mai jos.



(1) Martor 1



(2) Martor 2



(3) Martor 3



(4) 4 straturi țesătură-1



(5) 4 straturi țesătură-2



(6) 4 straturi țesătură-3



(7) 4 straturi țesătură-4



(8) 4 straturi țesătură-5



(9) Țesătură înfășurată-1



(10) Tesătură înfășurată-2



(11) Tesătură înfășurată - 3



(12) Plăcuțe met. o față-1



(13) Plăcuțe met. o față-2



(14) Plăcuțe met. o față-3



(15) Plăcuțe met. 2 fețe-1



(16) Plăcuțe met. 2 fețe-2



(17) Plăcuțe met. 2 fețe-3

Figura 4.5. Încercarea la tracțiune pentru lamelele consolidate

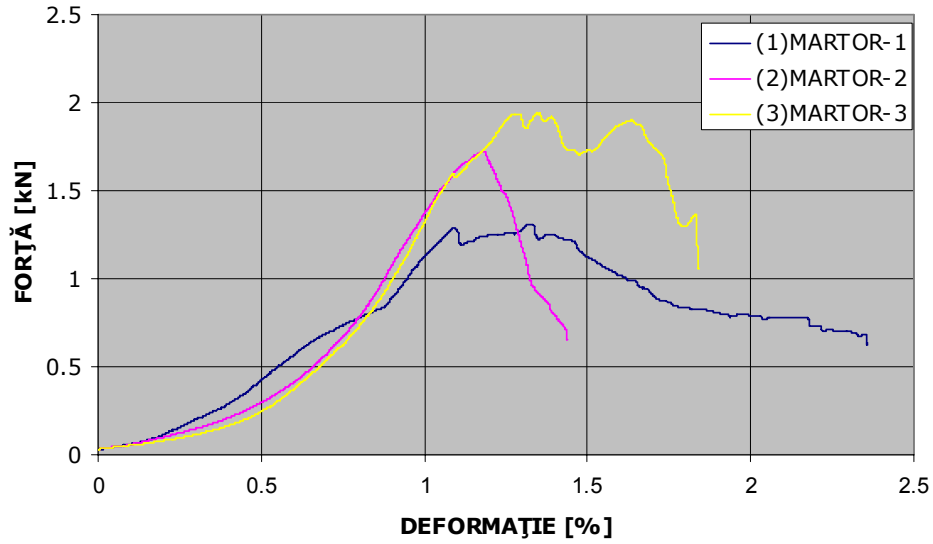


Figura 4.6. Curba forță-deformație pentru epruvetele martor

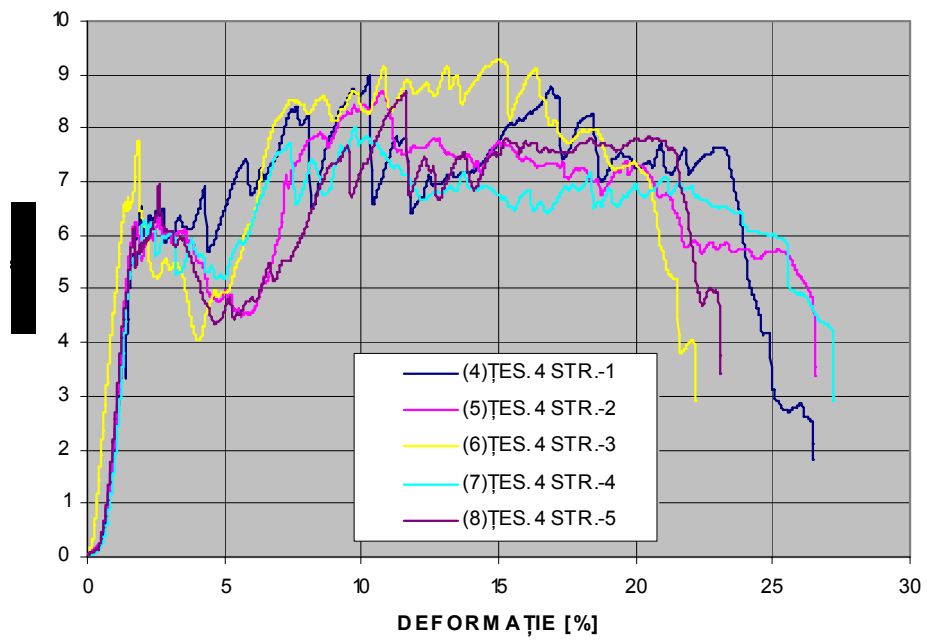


Figura 4.7. Curba forță-deformație pentru epruvetele consolidate cu țesătură în patru straturi

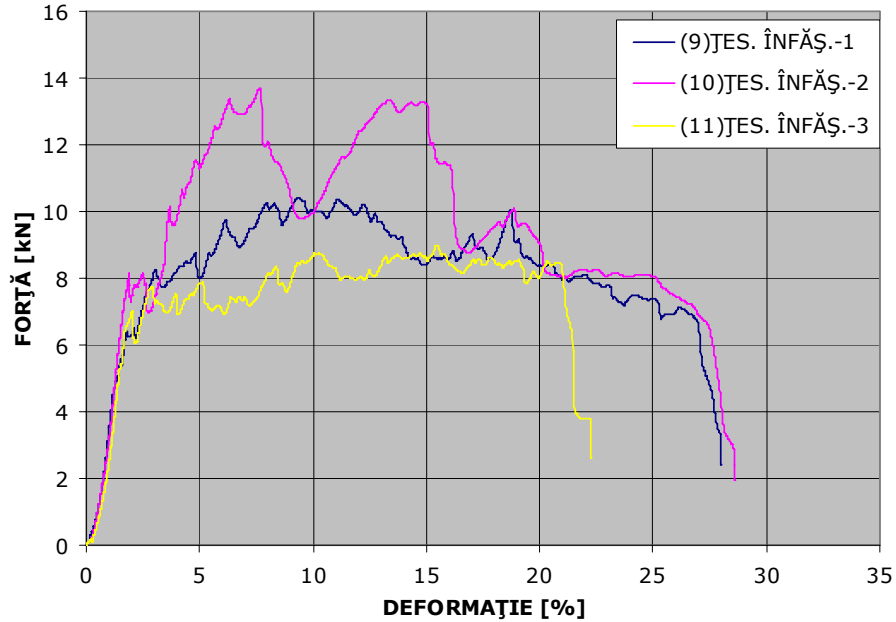


Figura 4.8. Curba forță-deformație pentru epruvetele consolidate prin înfășurare cu țesătură în două straturi

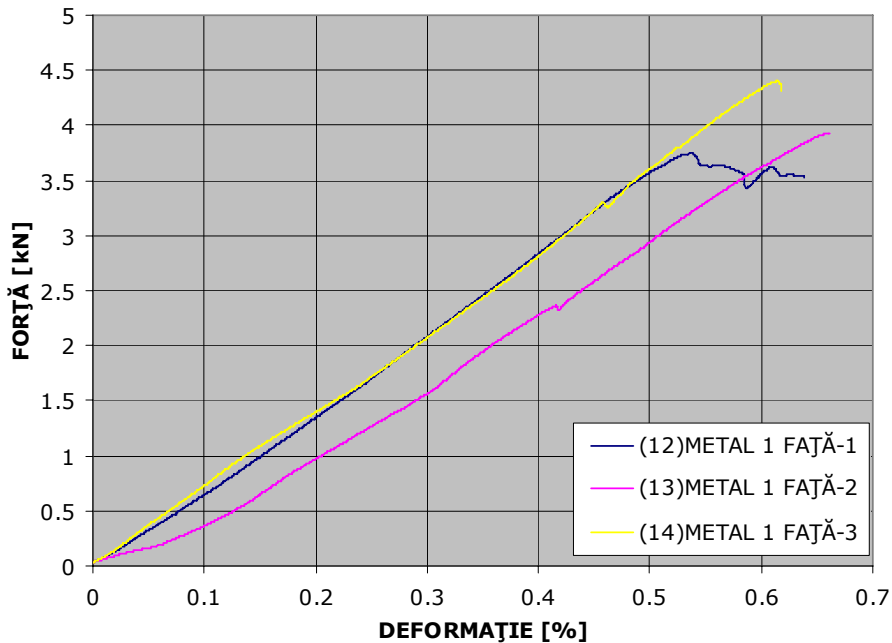


Figura 4.9. Curba forță-deformație pentru epruvetele consolidate cu plăcuțe metalice pe o față

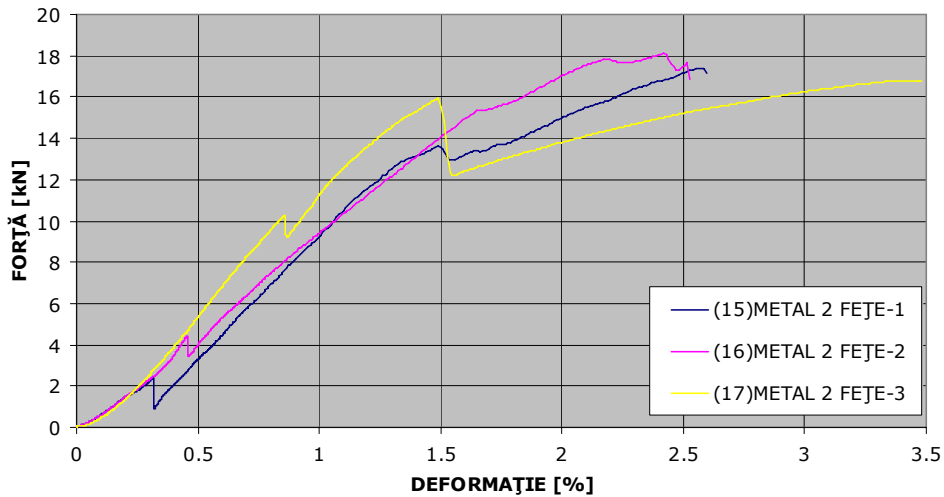


Figura 4.10. Curba forță-deformație pentru epruvetele consolidate cu plăcuțe metalice pe două fețe

Rezultatele obținute sunt sistematizate în tabelul următor.

Tabelul 4.4. Rezultatele încercării la tracțiune pe lamelele consolidate

Nr. Crt.	Tipul consolidării	Nr. epruvete/ tip consolidare	F_{max} [daN]	deformația [%]
1	martor	1	130,9	2,27
2		2	172,3	1,43
3		3	194,1	1,84
4	țesătură GFRP în 4 straturi	1	897,9	26,47
5		2	870,1	26,5
6		3	927,7	22,15
7		4	803,5	27,23
8		5	868,7	23,04
9	țesătură GFRP prin înfășurare dublu strat	1	1041,9	28,01
10		2	1369,3	28,58
11		3	899,4	22,29
12	plăcuțe din tablă pe o singură față	1	374,4	0,64
13		2	392,5	0,66
14		3	440,2	0,62
15	plăcuțe din tablă pe ambele fețe	1	1739,5	2,59
16		2	1811,9	2,53
17		3	1680,6	3,48

Pentru consolidarea finală a lamelei din fibre de carbon s-a optat pentru înfășurare în dublu strat cu țesătură GFRP, având în vedere raportul dintre forța maximă și deformație, precum și ușurința realizării și ulterior a aplicării produsului final pe grinda din beton armat.

5. STUDIU TEORETIC. MODELARE NUMERICĂ ASISTATĂ DE CALCULATOR

5.1. Studiu teoretic

Soluțiile de consolidare cu materiale compozite polimerice sunt relativ noi în domeniul construcțiilor, dovedindu-se a fi tehnici eficiente care au fost aplicate cu succes la o scară largă de structuri alcătuite din diferite materiale. Întrucât pe piață sunt disponibile o serie vastă de materiale compozite și implicit diferite sisteme de consolidare, inginerul proiectant trebuie să aibă experiență în propunerea și calcularea consolidărilor structurale. Acest lucru implică deci cunoștințe despre materiale, sisteme, comportarea structurii și aspecte de siguranță și/sau risc.

În acest capitol al tezei sunt analizate aspecte legate de consolidarea grinzilor din beton armat luându-se în considerare încovoierea ca solicitare de bază.

Calcululele au fost efectuate având la bază două normative de calcul internaționale aflate în vigoare la data elaborării tezei:

- Raportul 14 al *fib* TG9.3 – „Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures”
- Raportul ACI 440.2R-02 – „Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures”
- Eurocode 2 – „Design of Concrete Structures”

5.1.1. Calculul conform *fib* TG 9.3 – verificarea la încovoiere

La baza calculelor se află principiile și procedurile utilizate în Eurocode 2 (EC2). Astfel, comportarea compozitului pentru verificarea în starea limită ultimă (S.L.U.) poate fi idealizată cu ajutorul unui răspuns liniar, definit astfel:

$$\sigma_f = E_{fu} \times \varepsilon_f \leq f_{fd} \quad (5.1)$$

$$E_{fu} = \frac{f_{tk}}{\varepsilon_{fuk}} \quad (5.2)$$

Unde:

- E_{fu} este modulul de elasticitate bazat pe valorile caracteristice ale rezistenței la întindere și ale deformației specifice ultime ale compozitului.

Dacă modul de cedare ales în calculele conduse în starea limită ultimă este prin zdrobirea betonului comprimat sau prin dezlipirea compozitului, atunci se limitează deformația specifică maximă ce poate apărea în compozit, situație în care efortul din compozit σ_f este mai mic decât rezistența la întindere. În situațiile în care capacitatea elementului este dictată de cedarea la întindere a compozitului, rezistența de calcul la întindere a compozitului se calculează astfel:

$$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f} \times \frac{\varepsilon_{fue}}{\varepsilon_{fum}} \quad (5.3)$$

Unde:

- f_{fd} – rezistența de calcul a compozitului
- f_{fk} – rezistența caracteristică a compozitului
- γ_f – factor de siguranță (Tabelul 5.1.)
- ϵ_{fue} – deformația ultimă efectivă a compozitului
- ϵ_{fum} – deformația ultimă medie a compozitului

Tabelul 5.1. Factori de siguranță γ_f

Tipul compozitului	Tipul A de aplicare	Tipul B de aplicare
Cu fibră de carbon	1.20	1.35
Cu fibră de aramidă	1.25	1.45
Cu fibră de sticlă	1.30	1.50

Valorile factorului de siguranță γ_f se bazează în general pe diferențele observate în comportamentul de lungă durată al compozitului dar și influența metodei aplicate. Tipul A de aplicare se referă la lamelele compozite și la procesul de aplicare umedă a materialului compozit, pentru care este asigurat un control strict al calității compozitului și a modului de aplicare. Tipul B de aplicare presupune lipirea materialelor compozite prin procedeul aplicării umede dar sub un control normal al calității și/sau în condiții grele de aplicare (acces dificil).

Raportul $\epsilon_{fue}/\epsilon_{fum}$ este unitar dacă deformația specifică ultimă efectivă a compozitului nu diferă semnificativ de valoarea medie obținută din teste.

În calculul la încovoiere a elementului consolidat trebuie luat în considerare efectul încărcării inițiale dinaintea consolidării.

Conform teoriei elasticității și având momentul de serviciu M_0 ce acționează asupra elementului în timpul consolidării, se poate evalua distribuția deformațiilor specifice din element. De regulă M_0 este mai mare decât momentul de fisurare M_{cr} și prin urmare calculele se bazează pe o secțiune fisurată. Dacă M_0 este mai mic decât M_{cr} atunci se poate neglija influența lui în calculul elementului consolidat.

Axa neutră:

$$\frac{b * x_0^2}{2} * (\alpha_s - 1) * A_{s2} * (x_0 - d_2) = \alpha_s * A_{s1} * (d - x_0) \quad (5.4)$$

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_c} \quad (5.5)$$

Deformația specifică a betonului în fibra superioară:

$$\epsilon_{c0} = \frac{M_0 * x_0}{E_c * I_{02}} \quad (5.6)$$

Unde I_{02} este momentul de inerție al secțiunii de beton fisurate transformate.

$$I_{02} = \frac{b * x_0^3}{3} + (\alpha_s - 1) * A_{s2} * (x_0 - d_2)^2 + \alpha_s * A_{s1} * (d - x_0)^2 \quad (5.7)$$

Ecuția deformației specifice în fibra externă întinsă a betonului:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{c0} * \frac{(h - x_0)}{x_0} \quad (5.8)$$

Consolidările cu materiale compozite prezintă diferite moduri de cedare care se clasifică în funcție de contribuția compozitului astfel:

- curgerea armăturii urmată de zdrobirea betonului,
- curgerea armăturii urmată de ruperea compozitului,
- zdrobirea betonului (nedorită),
- dezlipire (debonding) – care poate apărea: în betonul de la suprafață, în adeziv, la interfața beton-adeziv sau adeziv-compozit, în compozit;
- desprindere (peeling-off) – care poate apărea: în zona de ancorare nefisurată, în zona fisurată din încovoiere, în zona fisurată din forță tăietoare, în zonele denivelate ale suprafeței betonului;
- cedarea la forță tăietoare a betonului de la capătul compozitului.

Pentru primele trei tipuri de cedare compozitul acționează la întreaga lui capacitate pe când la ultimele trei cedarea se face prin pierderea contribuției compozitului.

5.1.1.1. Considerarea cedării prin curgerea armăturii și zdrobirea betonului (la S.L.U.)

Axa neutră:

$$0,85 * \psi * f_{cd} * b * x + A_{s2} * E_s * \varepsilon_{s2} = f_{yd} * A_{s1} + A_f * E_{fu} * \varepsilon_f \quad (5.9)$$

Unde:

- $\psi = 0.8$
- f_{cd} – rezistența de calcul la compresiune a betonului
- b – lățimea elementului de beton armat
- x – poziția axei neutre
- A_{s2} – aria armăturii de oțel comprimate
- E_s – modulul de elasticitate al oțelului
- ε_{s2} – deformația specifică a armăturii de oțel comprimate
- A_{s1} – aria armăturii de oțel întinse
- f_{yd} – rezistența de calcul la curgere a oțelului
- A_f – aria secțională a compozitului
- E_{fu} – modulul de elasticitate al compozitului
- ε_f – deformația specifică a compozitului

Deformația specifică în armătura comprimată:

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} * \frac{x - d_2}{x}; E_s * \varepsilon_{s2} < f_{yd} \quad (5.10)$$

Unde:

- ε_{cu} – deformația specifică a betonului comprimat
- d_2 – distanța de la centrul armăturii comprimate până la fibra extremă de beton comprimat

Deformația specifică în compozit:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} * \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \quad (5.11)$$

Unde:

- ε_0 - deformația inițială a fibrei extreme întinse din beton, înainte de aplicarea compozitului
- h - înălțimea totală a secțiunii de beton

Momentul capabil:

$$M_{Rd} = A_{s1} * f_{yd} (d - \delta_G * x) + A_f * E_f * \varepsilon_f (h - \delta_G * x) + \varepsilon_{s2} * A_{s2} * E_s (\delta_G * x - d_2) \quad (5.12)$$

Unde:

- M_{Rd} - momentul capabil al secțiunii consolidate
- d - înălțimea utilă a elementului de beton armat
- δ_G - coeficient al centroidului zonei comprimate ($\delta_G=0.4$)

Intrarea în curgere a armăturii întinse:

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} * \frac{d - x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (5.13)$$

Evitarea rupei compozitului:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} * \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fud} \quad (5.14)$$

5.1.1.2. Considerarea cedării prin curgerea armăturii și ruperea compozitului (la S.L.U.)

Teoretic este posibil acest tip de cedare dar în realitate mai degrabă apare desprinderea compozitului înaintea rupei lui și astfel acesta să nu-și atingă limita de capacitate. Astfel, în ecuațiile anterioare se înlocuiesc: ε_{cu} cu ε_c (deformația specifică a betonului în fibra extremă comprimată) și ε_f cu ε_{fud} (valoarea de calcul a deformației specifice ultime a compozitului).

Calculul coeficienților ψ și δ_G se va face astfel:

$$\psi = \begin{cases} 1000 * \varepsilon_c * \left(0,5 - \frac{1000}{12} * \varepsilon_c\right) & \text{pt. } \varepsilon_c \leq 0,002 \\ 1 - \frac{2}{3000 * \varepsilon_c} & \text{pt. } 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases}$$

$$\delta_G = \begin{cases} \frac{8 - 1000 * \varepsilon_c}{4 * (6 - 1000 * \varepsilon_c)} & \text{pt. } \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{1000 * \varepsilon_c * (3000 * \varepsilon_c - 4) + 2}{2000 * \varepsilon_c * (3000 * \varepsilon_c - 2)} & \text{pt. } 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases}$$

Axa neutră:

$$0,85 * \psi * f_{cd} * b * x + A_{s2} * E_s * \varepsilon_{s2} = f_{yd} * A_{s1} + A_f * E_{fu} * \varepsilon_{fud} \quad (5.15)$$

Deformația specifică în armătura comprimată:

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_c * \frac{x - d_2}{x}; E_s * \varepsilon_{s2} < f_{yd} \quad (5.16)$$

Deformația specifică în compozit:

$$\varepsilon_{fud} = \varepsilon_c * \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \quad (5.17)$$

Momentul capabil:

$$M_{Rd} = A_{s1} * f_{yd}(d - \delta_G * x) + A_f * E_f * \varepsilon_{fud}(h - \delta_G * x) + \varepsilon_{s2} * A_{s2} * E_s(\delta_G * x - d_2) \quad (5.18)$$

5.1.1.3. Considerarea cedării prin desprindere cauzată de fisurile din forță tăietoare (la S.L.U.)

O abordare a acestei situații presupune o limitare din calcul a capacității portante la forță tăietoare, considerându-se că efortul de forfecare este preluat doar de secțiunea de beton nearmată la forță tăietoare și este introdus un factor pentru considerarea armăturii longitudinale (ρ_{eq}).

$$\tau_{Rk} = 0,15 * \sqrt[3]{f_{ck}} \quad (5.19)$$

$$\rho_{eq} = \frac{A_s + A_f * \frac{E_f}{E_s}}{b * d} \quad (5.20)$$

Unde:

- τ_{Rk} – rezistența caracteristică a betonului la forfecare
- f_{ck} – rezistența caracteristică la compresiune a betonului
- ρ_{eq} – raportul de echivalență al armăturii longitudinale
- A_s – aria totală a armăturii longitudinale
- A_f – aria secțiunii compozitului
- E_f – modulul de elasticitate al compozitului
- E_s – modulul de elasticitate al oțelului
- b – lățimea elementului de beton armat
- d – înălțimea utilă a elementului de beton armat

5.1.1.4. Considerarea cedării prin desprindere cauzată de fisurile din încovoiere sau desprinderea ancorării de capăt (la S.L.U.)

Presupune trei tipuri diferite de abordare:

- prin verificarea ancorării de capăt – limitarea eforturilor în compozit
- prin verificarea înfășurătorii eforturilor de întindere din compozit
- prin verificarea ancorării de capăt și a transferului de eforturi la interfața dintre compozit și beton.

VERIFICAREA ANCORĂRII DE CAPĂT – LIMITAREA EFORTURILOR ÎN COMPOZIT

Această metodă se bazează pe limitarea alungirii relative în compozit, propunându-se diferite valori: $\varepsilon_{f,lim} = 0,0065 \div 0,0085$, dar astfel plaja de valori cuprinsă este destul de largă, iar prin limitarea respectivă nu se ține seama de alți factori importanți cum ar fi: tipul încărcării, tipul de contact, tipul de fisuri ș.a.

Forța maximă ce poate fi preluată de ancorajul direct, precum și lungimea maximă de acțiune a ancorajului, se pot calcula mai exact astfel:

$$N_{fa, max} = \alpha * c_1 * k_c * k_b * b * \sqrt{E_f * t_f * f_{ctm}} \quad [N] \quad (5.21)$$

$$l_{b, max} = \sqrt{\frac{E_f * t_f}{c_2 * f_{ctm}}} \quad [mm] \quad (5.22)$$

Unde:

- $N_{fa, max}$ – forța de întindere maximă din compozit ce poate fi preluată de ancoraj
- α – factor de reducere ce ia în considerare influența fisurilor înclinate asupra aderenței ($\alpha=0,90$ – uzual – și $\alpha=1,00$ – pentru plăci și rigle suficient armate la forfecare)
- c_1 și c_2 – se obțin prin calibrarea cu modele experimentale (pentru fâșii de compozit cu fibră de carbon: $c_1=0,64$ și $c_2=2,00$)
- k_c – factor ce ia în considerare compactarea betonului ($k_c=1,00$ – uzual – și $k_c=0,67$ – pentru betonul cu compactare redusă)

$$k_b = 1,06 * \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 - \frac{b_f}{400}}} \geq 1, \quad pt. \frac{b_f}{b} \geq \frac{1}{3} \quad (5.23)$$

Pentru $\frac{b_f}{b} \leq \frac{1}{3}$ se consideră $k_b=1$

- b – lățimea elementului din beton
- b_f – lățimea compozitului
- E_f – modulul de elasticitate al compozitului
- t_f – grosimea compozitului
- f_{ctm} – valoarea medie a rezistenței la întindere a betonului ($f_{ctm}=0,3*f_{ck}^{2/3}$)
- f_{ck} – rezistența caracteristică la compresiune a betonului

- $l_{b,max}$ – lungimea maximă ce se poate ancora

Pentru lungimi de ancorare $l_b < l_{b,max}$, forța maximă ce poate fi preluată de ancoraj este:

$$N_{fa} = N_{fa,max} * \frac{l_b}{l_{b,max}} * \left(2 - \frac{l_b}{l_{b,max}} \right) \quad [N] \quad (5.24)$$

VERIFICAREA ÎNFĂȘURĂTORII EFORTURILOR DE ÎNTINDERE

Se urmărește determinarea creșterii maxim posibilă a efortului de întindere din compozit ce poate fi preluată prin eforturile de aderență dezvoltate între două fisuri succesive, și care va fi comparată cu acea creștere obținută prin dimensionarea ce nu ia în considerare aceste efecte de fisurare. Pașii urmăriți sunt:

a) determinarea celei mai defavorabile distanțe dintre fisuri – se acceptă că distanța dintre fisuri (s_{rm}) este aceeași pentru toate fisurile și este egală cu dublul lungimii de transmitere (l_t).

$$s_{rm} = 2 * l_t = 2 * \frac{M_{cr}}{z_m} * \frac{1}{\sum(\tau_{fm} * b_f) + \sum(\tau_{sm} * d_s * \pi)} \quad (5.25)$$

Unde:

- M_{cr} – momentul încovoietor ce cauzează apariția fisurilor

$$M_{cr} = \frac{k * f_{ctk,0.95} * b * h^2}{6} \quad (5.26)$$

- k – factor ce ia în considerare, printre altele, raportul dintre valoarea mai mare a rezistenței la încovoiere a betonului și rezistența la întindere a betonului (conform EC2 avem k=2)
- $f_{ctk,0.95}$ – rezistența caracteristică la întindere a betonului la limita superioară
- b – lățimea elementului de beton armat
- h – înălțimea elementului din beton armat
- z_m – brațul momentului încovoietor

$$z_m = 0,85 * \frac{(h * E_f * A_f + d * E_s * A_{s1})}{(E_f * A_f + E_s * A_{s1})} \quad (5.27)$$

- E_f – modulul de elasticitate al compozitului
- $A_f = b_f * t_f$ – aria secțiunii compozitului
- b_f – lățimea compozitului
- t_f – grosimea compozitului
- d – înălțimea utilă a elementului din beton armat
- E_s – modulul de elasticitate al oțelului
- A_{s1} – aria armăturii întinse
- $\tau_{fm} = 0,44 * f_{ctm}$ – efortul mediu de adeziune al compozitului la beton
- f_{ctm} – rezistența medie la întindere a betonului
- $\tau_{sm} = 2,25 * f_{ctk,0.95} = 1,85 * f_{ctm}$ – efortul mediu de adeziune la beton a armăturii întinse de oțel
- d_s – diametrul armăturii întinse de oțel

b) determinarea eforturilor de întindere din compozit între două fisuri adiacente, din dimensionarea la încovoiere – calculul se face conform punctului 5.1.1.1., luând în considerare eforturile din secțiunea unde se doresc a fi determinate eforturile, scriind echilibrul de forțe din secțiune.

c) determinarea creșterii maxime a efortului de întindere din compozit – efortul de întindere maxim ce poate fi transferat în zona de ancoraj se poate determina astfel:

$$\sigma_{fad,max} = \frac{c_1}{\gamma_c} * \sqrt{\frac{E_f * \sqrt{f_{ck} * f_{ctm}}}{n * t_f}} \quad [N / mm^2] \quad (5.28)$$

Unde:

- $c_1 = 0,23$ (valoare orientativă, valoarea exactă se va calibra experimental)
- γ_c – factorul de siguranță pentru beton
- E_f – modulul de elasticitate al compozitului
- f_{ctm} – rezistența medie la întindere a betonului
- f_{ck} – rezistența caracteristică la compresiune a betonului
- t_f – grosimea fiecărui strat de compozit
- n – numărul de straturi de compozit

Lungimea de ancorare este:

$$l_{b,max} = c_2 * \sqrt{\frac{E_f * t_f}{\sqrt{f_{ck} * f_{ctm}}}} \quad [mm], \quad c_2 = 1,44 \text{ (valoare orientativă)} \quad (5.29)$$

O creștere a lungimii de ancorare peste această valoare nu conduce la o creștere a efortului capabil de ancorare, în schimb o lungime de ancorare efectivă mai mică decât această valoare conduce la diminuarea efortului capabil de ancorare astfel:

$$\sigma_{fad} = \frac{l_b}{l_{b,max}} * \left(2 - \frac{l_b}{l_{b,max}} \right) * \sigma_{fad,max} \quad [N / mm^2] \quad (5.30)$$

Unde:

- σ_{fad} – efortul capabil efectiv corespunzător lungimii de ancorare l_b
- $\sigma_{fad,max}$ – efortul de întindere maxim în ancoraj
- l_b – lungimea efectivă de ancorare ($l_b \leq l_{b,max}$)

Lungimea maximă teoretică de ancorare (din reazemul teoretic), l_b^t , se determină astfel:

- momentul capabil (neconsolidat): M_{cap}^0
- încărcarea totală finală pe grindă: q_t
- momentul la distanța l_b^t de reazem:

$$M_{l_b^t} = \frac{q_t * L}{2} * l_b^t - \frac{q_t * (l_b^t)^2}{2} \quad (5.31)$$

- din egalarea $M_{cap}^0 = M_{l_b^t}$ va rezulta l_b^t

Lungimea reală de ancorare se obține astfel:

$$l_b = l_b^t - \frac{(L - l_0)}{2} \quad (5.32)$$

Unde: l_0 – deschiderea liberă a grinzii (lumina)

VERIFICAREA ANCORĂRII ȘI A TRANSFERULUI EFORTURILOR ÎNTRE COMPOZIT ȘI BETON

Presupune parcurgerea a doi pași: primul constă în verificarea ancorării (ca la prima metodă de verificare), iar al doilea în limitarea efortului de forfecare τ_b ce se dezvoltă la interfața dintre beton și compozit.

Dacă se consideră două secțiuni la distanța Δx , supuse la momentele încovoietoare M_d și ΔM_d , atunci vom avea:

$$\tau_b = \frac{\Delta N_{fd}}{b_f * \Delta x} \quad (5.33)$$

Unde:

- ΔN_{fd} – diferența de forță axială în compozit, între cele două secțiuni
- b_f – lățimea compozitului

La SLU, τ_b trebuie limitat la valoarea efortului de calcul, care în majoritatea cazurilor este efortul de forfecare la adeziune a betonului:

$$f_{cbd} = 1,8 * \frac{f_{ctk}}{\gamma_c} \quad (5.34)$$

Unde:

- f_{ctk} – rezistența caracteristică la întindere a betonului

Considerând $N_{Rd} = M_d / z_m$ și $N_{Rd} = N_{fd} + N_{sd}$ și luând în calcul și posibilitatea intrării în curgere a armăturii, putem scrie:

$$\begin{cases} \varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd} : N_{Rd} = N_{fd} \left(1 + \frac{A_{s1} * E_s * \varepsilon_s}{A_f * E_f * \varepsilon_f} \right) \approx N_{fd} \left(1 + \frac{A_{s1} * E_s}{A_f * E_f} \right) \\ \varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd} : N_{Rd} = N_f + A_{s1} * f_{yd} \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd} : \Delta N_{fd} \approx \frac{\Delta M_d}{z_m \left(1 + \frac{A_{s1} * E_s}{A_f * E_f} \right)} \\ \varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd} : \Delta N_{fd} = \frac{\Delta M_d}{z_m} \end{cases}$$

Unde:

- M_d – momentul de calcul (necesar)
- z_m – brațul momentului
- N_{fd} – forța axială de calcul în compozit
- N_{sd} – forța axială de calcul în armătura de oțel întinsă

- ε_{s1} – deformația specifică în armăturile întinse
- ε_{yd} – deformația specifică la curgere, de calcul pentru armătura întinsă
- A_{s1} – aria armăturii întinse de oțel
- E_s – modulul de elasticitate al oțelului
- ε_f – deformația specifică a compozitului
- A_f – aria secțiunii compozitului
- E_f – modulul de elasticitate al compozitului
- ΔM_d – diferența de moment încovoietor între cele două secțiuni aflate la distanța Δx

Având $\Delta M_d / \Delta x \approx V_d$ și $z_m = (z_s + z_f) / 2 \approx 0.95d$, vom obține:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd} : \frac{V_d}{0,95 * d * b_f \left(1 + \frac{A_{s1} * E_s}{A_f * E_f} \right)} \leq f_{cbd} \\ \varepsilon_{s1} < \varepsilon_{yd} : \frac{V_d}{0,95 * d * b_f} \leq f_{cbd} \end{array} \right.$$

Unde:

- V_d – forța tăietoare de calcul
- d – înălțimea utilă a secțiunii de beton armat
- b_f – lățimea compozitului
- f_{cbd} – efortul de forfecare la adeziune a betonului

Ca observații putem spune că:

- probleme cu adeziunea pot apare doar dacă armătura întinsă curge sau dacă se dezvoltă forțe tăietoare mari
- dacă cele două condiții de mai sus sunt îndeplinite, fisurile din încovoierie vor produce doar microfisuri la interfața dintre compozit și beton, precum și desprinderi locale ale compozitului, care însă nu vor conduce la cedarea prin dezlipirea compozitului.

5.1.1.5. Considerarea cedării prin forfecare la capătul compozitului (la S.L.U.)

Ceea ce presupune cedarea la forță tăietoare a betonului din imediata vecinătate a capătului compozitului. Pentru ca acest lucru să fie evitat, trebuie îndeplinită condiția:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd} = \tau_{Rd} * b * d \quad (5.35)$$

Unde:

- V_{Sd} – forța tăietoare de calcul
- V_{Rd} – rezistența de calcul la forță tăietoare
- τ_{Rd} – valoarea de calcul a rezistenței la forță tăietoare a betonului

$$\tau_{Rd} = 0,15 * \sqrt[3]{3 \frac{d}{a_L}} * \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) * \sqrt[3]{100 * \rho_s * f_{ck}} \quad (5.36)$$

- d - înălțimea utilă a secțiunii de beton

$$a_L = \sqrt[4]{\frac{(1 - \sqrt{\rho_s})^2}{\rho_s}} * d * L^3, \text{daca: } a_L > (L + d) \text{ si } a_L < a$$

- $\rho_s = A_{s1}/(b*d)$
- A_{s1} - aria armăturii întinse
- f_{ck} - rezistența caracteristică la compresiune a betonului

5.1.1.6. Claculul în starea limită a exploatării normale (S.L.E.N.)

a) Baza de calcul

Calculul se face considerând o comportare linear elastică a elementelor și materialelor.

Axa neutră:

$$\frac{b * x_e^2}{2} + (\alpha_s - 1) * A_{s2} (x_e - d_2) = \alpha_s * A_{s1} (d - x_e) + \alpha_f * A_f \left[h - \left(1 + \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c} \right) * x_e \right] \quad (5.37)$$

Unde:

- $\alpha_s = E_s/E_c$
- $\alpha_f = E_f/E_c$

Pentru valori mici ale lui ε_0 se poate considera ca $(1 + \varepsilon_0/\varepsilon_c) = 1$.

Pentru valori mari ale lui ε_0 , axa neutră se va determina din:

$$E_c * \varepsilon_c = \frac{M_k}{\frac{b * x_e}{2} \left(h - \frac{x_e}{3} \right) + (\alpha_s - 1) * A_{s2} \frac{(x_e - d_2)}{x_e} * (h - d_2) - \alpha_s * A_{s1} \frac{(d - x_e)}{x_e} * (h - d)} \quad (5.38)$$

Considerând:

- neglijarea armăturii comprimate ($A_{s2}=0$)
- $h/d \approx 1.1$
- $h \approx 1.05d$, ecuația de mai sus se poate scrie simplificat astfel:

$$E_c * \varepsilon_c = \frac{M_k}{\frac{b * x_e}{2} \left(1,5 * d - \frac{x_e}{3} \right)} \quad (5.39)$$

De asemenea se poate scrie:

$$\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c} \approx \frac{M_0}{M_k} * \frac{x_e}{x_0} \quad (5.40)$$

Unde:

- M_0 - momentul capabil înainte de aplicarea compozitului
- M_k - momentul capabil după aplicarea compozitului
- x_0 - poziția axei neutre înainte de aplicarea compozitului

Momentul de inerție al secțiunii fisurate se poate scrie:

$$I_2 = \frac{b * x_e^3}{2} + (\alpha_s - 1) * A_{s2} (x_e - d_2)^2 + \alpha_s * A_{s1} (d - x_e)^2 + \alpha_f * A_f (h - x_e)^2 \quad (5.41)$$

Pentru secțiunile nefisurate, calculul se poate face asemănător. Neglijând influența armăturilor, momentul de inerție al secțiunii nefisurate se poate aproxima cu:

$$I_1 \approx \frac{b * h^3}{12} \quad (5.42)$$

Iar momentul la care grinda fisurează se poate scrie astfel:

$$M_{cr} \approx f_{ctm} \frac{b * h^2}{6} \quad (5.43)$$

b) Limitarea eforturilor

Pentru a preveni compresiunea excesivă, ce produce deformări longitudinale ireversibile și crăpături, se impune limitarea eforturilor în beton astfel (conform EC2):

$$\sigma_c \leq 0,60 * f_{ck} - \text{în combinațiile de încărcări excepționale,}$$

$$\sigma_c \leq 0,45 * f_{ck} - \text{în combinațiile de încărcări cvasi-permanente,}$$

unde $\sigma_c = \varepsilon_c * E_c$ este obținut din ecuația (5.38).

Limitarea eforturilor în armătură - în combinațiile de încărcări excepționale:

$$\sigma_s = E_s * \varepsilon_c \frac{d - x_e}{x_e} \leq 0,80 * f_{yk} \quad (5.44)$$

Limitarea eforturilor în compozit - în combinațiile de încărcări permanente:

$$\sigma_f = E_f \left(\varepsilon_c \frac{h - x_e}{x_e} - \varepsilon_0 \right) \leq \eta * f_{fk} \quad (5.45)$$

Unde:

- η - coeficient de reducere pentru compozite ($\eta < 1$); orientativ are valorile: 0.80 pentru fibra de carbon, 0.50 pentru fibra de aramidă, 0.30 pentru fibra de sticlă.

Proiectarea acestor elemente consolidate cu compozite este de obicei dominată de starea limită a exploatării normale, deci ruperea prin curgerea lentă a compozitului nu este relevantă.

c) Verificarea săgeților

Săgeata totală:

$$a = a_1(1 - \zeta_b) + a_2 * \zeta_b \quad (5.46)$$

Unde:

- a_1 – săgeata elementului nefisurat

$$a_1 = k_M * l^2 \frac{M_k}{E_c * I_1} \quad (5.47)$$

- k_M – coeficient ce depinde de tipul încărcării
- l – deschiderea liberă
- M_k – momentul capabil al elementului consolidat
- E_c – modulul de elasticitate al betonului
- $I_1 = bh^3/12$ – momentul de inerție al secțiunii dreptunghiulare
- a_2 – săgeata elementului fisurat

$$a_2 = k_M * l^2 \left(\frac{M_0}{E_c * I_{02}} + \frac{M_k - M_0}{E_c * I_2} \right) \quad (5.48)$$

- M_0 – momentul capabil înainte de consolidare
- I_{02} – momentul de inerție al secțiunii de beton fisurate neconsolidate
- I_2 – momentul de inerție al secțiunii de beton fisurate și consolidate
- ζ_b – coeficient de rigidizare a eforturilor

$$\begin{cases} M_k < M_{cr}, \zeta_b = 0 \\ M_k > M_{cr}, \zeta_b = 1 - \beta_1 * \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_k} \right)^{\frac{n}{2}} \end{cases}$$

- M_{cr} – momentul la care grinda fisurează
- $n = 2$ pentru buioane normale
= 3 pentru buioane de înaltă rezistență
- β_1 – coeficient ce ia în calcul caracteristica de adeziune a armăturii la beton
= 0,5 pentru oțel neted (EC2)
= 1,0 pentru oțel profilat (EC2)
- β_2 – coeficient ce ia în considerare tipul încărcării
= 0,5 pentru încărcări de lungă durată (EC2)
= 1,0 pentru încărcări de scurtă durată (EC2)

d) Verificarea deschiderii fisurilor

Conform EC2 avem:

$$w_k = \beta * s_{rm} * \varepsilon_{rm,r} = \beta * s_{rm} * \zeta * \varepsilon_2 \quad (5.49)$$

Unde:

- β – coeficient legat de valoarea medie a deschiderii fisurilor ($\beta = 1,7$)
- s_m – distanța medie dintre fisuri

$$s_{rm} = \frac{2 * f_{ctm} * A_{c,eff}}{\tau_{sm} * u_s} * \frac{E_s * A_s}{E_s * A_s + \xi_b * E_f * A_f} =$$

$$= \frac{2 * f_{ctm} * A_{c,eff}}{\tau_{fm} * u_f} * \frac{\xi_b * E_f * A_f}{E_s * A_s + \xi_b * E_f * A_f} \quad (5.50)$$

- f_{ctm} – rezistența medie la întindere a betonului
- $A_{c,eff}$ – aria efectivă a betonului

$$A_{c,eff} = \min \begin{cases} 2,5 * (h - d) * b \\ \frac{(h - x) * b}{3} \end{cases}$$

- τ_{sm} – efortul mediu de adeziune la beton
- τ_{fm} – efortul mediu de adeziune al compozitului

$$\tau_{sm} = 1,8 * f_{ctm}$$

$$\tau_{fm} = 1,25 * f_{ctm}$$

- u_s – perimetrul total al armăturilor de oțel întinse
- $u_f = b_f$ – lățimea compozitului
- ξ_b – parametru de adeziune

$$\xi_b = \frac{\tau_{fm} * E_s * A_s * u_f}{\tau_{sm} * E_f * A_f * u_s} = \frac{\tau_{fm} * E_s * d_s}{\tau_{sm} * E_f * 4 * t_f}$$

- d_s – diametrul mediu al armăturilor întinse
- t_f – grosimea compozitului
- ζ_b – coeficient de rigidizare a eforturilor

$$\begin{cases} M_k < M_{cr} , \zeta_b = 0 \\ M_k > M_{cr} , \zeta_b = 1 - \beta_1 * \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_k} \right)^n \end{cases}$$

- ε_2 – deformația armăturii în stadiul ultim (fisurare totală)

presupunând: $\varepsilon_2 \approx \varepsilon_1 \approx \varepsilon_f + \varepsilon_0$

$N_{rk} = N_{s1} + N_f$, vom avea:

$$\varepsilon_2 = \frac{N_{rk} + E_f * A_f * \varepsilon_0}{E_s * A_s + E_f * A_f}$$

- $N_{rk} = M_k / z_e$
- z_e – brațul intern din forța de întindere totală ($N_{s1} + N_f$) și forța de compresiune ($N_{s2} + N_c$)

Simplificat, luând $\zeta = 1$ și $\varepsilon_0 = 0$, vom avea:

$$w_k = 2,1 * \rho_{c,eff} * \frac{M_k}{E_s * d * \rho_{eq}} * \frac{1}{(u_s + 0,694 * u_f)} \quad (5.51)$$

Unde:

- $\rho_{c,eff} = A_{c,eff} / b * d$ – raportul ariei efective de beton întins
- ρ_{eq} – procentul de armare echivalent

Conform EC2, se pune condiția ca $w_k \leq 0,3$ mm. Astfel vom avea:

$$u_f = b_f \geq 10,1 * \rho_{c,eff} * \frac{M_k}{E_s * d * \rho_{eq}} - 1,44 * u_s \quad (5.52)$$

În cazul în care din calcul reiese $b_f > b$, atunci se poate modifica parametrul ρ_{eq} prin modificarea grosimii compozitului, t_f .

e) Verificarea desprinderii de pe beton, la capătul compozitului

La capătul compozitului, acest efect este mai probabil a se produce. Apariția lui trebuie evitată în cazul exploatării normale a elementului. Pentru aceasta trebuie verificat ca: $\tau_{f1} < f_{ctk}$.

Unde:

- f_{ctk} – rezistența caracteristică la întindere a betonului
- τ_{f1} – efortul tăietor la capătul compozitului

$$\tau_{f1} = \left[V_{x=0} + M_{x=0} * \sqrt{\left(\frac{G_a}{E_f * t_f * t_a} \right)} \right] * \frac{t_f (h - x_e)}{I_c} \quad (5.53)$$

- $V_{x=0}$ – forța tăietoare în secțiunea de la capătul compozitului
- $M_{x=0}$ – momentul încovoietor în secțiunea de la capătul compozitului
- G_a – modulul de forfecare al adezivului de la interfața beton-compozit
- t_a – grosimea stratului de adeziv de la interfața beton-compozit
- E_f – modulul de elasticitate al compozitului
- t_f – grosimea compozitului
- h – înălțimea totală a elementului de beton
- x_e – poziția axei neutre
- I_c – momentul de inerție al secțiunii de beton fisurate transformate

$$I_c = \frac{b * x_0^3}{3} + (\alpha_s - 1) * A_{s2} (x_0 - d_2)^2 + \alpha_s * A_{s1} (d - x_0)^2 \quad (5.54)$$

Pentru a limita apariția acestei desprinderi a capătului compozitului în starea limită a exploatării normale, se pune condiția ca alunecarea la capătul compozitului să fie mai mică decât valoarea lui s_{f0} .

$$I_c = \frac{2 * G_F}{\tau_{f1}} \quad (5.55)$$

Unde:

- $G_F = c_F * f_{ctm}$
- c_F – factor ce leagă energia la rupere a betonului cu rezistența medie la întindere; orientativ $c_F = 0,202$ mm
- f_{ctm} – rezistența medie la întindere a betonului
- τ_{f1} – efortul de forfecare la capătul compozitului ($\tau_{f1} = 1,8 * f_{ctm}$)

Condiția ca deschiderea efectivă a fisurii să fie mai mică decât deschiderea admisă se poate scrie astfel:

$$2 * s_{f0} < 0,30 \text{ mm}$$

5.1.2. Calculul conform ACI 440.2R-02 – verificarea la încovoiere

Acest cod specifică încă de la început factorul de reducere a caracteristicilor compozitului notat cu C_E și prezentat în tabelul de mai jos.

Tabelul 5.2. Factorul de mediu C_E

Condiții de expunere	Tipul compozitului	C_e
Expunere interioară	fibră de carbon/rășină epoxidică	0,95
	fibră de sticlă/rășină epoxidică	0,75
	fibră de aramidă/rășină epoxidică	0,85
Expunere exterioară	fibră de carbon/rășină epoxidică	0,85
	fibră de sticlă/rășină epoxidică	0,65
	fibră de aramidă/rășină epoxidică	0,75
Expunere exterioară în medii agresive	fibră de carbon/rășină epoxidică	0,85
	fibră de sticlă/rășină epoxidică	0,50
	fibră de aramidă/rășină epoxidică	0,70

Rezistența:

$$f_{fu} = f_{fu}^* * C_E \quad (5.56)$$

Unde:

- f_{fu} – rezistența ultimă de calcul
- f_{fu}^* – rezistența ultimă comunicată de producător
- C_E – factor de mediu

Deformația specifică a compozitului:

$$\varepsilon_{fu} = \varepsilon_{fu}^* * C_E \quad (5.57)$$

Unde:

- ε_{fu} – deformația specifică ultimă de calcul a compozitului
- ε_{fu}^* – deformația specifică ultimă comunicată de producător
- C_E – factor de mediu

Ca urmare a aplicării acestor corecții, modulul de elasticitate va rămâne neschimbat:

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}} \quad (5.58)$$

În cadrul verificării la încovoiere trebuie avute în vedere următoarele considerații:

- calculul se va face pe baza proprietăților fizice și geometrice ale secțiunii existente,
- ipoteza secțiunilor plane este acceptată,
- deformația maximă acceptată pentru betonul comprimat este de 0.003,
- rezistența la întindere a betonului este neglijată,
- compozitul se comportă elastic până la cedare,
- se realizează o legătură perfectă la contactul dintre compozit și elementul de beton armat.

În cazul în care se urmărește creșterea capacității portante la moment încovoietor, neapărat se va studia dacă elementul satisface cerințele de rezistență la forță tăietoare.

5.1.2.1. Claculul în starea limită ultimă (S.L.U.)

Ecuția de bază ce trebuie satisfăcută:

$$\phi * M_n \geq M_u \quad (5.58)$$

Unde:

- ϕ – factor de reducere ce ia în considerare caracteristicile ductile ale secțiunii

$$\phi = \begin{cases} 0,90 & \text{pentru : } \varepsilon_s \geq 0,005 \\ 0,70 + \frac{0,20(\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{(0,005 - \varepsilon_{sy})} & \text{pentru : } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < 0,005 \\ 0,70 & \text{pentru : } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \end{cases}$$

- ε_{bi} – deformația inițială a betonului
- ε_{sy} – deformația specifică a oțelului la curgere
- M_u – momentul necesar din încărcări [Nmm]
- M_n – momentul capabil [Nmm]

$$M_n = A_s * f_s \left(d - \frac{\beta_1 * c}{2} \right) + \psi_f * A_f * f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 * c}{2} \right) \quad (5.59)$$

- A_s – aria armăturii întinse (fără pretensionare) [mm²]
- f_s – efortul în armătura întinsă [N/mm²]
- d – înălțimea utilă a secțiunii de beton [mm]
- β_1 – coeficient de echivalență pentru aria de beton comprimat, raportat la poziția reală a axei neutre – se ia din ACI318-Secțiunea 10.2.7.3.

$$\beta_1 = \begin{cases} 0,85 & \text{pentru : } f'_c < 4000 \text{ psi} = 27,579 \text{ [N / mm}^2\text{]} \\ 0,65 & \text{pentru : } f'_c > 8000 \text{ psi} = 55,158 \text{ [N / mm}^2\text{]} \end{cases}$$

Pentru valori intermediare se interpolează liniar.

- c – poziția axei neutre

$$c = \frac{A_s * f_s + A_f * f_{fe}}{\gamma * f'_c * \beta_1 * b} \quad (5.60)$$

- γ – multiplicator al lui f'_c ; dacă modul de cedare este prin zdrobirea betonului atunci se ia $\gamma=0,85$
- f'_c – rezistența la compresiune a betonului [N/mm²]
- b – lățimea elementului de beton armat [mm]
- A_f – aria secțiunii compozitului [mm²]

$$A_f = n * t_f * b_f$$

- n – numărul de straturi de compozit
- t_f – grosimea fiecărui strat de compozit

- b_f – lățimea fiecărui strat de compozit
- Ψ_f – factor de reducere a acțiunii compozitului; la încovoiere $\Psi_f=0,85$
- f_{fe} – efortul în compozit [N/mm^2]
- h – înălțimea elementului de beton armat [mm]

Sunt considerate cinci moduri de cedare:

- zdrobirea betonului comprimat înainte de intrarea în curgere a armăturii întinse
- curgerea armăturii întinde urmată de ruperea compozitului
- curgerea armăturii întinde urmată de zdrobirea betonului comprimat
- desprinderea betonului de acoperire de pe elementul consolidat, împreună cu compozitul
- dezlipirea compozitului de pe elementul de beton armat.

Zdrobirea betonului comprimat poate avea loc atunci când $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} = 0,003$.

Ruperea compozitului are loc atunci când $\varepsilon_f = \varepsilon_{fu}$.

Desprinderea sau dezlipirea compozitului au loc atunci când nu se poate face transmiterea eforturilor maxime din element către compozit.

Deformația specifică ultimă din compozit va conduce la determinarea efortului ultim, datorită comportării elastice a compozitului.

Deformația specifică ultimă în compozit se determină cu expresia:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq k_m * \varepsilon_{fu} \quad (5.61)$$

Unde:

- ε_{fe} – deformația specifică în compozit la cedarea secțiunii
- ε_{cu} – deformația specifică maximă la compresiune a betonului
- h – înălțimea secțiunii de beton
- c – poziția axei neutre
- ε_{bi} – deformația inițială a betonului (înainte de aplicarea compozitului)
- ε_{fu} – deformația specifică ultimă a compozitului
- k_m – factor de reducere ce previne desprinderea sau dezlipirea compozitului

$$k_m = \begin{cases} \frac{1}{60 * \varepsilon_{fu}} \left(1 - \frac{n * E_f * t_f}{360000} \right) \leq 0,90 & \text{pt. } n * E_f * t_f \leq 180000 [N / mm] \\ \frac{1}{60 * \varepsilon_{fu}} \left(\frac{90000}{n * E_f * t_f} \right) \leq 0,90 & \text{pt. } n * E_f * t_f > 180000 [N / mm] \end{cases}$$

Deformația specifică ultimă în armătura întinsă se determină cu expresia:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) * \left(\frac{d-c}{h-c} \right) \quad (5.62)$$

Unde:

- ε_s – deformația specifică a armăturii întinse
- ε_{fe} – deformația specifică în compozit la cedarea secțiunii
- d – înălțimea utilă a secțiunii de beton

Efortul în oțelul întins, precum și cel în compozit, se determină considerând o comportare elastică a ambelor materiale:

$$\text{oțel:} \quad f_s = \varepsilon_s * E_s \leq f_y$$

compozit: $f_{fe} = \varepsilon_{fe} * E_f$

Echilibrul intern este satisfăcut dacă:

$$C = \frac{A_s * f_s + A_f * f_{fe}}{\gamma * f'_c * \beta_1 * b}$$

Capacitatea de ductilitate se determină prin considerare factorului \emptyset în determinarea eforturilor capabile ale secțiunii de beton.

5.1.2.2. Claculul în starea limită a exploatării normale (S.L.E.N.)

Sunt limitate eforturile ce pot apare în oțel la exploatarea normală:

$$f_{s,s} \leq 0,80 * f_y \quad (5.63)$$

Unde:

- $f_{s,s}$ - efortul la solicitarea maximă (S.L.E.N.)
- f_y - efortul la curgere în oțel

Efortul în oțel se calculează cu relația:

$$f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} * A_f * E_f \left(h - \frac{k * d}{3} \right) \right] * (d - k * d) * E_s}{A_s * E_s \left(d - \frac{k * d}{3} \right) * (d - k * d) + A_f * E_f \left(h - \frac{k * d}{3} \right) * (h - k * d)} \quad (5.64)$$

Unde:

- $f_{s,s}$ - efortul în oțel
- M_s - momentul încovoietor maxim în S.L.E.N.
- ε_{bi} - deformația inițială a betonului (înainte de aplicarea compozitului)
- A_f - aria secțiunii compozitului
- E_f - modulul de elasticitate al compozitului
- h - înălțimea secțiunii de beton armat
- $k*d$ - poziția axei neutre în S.L.E.N. Ξ axa neutră elastică
- d - înălțimea utilă a secțiunii de beton armat
- E_s - modulul de elasticitate al oțelului
- A_s - aria armăturii întinse

Pentru încărcarea din domeniul elastic al elementului (M_s), efortul din compozit este:

$$f_{f,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s} \right) * \frac{h - k * d}{d - k * d} - \varepsilon_{bi} * E_f \quad (5.65)$$

Condiția de limitare a efortului datorită fluajului compozitului este:

$$F_{f,s} \geq f_{f,s}$$

Unde $F_{f,s}$ se dă în tabelul de mai jos:

Tabelul 5.3. Rezistența compozitului la fluaj

Tipul fibrei din compozit	sticlă	aramidă	carbon
$F_{f,s}$	$0,20 * f_{fu}$	$0,30 * f_{fu}$	$0,55 * f_{fu}$

În ceea ce privește rezistența la oboseală a compozitului, calculul și limitările sunt identice cu cele pentru fluaj, cu deosebirea că la momentul M_s se adaugă și momentul din încărcarea ciclică.

5.2. Modelare numerică asistată de calculator

La realizarea modelărilor numerice s-au folosit caracteristicile materialelor prezentate în capitolul 4, introduse în programul de analiză numerică ATENA 2D.

Astfel au fost modelate elementele martor (RB și RB2) și a elementelor consolidate dar fără a folosi ancoraje (R-2W, R-2NSMS, R-1S-0) cu scopul de a observa comportamentul acestora sub încărcări în ideea alegerii standului de încercări corespunzător ca și gabarit cât și a cricului prin care se transmite forța verticală (referitor la aria pistonului cricului și cursa acestuia).

5.2.1. Principiul de încercare

Principiul de încercare a elementelor experimentale este cel prezentat în schema din figura 5.1. Acest mod de încercare a grinzilor este utilizat pe scară largă și la încercări experimentale desfășurate de cercetători din întreaga lume. Este un principiu de încercare în patru puncte la care încărcarea elementului se face prin aplicarea unei forțe verticale monoton crescătoare ce descarcă pe grindă în două puncte, la o distanță de 140 cm între ele, situate centrat față de cele două reazeme aflate la 400 cm unul de celălalt. Distanța de la reazem la punctul de descărcare din imediata vecinătate a lui este de 130 cm.

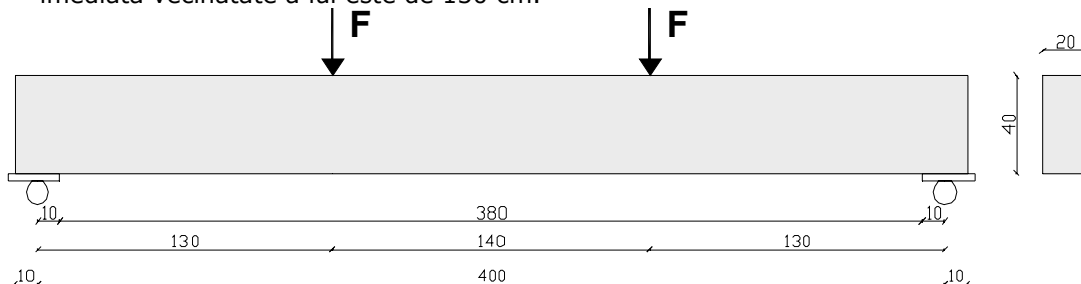


Figura 5.1. Principiul de încercare a grinzilor [cm]

Elementele experimentale încercate în cadrul programului de cercetare au aceleași dimensiuni geometrice:

- lungimea $L=420$ cm,
- grosimea $D=20$ cm,
- înălțimea $H=40$ cm.

De asemenea elementele sunt similare din punct de vedere a materialelor utilizate (beton și armătură) și anume:

- beton de clasă C32/40,

- armătură $f_{t,med}=781 \text{ N/mm}^2$
- toate grinzile au acelaș sistem de armare, prezentat în figura 5.2.
- armătură longitudinală $3\text{Ø}16$,
- bare de montaj $2\text{Ø}8$,
- etrieri $\text{Ø}8/15$.

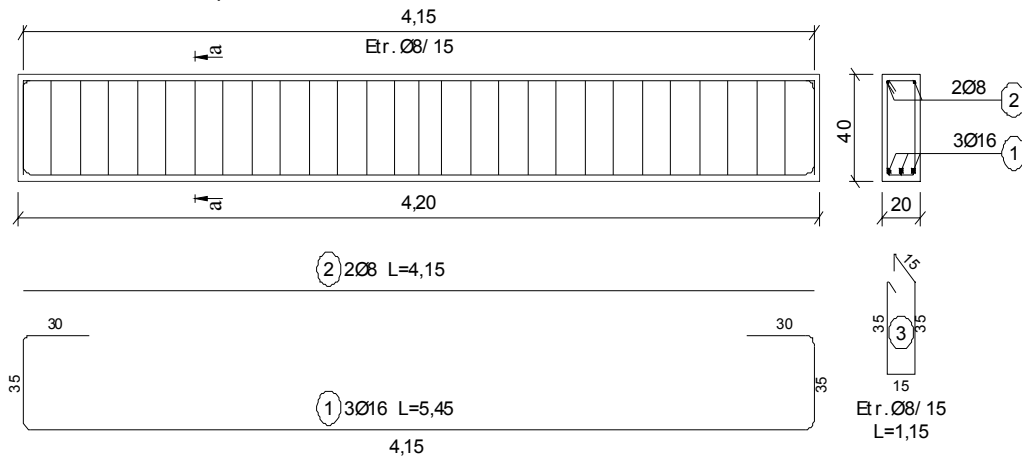


Figura 5.2. Principiul de armare [m]

Pornind de la ideea că în exploatare unele elementele structurale necesită consolidare ca urmare a influenței negative pe care o au asupra lor diferiți factori dintre care reamintesc doar mediul coroziv, impactul mecanic, creșterea încărcărilor etc. (ceea ce se traduce prin corodarea armăturii de rezistență și deci reducerea ariei de armare, prin deteriorarea armăturii sau chiar tăierea acesteia și iar apare o reducere a ariei de armare), am simulat această deteriorare și implicit reducerea ariei de armare prin tăierea armăturii longitudinale din mijloc în trei puncte (în dreptul zonelor de transmitere a încărcării pe grindă și în mijloc – figura 5.3.) rămânând astfel active doar două bare din trei. Aceasta s-a realizat pentru grinda martor RB2 și pentru restul grinzilor care au fost consolidate prin diverse sisteme.

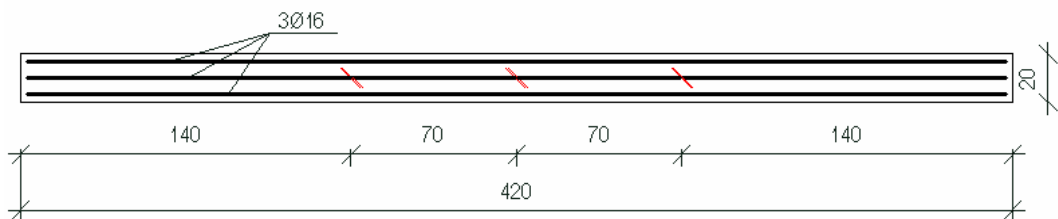


Figura 5.3. Locația tăieturilor pe armătura din mijloc [cm]

5.2.2. Modelarea numerică pentru grinda martor RB

În urma rulării programului Athena 2D s-a obținut diagrama forță-deplasare pentru elementul martor RB.

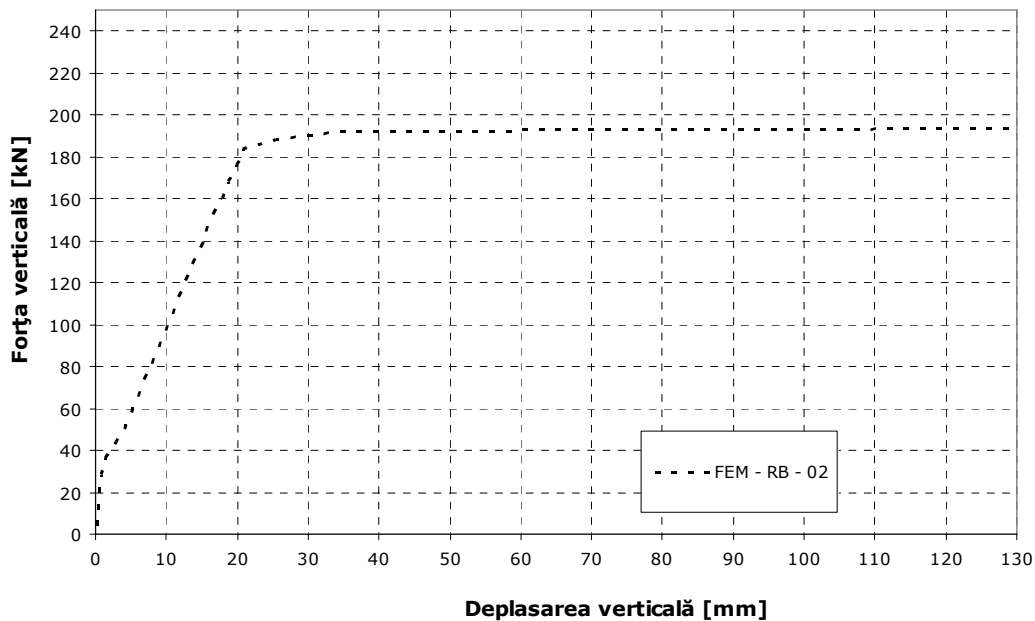


Figura 5.4. Diagrama forță-deplasare pentru elementul martor RB

Forța ultimă la care cedează grinda martor RB este de 192 kN.

5.2.3. Modelarea numerică pentru grinda martor RB2

În urma rulării programului ATENA 2D s-au obținut curbele forță-deplasare pentru elementul martor RB2 pentru două ipoteze de calcul. Prima ipoteză nu a luat în calcul armătura tăiată, modelarea numerică făcându-se considerând doar două bare $\varnothing 16$ în zona întinsă. Cea de-a doua ipoteză a luat în calcul și cele 3 segmente din armătura mijlocie rezultate în urma tăierii acestora.

Prin suprapunerea celor două curbe în diagrama din figura 5.5., se observă că segmentele de armătură rămase conferă grinzii o rigiditate mai mare decât în cazul eliminării lor complete din calcul, precum și o creștere ușoară a forței ultime de la 140 kN la 144 kN.

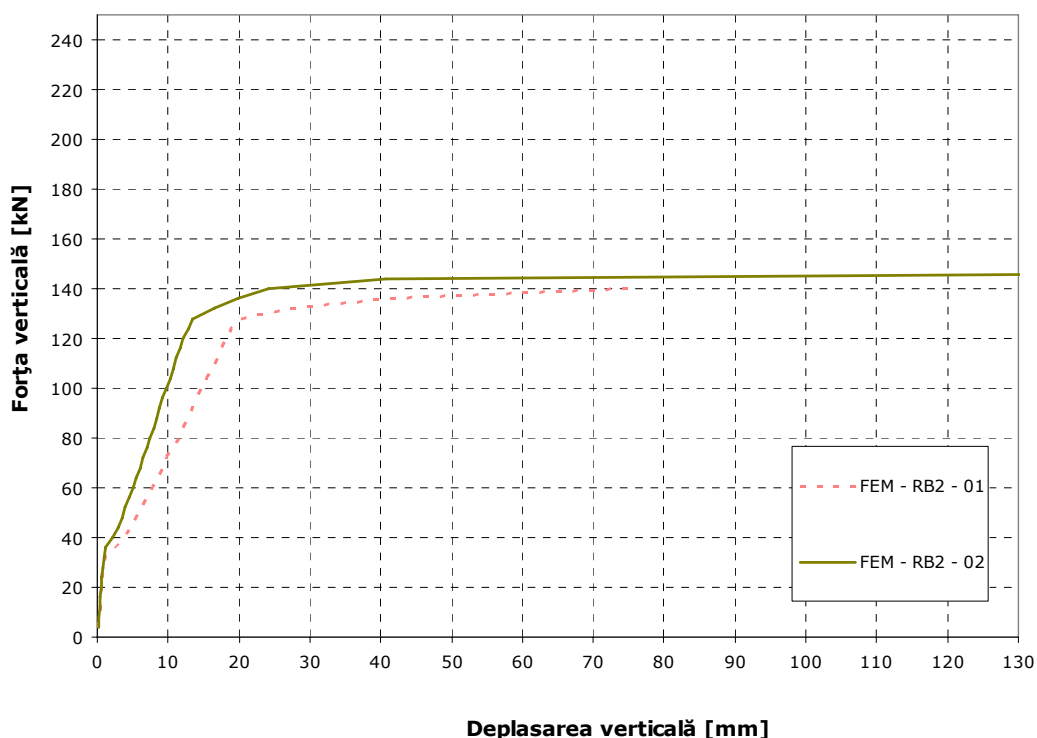


Figura 5.5. Diagrama forță-deplasare pentru elementul martor RB2

În continuare, pentru elementele consolidate cu materiale compozite, modelarea numerică s-a făcut luând în considerare ambele ipoteze.

5.2.4. Modelarea numerică pentru grinda consolidată cu țesătură din fibre de carbon R-2W

Ca sistem de consolidare s-a luat în considerare aplicarea pe fața inferioară a grinzii a două straturi de țesătură din fibre de carbon (SikaWrap 230C) cu lățimea de 180 mm și lungimea de 3700 mm. Grosimea țesăturii dată de producător este de 0,12 mm. Lipirea pe suprafața betonului se face cu rășină epoxidică bicomponentă (SikaDur 330).

Se observă din nou creșterea rigidității și a forței ultime pentru grinda la care s-au luat în considerare segmentele de armătură rămase. Forța ultimă crește de la 144 kN la 176 kN.

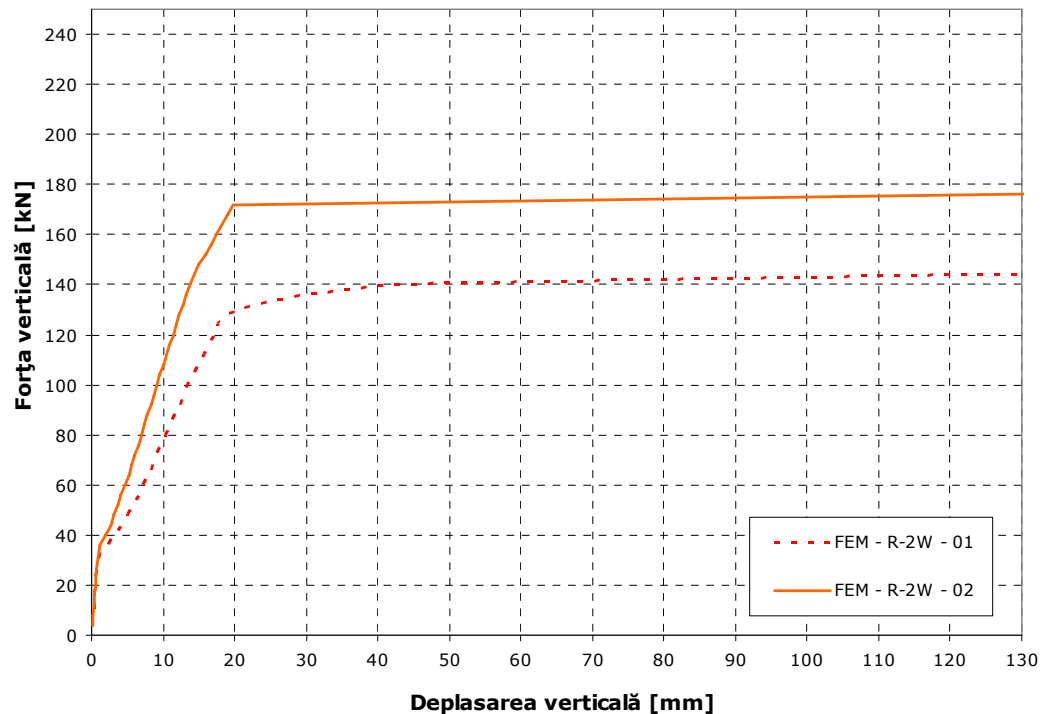


Figura 5.6. Diagrama forță-deplasare pentru elementul consolidat R-2W

5.2.5. Modelarea numerică pentru grinda consolidată cu lamelă din fibre de carbon R-1S-0

Ca sistem de consolidare s-a luat în considerare aplicarea pe fața inferioară a grinzii a unei lamele din fibre de carbon (SikaDur S512) cu lățimea de 50 mm și lungimea de 3700 mm. Grosimea lamelei dată de producător este de 1,2 mm. Lipirea pe suprafața betonului se face cu rășină epoxidică bicomponentă (SikaDur 30).

Se observă din nou creșterea rigidității și a forței ultime pentru grinda la care s-au luat în considerare segmentele de armătură rămase. Forța ultimă crește de la 140 kN la 144 kN.

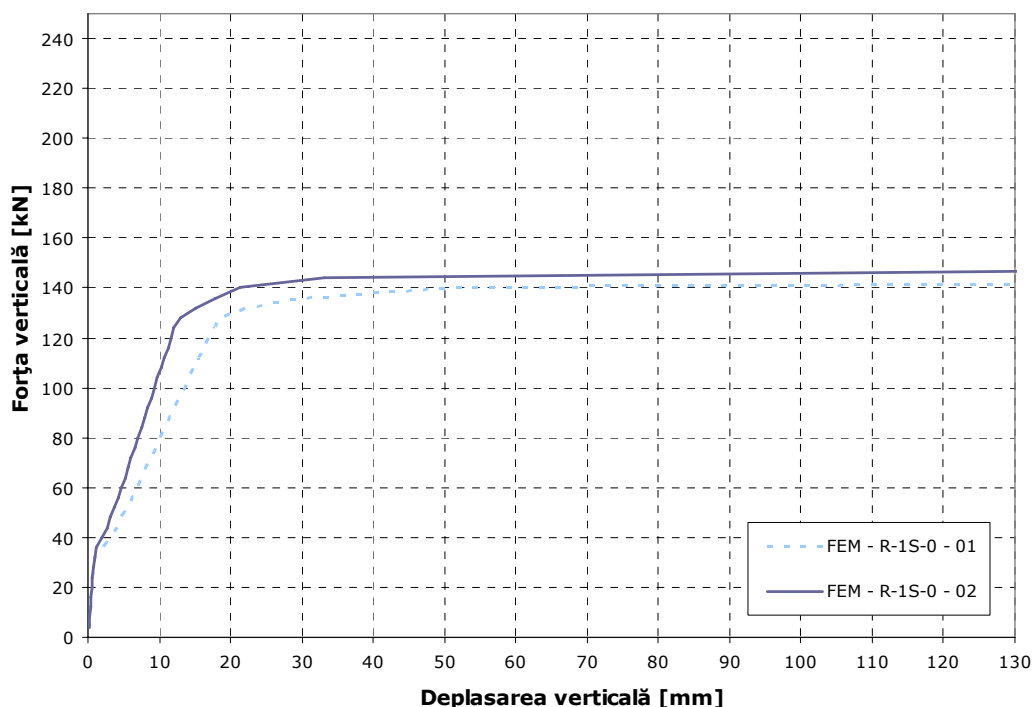


Figura 5.7. Diagrama forță-deplasare pentru elementul consolidat R-1S-0

5.2.6. Modelarea numerică pentru grinda consolidată cu lamele din fibre de carbon în șanțuri tăiate în beton R-2NSMS

Ca sistem de consolidare s-a luat în considerare aplicarea pe fața inferioară a grinzii a două lamele din fibre de carbon (SikaDur S512) cu lățimea de 20 mm și lungimea de 3700 mm, prin tăierea unor șanțuri la suprafața betonului. Grosimea lamelei dată de producător este de 1,2 mm. Lipirea lamelor se face prin înglobarea lor în rășină epoxidică bicomponentă (SikaDur 30) introdusă în prealabil în șlițurile tăiate.

Se observă din nou creșterea rigidității și a forței ultime pentru grinda la care s-au luat în considerare segmentele de armătură rămase. Forța ultimă crește de la 176 kN la 204 kN.

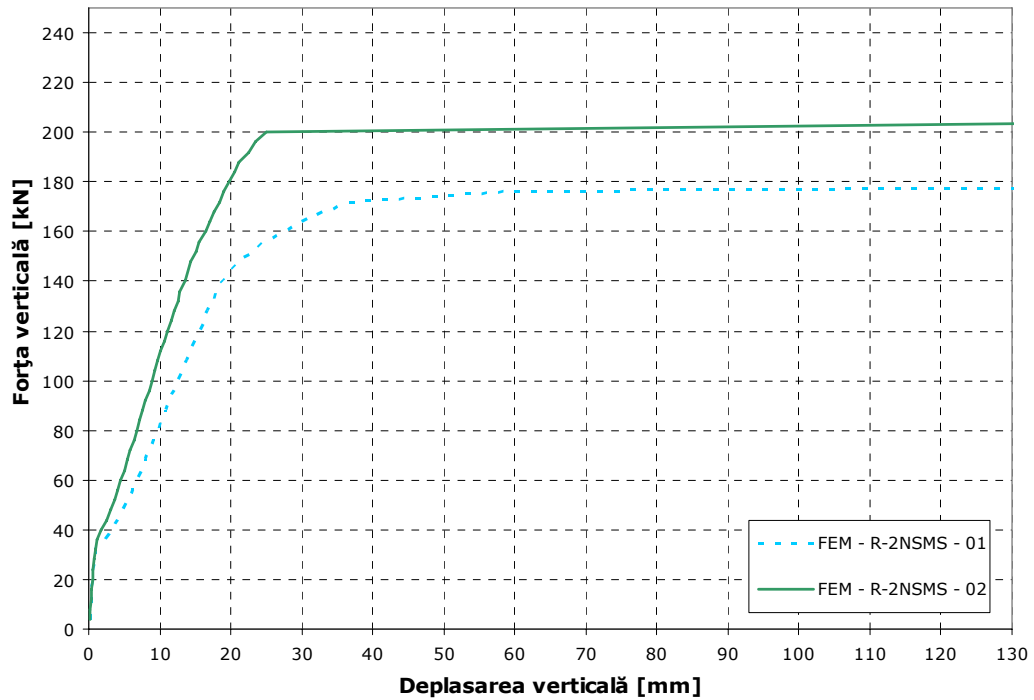


Figura 5.8. Diagrama forță-deplasare pentru elementul consolidat R-2NSMS

6. PROGRAMUL EXPERIMENTAL

6.1. Introducere

Programul experimental, prezentat în Anexă, presupune testarea a 14 elemente dintre care:

- două grinzi martor (RB și RB2),
- trei grinzi consolidate cu materiale compozite (R-2W, R-1S-0 și R-2NSMS);
- nouă grinzi consolidate și ancorate folosind materiale compozite (R-2W-A, R-2W-MA, RL-2W-A, R-2S-W, R-2S-W-2, R-1S, R-1S-AS, R-1S-SP, R-1S-CA).

Caracteristicile materialelor și principiul de încercare au fost prezentate în capitolele anterioare.

Standul experimental prin care s-a pus în practică principiul de încercare este prezentat în figura 6.1.

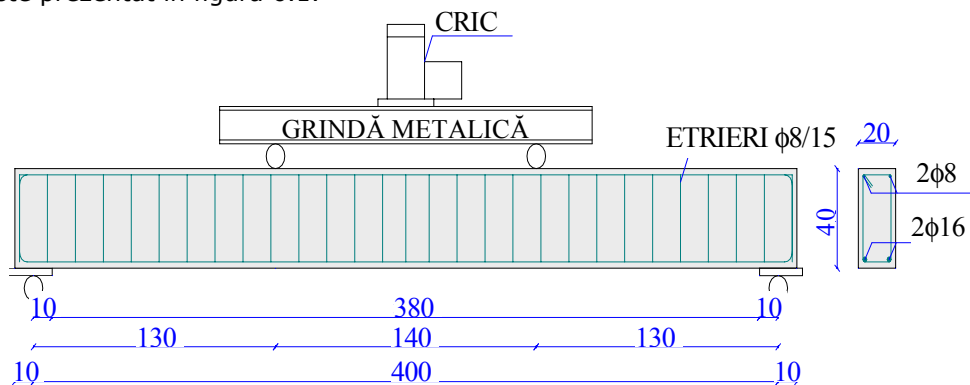


Figura 6.1. Standul experimental [cm]

Acesta a fost realizat din profile metalice din oțel laminat, dimensiunile acestora rezultând din necesarul de gabarit pentru elementul experimental și pentru presa hidraulică necesară la aplicarea forței verticale.

6.2. Măsurarea datelor experimentale

Înregistrarea comportării elementului experimental sub încărcări s-a realizat cu ajutorul unor deformetre electronice pentru măsurarea deformațiilor verticale, a unui captor de presiune pentru a controla încărcarea dată de presa hidraulică și cu ajutorul timbrelor tensometrice dispuse pe fibrele materialului compozit utilizat la consolidare pentru a urmări deformația specifică în compozit. Acestea au fost conectate la unitatea de citire iar datele obținute s-au înregistrat în permanență și în timp real pe calculator pe toată durata de testare a unui element.

Au fost utilizate un număr de 4 deformetre dispuse asemănător pentru toate elementele astfel:

- D1 și D3 în dreptul punctelor de descărcare a efortului transmis de presă,
- D2 în mijlocul grinzii pentru a măsura săgeata,
- D4 aproape de reazemul din dreapta.

Timbrele tensometrice au variat ca număr de la un test la altul în funcție de sistemul de consolidare ales, fiind dispuse în locurile în care compozitul era solicitat la întindere, iar denumirea lor a fost G1-G4.

Forța verticală este variabilă fiind aplicată în trepte de la 0 la valoarea maximă ce corespunde cedării elementului. Valoarea unei trepte de încărcare s-a stabilit la 10 kN. La fiecare treaptă de încărcare s-a verificat starea de fisurare, marcându-se pe element fisurile apărute.

Datele înregistrate pe durata încercărilor au fost:

- încărcarea verticală,
- deplasările pe verticală,
- modurile de cedare a elementelor,
- deformațiile specifice din compozit.

6.3. Derularea programului experimental

6.3.1. Elementul martor RB

Elementul RB este o grindă din beton armat care prezintă în zona întinsă 3 armături cu diametrul $\varnothing 16$. În zona comprimată s-au folosit 2 bare de montaj cu diametrul $\varnothing 8$. Pentru a împiedica cedarea grinzii la forță tăietoare, etrierii au fost supradimensionați, realizați din bare de oțel PC52 și dispuși pe toată lungimea elementului la o distanță constantă de 15 cm între ei.

Elementul RB este prezentat gata pentru încercare în figura 6.2.



Figura 6.2. Grinda RB pregătită pentru încercare

Forța verticală aplicată conform principiului de încercare prezentat anterior este monoton crescătoare. Treptele de încărcare sunt de câte 10 kN până la valoarea maximă corespunzătoare ruperii elementului. Cedarea elementului s-a realizat prin zdrobirea betonului în zona comprimată respectiv deschiderea fisurilor și curgerea armăturilor în zona întinsă, la o valoare a forței verticale $F_{\max} = 196$ kN. Primele fisuri au apărut când forța verticală a atins valoarea de 48.5 kN moment în care captorul de deplasare D2 a înregistrat o deformație de 2,25 mm.



Figura 6.3. Grinda RB după încercare

6.3.2. Elementul martor RB2

Elementul RB2 este realizat similar cu elementul RB doar că i s-a tăiat o armătură longitudinală de rezistență (cea din mijloc) în trei locuri (în dreptul zonelor de transmitere a încărcării pe grindă și în mijloc – figura 5.3.) pentru a simula o eventuală deteriorare a grinzii. Astfel în zona întinsă au rămas două bare cu diametrul $\varnothing 16$.

Grinda RB2 este prezentată gata pentru încercare în figura 6.4.

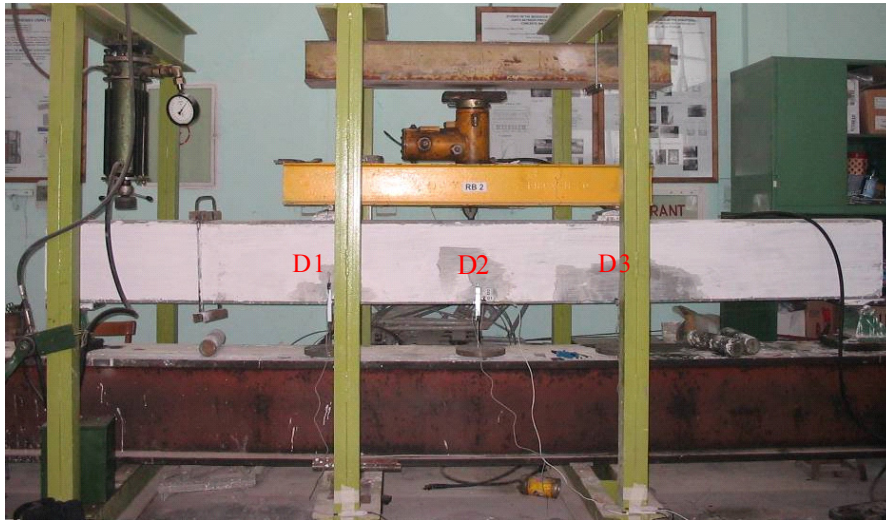


Figura 6.4. Grinda RB2 pregătită pentru încercare



Figura 6.5. Grinda RB2 după încercare

Forța verticală aplicată conform principiului de încercare prezentat anterior este monoton crescătoare. Treptele de încărcare sunt de câte 10 kN până la valoarea maximă corespunzătoare ruperii elementului. Pe armătura întinsă s-a lipit un timbru tensiometric pentru a măsura deformația specifică a acesteia. Cedarea elementului s-a realizat prin zdrobirea betonului în zona comprimată respectiv deschiderea fisurilor și curgerea armăturilor în zona întinsă, la o valoare a forței verticale $F_{\max} = 134$ kN. Primele fisuri au apărut când forța verticală a atins valoarea de 38.5 kN moment în care captorul de deplasare D2 a înregistrat o săgeată de 1,98 mm.

6.3.3. Elementul R-2W

Elementul R-2W este realizat similar cu RB2 (cu armătura longitudinală de rezistență din mijloc tăiată pentru a simula o eventuală deteriorare a grinzii). Astfel în zona întinsă sunt două bare din oțel cu diametrul $\varnothing 16$.

Dimensiunile elementului rămân neschimbate.

Pentru a avea un reper de comparație toate grinzile s-au consolidat impunând o capacitate maximă de 160 kN, astfel compozitul utilizat s-a calculat pentru a asigura suplimentarea capacității portante maxime a elementelor de la 134 kN (cât a rezistat grinda martor RB2) la cel puțin valoarea impusă.

Necesarul de material compozit pentru R-2W din calcul a rezultat ca fiind două fâșii de țesătură din fibre de carbon (SikaWrap 230C) cu lățimea de 180 mm și lungime de 3700 mm, suprapuse și lipite pe fața inferioară a grinzii cu rășină epoxidică (SikaDur 330).

6.3.3.1. Etapele consolidării grinzii R-2W

Consolidarea grinzii din beton armat cu țesătură din fibre de carbon presupune parcurgerea următorilor pași (prezentați în figura 6.6.):

- curățarea suprafeței betonului prin șlefuire mecanică pentru înlăturarea laptelui de ciment și nivelare,
- aspirarea suprafeței și suflarea cu aer comprimat cu scopul de a elimina praful și impuritățile din porii betonului,
- măsurarea, tăierea și curățarea cu diluant (Colma-Cleaner) a țesăturii din fibre de carbon,
- aplicarea rășinii epoxidice pe suprafața suport,
- așezarea primei fâșii de țesătură peste rășină și impregnarea acesteia prin apăsarea cu o rolă în lungul fibrelor,
- suplimentarea cu rășină și aplicarea celei de-a doua fâșii de țesătură urmată de impregnarea acesteia prin roluire în lungul fibrelor;
- lăsarea pentru întărire minim 7 zile înainte de testare.



Șlefuirea suprafeței betonului



Curățarea suprafeței de praf



Măsurarea și tăierea țesăturii



Curățarea țesăturii cu diluant



Aplicarea rășinii epoxidice



Impregnarea țesăturii prin roluire

Figura 6.6. Consolidarea cu țesătură din fibre de carbon – R-2W

6.3.3.2. Încercarea grinzii R-2W

Înainte de încercare s-au lipit 4 timbre tensiometrice pe materialul compozit astfel: 3 din ele au fost dispuse pe aceeași fibră din mijlocul țesăturii (un timbru G1 în zona de mijloc a grinzii și două în dreptul zonelor de descărcare a forței verticale, G2 și G3) iar al patrulea pe o fibră marginală în zona de mijloc a grinzii, G4.

Elementul R-2W este prezentat gata pentru încercare în figura 6.7.

Forța verticală aplicată conform principiului de încercare prezentat anterior este monoton crescătoare. Treptele de încărcare sunt de câte 10 kN până la valoarea maximă corespunzătoare ruperii elementului. Cedarea elementului s-a realizat prin dezlipirea țesăturii de pe suprafața suport, la o valoare a forței verticale $F_{\max} = 166$ kN. Prima fisură a apărut când forța verticală a atins valoarea de 56.5 kN moment în care captorul de deplasare D2 a înregistrat o deformație de 3,21 mm.



Figura 6.7. Grinda R-2W pregătită pentru încercare



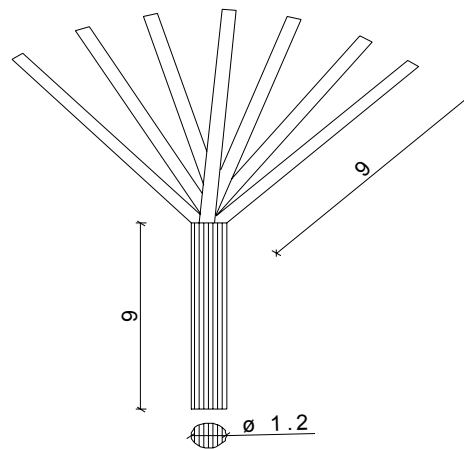
Figura 6.8. Grinda R-2W după încercare. Modul de cedare

6.3.4. Elementul R-2W-A

Elementul R-2W-A este realizat similar cu RB2 (cu armătura longitudinală de rezistență din mijloc tăiată pentru a simula o eventuală deteriorare a grinzii). Astfel în zona întinsă sunt două bare din oțel cu diametrul $\varnothing 16$.

Dimensiunile elementului rămân neschimbate.

Grinda s-a consolidat impunând o capacitate maximă de 160 kN, astfel compozitul utilizat a fost calculat pentru a asigura suplimentarea capacității portante maxime de la 134 kN (cât a rezistat grinda martor RB2) la cel puțin valoarea impusă.



= $\varnothing 12$ - ancoraj / $\varnothing 14$ - gaura =

Figura 6.9. Detaliu ancoraj tijă compozită cu capăt floare (Anchor Spike) [cm]

Necesarul de material compozit pentru R-2W-A din calcul a rezultat ca fiind două fâșii de țesătură din fibre de carbon (SikaWrap 230C) cu lățimea de 180 mm și lungime de 3700 mm, suprapuse și lipite pe fața inferioară a grinzii cu rășină epoxidică (SikaDur 330). Pe lângă aceasta mai e nevoie de 6 fâșii de țesătură (100x360 mm) pentru confecționarea ancorajelor de tip tijă compozită cu capăt floare (Anchor Spike) și de 18 fâșii de țesătură (100x180 mm) care vor fi lipite perpendicular pe direcția fibrelor din țesătura longitudinală.

6.3.4.1. Etapele consolidării grinzii R-2W-A

Înainte de începerea consolidării se impune confecționarea ancorajelor. Acestea se pot face fie din țesătură din fibre de carbon fie din țesătură din fibre de sticlă. Avantajul acestora este că valorifică deșeurile de țesătură fiind nevoie de fâșii cu dimensiunea 100x360 mm.

Consolidarea grinzii din beton armat cu țesătură din fibre de carbon, ancorată la capete cu tije compozite cu capăt floare, presupune parcurgerea următorilor pași (prezentați în figura 6.10.):

- realizarea găurilor pentru ancoraje, $h=100$ mm, $d=14$ mm;

- curățarea suprafeței betonului prin șlefuire mecanică pentru înlăturarea laptelui de ciment și nivelare,
- aspirarea suprafeței și suflarea cu aer comprimat cu scopul de a elimina praful și impuritățile din porii betonului și din găurile pentru ancoraje,
- măsurarea, tăierea și curățarea cu diluant (Colma-Cleaner) a țesăturii din fibre de carbon;
- aplicarea rășinii epoxidice pe suprafața suport,
- așezarea și impregnarea câte unei fâșii (100x180 mm) centrat pe fiecare gaură de ancorare, cu orientarea fibrelor perpendicular pe direcția longitudinală a grinzii;
- așezarea primei fâșii de țesătură peste rășină și impregnarea acesteia prin apăsarea cu o rolă în lungul fibrelor,
- așezarea și impregnarea câte unei fâșii (100x180 mm) centrat pe fiecare gaură de ancorare, cu orientarea fibrelor perpendicular pe direcția fibrelor din prima fâșie longitudinală;
- suplimentarea cu rășină și aplicarea celei de-a doua fâșii de țesătură urmată de impregnarea acesteia prin roluire în lungul fibrelor,
- așezarea și impregnarea câte unei fâșii (100x180 mm) centrat pe fiecare gaură de ancorare, cu orientarea fibrelor perpendicular pe direcția fibrelor din a doua fâșie longitudinală;
- umplerea găurilor cu rășină și introducerea prin rotire a tijei ancorajului în gaură, străpungând straturile de țesătură;
- răsfirarea țesăturii libere din capătul tijei ancorajului și impregnarea ei prin roluire peste straturile de țesătură deja aplicate;
- lăsarea pentru întărire minim 7 zile înainte de testare.



Impregnarea în zona viitoareii tije



Formarea tije



Formarea flozii de țesătură de la capătul tije



Finisarea tije composite

Figura 6.10. Confecționarea ancorajelor gen tije composite cu capăt floare



Grinda șlefuită, aspirată; găurile pentru ancoraje; fâșiile longitudinale



Aplicarea și impregnarea primului strat de fâșii transversale în zona găurilor



Aplicarea și impregnarea primei fâșii longitudinale



Străpungerea fâșiilor pentru introducerea ancorajelor

Figura 6.11. Consolidarea cu țesătură din fibre de carbon ancorată la capete cu tije composite cu capăt floare – R-2W-A

6.3.4.2. Încercarea grinzii R-2W-A

Înainte de încercare s-au lipit 4 timbre tensiometrice pe materialul compozit astfel: 3 din ele au fost dispuse pe aceeași fibră din mijlocul țesăturii (un timbru G1 în zona de mijloc a grinzii și două în dreptul zonelor de descărcare a forței verticale, G2 și G3) iar al patrulea pe o fibră marginală în zona de mijloc a grinzii, G4.

Elementul R-2W-A este prezentat gata pentru încercare în figura 6.12.



Figura 6.12. Grinda R-2W-A pregătită pentru încercare

Forța verticală aplicată conform principiului de încercare prezentat anterior este monoton crescătoare. Treptele de încărcare sunt de câte 10 kN până la valoarea maximă corespunzătoare ruperii elementului. Cedarea elementului s-a realizat prin dezlipirea țesăturii de pe suprafața suport și ruperea ei în imediata vecinătate a ancorajului, la o valoare a forței verticale $F_{\max} = 191$ kN. Prima fisură a apărut când forța verticală a atins valoarea de 48.5 kN moment în care captorul de deplasare D2 a înregistrat o deformație de 2,70 mm.



Figura 6.13. Grinda R-2W-A după încercare



Figura 6.14. Grinda R-2W-A - modul de cedare

6.3.5. Elementul R-2W-MA

Elementul R-2W-MA este realizat similar cu RB2 (cu armătura longitudinală de rezistență din mijloc tăiată pentru a simula o eventuală deteriorare a grinzii). Astfel în zona întinsă sunt două bare din oțel cu diametrul $\varnothing 16$.

Dimensiunile elementului rămân neschimbate.

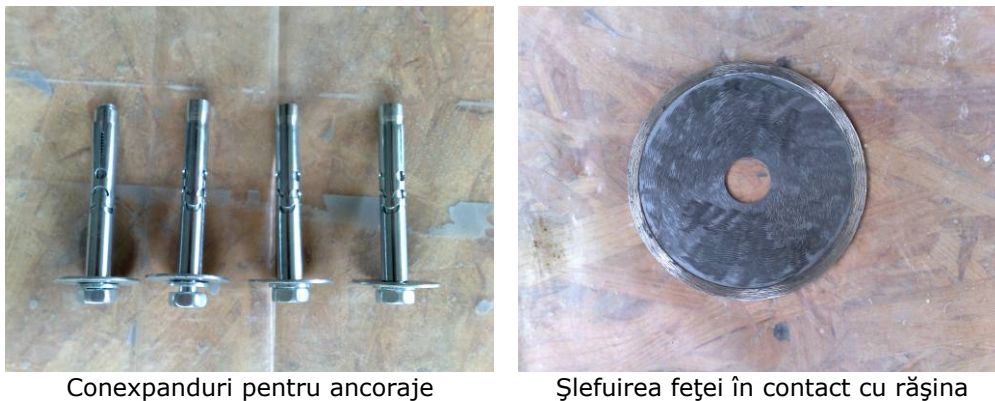
Grinda s-a consolidat impunând o capacitate maximă de 160 kN, astfel compozitul utilizat a fost calculat pentru a asigura suplimentarea capacității portante maxime de la 134 kN (cât a rezistat grinda martor RB2) la cel puțin valoarea impusă.

Necesarul de material compozit pentru R-2W-MA din calcul a rezultat ca fiind două fâșii de țesătură din fibre de carbon (SikaWrap 230C) cu lățimea de 180 mm și

lungime de 3700 mm, suprapuse și lipite pe fața inferioară a grinzii cu rășină epoxidică (SikaDur 330). Pe lângă aceasta mai e nevoie de 4 conexspanuri cu diametrul de 8 mm și 4 discuri diamantate de tăiat beton, uzate, cu diametrul de 112 mm, reciclate cu scopul de a le folosi pe post de ancoraje metalice. Mai sunt necesare 18 fâșii de țesătură (100x180 mm) care vor fi lipite perpendicular pe direcția fibrelor din țesătura longitudinală, la fel ca la elementul R-2W-A.

6.3.5.1. Etapele consolidării grinzii R-2W-MA

Înainte de începerea consolidării se impune pregătirea ancorajelor metalice. Acestea se șlefuiesc pe partea care intră în contact cu rășina pentru o mai bună aderență. Avantajul acestora este că oferă o soluție de reciclare a discurilor diamantate uzate.



Conexspanuri pentru ancoraje

Șlefuirea feței în contact cu rășina

Figura 6.15. Pregătirea ancorajelor metalice – grinda R-2W-MA

Consolidarea grinzii din beton armat cu țesătură din fibre de carbon, ancorată la capete cu conexspanuri și discuri metalice, presupune parcurgerea următorilor pași (prezentați în figura 6.16.):

- realizarea găurilor pentru ancoraje, $h=100$ mm, $d=12$ mm;
- curățarea suprafeței betonului prin șlefuire mecanică pentru înlăturarea laptelui de ciment și nivelare,
- aspirarea suprafeței și suflarea cu aer comprimat cu scopul de a elimina praful și impuritățile din porii betonului,
- măsurarea, tăierea și curățarea cu diluant (Colma-Cleaner) a țesăturii din fibre de carbon;
- aplicarea rășinii epoxidice pe suprafața suport,
- așezarea și impregnarea câte unei fâșii (100x180 mm) centrat pe fiecare gaură de ancorare, cu orientarea fibrelor perpendicular pe direcția longitudinală a grinzii;
- așezarea primei fâșii de țesătură peste rășină și impregnarea acesteia prin apăsarea cu o rolă în lungul fibrelor,
- așezarea și impregnarea câte unei fâșii (100x180 mm) centrat pe fiecare gaură de ancorare, cu orientarea fibrelor perpendicular pe direcția fibrelor din prima fâșie longitudinală;

- suplimentarea cu rășină și aplicarea celei de-a doua fâșii de țesătură urmată de impregnarea acesteia prin roluire în lungul fibrelor,
- așezarea și impregnarea câte unei fâșii (100x180 mm) centrat pe fiecare gaură de ancorare, cu orientarea fibrelor perpendicular pe direcția fibrelor din a doua fâșie longitudinală;
- introducerea conexpandurilor în găurile de ancorare, așezarea discurilor metalice și strângerea piulițelor;
- lăsarea pentru întărire minim 7 zile înainte de testare.



Pregătirea țesăturii pentru consolidare



Aplicarea și impregnarea fâșiilor transversale în zona găurilor



Aplicarea și impregnarea fâșiei longitudinale



Prinderea ancorajelor

Figura 6.16. Consolidarea cu țesătură din fibre de carbon ancorată la capete cu conexpanduri și discuri metalice – R-2W-MA

6.3.5.2. Încercarea grinzii R-2W-MA

Înainte de încercare s-au lipit 2 timbre tensiometrice pe materialul compozit, dispuse pe aceeași fibră din mijlocul țesăturii (un timbru G2 în zona de mijloc a grinzii și un timbru G1 în dreptul zonei de descărcare a forței verticale, în partea dreaptă).

Elementul R-2W-MA este prezentat gata pentru încercare în figura 6.17.



Figura 6.17. Grinda R-2W-MA pregătită pentru încercare

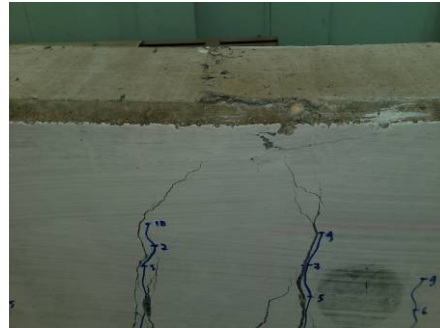
Forța verticală aplicată conform principiului de încercare prezentat anterior este monoton crescătoare. Treptele de încărcare sunt de câte 10 kN până la valoarea maximă corespunzătoare ruperii elementului. Cedarea elementului s-a realizat prin dezlipirea țesăturii de pe suprafața suport și ruperea ei între cele două ancoraje de capăt, la o valoare a forței verticale $F_{\max} = 176$ kN, concomitent cu distrugerea betonului în zona comprimată. Prima fisură a apărut când forța verticală a atins valoarea de 58.5 kN moment în care captorul de deplasare D2 a înregistrat o deformație de 4,45 mm.



Figura 6.18. Grinda R-2W-MA după încercare



Ruperea țesăturii



Cedarea betonului

Figura 6.19. Grinda R-2W-MA - modul de cedare

6.3.6. Elementul RL-2W-A

Elementul RL-2W-A este realizat similar cu RB2 (cu armătura longitudinală de rezistență din mijloc tăiată pentru a simula o eventuală deteriorare a grinzii). Astfel în zona întinsă sunt două bare din oțel cu diametrul $\varnothing 16$.

Dimensiunile elementului rămân neschimbate.

Grinda s-a consolidat impunând o capacitate maximă de 160 kN, astfel compozitul utilizat a fost calculat pentru a asigura suplimentarea capacității portante maxime de la 134 kN (cât a rezistat grinda martor RB2) la cel puțin valoarea impusă.

Necesarul de material compozit pentru RL-2W-A din calcul a rezultat ca fiind de câte două fâșii de țesătură din fibre de carbon (SikaWrap 230C) pe fiecare față laterală a grinzii, fâșii cu lățimea de 90 mm și lungime de 3700 mm, suprapuse și lipite pe fața inferioară a grinzii cu rășină epoxidică (SikaDur 330). Pe lângă aceasta mai e nevoie de 12 fâșii de țesătură din fibre de sticlă (100x360 mm) pentru confecționarea ancorajelor de tip tijă compozită cu capăt floare (Anchor Spikes).

6.3.6.1. Etapele consolidării grinzii RL-2W-A

Înainte de începerea consolidării se impune confecționarea ancorajelor. Procedul este același cu cel descris la grinda R-2W-A.



Umplerea găurilor cu rășină și introducerea ancorajelor



Răsfirarea țesăturii din capătul ancorajului și impregnarea ei



Aplicarea rășinii pe suprafața betonului



Aplicarea țesăturii longitudinale și impregnarea ei prin roluire

Figura 6.20. Consolidarea cu țesătură din fibre de carbon aplicată pe fețele laterale și ancorată la capete cu tije compozite cu capăt floare – RL-2W-A

Consolidarea grinzii din beton armat cu țesătură din fibre de carbon aplicată pe fețele laterale ale grinzii și ancorată la capete cu tije compozite cu capăt floare, presupune parcurgerea următorilor pași (prezentați în figura 6.20.):

- realizarea găurilor pentru ancoraje, $h=100$ mm, $d=14$ mm;
- curățarea suprafeței betonului prin șlefuire mecanică pentru înlăturarea laptelui de ciment și nivelare,
- aspirarea suprafeței și suflarea cu aer comprimat cu scopul de a elimina praful și impuritățile din porii betonului și din găurile pentru ancoraje,
- măsurarea, tăierea și curățarea cu diluant (Colma-Cleaner) a țesăturii din fibre de carbon;
- umplerea găurilor cu rășină și introducerea prin rotire a tijei ancorajului în gaură,
- răsfirarea țesăturii libere din capătul tijei ancorajului și impregnarea ei prin roluire,
- aplicarea rășinii epoxidice pe suprafața suport,
- așezarea primei fâșii de țesătură peste rășină și impregnarea acesteia prin apăsarea cu o rolă în lungul fibrelor,
- suplimentarea cu rășină și aplicarea celei de-a doua fâșii de țesătură urmată de impregnarea acesteia prin roluire în lungul fibrelor,

- lăsarea pentru întărire minim 7 zile înainte de testare.

6.3.6.2. Încercarea grinzii RL-2W-A

Înainte de încercare s-au lipit 4 timbre tensiometrice pe materialul compozit pe aceeași fibră din partea de jos a țesăturii (două timbre în dreptul ancorajelor de capăt, G1 și G4, un timbru în zona de mijloc a grinzii, G2, și încă un timbru, G3, în dreptul zonei de descărcare a forței verticale, în dreapta).

Elementul RL-2W-A este prezentat gata pentru încercare în figura 6.21.

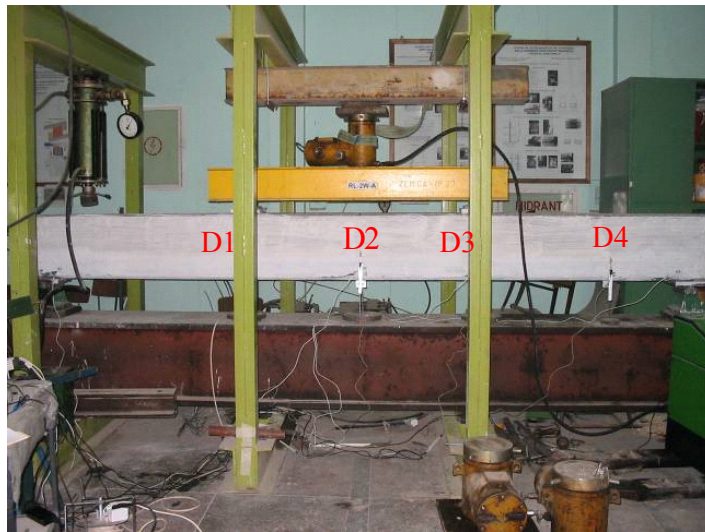


Figura 6.21. Grinda RL-2W-A pregătită pentru încercare

Forța verticală aplicată conform principiului de încercare prezentat anterior este monoton crescătoare. Treptele de încărcare sunt de câte 10 kN până la valoarea maximă corespunzătoare ruperii elementului. Cedarea elementului s-a realizat prin dezlipirea țesăturii, planul de alunecare fiind în interiorul compozitului, la o valoare a forței verticale $F_{max} = 161$ kN. Prima fisură a apărut când forța verticală a atins valoarea de 68.5 kN moment în care captorul de deplasare D2 a înregistrat o deformație de 4,85 mm.



Figura 6.22. Grinda RL-2W-A după încercare



Figura 6.23. Grinda RL-2W-A - modul de cedare

6.3.7. Elementul R-2S-W

Elementul R-2S-W este realizat similar cu RB2 (cu armătura longitudinală de rezistență din mijloc tăiată pentru a simula o eventuală deteriorare a grinzii). Astfel în zona întinsă sunt două bare din oțel cu diametrul $\varnothing 16$.

Dimensiunile elementului rămân neschimbate.

Grinda s-a consolidat impunând o capacitate maximă de 160 kN, astfel compozitul utilizat a fost calculat pentru a asigura suplimentarea capacității portante

maxime de la 134 kN (cât a rezistat grinda martor RB2) la cel puțin valoarea impusă.

Necesarul de material compozit pentru R-2S-W s-a stabilit ca fiind format din două lamele de țesătură din fibre de carbon (SikaDur S512) cu lățimea de 50 mm și lungime de 3700 mm, aplicate pe două fețe opuse, inferioară și superioară, ale grinzii cu rășină epoxidică (SikaDur 30). Pe lângă aceasta mai e nevoie de 4 fâșii din țesătură de carbon (SikaWrap 230C) având dimensiunile 600x1400 mm, înfășurate pe direcție transversală, câte două la fiecare capăt al grinzii.

6.3.7.1. Etapele consolidării grinzii R-2S-W

Această soluție de consolidare a plecat de la un caz real, ca urmare a faptului că stâlpul de cadru ce urma a fi consolidat era alipit de alt cadru.

Întrucât spațiul îngust dintre cele două cadre nu permitea executarea corespunzătoare a consolidării nodului dintre parter și etajul 1, s-a adaptat cazul respectiv la grinda R-2S-W.

Astfel suprafața grinzii pe care s-a executat consolidarea nu a fost șlefuită, lipirea compozitelor realizându-se direct pe betonul brut. Prin urmare au fost săriți pașii referitori la șlefuirea betonului și aspirarea suprafeței pentru curățarea porilor.

S-a început cu aplicarea lamelor din fibre de carbon, astfel:

- măsurarea, tăierea și curățarea cu diluant (Colma-Cleaner) a lamelor din fibre de carbon;
- trasarea locului de aplicare a lamelor,
- aplicarea rășinii epoxidice (SikaDur 30) pe suprafața suport,
- aplicarea rășinii epoxidice (SikaDur 30) pe suprafața lamelor,
- așezarea și lipirea lamelor pe beton prin apăsare cu o rolă de cauciuc,
- curățarea rășinei în exces.

Urmează apoi pașii de aplicare a țesăturii din fibre de carbon, cu rol de ancorare pentru lamele:

- măsurarea, tăierea și curățarea cu diluant (Colma-Cleaner) a țesăturii din fibre de carbon;
- rotunjirea muchiilor grinzii în zona de aplicare a țesăturii ($R_{\min}=20$ mm),
- aplicarea unui strat de rășină epoxidică pe suprafața betonului,
- așezarea și impregnarea primei fâșii de țesătură cu lățimea de 600 mm, începând de la capătul lamelei spre mijloc; orientarea fibrelor din țesătură trebuie să fie perpendiculare pe direcția lamelei; înfășurarea țesăturii se face prin suprapunere de minim 200 mm;
- așezarea și impregnarea următoarei fâșii de țesătură cu lățimea de 600 mm în continuarea primei, formându-se la capetele grinzii o porțiune de 1200 mm cu țesătură înfășurată în jurul grinzii și peste lamele;
- lăsarea pentru întărire minim 7 zile înainte de testare.

6.3.7.2. Încercarea grinzii R-2S-W

Înainte de încercare s-au lipit 3 timbre tensiometrice pe lamela de la fața inferioară, dispuse pe aceeași fibră din mijlocul lamelei (un timbru G2 în zona de mijloc a grinzii și două timbre, G1 și G3, în dreptul zonelor de descărcare a forței verticale, în imediata vecinătate a țesăturii).

Elementul R-2S-W este prezentat gata pentru încercare în figura 6.24.

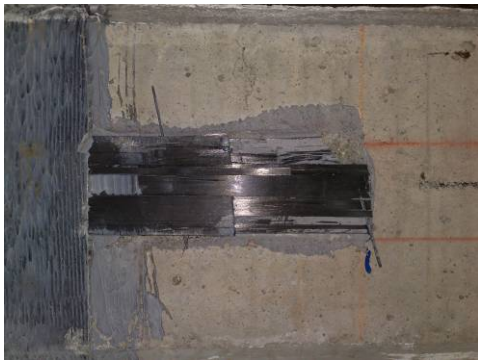


Figura 6.24. Grinda R-2S-W pregătită pentru încercare

Forța verticală aplicată conform principiului de încercare prezentat anterior este monoton crescătoare. Treptele de încărcare sunt de câte 10 kN până la valoarea maximă corespunzătoare ruperii elementului. Întrucât comportarea sistemului de consolidare a fost peste așteptări, testul a trebuit oprit din considerente tehnice când s-a ajuns la o forță verticală de cca. 250 kN. S-a înlocuit cricul cu altul mai mare și s-a continuat testarea grinzii. Cedarea elementului s-a realizat prin alunecarea parțială a lamelei concomitent cu forfecarea fibrelor din țesătură de-a lungul lamelei. Alunecarea bruscă a lamelei a condus la flambarea acesteia urmată de ruperea casantă, la o valoare a forței verticale $F_{\max} = 291$ kN. Prima fisură a apărut când forța verticală a atins valoarea de 38.5 kN moment în care captorul de deplasare D2 a înregistrat o deformație de 1,18 mm.



Figura 6.25. Grinda R-2S-W după încercare



Alunecarea parțială a lamelei



Forfecarea fibrelor din țesătură pe direcția lamelei



Ruperea lamelei din flambaj la alunecare

Figura 6.26. Grinda R-2S-W - modul de cedare

6.3.8. Elementul R-2S-W-2

Elementul R-2S-W-2 provine din grinda R-2S-W prin rotirea acesteia cu 180°. Astfel în zona întinsă sunt două bare din oțel cu diametrul $\varnothing 8$.

Dimensiunile elementului rămân neschimbate.

Fiind aceeași grindă cu R-2S-W și sistemul de consolidare este identic, diferența fiind dată de aria de armătură din zona întinsă care pentru elementul R-2S-W-2 este de aproape 4 ori mai mică decât cea a grinzii martor RB2 (și implicit a grinzii R-2S-W) și de aproape 6 ori mai mică decât a grinzii martor RB.

6.3.8.1. Încercarea grinzii R-2S-W-2

Înainte de încercare s-a lipit un timbru tensiometric pe lamela de la fața inferioară, dispus pe fibra din mijlocul lamelei, în zona de mijloc a grinzii.

Elementul R-2S-W-2 este prezentat gata pentru încercare în figura 6.27.



Figura 6.27. Grinda R-2S-W-2 pregătită pentru încercare

Forța verticală aplicată conform principiului de încercare prezentat anterior este monoton crescătoare. Treptele de încărcare sunt de câte 10 kN până la valoarea maximă corespunzătoare ruperii elementului. Cedarea elementului s-a realizat prin forfecarea fibrelor din țesătură de-a lungul lamelei. Alunecarea bruscă a lamelei a condus la flambarea acesteia urmată de ruperea casantă, la o valoare a forței verticale $F_{\max} = 119$ kN.



Figura 6.28. Grinda R-2S-W-2 după încercare



Forfecarea fibrelor din țesătură pe direcția Ruperea lamelei din flambaj la alunecare

Figura 6.29. Grinda R-2S-W-2 - modul de cedare

6.3.9. Elementul R-2NSMS

Elementul R-2NSMS este realizat similar cu RB2 (cu armătura longitudinală de rezistență din mijloc tăiată pentru a simula o eventuală deteriorare a grinzii). Astfel în zona întinsă sunt două bare din oțel cu diametrul $\varnothing 16$.

Dimensiunile elementului rămân neschimbate.

Grinda s-a consolidat impunând o capacitate maximă de 160 kN, astfel compozitul utilizat a fost calculat pentru a asigura suplimentarea capacității portante maxime de la 134 kN (cât a rezistat grinda martor RB2) la cel puțin valoarea impusă.

Necesarul de material compozit pentru R-2NSMS din calcul a rezultat ca fiind de două lamele din fibre de carbon (SikaDur S512) așezate în șlițuri tăiate în beton pe fața inferioară a grinzii, lamele cu lățimea de 20 mm și lungime de 3700 mm.

Lipirea lamelor se face prin înglobarea lor în rășină epoxidică bicomponentă (SikaDur 30) introdusă în prealabil în șlițurile tăiate.

6.3.9.1. Etapele consolidării grinzii R-2NSMS

Consolidarea grinzii din beton armat cu lamele din fibre de carbon aplicate în șlițuri tăiate în beton pe fața inferioară a grinzii (sistemul Near Surface Mounted Strenghtening), presupune parcurgerea următorilor pași (prezentați în figura 6.30.):

- realizarea șanțurilor în beton – dimensiuni recomandate:

$$h_{\text{gaură}} = h_{\text{lamelă}} + 2.5 * b_{\text{lamelă}} = 20 + 2.5 * 1.2 = 23\text{mm}$$

$$b_{\text{gaură}} = 6 * b_{\text{lamelă}} = 6 * 1.2 = 7.2\text{mm}$$

Din considerente tehnologice, dimensiunea finală a șlițurilor s-a executat de 6x23 mm.

- aspirarea șlițurilor și suflarea cu aer comprimat cu scopul de a elimina praful și impuritățile din porii betonului,
- măsurarea, tăierea și curățarea cu diluant (Colma-Cleaner) a lamelor din fibre de carbon;
- umplerea șlițurilor cu rășină prin apăsare cu șpaclul pentru o aderență cât mai bună cu betonul și eliminarea rășinii în exces,
- introducerea lamelor în șlițuri prin înglobarea lor în rășină,
- curățarea rășinii dislocate de lamele și nivelarea cu șpaclul,
- lăsarea pentru întărire minim 7 zile înainte de testare.



Tăierea șlițurilor în beton și aspirarea lor



Umplerea șlițurilor cu rășină



Înglobarea lamelei în rășina din șlițul
pretăiat



Nivelarea suprafeței cu șpaclul

Figura 6.30. Consolidarea cu lamele din fibre de carbon aplicate în șlițuri tăiate în beton pe fața inferioară a grinzii – R-2NSMS

6.3.9.2. Încercarea grinzii R-2NSMS

Înainte de încercare s-au lipit 2 timbre tensiometrice, G1 și G2, pe cele două lamele în zona de mijloc a grinzii.

Elementul R-2NSMS este prezentat gata pentru încercare în figura 6.31.

Forța verticală aplicată conform principiului de încercare prezentat anterior este monoton crescătoare. Treptele de încărcare sunt de câte 10 kN până la valoarea maximă corespunzătoare ruperii elementului. Cedarea elementului s-a realizat prin ruperea lamelor și distrugerea betonului în zona comprimată, la o valoare a forței verticale $F_{max} = 201$ kN. Prima fisură a apărut când forța verticală a atins valoarea de 58.5 kN moment în care captorul de deplasare D2 a înregistrat o deformație de 3,40 mm.

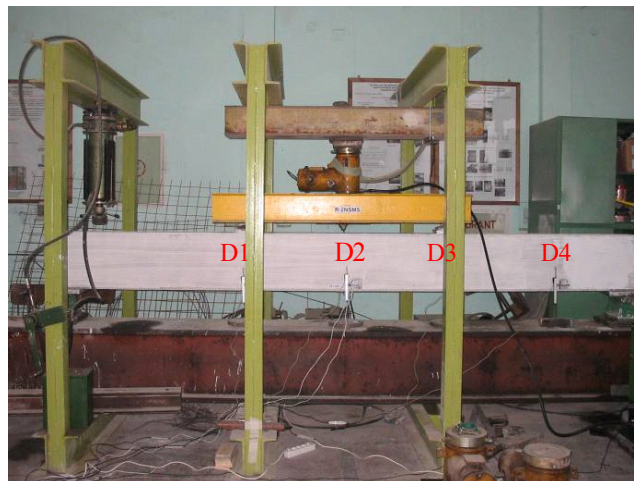


Figura 6.31. Grinda R-2NSMS pregătită pentru încercare



Figura 6.32. Grinda R-2NSMS după încercare



Ruperea lamelei



Cedarea betonului în zona comprimată

Figura 6.33. Grinda R-2NSMS - modul de cedare

6.3.10. Elementul R-1S-0

Elementul R-1S-0 este realizat similar cu RB2 (cu armătura longitudinală de rezistență din mijloc tăiată pentru a simula o eventuală deteriorare a grinzii). Astfel în zona întinsă sunt două bare din oțel cu diametrul $\varnothing 16$.

Dimensiunile elementului rămân neschimbate.

Pentru a avea un reper de comparație toate grinzile s-au consolidat impunând o capacitate maximă de 160 kN, astfel compozitul utilizat s-a calculat pentru a asigura suplimentarea capacității portante maxime a elementelor de la 134 kN (cât a rezistat grinda martor RB2) la cel puțin valoarea impusă.

Necesarul de material compozit pentru R-1S-0 din calcul a rezultat ca fiind o lamelă din fibre de carbon (SikaDur S512) cu lățimea de 50 mm și lungime de 3700 mm, aplicată pe fața inferioară a grinzii cu rășină epoxidică (SikaDur 30).

6.3.10.1. Etapele consolidării grinzii R-1S-0

Consolidarea grinzii din beton armat cu lamelă din fibre de carbon presupune parcurgerea următorilor pași:

- curățarea suprafeței betonului prin șlefuire mecanică pentru înlăturarea laptelui de ciment și nivelare,
- aspirarea suprafeței și suflarea cu aer comprimat cu scopul de a elimina praful și impuritățile din porii betonului,
- măsurarea, tăierea și curățarea cu diluant (Colma-Cleaner) a lamelei din fibre de carbon,
- trasarea locului de aplicare a lamelei,
- aplicarea rășinii epoxidice (SikaDur 30) pe suprafața suport,
- aplicarea rășinii epoxidice (SikaDur 30) pe lamelă,
- așezarea și lipirea lamelei pe beton prin apăsare cu o rolă de cauciuc,
- curățarea rășinei în exces.
- lăsarea pentru întărire minim 7 zile înainte de testare.

6.3.10.2. Încercarea grinzii R-1S-0

Înainte de încercare s-au lipit 2 timbre tensiometrice pe lamelă dispuse pe aceeași fibră din mijlocul acesteia (un timbru G1 în zona de mijloc a grinzii și un timbru G2 în dreptul zonei de descărcare a forței verticale, în dreapta).

Elementul R-1S-0 este prezentat gata pentru încercare în figura 6.34.

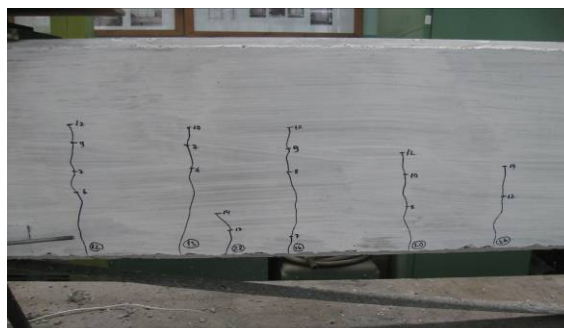


Figura 6.34. Grinda R-1S-0 pregătită pentru încercare



Figura 6.35. Grinda R-1S-0 după încercare

Forța verticală aplicată conform principiului de încercare prezentat anterior este monoton crescătoare. Treptele de încărcare sunt de câte 10 kN până la valoarea maximă corespunzătoare ruperii elementului. Cedarea elementului s-a realizat prin dezlipirea lamelei de pe suprafața suport, la o valoare a forței verticale $F_{\max} = 155$ kN. Prima fisură a apărut când forța verticală a atins valoarea de 48.5 kN moment în care captorul de deplasare D2 a înregistrat o deformație de 2,09 mm.



Dezlipirea lamelei de pe suprafața suport

Figura 6.36. Grinda R-1S-0 - modul de cedare

6.3.11. Elementul R-1S

Elementul R-1S este realizat similar cu RB2 (cu armătura longitudinală de rezistență din mijloc tăiată pentru a simula o eventuală deteriorare a grinzii). Astfel în zona întinsă sunt două bare din oțel cu diametrul $\varnothing 16$.

Dimensiunile elementului rămân neschimbate.

Pentru a avea un reper de comparație toate grinzile s-au consolidat impunând o capacitate maximă de 160 kN, astfel compozitul utilizat s-a calculat

pentru a asigura suplimentarea capacității portante maxime a elementelor de la 134 kN (cât a rezistat grinda martor RB2) la cel puțin valoarea impusă.

Necesarul de material compozit pentru R-1S din calcul a rezultat ca fiind o lamelă din fibre de carbon (SikaDur S512) cu lățimea de 50 mm și lungime de 3700 mm, aplicată pe fața inferioară a grinzii cu rășină epoxidică (SikaDur 30) și ancorată la capete cu plăcuțe metalice fixate în beton cu 6 buloane cu diametrul de 10 mm pentru fiecare plăcuță. În urma testelor la smulgere s-a ales rășina de la HILTI pentru ancorarea chimică a buloanelor.



Figura 6.37. Detaliu ancoraj – grinda R-1S

6.3.11.1. Etapele consolidării grinzii R-1S

Consolidarea grinzii din beton armat cu lamelă din fibre de carbon și ancorată la capete cu plăcuțe metalice fixate în beton, presupune parcurgerea următorilor pași:

- curățarea suprafeței betonului prin șlefuire mecanică pentru înlăturarea laptelui de ciment și nivelare,
- șlefuirea plăcuțelor metalice pe fața în contact cu rășina pentru o mai buna aderență,
- realizare găurilor pentru buloanele de ancorare (2x6 găuri), cu diametrul de 12 mm și adâncime de 100 mm;
- aspirarea suprafeței și suflarea cu aer comprimat cu scopul de a elimina praful și impuritățile din porii betonului și din găurile de ancorare,
- măsurarea, tăierea și curățarea cu diluant (Colma-Cleaner) a lamelei din fibre de carbon,
- trasarea locului de aplicare a lamelei și a plăcuțelor metalice,
- aplicarea rășinii epoxidice (SikaDur 30) pe suprafața suport,
- aplicarea rășinii epoxidice (SikaDur 30) pe lamelă,
- așezarea și lipirea lamelei pe beton prin apăsare cu o rolă de cauciuc,
- curățarea rășinii în exces,
- umplerea găurilor cu rășina de ancorare,
- introducerea buloanelor printr-o mișcare continuă de apăsare și rotire,
- aplicarea rășinii în zona ancorajelor și pe fața șlefuită a plăcuțelor metalice,
- potrivirea plăcuțelor pe buloane,

- după întărirea rășinii de ancorare buloanele se strâng cu cheia dinamometrică, reglând momentul de torsiune la 40 Nm;
- lăsarea pentru întărire minim 7 zile înainte de testare.

6.3.11.2. Încercarea grinzii R-1S

Înainte de încercare s-au lipit 3 timbre tensiometrice pe lamelă dispuse pe aceeași fibră din mijlocul acesteia (un timbru G1 în zona de mijloc a grinzii, un timbru G2 în dreptul zonei de descărcare a forței verticale, în dreapta și un timbru G3 înaintea plăcuței metalice de ancorare din partea dreaptă).

Elementul R-1S este prezentat gata pentru încercare în figura 6.38.

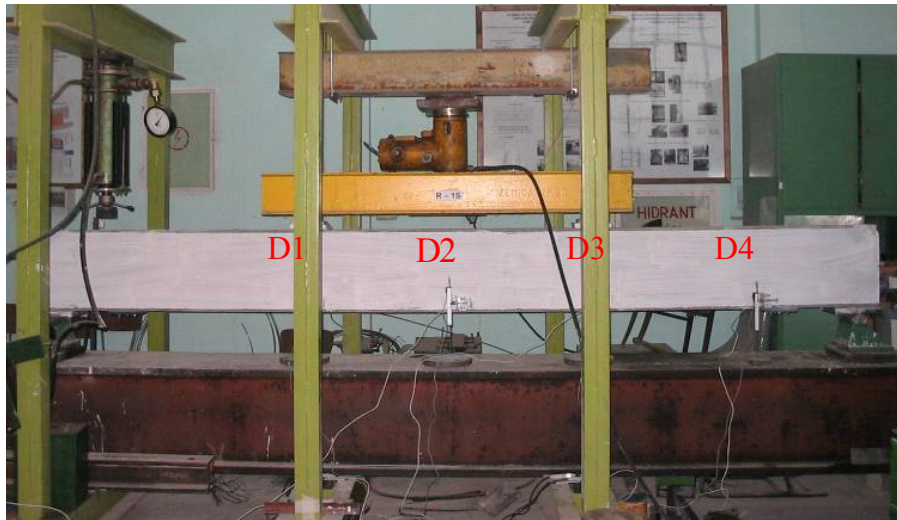


Figura 6.38. Grinda R-1S pregătită pentru încercare

Forța verticală aplicată conform principiului de încercare prezentat anterior este monoton crescătoare. Treptele de încărcare sunt de câte 10 kN până la valoarea maximă corespunzătoare ruperii elementului. Cedarea elementului s-a realizat prin dezlipirea lamelei în ancoraje urmată de distrugerea betonului în zona comprimată și în ultimă instanță smulgerea compozitului din ancoraj simultan cu ruperea lamelei, la o valoare a forței verticale $F_{\max} = 224$ kN. Prima fisură a apărut când forța verticală a atins valoarea de 48.5 kN moment în care captorul de deplasare D2 a înregistrat o deformație de 1,80 mm.



Figura 6.39. Grinda R-1S după încercare. Modurile de cedare

6.3.12. Elementul R-1S-AS

Elementul R-1S-AS este realizat similar cu RB2 (cu armătura longitudinală de rezistență din mijloc tăiată pentru a simula o eventuală deteriorare a grinzii). Astfel în zona întinsă sunt două bare din oțel cu diametrul $\varnothing 16$.

Dimensiunile elementului rămân neschimbate.

Pentru a avea un reper de comparație toate grinzile s-au consolidat impunând o capacitate maximă de 160 kN, astfel compozitul utilizat s-a calculat pentru a asigura suplimentarea capacității portante maxime a elementelor de la 134 kN (cât a rezistat grinda martor RB2) la cel puțin valoarea impusă.

Necesarul de material compozit pentru R-1S-AS din calcul a rezultat ca fiind o lamelă din fibre de carbon (SikaDur S512) cu lățimea de 50 mm și lungime de 3700 mm, aplicată pe fața inferioară a grinzii cu rășină epoxidică (SikaDur 30) și ancorată la capete cu câte două tije compozite cu capăt floare. Pentru a crește randamentul ancorajului, la capetele lamelor s-a tăiat în beton un șanț cu lățimea de 70 mm și lung de 150 mm, înclinat la 90° față de planul de aplicare a lamelei.

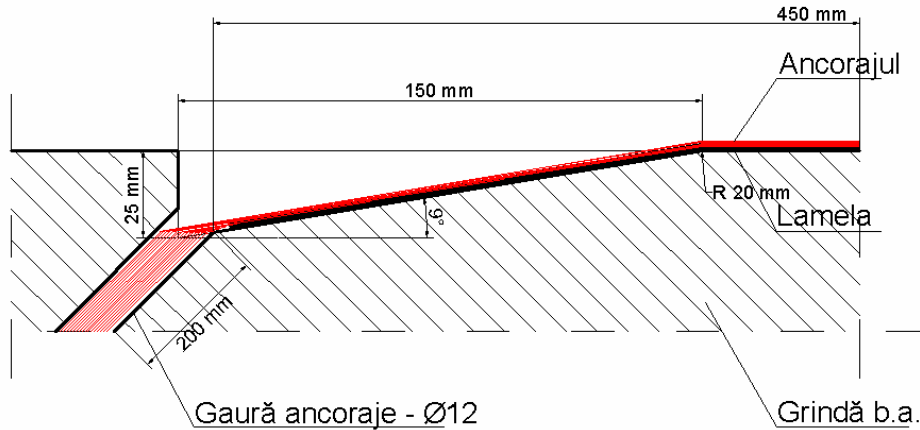


Figura 6.40. Detaliul zonei de ancorare – grinda R-1S-AS

6.3.12.1. Etapele consolidării grinzii R-1S-AS

Înainte de începerea consolidării se impune confecționarea ancorajelor din țesătură din fibre de carbon. Avantajul acestora este că valorifică deșeurile de țesătură fiind nevoie de fâșii cu dimensiunea 100x650 mm.

Consolidarea grinzii din beton armat cu lamelă din fibre de carbon și ancorată la capete cu câte două tije compozite cu capăt floare, presupune parcurgerea următorilor pași:

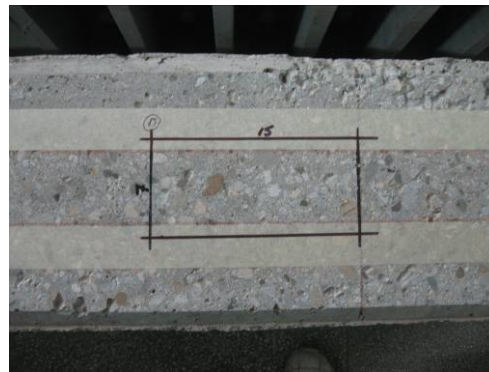
- realizarea șanțurilor de capăt în plan înclinat cu 90° față de planul lamelei,
- executarea găurilor pentru ancorajele cu tije compozite și capăt floare (2x2 găuri cu diametrul de 12 mm și adâncimea de 205 mm) și pentru ancorajele provizorii (2x6 găuri cu diametrul de 8 mm și adâncimea de 100 mm);
- curățarea suprafeței betonului prin șlefuire mecanică pentru înlăturarea laptelui de ciment și nivelare,
- aspirarea suprafeței și suflarea cu aer comprimat cu scopul de a elimina praful și impuritățile din porii betonului și din găurile de ancorare,
- măsurarea, tăierea și curățarea cu diluant (Colma-Cleaner) a lamelei din fibre de carbon,
- trasarea locului de aplicare a lamelei,
- aplicarea rășinii epoxidice (SikaDur 30) pe suprafața suport,
- aplicarea rășinii epoxidice (SikaDur 30) pe lamelă,
- așezarea și lipirea lamelei pe beton prin apăsare cu o rolă de cauciuc,
- fixarea provizorie în 2 puncte la fiecare capăt a lamelei cu plăcuțe metalice ancorate în beton prin conexpanduri pentru a-i menține curbura la capete,
- curățarea rășinii în exces,
- lăsarea 24 de ore pentru întărirea sistemului,
- înlăturarea plăcuțelor de fixare provizorie și a buloanelor de prindere,
- umplerea găurilor de ancorare cu rășină (SikaDur 330),
- aplicarea rășinii (SikaDur 330) pe lamelă la capăt, în lungime de 450 mm;
- introducerea tije compozite în găuri printr-o mișcare continuă de apăsare și rotire,

118 PROGRAMUL EXPERIMENTAL - 6

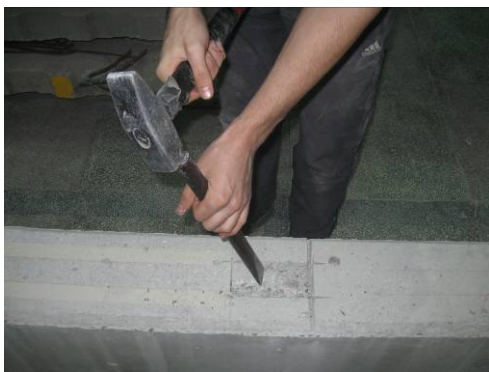
- întinderea țesăturii din capătul tijelor compozite peste lamelă și impregnarea lor prin roluire;
- umplerea șanțului cu rășină,
- lăsarea pentru întărire minim 7 zile înainte de testare.



Confecționarea ancorajelor



Localizarea și marcarea șanțului de la capătul lamelei



Realizarea planului înclinat al șanțului



Găurile de ancorare și buloanele de prindere provizorie (conexpanduri)



Aplicarea rășinii epoxidice



Fixarea provizorie a capătului lamelei



Înlăturarea plăcuțelor metalice de fixare după întărirea rășinii



Curățarea găurilor prin periere și aspirarea prafului



Aplicarea primului ancoraj pe capăt



Aplicarea celui de-al doilea ancoraj pe capăt

Figura 6.41. Consolidarea cu lamelă ancorată la capăt cu Anchor Spikes – R-1S-AS

6.3.12.2. Încercarea grinzii R-1S-AS

Înainte de încercare s-au lipit 2 timbre tensiometrice pe lamelă dispuse pe aceeași fibră din mijlocul acesteia (un timbru G1 în zona de mijloc a grinzii și un timbru G2 în dreptul zonei de descărcare a forței verticale, în dreapta).

Elementul R-1S-AS este prezentat gata pentru încercare în figura 6.42.



Figura 6.42. Grinda R-1S-AS pregătită pentru încercare



Figura 6.43. Grinda R-1S-AS după încercare

Forța verticală aplicată conform principiului de încercare prezentat anterior este monoton crescătoare. Treptele de încărcare sunt de câte 10 kN până la valoarea maximă corespunzătoare ruperii elementului. Cedarea elementului s-a realizat prin dezlipirea lamelei în ancoraje urmată de alunecarea și smulgerea compozitului din ancoraje, la o valoare a forței verticale $F_{\max} = 181$ kN. Prima fisură a apărut când forța verticală a atins valoarea de 58.5 kN moment în care captorul de deplasare D2 a înregistrat o deformație de 3,29 mm.



Dezlipirea lamelei și smulgerea din ancoraj

Figura 6.44. Grinda R-1S-AS - modul de cedare

6.3.13. Elementul R-1S-SP

Elementul R-1S-SP este realizat similar cu RB2 (cu armătura longitudinală de rezistență din mijloc tăiată pentru a simula o eventuală deteriorare a grinzii). Astfel în zona întinsă sunt două bare din oțel cu diametrul $\varnothing 16$.

Dimensiunile elementului rămân neschimbate.

Pentru a avea un reper de comparație toate grinzile s-au consolidat impunând o capacitate maximă de 160 kN, astfel compozitul utilizat s-a calculat pentru a asigura suplimentarea capacității portante maxime a elementelor de la 134 kN (cât a rezistat grinda martor RB2) la cel puțin valoarea impusă.

Necesarul de material compozit pentru R-1S-SP din calcul a rezultat ca fiind o lamelă din fibre de carbon (SikaDur S512) cu lățimea de 50 mm și lungime de 3700 mm, aplicată pe fața inferioară a grinzii cu rășină epoxidică (SikaDur 30) și ancorată la capete cu câte trei plăcuțe metalice ($h=10$ mm, $b=40$ mm, $l=70$ mm) prinse în beton cu conexpanduri M8 (câte două de fiecare plăcuță). Distanța dintre plăcuțele metalice este de 150 mm interax. Pentru a crește randamentul ancorajului, la capete lamelelor s-a tăiat în beton un șanț cu lățimea de 70 mm și lung de 150 mm, înclinat la 9° față de planul de aplicare a lamelei (la fel ca la elementul R-1S-AS).

6.3.13.1. Etapele consolidării grinzii R-1S-SP

Consolidarea grinzii din beton armat cu lamelă din fibre de carbon și ancorată la capete cu trei plăcuțe metalice prinse în beton cu conexpanduri, presupune parcurgerea următorilor pași:

- realizarea șanțurilor de capăt în plan înclinat cu 9° față de planul lamelei,
- executarea găurilor pentru conexpandurile de ancorare (2x6 găuri cu diametrul de 10 mm și adâncimea de 100 mm);
- curățarea suprafeței betonului prin șlefuire mecanică pentru înlăturarea laptelui de ciment și nivelare,
- șlefuirea plăcuțelor metalice pe fața care intră în contact cu rășina pentru o mai bună aderență,

122 PROGRAMUL EXPERIMENTAL - 6

- aspirarea suprafeței și suflarea cu aer comprimat cu scopul de a elimina praful și impuritățile din porii betonului și din găurile de ancorare,
- măsurarea, tăierea și curățarea cu diluant (Colma-Cleaner) a lamelei din fibre de carbon,
- trasarea locului de aplicare a lamelei,
- aplicarea rășinii epoxidice (SikaDur 30) pe suprafața suport,
- aplicarea rășinii epoxidice (SikaDur 30) pe lamelă,
- așezarea și lipirea lamelei pe beton prin apăsare cu o rolă de cauciuc,
- fixarea în 3 puncte la fiecare capăt a lamelei cu plăcuțe metalice ancorate în beton pentru a-i menține curbura la capete,
- curățarea rășinii în exces,
- lăsarea pentru întărire minim 7 zile înainte de testare.



Conexpandurile de ancorare a plăcuțelor metalice



Plăcuțele metalice șlefuite



Șanțul de la capătul lamelei și dispunerea conexpandurilor



Aplicarea rășinii epoxidice



Figura 6.45. Consolidarea cu lamelă ancorată la capăt cu plăcuțe metalice – R-1S-SP

6.3.13.2. Încercarea grinzii R-1S-SP

Înainte de încercare s-au lipit 3 timbre tensiometrice pe lamelă dispuse astfel: două timbre pe aceeași fibră din mijlocul lamelei (un timbru G1 în zona de mijloc a grinzii și un timbru G3 în dreptul zonei de descărcare a forței verticale, în dreapta) și un timbru G2 în zona de mijloc a grinzii pe fibra marginală.

Elementul R-1S-SP este prezentat gata pentru încercare în figura 6.46.

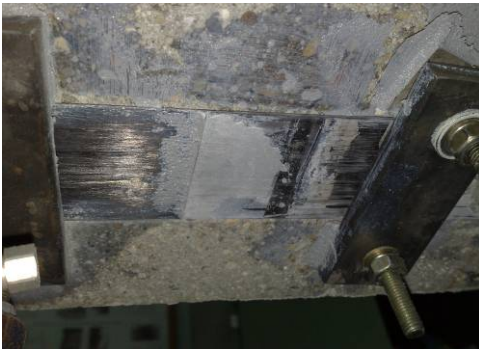


Figura 6.46. Grinda R-1S-SP pregătită pentru încercare



Figura 6.47. Grinda R-1S-SP după încercare

Forța verticală aplicată conform principiului de încercare prezentat anterior este monoton crescătoare. Treptele de încărcare sunt de câte 10 kN până la valoarea maximă corespunzătoare ruperii elementului. Cedarea elementului s-a realizat prin dezlipirea lamelei în ancoraj urmată de alunecarea și smulgerea compozitului din ancoraj producând flambarea și ruperea lamelei, la o valoare a forței verticale $F_{\max} = 177$ kN. Prima fisură a apărut când forța verticală a atins valoarea de 48.5 kN moment în care captorul de deplasare D2 a înregistrat o deformație de 2,36 mm.



Dezlipirea lamelei și smulgerea din ancoraj



Ruperea lamelei după smulgerea din ancorajul opus

Figura 6.48. Grinda R-1S-SP - modul de cedare

6.3.14. Elementul R-1S-CA

Elementul R-1S-CA este realizat similar cu RB2 (cu armătura longitudinală de rezistență din mijloc tăiată pentru a simula o eventuală deteriorare a grinzii). Astfel în zona întinsă sunt două bare din oțel cu diametrul $\varnothing 16$.

Dimensiunile elementului rămân neschimbate.

Pentru a avea un reper de comparație toate grinzile s-au consolidat impunând o capacitate maximă de 160 kN, astfel compozitul utilizat s-a calculat pentru a asigura suplimentarea capacității portante maxime a elementelor de la 134 kN (cât a rezistat grinda martor RB2) la cel puțin valoarea impusă.

Necesarul de material compozit pentru R-1S-CA din calcul a rezultat ca fiind o lamelă din fibre de carbon (SikaDur S512) cu lățimea de 50 mm și lungime de 3700 mm, aplicată pe fața inferioară a grinzii cu buloane ancorate chimic în beton și distribuite pe toată lungimea lamelei. Diametrul buloanelor este de 8 mm iar distanța dintre ele este de 85 mm rezultând un număr de 38 de buloane pe toată lungimea lamelei. Întrucât lamela se comportă foarte bine doar la eforturi de întindere în lungul fibrelor a fost necesară consolidarea acesteia la presiune pe gaură. În urma testelor făcute și prezentate în capitolul 4 s-a ales ca metodă de consolidare a lamelei înfășurarea cu țesătură din fibre de sticlă (SikaWrap 230G) în dublu strat astfel încât direcția fibrelor de sticlă din țesătură să fie perpendiculară pe direcția fibrelor de carbon din lamelă.



Figura 6.49. Detaliu ancoraj – grinda R-1S-CA

6.3.14.1. Etapele consolidării grinzii R-1S-CA

Înainte de începerea consolidării efective a grinzii din beton armat, s-a realizat consolidarea lamelei la presiune pe gaură prin înfășurare cu țesătură din fibre de sticlă (SikaWrap 230G) în dublu strat.

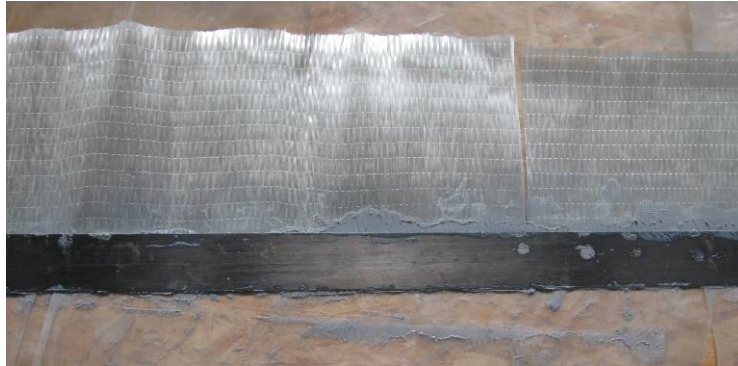


Figura 6.50. Consolidarea lamei la presiune pe gaură

Consolidarea grinzii din beton armat cu lamelă din fibre de carbon și ancorată cu buloane prinse chimic în beton și distribuite pe toată lungimea lamei, presupune parcurgerea următorilor pași:

- executarea găurilor pentru ancorajele cu buloane (38 găuri cu diametrul de 10 mm și adâncimea de 100 mm),
- realizarea găurilor în lamelă,
- aspirarea găurilor de ancorare și suflarea cu aer comprimat cu scopul de a elimina praful și impuritățile,
- umplerea găurilor cu rășina de ancorare (SikaDur 330),
- introducerea buloanelor în găuri printr-o mișcare continuă de apăsare și rotire,
- curățarea rășinii dislocuite prin introducerea buloanelor,
- potrivirea și așezarea lamei în bulone,
- lăsarea rășinii de ancorare să facă priză,
- filetarea și strângerea piulițelor prevăzute cu șaibe.

6.3.14.2. Încercarea grinzii R-1S-CA

Înainte de încercare s-au lipit 3 timbre tensiometrice pe lamelă dispuse astfel: două timbre pe aceeași fibră de margine (un timbru G2 în zona de mijloc a grinzii și un timbru G1 în dreptul zonei de descărcare a forței verticale, în stânga) și un timbru G3 pe fibra marginală opusă, în zona de mijloc.

Elementul R-1S-CA este prezentat gata pentru încercare în figura 6.51.

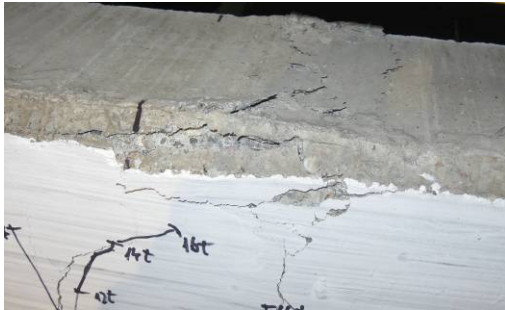


Figura 6.51. Grinda R-1S-CA pregătită pentru încercare

Forța verticală aplicată conform principiului de încercare prezentat anterior este monoton crescătoare. Treptele de încărcare sunt de câte 10 kN până la valoarea maximă corespunzătoare ruperii elementului. Cedarea elementului s-a realizat prin cedarea betonului în zona comprimată urmată de distrugerea lamelei în zona de mijloc, la o valoare a forței verticale $F_{max} = 213$ kN. Prima fisură a apărut când forța verticală a atins valoarea de 38.5 kN moment în care captorul de deplasare D2 a înregistrat o deformație de 2,14 mm.



Figura 6.52. Grinda R-1S-CA după încercare



Cedarea betonului în zona comprimată



Distrugerea lamelei la mijloc

Figura 6.53. Grinda R-1S-CA - modul de cedare

7. REZULTATE

7.1. Elementul martor RB

Diagrama forță-deplasare la nivelul captorului de deplasare D2 situat la mijlocul grinzii este dată în figura 7.1., în comparație cu diagrama obținută prin modelare numerică.

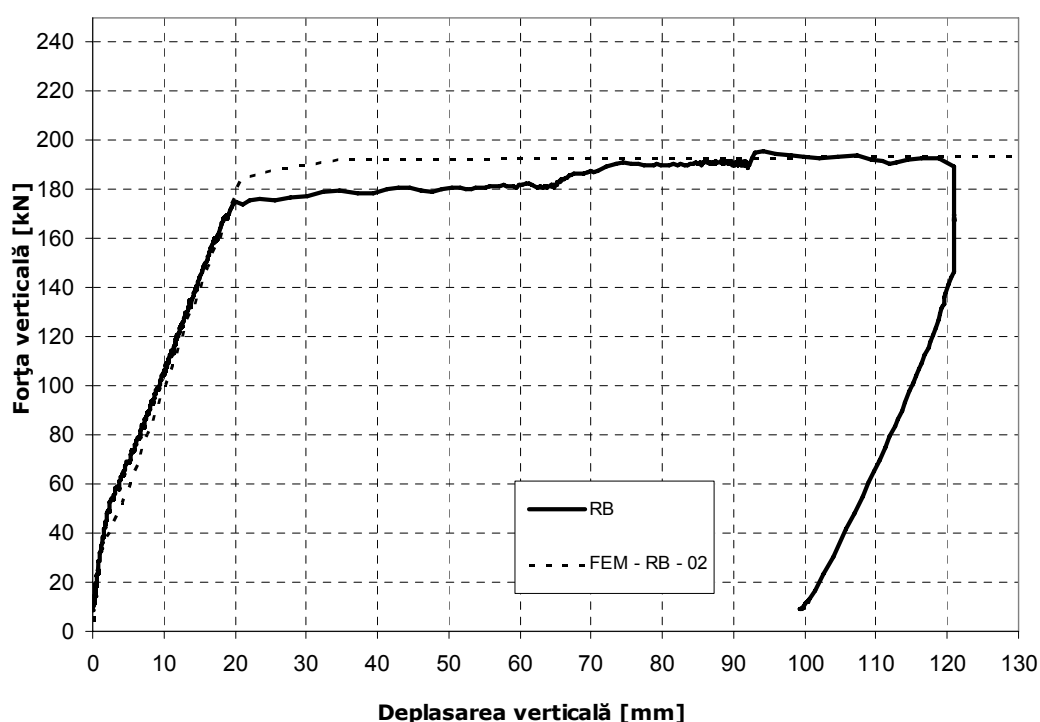


Figura 7.1. Diagrama forță-deplasare pentru grinda martor RB

Câteva dintre concluziile ce se desprind în urma încercării elementului martor RB și trasării diagramei forță-deplasare ar fi:

- pentru valori ale forței orizontale între 0 și 48.5 kN, valoare la care apar primele fisuri în grindă, comportarea elementului este cvasi-elastică, deplasările pe verticală menținându-se sub 2.25 mm;
- comportarea elastică a grinzii se consideră până la 40% din încărcarea maximă la care a rezistat aceasta, adică până la 78 kN când săgeata este de cca. 6.5 mm apărând tot mai multe fisuri de-a lungul grinzii;
- pe intervalul 78-170 kN al forței verticale comportarea elementului poate fi caracterizată ca și elasto-plastică, deplasările verticale amplificându-se astfel că se formează noi fisuri pe lângă extinderea celor deja dezvoltate;

- până la 196 kN armăturile longitudinale de rezistență intră în curgere, deplasarea orizontală crește tot mai mult permițând deschiderea fisurilor;
- la atingerea valorii de 196 kN se produce cedarea grinzii de beton armat prin exfolierea betonului în zona comprimată. Deplasarea maximă pe verticală a atins valoarea de 120.94 mm;
- se observă comportarea asemănătoare dintre modelul numeric și elementul real.

7.2. Elementul martor RB2

Diagrama forță-deplasare la nivelul captorului de deplasare D2 situat la mijlocul grinzii este dată în figura 7.2, în comparație cu diagramele obținute prin modelare numerică (FEM-RB2-01 – când se consideră doar două bare $\varnothing 16$ în zona întinsă - și FEM-RB2-02 - când se consideră în zona întinsă, pe lângă cele două bare $\varnothing 16$, și segmentele de armătură rămase după secționarea barei din mijloc) și grinda martor RB.

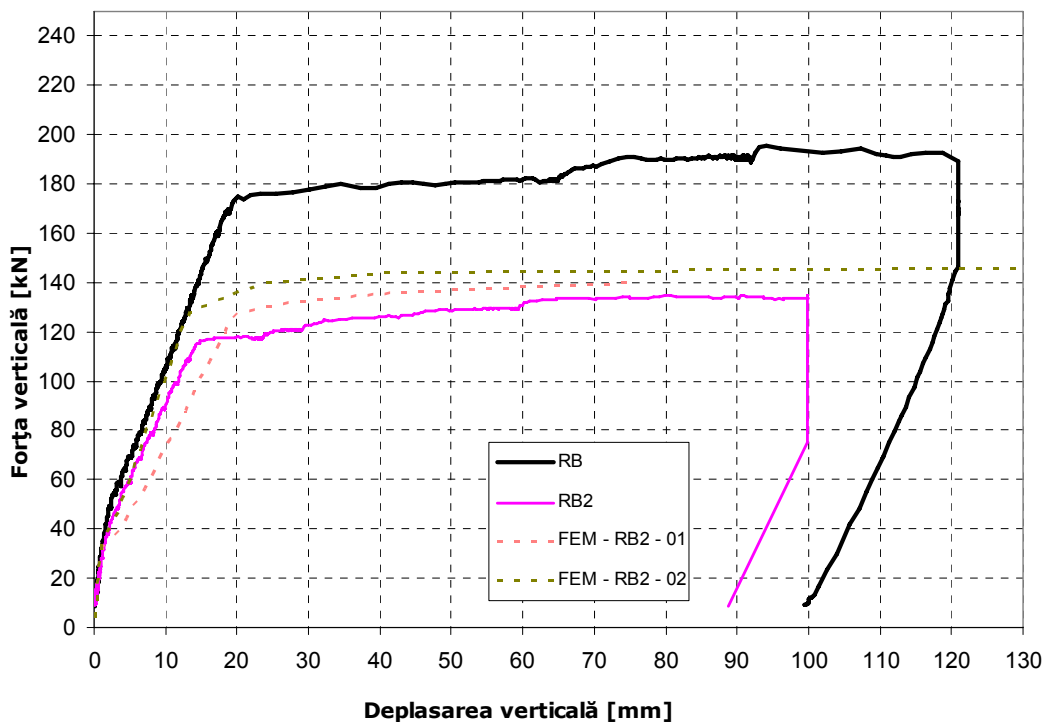


Figura 7.2. Diagramele forță-deplasare pentru grinzile RB2 și RB

Câteva dintre concluziile ce se desprind în urma încercării elementului martor RB2 și trasării diagramei forță-deplasare ar fi:

- pentru valori ale forței orizontale între 0 și 38.5 kN, valoare la care apare prima fisură în grindă, comportarea elementului este cvasi-elastică, deplasările pe verticală menținându-se sub 1.98 mm;

- comportarea elastică a grinzii se consideră până la 40% din încărcarea maximă la care a rezistat aceasta, adică până la 54 kN când săgeata este de circa 5 mm apărând tot mai multe fisuri de-a lungul grinzii;
- pe intervalul 54-110 kN al forței verticale comportarea elementului poate fi caracterizată ca și elasto-plastică, deplasările verticale amplificându-se astfel că se formează noi fisuri pe lângă extinderea celor deja dezvoltate;
- la 110 kN armăturile longitudinale de rezistență intră în curgere, deplasarea orizontală crește tot mai mult permițând deschiderea fisurilor, comportarea elementului fiind pur plastică;
- la atingerea valorii de 134 kN se produce ruperea grinzii de beton armat prin cedarea armăturii longitudinale de rezistență. Deplasarea maximă pe verticală a atins valoarea de 99.72 mm.

Din suprapunerea curbelor forță-deplasare ale celor două elemente martor se poate observa comportarea similară pe palierele elastic și elasto-plastic urmată de curgerea armăturii de rezistență care duce la creșterea din ce în ce mai mare a deplasării pe verticală în raport cu suplimentarea încărcării, ducând la o deformație remanentă a grinzii. De asemenea se observă diferența de rigiditate la curbele obținute prin modelare numerică, diferență dată de luarea în considerare a segmentelor de armătură rămase după secționarea barei din mijloc. Astfel rigiditatea elementului FEM-RB2-02 este mai mare decât a elementului FEM-RB2-01 și se suprapune peste rigiditatea grinzii martor RB.

7.3. Elementul R-2W

Diagrama forță-deplasare la nivelul captorului de deplasare D2 situat la mijlocul grinzii este dată în figura 7.3, în comparație cu diagramele obținute prin modelare numerică (FEM-R-2W-01 – când se consideră doar două bare Ø16 în zona întinsă - și FEM-R-2W-02 - când se consideră în zona întinsă, pe lângă cele două bare Ø16, și segmentele de armătură rămase după secționarea barei din mijloc) și grinda martor RB2.

Câteva dintre concluziile ce se desprind ca urmare a încercării elementului consolidat R-2W și trasării diagramei forță-deplasare ar fi:

- pentru valori ale forței orizontale între 0 și 56.5 kN, valoare la care apare prima fisură în grindă, comportarea elementului este cvasi-elastică, deplasările pe verticală menținându-se sub 3.21 mm;
- comportarea elastică a grinzii se consideră până la 40% din încărcarea maximă la care a rezistat aceasta, adică până la 66 kN când săgeata este de circa 6 mm apărând tot mai multe fisuri de-a lungul grinzii;
- pe intervalul 66-148 kN al forței verticale comportarea elementului poate fi caracterizată ca și elasto-plastică, deplasările verticale amplificându-se astfel că se formează noi fisuri pe lângă extinderea celor deja dezvoltate;
- la atingerea valorii de 166 kN se produce ruperea grinzii de beton armat prin desprinderea țesăturii din fibre de carbon de pe suprafața de beton. Deplasarea maximă pe verticală a atins valoarea de 49.09 mm.

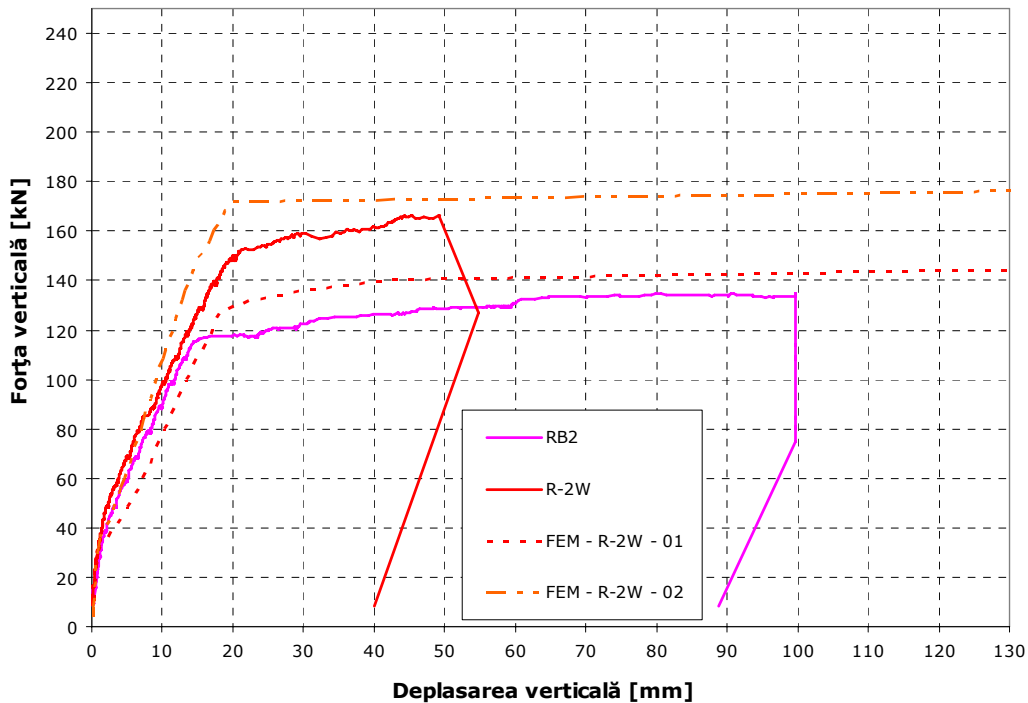


Figura 7.3. Diagramele forță-deplasare pentru grinzile R-2W și RB2

Din suprapunerea curbelor forță-deplasare ale celor două elemente, martor și consolidat, se poate observa comportarea similară pe palierele elastic și elasto-plastic. Se observă că materialul compozit a întârziat formarea fisurilor, acestea apărând la 56.5 kN față de 38.5 kN la grinda martor RB2.

Se observă diferența de rigiditate la curbele obținute prin modelare numerică, diferență dată de luarea în considerare a segmentelor de armătură rămase după secționarea barei din mijloc. Astfel rigiditatea elementului FEM-R-2W-02 este mai mare decât a elementului FEM-R-2W-01.

Obiectivul impus al capacității maxime de 160 kN a fost sensibil depășit cu 3.86%, dar compozitul mai avea rezerve de a prelua încărcări, cedarea apărând din cauza slabei aderențe între beton și țesătura din fibre de carbon (ceea ce a dus la dezlipirea țesăturii). Acest lucru putea fi evitat prin folosirea unor metode de ancorare a compozitului, prezentate în continuare.

7.4. Elementul R-2W-A

Diagrama forță-deplasare la nivelul captorului de deplasare D2 situat la mijlocul grinzii este dată în figura 7.4., în comparație cu diagrama elementului RB2.

Câteva dintre concluziile ce se desprind ca urmare a încercării elementului consolidat R-2W-A și trasării diagramei forță-deplasare ar fi:

- pentru valori ale forței orizontale între 0 și 48.5 kN, valoare la care apar primele fisuri în grindă, comportarea elementului este cvasi-elastică, deplasările pe verticală menținându-se sub 2.70 mm;

- comportarea elastică a grinzii se consideră până la 40% din încărcarea maximă la care a rezistat aceasta, adică până la 76 kN când săgeata este de circa 6 mm apărând tot mai multe fisuri de-a lungul grinzii;
- pe intervalul 76-140 kN al forței verticale comportarea elementului poate fi caracterizată ca și elasto-plastică, deplasările verticale amplificându-se astfel că se formează noi fisuri pe lângă extinderea celor deja dezvoltate;
- peste 140 kN avem un comportament plastic, deplasările crescând mult față de încărcare;
- la atingerea valorii de 191 kN se produce cedarea grinzii de beton armat prin dezlipirea țesăturii de pe suprafața suport și ruperea ei în imediata vecinătate a ancorajului. Deplasarea maximă pe verticală a atins valoarea de 69.32 mm.

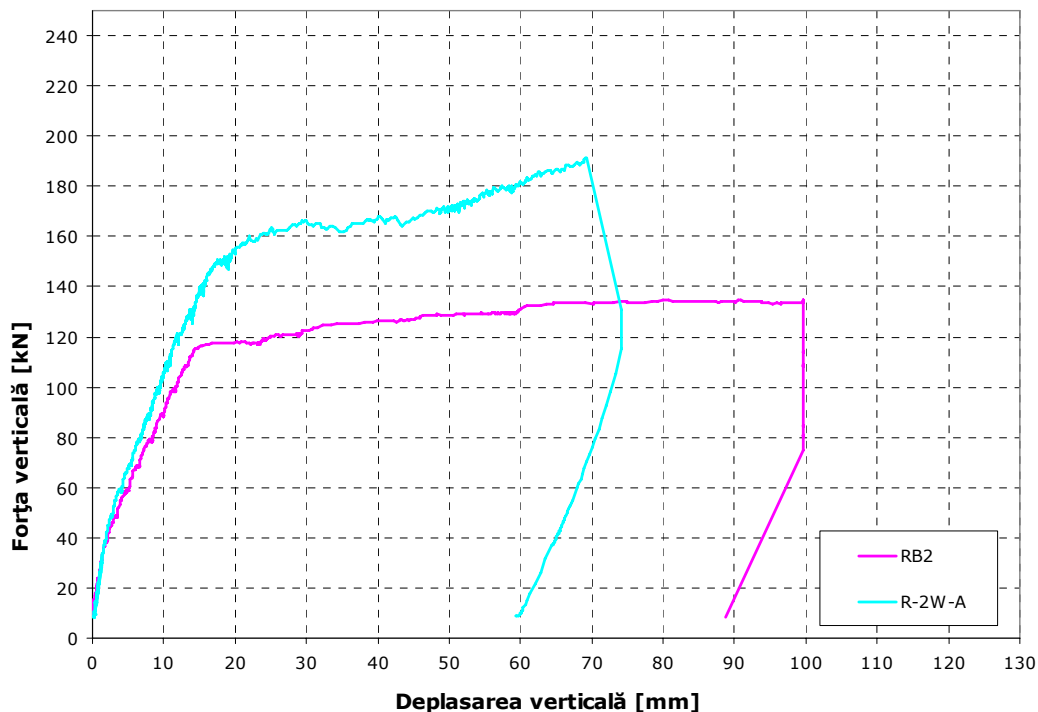


Figura 7.4. Diagramele forță-deplasare pentru grinzile R-2W-A și RB2

Din suprapunerea curbelor forță-deplasare ale celor două elemente, martor și consolidat, se poate observa comportarea similară pe palierele elastic și elasto-plastic. Se observă că materialul compozit a întârziat formarea fisurilor, acestea apărând la 48.5 kN față de 38.5 kN la grinda martor RB2.

Obiectivul impus al capacității maxime de 160 kN a fost depășit cu 19.5%.

7.5. Elementul R-2W-MA

Diagrama forță-deplasare la nivelul captorului de deplasare D2 situat la mijlocul grinzii este dată în figura 7.5., în comparație cu diagrama elementului RB2.



Figura 7.5. Diagramele forță-deplasare pentru grinzile R-2W-MA și RB2

Câteva dintre concluziile ce se desprind ca urmare a încercării elementului consolidat R-2W-MA și trasării diagramei forță-deplasare ar fi:

- pentru valori ale forței orizontale între 0 și 58.5 kN, valoare la care apar primele fisuri în grindă, comportarea elementului este cvasi-elastică, deplasările pe verticală menținându-se sub 4.45 mm;
- comportarea elastică a grinzii se consideră până la 40% din încărcarea maximă la care a rezistat aceasta, adică până la 70 kN când săgeata este de circa 6 mm apărând tot mai multe fisuri de-a lungul grinzii;
- pe intervalul 70-140 kN al forței verticale comportarea elementului poate fi caracterizată ca și elasto-plastică, deplasările verticale amplificându-se astfel că se formează noi fisuri pe lângă extinderea celor deja dezvoltate;
- peste 140 kN avem un comportament plastic, deplasările crescând mult față de încărcare;
- la atingerea valorii de 176 kN se produce cedarea grinzii de beton armat prin dezlipirea țesăturii de pe suprafața suport și ruperea ei între cele două ancoraje. Deplasarea maximă pe verticală a atins valoarea de 71.42 mm.

Din suprapunerea curbelor forță-deplasare ale celor două elemente, martor și consolidat, se poate observa comportarea similară pe palierele elastic și elasto-

plastic. Se observă că materialul compozit a întârziat formarea fisurilor, acestea apărând la 58.5 kN față de 38.5 kN la grinda martor RB2.

Obiectivul impus al capacității maxime de 160 kN a fost depășit cu 10%.

7.6. Elementul RL-2W-A

Diagrama forță-deplasare la nivelul captorului de deplasare D2 situat la mijlocul grinzii este dată în figura 7.6., în comparație cu diagrama elementului RB2.

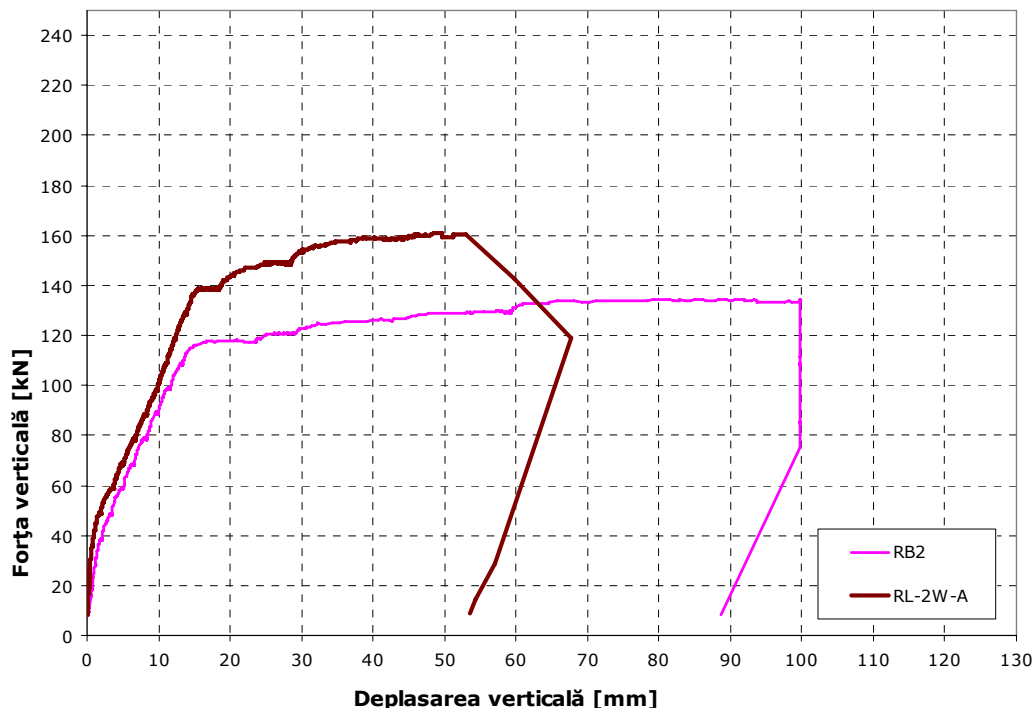


Figura 7.6. Diagramele forță-deplasare pentru grinzile RL-2W-A și RB2

Câteva dintre concluziile ce se desprind ca urmare a încercării elementului consolidat RL-2W-A și trasării diagramei forță-deplasare ar fi:

- pentru valori ale forței orizontale între 0 și 68.5 kN, valoare la care apar primele fisuri în grindă, comportarea elementului este cvasi-elastică, deplasările pe verticală menținându-se sub 4.85 mm;
- comportarea elastică a grinzii se consideră până la 40% din încărcarea maximă la care a rezistat aceasta, adică până la 64 kN când săgeata este de circa 5 mm apărând tot mai multe fisuri de-a lungul grinzii;
- pe intervalul 64-138 kN al forței verticale comportarea elementului poate fi caracterizată ca și elasto-plastică, deplasările verticale amplificându-se astfel că se formează noi fisuri pe lângă extinderea celor deja dezvoltate;
- peste 138 kN avem un comportament plastic, deplasările crescând mult față de încărcare;

- la atingerea valorii de 161 kN se produce cedarea grinzii de beton armat prin dezlipirea țesăturii, planul de alunecare fiind în interiorul compozitului. Deplasarea maximă pe verticală a atins valoarea de 52.99 mm.

Din suprapunerea curbelor forță-deplasare ale celor două elemente, martor și consolidat, se poate observa comportarea similară pe palierele elastic și elasto-plastic. Se observă că materialul compozit a întârziat formarea fisurilor, acestea apărând la 68.5 kN față de 38.5 kN la grinda martor RB2.

Obiectivul impus al capacității maxime de 160 kN a fost sensibil depășit cu 0.64%, dar compozitul mai avea rezerve de a prelua încărcări, cedarea apărând din cauza slabei aderențe între fâșiile de compozit ceea ce a dus la dezlipirea lor. Acest lucru putea fi evitat trecând ancorajele prin cele două fâșii și lipirea porțiunii neimpregnate peste compozit și nu sub el.

7.7. Elementul R-2S-W

Diagrama forță-deplasare la nivelul captorului de deplasare D2 situat la mijlocul grinzii este dată în figura 7.7., în comparație cu diagrama elementului RB2.

Câteva dintre concluziile ce se desprind ca urmare a încercării elementului consolidat R-2S-W și trasării diagramei forță-deplasare ar fi:

- pentru valori ale forței orizontale între 0 și 38.5 kN, valoare la care apar primele fisuri în grindă, comportarea elementului este cvasi-elastică, deplasările pe verticală menținându-se sub 1.18 mm;
- comportarea elastică a grinzii se consideră până la 40% din încărcarea maximă la care a rezistat aceasta, adică până la 116 kN când săgeata este de circa 9 mm apărând tot mai multe fisuri de-a lungul grinzii;
- pe intervalul 116-200 kN al forței verticale comportarea elementului poate fi caracterizată ca și elasto-plastică, deplasările verticale amplificându-se astfel că se formează noi fisuri pe lângă extinderea celor deja dezvoltate;
- peste 200 kN avem un comportament plastic, deplasările crescând mult față de încărcare;
- la atingerea valorii de 291 kN se produce cedarea grinzii de beton armat prin alunecarea parțială a lamelei concomitent cu forfecarea fibrelor din țesătură de-a lungul lamelei. Alunecarea bruscă a lamelei a condus la flambarea acesteia urmată de ruperea casantă. Deplasarea maximă pe verticală a atins valoarea de 93.87 mm.

Din suprapunerea curbelor forță-deplasare ale celor două elemente, martor și consolidat, se poate observa comportarea similară pe palierele elastic și elasto-plastic. Se observă că materialul compozit nu a întârziat formarea fisurilor, acestea apărând tot la 38.5 kN ca la grinda martor RB2, deoarece lamela nu a fost lipită cu rășină în treimea de mijloc (între ancorajele cu țesătură transversală).

Obiectivul impus al capacității maxime de 160 kN a fost depășit cu 81.88%.

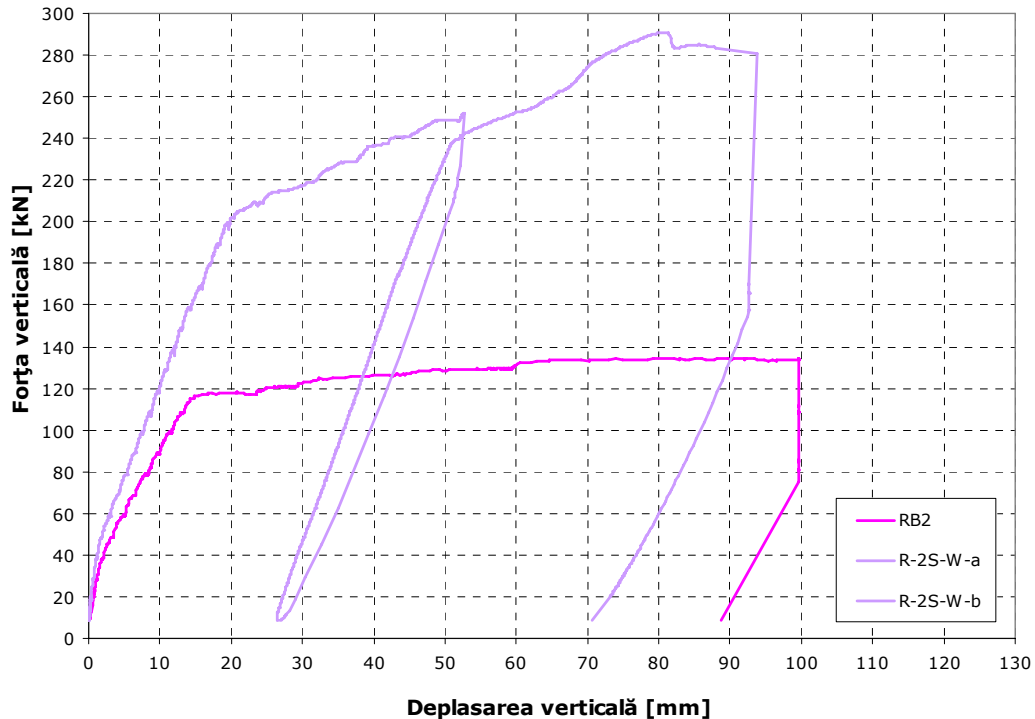


Figura 7.7. Diagramele forță-deplasare pentru grinzile R-2S-W și RB2

7.8. Elementul R-2S-W-2

Diagrama forță-deplasare la nivelul captorului de deplasare D2 situat la mijlocul grinzii este dată în figura 7.8., în comparație cu diagrama elementului RB2.

Câteva dintre concluziile ce se desprind ca urmare a încercării elementului consolidat R-2S-W-2 și trasării diagramei forță-deplasare ar fi:

- folosind aceeași grindă ca R-2S-W, doar rotind-o cu 180°, nu s-a mai pus accent pe urmărirea fisurilor, grinda fiind deja fisurată;
- comportarea elastică a grinzii se consideră până la 40% din încărcarea maximă la care a rezistat aceasta, adică până la 48 kN când săgeata este de circa 30 mm apărând tot mai multe fisuri de-a lungul grinzii;
- pe intervalul 48-90 kN al forței verticale comportarea elementului poate fi caracterizată ca și elasto-plastică, deplasările verticale amplificându-se astfel că se formează noi fisuri pe lângă extinderea celor deja dezvoltate;
- peste 90 kN avem un comportament plastic, deplasările crescând mult față de încărcare;
- la atingerea valorii de 119 kN se produce cedarea grinzii de beton armat prin forfecarea fibrelor din țesătură de-a lungul lamelei. Deplasarea maximă pe verticală a atins valoarea de 55.86 mm.

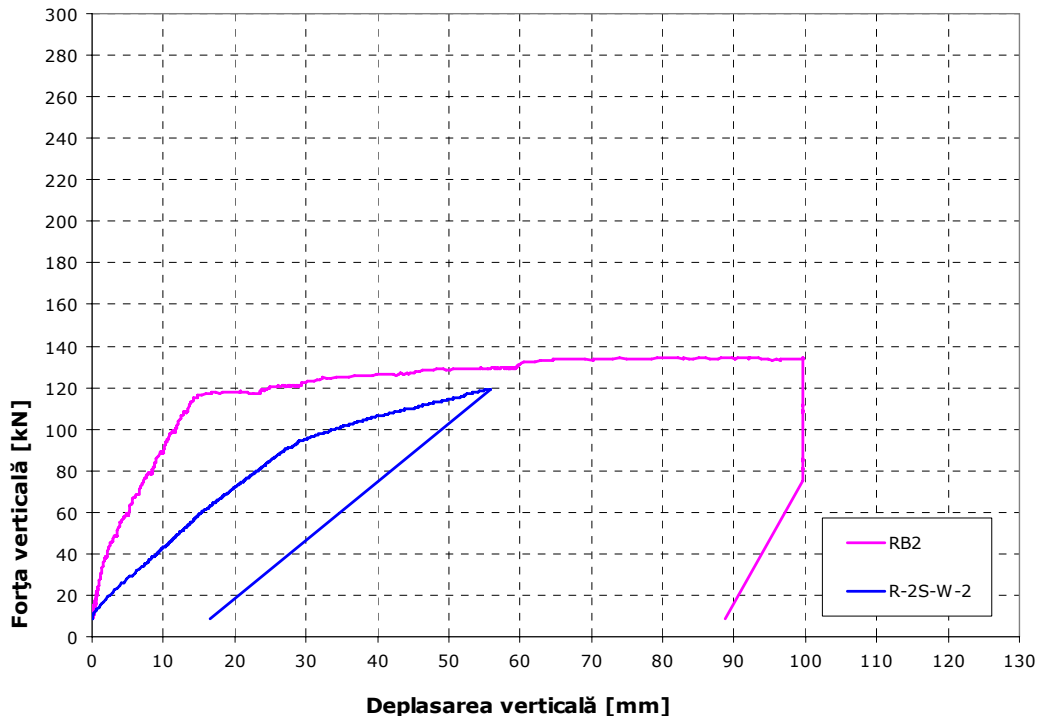


Figura 7.8. Diagramele forță-deplasare pentru grinzile R-2S-W-2 și RB2

Din suprapunerea curbelor forță-deplasare ale celor două elemente, martor și consolidat, se poate observa diferența mare de rigiditate dintre cele două datorită diferenței semnificative între ariile de armare din zona întinsă (aria de armare a grinzii R-2S-W-2 este de aproape 4 ori mai mică decât a elementului martor RB2).

Această încercare a avut doar rol informativ, dorindu-se urmărirea comportării sistemului de ancorare a lamei și a modului de cedare.

7.9. Elementul R-2NSMS

Diagrama forță-deplasare la nivelul captorului de deplasare D2 situat la mijlocul grinzii este dată în figura 7.9., în comparație cu diagramele obținute prin modelare numerică (FEM-R-2NSMS-01 - când se consideră doar două bare Ø16 în zona întinsă - și FEM-R-2NSMS-02 - când se consideră în zona întinsă, pe lângă cele două bare Ø16, și segmentele de armătură rămase după secționarea barei din mijloc) și grinda martor RB2.

Câteva dintre concluziile ce se desprind ca urmare a încercării elementului consolidat R-2NSMS și trasării diagramei forță-deplasare ar fi:

- pentru valori ale forței orizontale între 0 și 58.5 kN, valoare la care apar primele fisuri în grindă, comportarea elementului este cvasi-elastică, deplasările pe verticală menținându-se sub 3.4 mm;
- comportarea elastică a grinzii se consideră până la 40% din încărcarea maximă la care a rezistat aceasta, adică până la 80 kN când săgeata este de circa 7 mm apărând tot mai multe fisuri de-a lungul grinzii;

- pe intervalul 80-139 kN al forței verticale comportarea elementului poate fi caracterizată ca și elasto-plastică, deplasările verticale amplificându-se astfel că se formează noi fisuri pe lângă extinderea celor deja dezvoltate;
- peste 139 kN avem un comportament plastic, deplasările crescând mult față de încărcare;
- la atingerea valorii de 201 kN se produce cedarea grinzii de beton armat prin ruperea lamelelor și zdrobirea betonului în zonele comprimate. Deplasarea maximă pe verticală a atins valoarea de 89.89 mm.

Din suprapunerea curbelor forță-deplasare ale celor două elemente, martor și consolidat, se poate observa comportarea similară pe palierele elastic și elasto-plastic. Se observă că materialul compozit a întârziat formarea fisurilor, acestea apărând la 58.5 kN față de 38.5 kN la grinda martor RB2.

Se observă diferența de rigiditate la curbele obținute prin modelare numerică, diferență dată de luarea în considerare a segmentelor de armătură rămase după secționarea barei din mijloc. Astfel rigiditatea elementului FEM-R-2NSMS-02 este mai mare decât a elementului FEM-R-2NSMS-01.

Obiectivul impus al capacității maxime de 160 kN a fost depășit cu 25 % datorită folosirii acestui sistem de consolidare care presupune o suprafață de aderență mai mare între compozit și beton datorită așezării lamelelor în rosturile tăiate în beton. Acest lucru ne arată că și mărirea suprafeței de aderență se comportă ca un ancoraj pentru compozitul utilizat la consolidare.

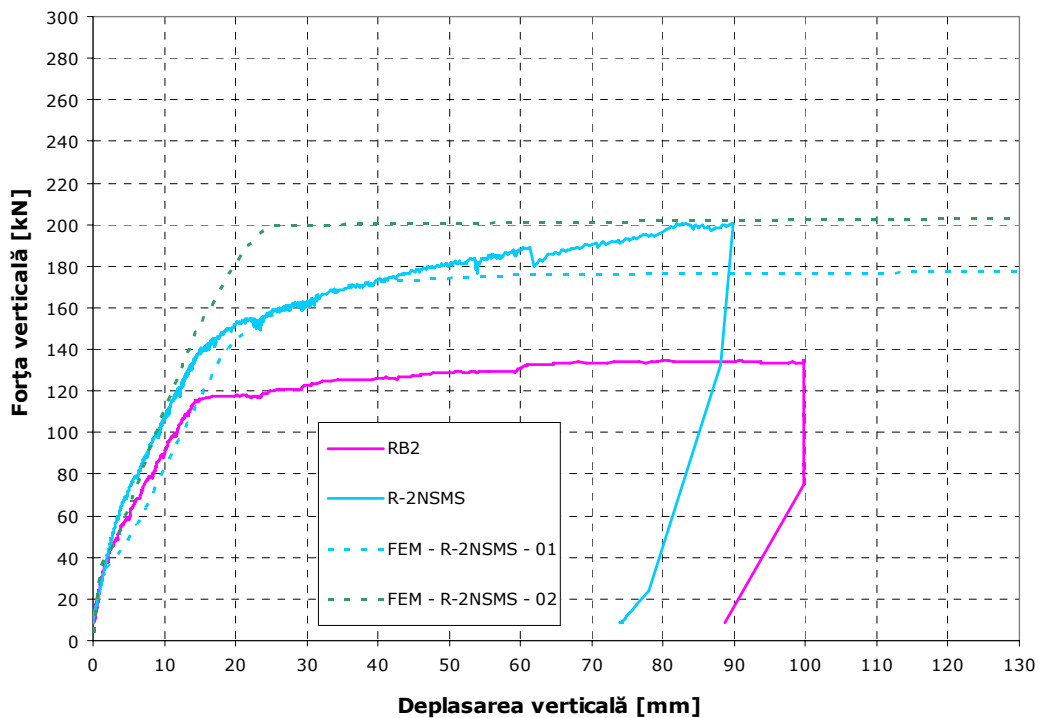


Figura 7.9. Diagramele forță-deplasare pentru grinzile R-2NSMS și RB2

7.10. Elementul R-1S-0

Diagrama forță-deplasare la nivelul captorului de deplasare D2 situat la mijlocul grinzii este dată în figura 7.10., în comparație cu diagramele obținute prin modelare numerică (FEM-R-1S-0-01 – când se consideră doar două bare Ø16 în zona întinsă - și FEM-R-1S-0-02 - când se consideră în zona întinsă, pe lângă cele două bare Ø16, și segmentele de armătură rămase după secționarea barei din mijloc) și grinda martor RB2.

Câteva dintre concluziile ce se desprind ca urmare a încercării elementului consolidat R-1S-0 și trasării diagramei forță-deplasare ar fi:

- pentru valori ale forței orizontale între 0 și 48.5 kN, valoare la care apar primele fisuri în grindă, comportarea elementului este cvasi-elastică, deplasările pe verticală menținându-se sub 2.09 mm;
- comportarea elastică a grinzii se consideră până la 40% din încărcarea maximă la care a rezistat aceasta, adică până la 62 kN când săgeata este de circa 3.8 mm apărând tot mai multe fisuri de-a lungul grinzii;
- pe intervalul 62-140 kN al forței verticale comportarea elementului poate fi caracterizată ca și elasto-plastică, deplasările verticale amplificându-se astfel că se formează noi fisuri pe lângă extinderea celor deja dezvoltate;
- peste 140 kN avem un comportament plastic, deplasările crescând mult față de încărcare;
- la atingerea valorii de 155 kN se produce cedarea grinzii de beton armat prin dezlipirea lamelei de pe suprafața suport. Deplasarea maximă pe verticală a atins valoarea de 23.67 mm.

Din suprapunerea curbelor forță-deplasare ale celor două elemente, martor și consolidat, se poate observa comportarea similară pe palierele elastic și elasto-plastic. Se observă că materialul compozit a întârziat formarea fisurilor, acestea apărând la 48.5 kN față de 38.5 kN la grinda martor RB2.

Se observă diferența de rigiditate la curbele obținute prin modelare numerică, diferență dată de luarea în considerare a segmentelor de armătură rămase după secționarea barei din mijloc. Astfel rigiditatea elementului FEM-R-1S-0-02 este mai mare decât a elementului FEM-R-1S-0-01.

Obiectivul impus al capacității maxime de 160 kN aproape că a fost atins, eșecul ne fiind datorat compozitului (care mai avea rezerve de a prelua încărcări) ci slabei aderențe între beton și lamela din fibre de carbon ceea ce a dus la dezlipirea acesteia. Acest lucru putea fi evitat prin folosirea unor metode de ancorare a compozitului, prezentate în continuare.

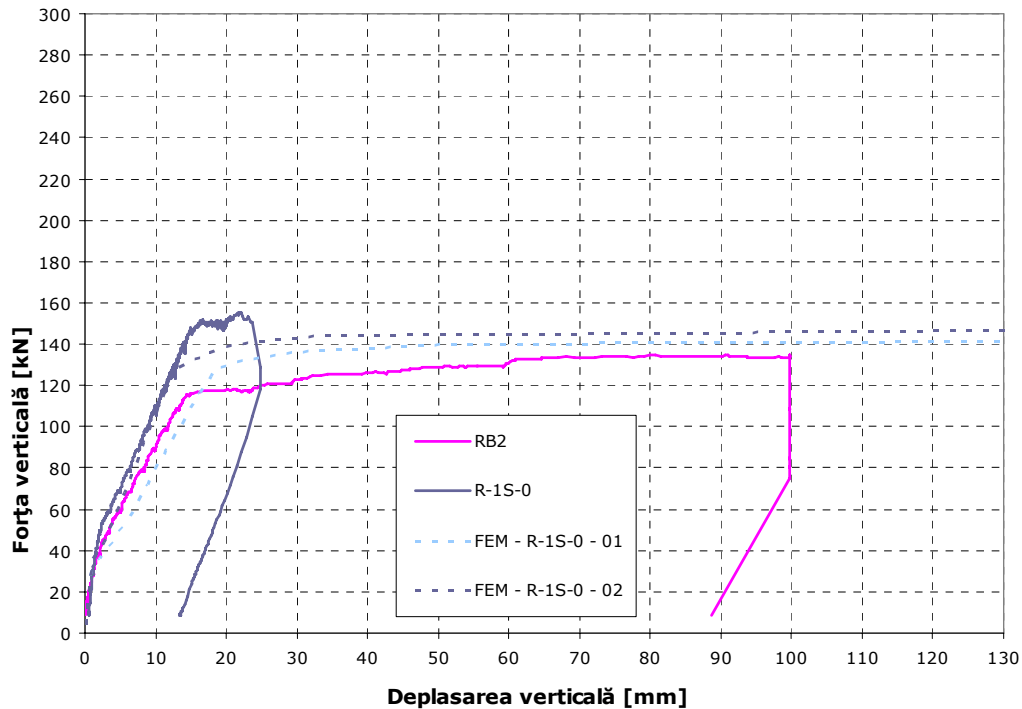


Figura 7.10. Diagramele forță-deplasare pentru grinzile R-1S-0 și RB2

7.11. Elementul R-1S

Diagrama forță-deplasare la nivelul captorului de deplasare D2 situat la mijlocul grinzii este dată în figura 7.11., în comparație cu diagrama elementului RB2.

Câteva dintre concluziile ce se desprind ca urmare a încercării elementului consolidat R-1S și trasării diagramei forță-deplasare ar fi:

- pentru valori ale forței orizontale între 0 și 48.5 kN, valoare la care apar primele fisuri în grindă, comportarea elementului este cvasi-elastică, deplasările pe verticală menținându-se sub 1.8 mm;
- comportarea elastică a grinzii se consideră până la 40% din încărcarea maximă la care a rezistat aceasta, adică până la 90 kN când săgeata este de circa 9 mm apărând tot mai multe fisuri de-a lungul grinzii;
- pe intervalul 90-148 kN al forței verticale comportarea elementului poate fi caracterizată ca și elasto-plastică, deplasările verticale amplificându-se astfel că se formează noi fisuri pe lângă extinderea celor deja dezvoltate;
- peste 148 kN avem un comportament plastic, deplasările crescând mult față de încărcare;
- la atingerea valorii de 224 kN se produce cedarea grinzii de beton armat prin dezlipirea lamelei în ancoraje urmată de distrugerea betonului în zona comprimată și în ultimă instanță smulgerea compozitului din ancoraj simultan cu ruperea lamelei. Deplasarea maximă pe verticală a atins valoarea de 87.11 mm.

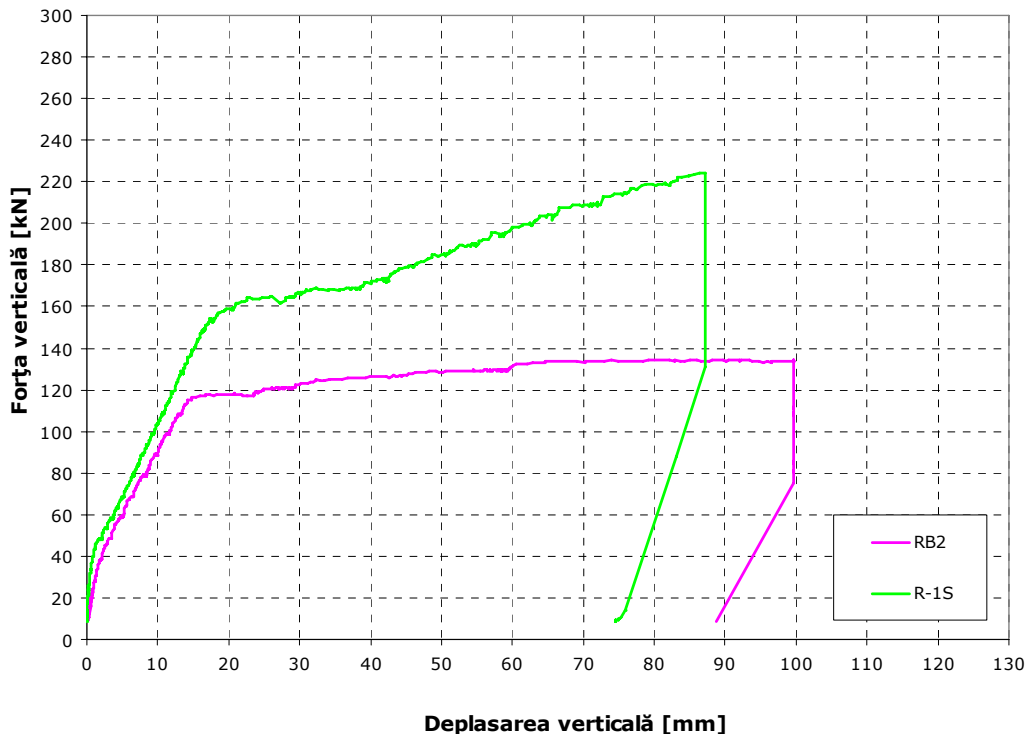


Figura 7.11. Diagramele forță-deplasare pentru grinzile R-1S și RB2

Din suprapunerea curbelor forță-deplasare ale celor două elemente, martor și consolidat, se poate observa comportarea similară pe palierele elastic și elasto-plastic. Se observă că materialul compozit a întârziat formarea fisurilor, acestea apărând la 48.5 kN față de 38.5 kN la grinda martor RB2.

Obiectivul impus al capacității maxime de 160 kN a fost depășit cu 40 % datorită folosirii ancorajelor la capetele lamelei. Acest lucru ne arată cât de benefice sunt ancorajele în soluțiile de consolidare.

7.12. Elementul R-1S-AS

Diagrama forță-deplasare la nivelul captorului de deplasare D2 situat la mijlocul grinzii este dată în figura 7.12., în comparație cu diagrama elementului RB2.

Câteva dintre concluziile ce se desprind ca urmare a încercării elementului consolidat R-1S-AS și trasării diagramei forță-deplasare ar fi:

- pentru valori ale forței orizontale între 0 și 58.5 kN, valoare la care apar primele fisuri în grindă, comportarea elementului este cvasi-elastică, deplasările pe verticală menținându-se sub 3.29 mm;
- comportarea elastică a grinzii se consideră până la 40% din încărcarea maximă la care a rezistat aceasta, adică până la 73 kN când săgeata este de circa 5 mm apărând tot mai multe fisuri de-a lungul grinzii;

- pe intervalul 73-145 kN al forței verticale comportarea elementului poate fi caracterizată ca și elasto-plastică, deplasările verticale amplificându-se astfel că se formează noi fisuri pe lângă extinderea celor deja dezvoltate;
- peste 145 kN avem un comportament plastic, deplasările crescând mult față de încărcare;
- la atingerea valorii de 181 kN se produce cedarea grinzii de beton armat prin dezlipirea lamelei în ancoraje urmată de alunecarea și smulgerea compozitului din ancoraje. Deplasarea maximă pe verticală a atins valoarea de 47.44 mm.

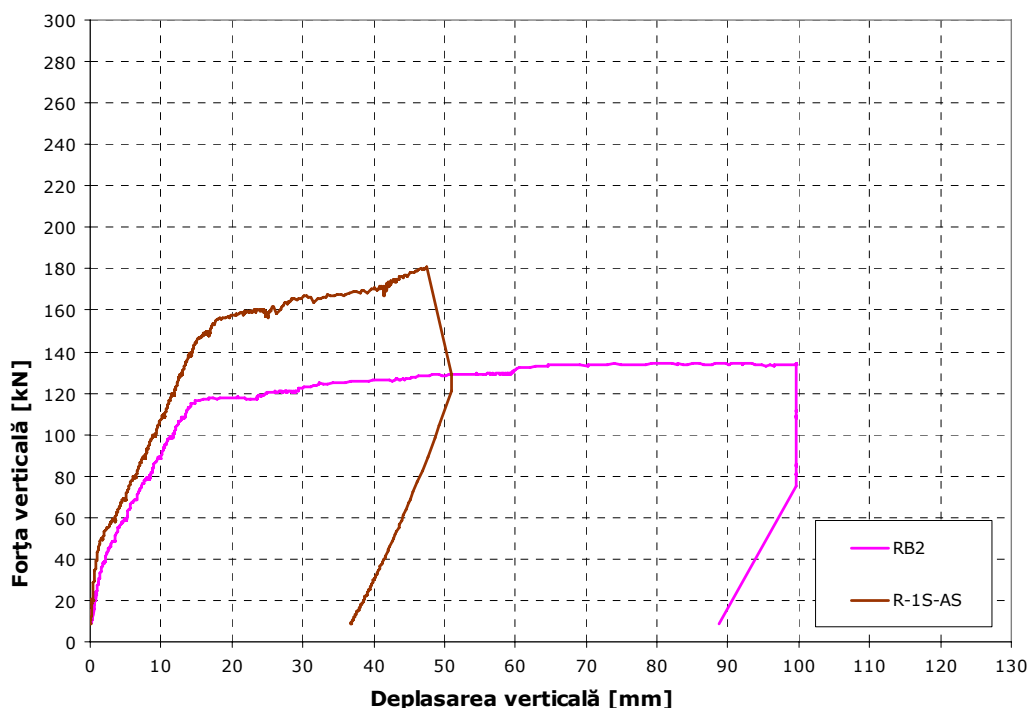


Figura 7.12. Diagramele forță-deplasare pentru grinzile R-1S-AS și RB2

Din suprapunerea curbelor forță-deplasare ale celor două elemente, martor și consolidat, se poate observa comportarea similară pe palierele elastic și elasto-plastic. Se observă că materialul compozit a întârziat formarea fisurilor, acestea apărând la 58.5 kN față de 38.5 kN la grinda martor RB2.

Obiectivul impus al capacității maxime de 160 kN a fost depășit cu 13.3% datorită folosirii ancorajelor la capetele lamelei. Acest lucru ne arată cât de benefice sunt ancorajele în soluțiile de consolidare.

7.13. Elementul R-1S-SP

Diagrama forță-deplasare la nivelul captorului de deplasare D2 situat la mijlocul grinzii este dată în figura 7.13., în comparație cu diagrama elementului RB2.

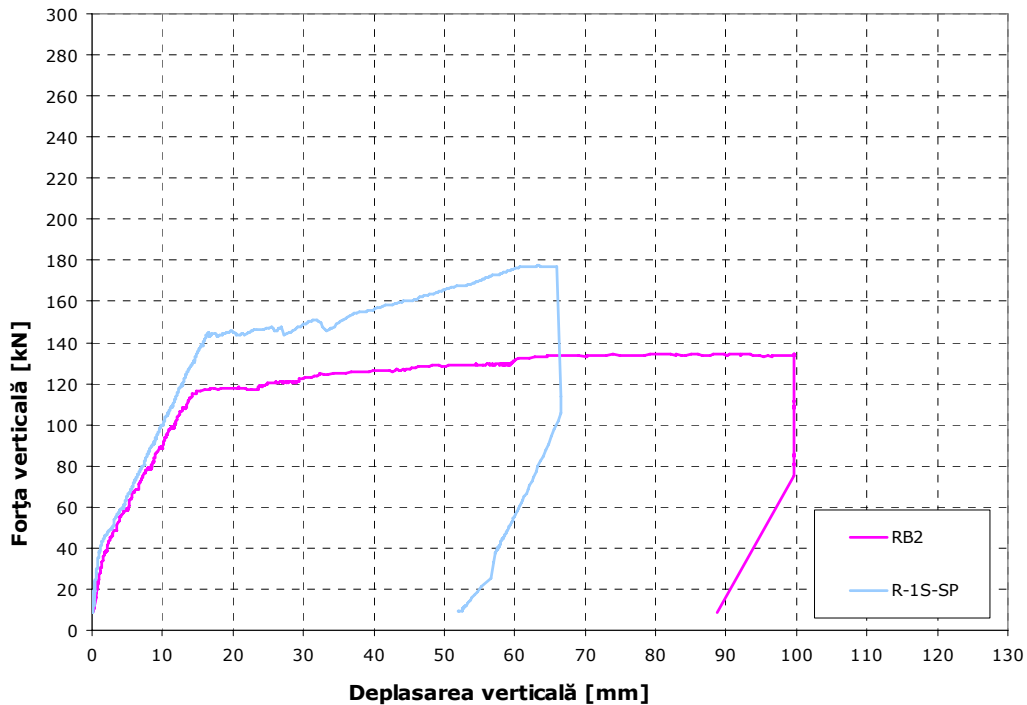


Figura 7.13. Diagramele forță-deplasare pentru grinzile R-1S-SP și RB2

Câteva dintre concluziile ce se desprind ca urmare a încercării elementului consolidat R-1S-SP și trasării diagramei forță-deplasare ar fi:

- pentru valori ale forței orizontale între 0 și 48.5 kN, valoare la care apar primele fisuri în grindă, comportarea elementului este cvasi-elastică, deplasările pe verticală menținându-se sub 2.36 mm;
- comportarea elastică a grinzii se consideră până la 40% din încărcarea maximă la care a rezistat aceasta, adică până la 71 kN când săgeata este de circa 6 mm apărând tot mai multe fisuri de-a lungul grinzii;
- pe intervalul 71-140 kN al forței verticale comportarea elementului poate fi caracterizată ca și elasto-plastică, deplasările verticale amplificându-se astfel că se formează noi fisuri pe lângă extinderea celor deja dezvoltate;
- peste 140 kN avem un comportament plastic, deplasările crescând mult față de încărcare;
- la atingerea valorii de 177 kN se produce cedarea grinzii de beton armat prin dezlipirea lamelei în ancoraj urmată de alunecarea și smulgerea compozitului din ancoraj producând flambarea și ruperea lamelei. Deplasarea maximă pe verticală a atins valoarea de 66.06 mm.

Din suprapunerea curbelor forță-deplasare ale celor două elemente, martor și consolidat, se poate observa comportarea similară pe palierele elastic și elasto-plastic. Se observă că materialul compozit a întârziat formarea fisurilor, acestea apărând la 48.5 kN față de 38.5 kN la grinda martor RB2.

Obiectivul impus al capacității maxime de 160 kN a fost depășit cu 10.78% datorită folosirii ancorajelor la capetele lamelei. Acest lucru ne arată cât de benefice sunt ancorajele în soluțiile de consolidare.

7.14. Elementul R-1S-CA

Diagrama forță-deplasare la nivelul captorului de deplasare D2 situat la mijlocul grinzii este dată în figura 7.14., în comparație cu diagrama elementului RB2.

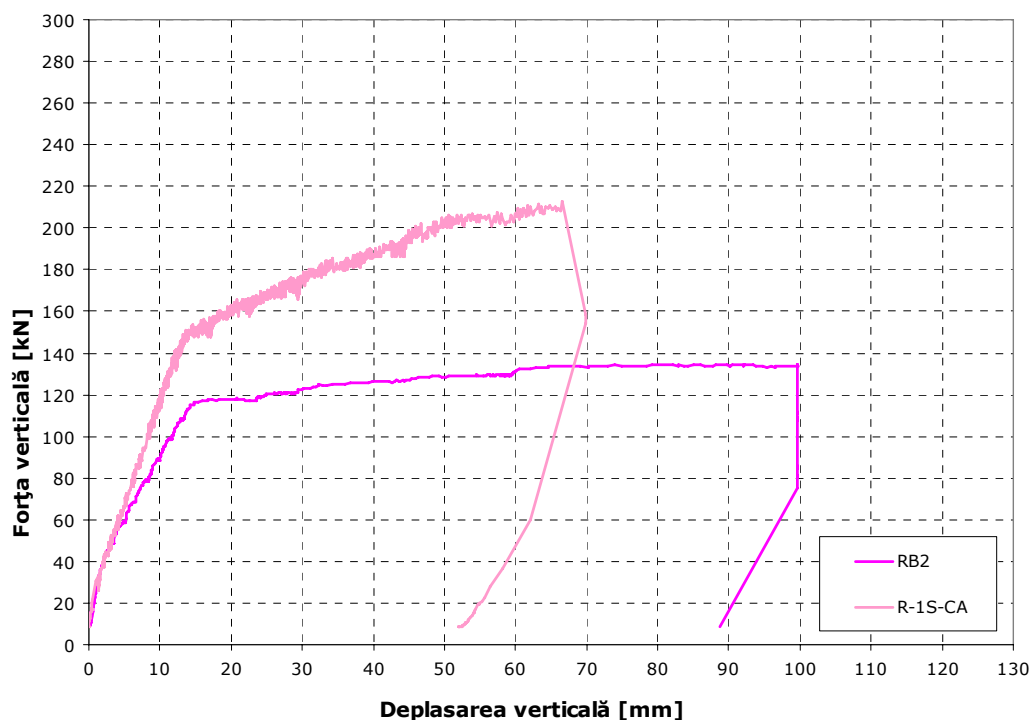


Figura 7.14. Diagramele forță-deplasare pentru grinzile R-1S-CA și RB2

Câteva dintre concluziile ce se desprind ca urmare a încercării elementului consolidat R-1S-CA și trasării diagramei forță-deplasare ar fi:

- pentru valori ale forței orizontale între 0 și 38.5 kN, valoare la care apar primele fisuri în grindă, comportarea elementului este cvasi-elastică, deplasările pe verticală menținându-se sub 2.14 mm;
- comportarea elastică a grinzii se consideră până la 40% din încărcarea maximă la care a rezistat aceasta, adică până la 85 kN când săgeata este de circa 7 mm apărând tot mai multe fisuri de-a lungul grinzii;
- pe intervalul 85-140 kN al forței verticale comportarea elementului poate fi caracterizată ca și elasto-plastică, deplasările verticale amplificându-se astfel că se formează noi fisuri pe lângă extinderea celor deja dezvoltate;
- peste 140 kN avem un comportament plastic, deplasările crescând mult față de încărcare;
- la atingerea valorii de 213 kN se produce cedarea grinzii de beton armat prin cedarea betonului în zona comprimată urmată de distrugerea lamelei în zona de mijloc. Deplasarea maximă pe verticală a atins valoarea de 66.27 mm.

Din suprapunerea curbelor forță-deplasare ale celor două elemente, martor și consolidat, se poate observa comportarea similară pe palierele elastic și elasto-plastic. Se observă că materialul compozit nu a întârziat formarea fisurilor, acestea apărând tot la 38.5 kN ca la grinda martor RB2, deoarece lamela nu a fost lipită cu rășină de suprafața betonului.

Obiectivul impus al capacității maxime de 160 kN a fost depășit cu 33% datorită folosirii sistemului de ancorare pe toată lungimea lamelei, cu buloane prinse chimic în beton. Acest lucru ne arată cât de benefice sunt ancorajele în soluțiile de consolidare.

Sintetizarea rezultatelor obținute în urma efectuării încercărilor pe cele 14 elemente ale programului experimental, se găsește în anexă.

8. APLICAREA REZULTATELOR ÎN PRACTICĂ

În acest capitol voi prezenta trei studii de caz: primul despre consolidarea unei centuri-buiandrug la o casă particulară, al doilea asupra unei lucrări de consolidare a cadrelor din beton armat la o hală din Timișoara, întrucât beneficiarul a dorit schimbarea destinației din spațiu de climatizare cu azot lichid în spații de producție; al treilea referitor la consolidarea nervurilor unui planșeu modular. Toate lucrările de consolidare au fost pregătite, urmărite și executate de mine prin firma proprie.

8.1. Consolidare centură-buiandrug

Deoarece beneficiarul nu a fost mulțumit cu înălțimea ușii de la intrare raportă la lățimea acesteia, s-a înlăturat buiandrugul iar centura din zona golului rezultat a fost consolidată prin aplicarea în zona întinsă a unei lamele pultrudate din fibre de carbon de 10 cm lățime ancorată la capete prin aplicare pe direcție transversala a unei țesături din fibre de carbon.



Figura 8.1. Starea structurală după înlăturarea buiandrugului

Pașii de consolidare sunt cei specifici aplicării materialelor compozite polimerice și anume:

- șlefuirea suprafeței betonului
- rotunjirea muchiilor în zonele de capăt unde s-a aplicat țesătura
- aspirarea suprafeței betonului și suflarea cu aer comprimat

- aplicarea rășinii epoxidice pe suprafața betonului și pe lamelă
- așezarea lamelei și apăsarea cu ajutorul unei role pentru un contact mai bun pe suprafața suport
- aplicarea la capete a țesăturii de carbon și impregnarea acesteia prin intermediul unei role speciale
- aplicarea de nisip pe suprafețele consolidate pentru a asigura o aderență mai bună straturilor ulterioare de finisare.



Suprafața șlefuită și muchii rotunjite



Aplicarea lamelei și pregătirea capetelor pentru țesătură

Figura 8.2. Pașii consolidării centurii

8.2. Consolidare cadre din beton armat

Hala cu pricina este o structură în cadre cu deschiderea de 9 m și 7 travei, pe două niveluri (parter și etaj), cu planșeu din beton armat monolit peste parter și planșeu prefabricat din fâșii cu goluri peste etaj. Pereții de închidere sunt din cărămidă plină cu gosimea de 25 cm. La nivelul 1 exista un planșeu intermediar, pe

care erau montate ventilatoarele de răcire, cu grinzi transversale de rigidizare pentru a reduce transmiterea vibrațiilor de la ventilatoare. Pentru a se valorifica spațiul de la etaj au trebuit demolate planșeul intermediar și grinzile transversale de rigidizare ceea ce a dus la slăbirea structurii.



Hala supusă consolidării



Stâlp parter necesar a fi consolidat



Grinda transversală de la etajul 1 ce urma a fi demolată



Alipirea de altă hală



Grinda transversală de la etaj demolată



Degradarea structurii datorită mediului agresiv din trecut

Figura 8.3. Starea structurală dinaintea consolidării

Clădirea a fost expertizată, iar ca soluții de consolidare sugerate de expert au fost: realizarea unui schelet metalic cu fundații independente, care să preia încărcările suplimentare și a doua soluție, folosirea materialelor compozite pentru a consolida elementele structurale direct afectate.

Deoarece unele încăperi erau folosite deja ca spații de depozitare a semifabricatelor și chiar de birouri, beneficiarul a optat pentru metoda consolidării cu materiale compozite, convins de durata mică de execuție și de deranjul minim.

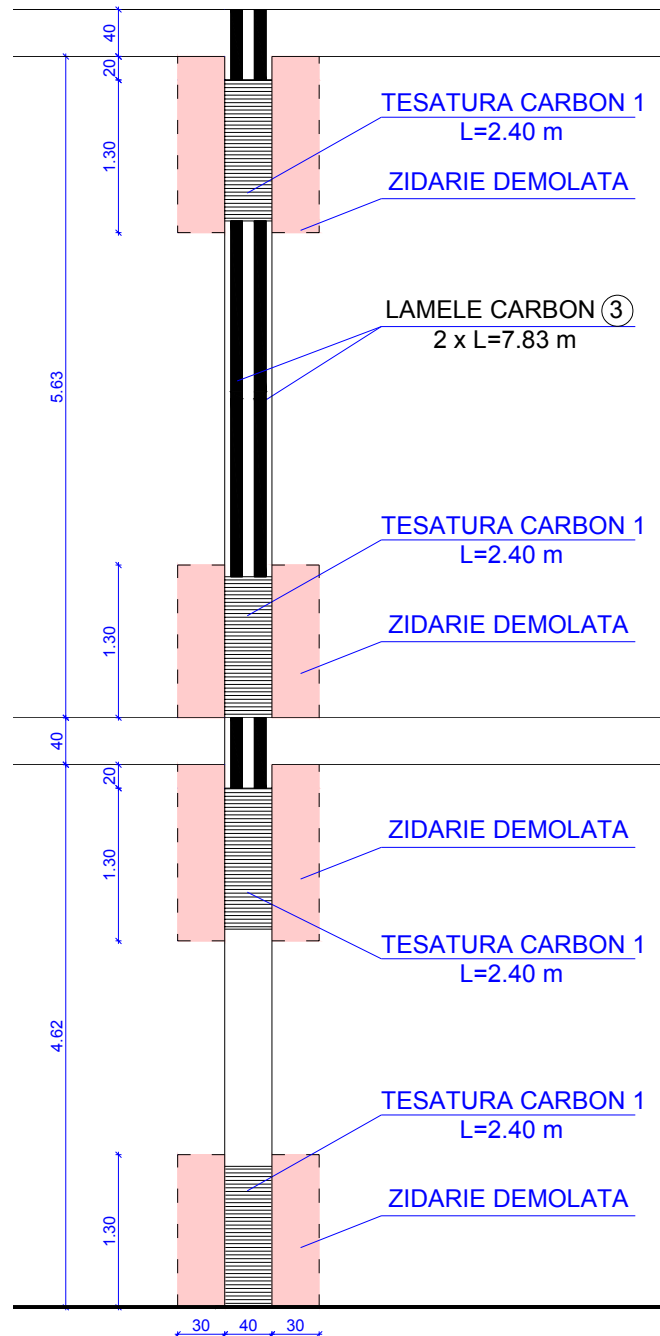
Situația clădirii înainte de consolidare este prezentată în fotografiile din figura 8.1.

Din cele 8 cadre ale clădirii au necesitat consolidarea doar 5. Elementele structurale consolidate au fost de tipul: stâlpi, grinzi și noduri, iar materialele compozite folosite au fost: țesătură din fibre de carbon (SikaWrap 230C), lamele din fibre de carbon (SikaDur S1012) de 10 cm lățime și rășinile epoxidice corespunzătoare (SikaDur 30 și SikaDur 330).

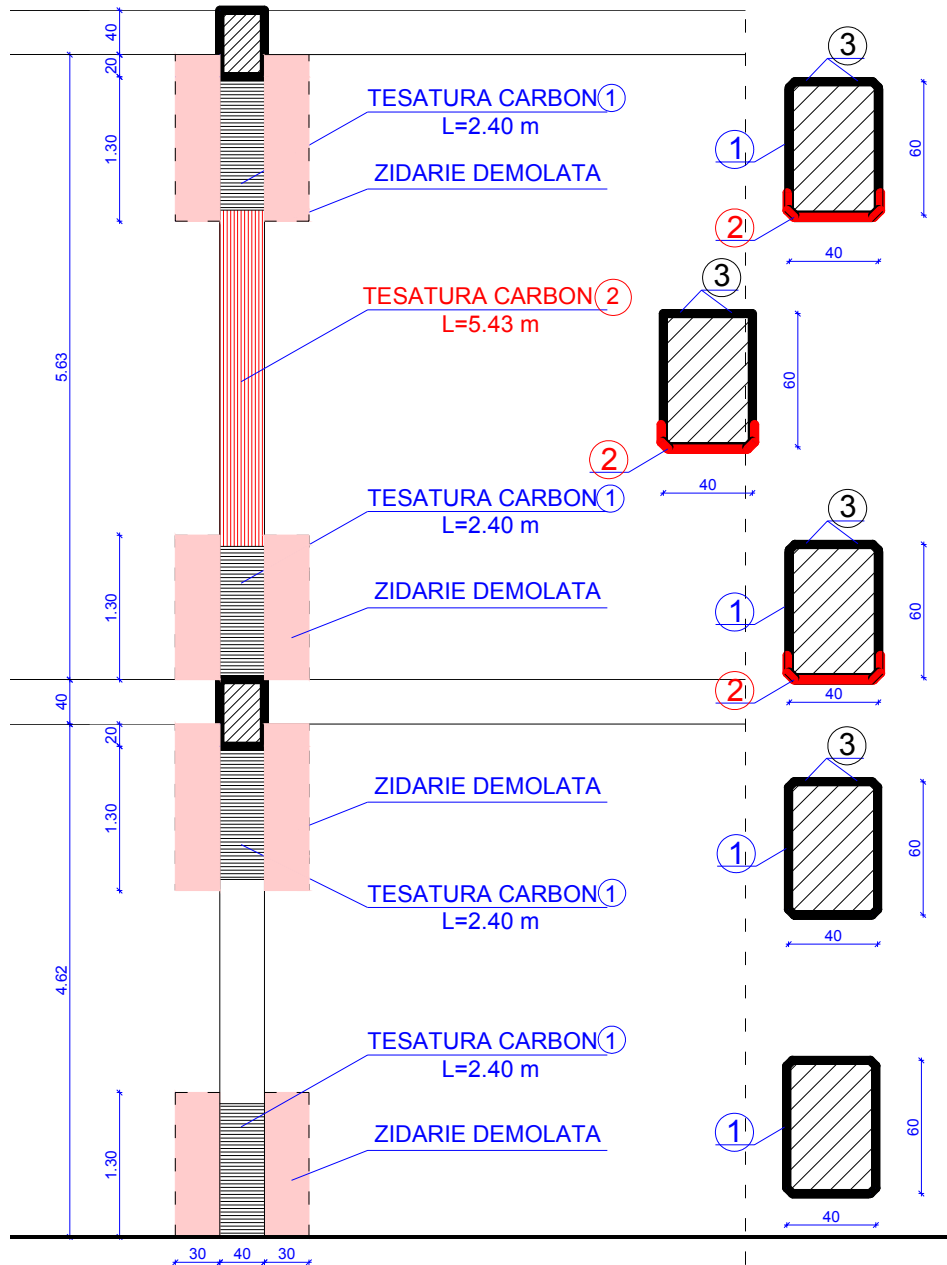
Consolidarea cu materiale compozite a presupus următoarele etape:

- înlăturarea obstacolelor: demontare tavan fals casetat, conducte de scurgere, unele cabluri de electrice (multe obstacole au rămas, consolidarea făcându-se ocolindu-le);
- identificarea elementelor structurale ce urmau a fi consolidate,
- demolarea zidăriei din jurul stâlpilor și grinzilor pe lungimea de consolidare, astfel încât să fie acces de jur împrejurul elementului;
- rotunjirea muchiilor stâlpilor și grinzilor pe lungimea de consolidare, cu o rază de minim 20 mm;
- șlefuirea suprafețelor de beton pe care urmează a se lipi materialele compozite,
- aspirarea acestor suprafețe pentru înlăturarea prafului și impurităților,
- aplicarea lamelor din fibre de carbon, câte două lipite pe fața exterioară a stâlpilor de cadru;
- aplicarea lamelor din fibre de carbon, câte două lipite pe fața inferioară a grinzilor de la etaj consolidate la încovoiere în câmp și câte una pe fețele laterale în zona de capăt la partea superioară pentru consolidare la încovoiere în reazem;
- lipirea țesăturii din fibre de carbon la fața interioară a stâlpilor de la etaj, pe toată înălțimea stâlpului;
- lipirea țesăturii din fibre de carbon pe fețele laterale ale stâlpilor la partea superioară
- confinarea stâlpilor la bază și la partea superioară (imediat sub grindă) prin înfășurare cu țesătură din fibre de carbon pe o înălțime de 120 cm;
- consolidarea la forță tăietoare a capetelor de grinzi prin înfășurare cu țesătură din fibre de carbon pe o lungime de 180 cm;
- aplicarea de nisip pe consolidarea proaspăt aplicată pentru aderența viitoarelor straturi de finisare,
- refacerea zidăriei în jurul elementelor consolidate.

STÂLP CADRU -LA EXTERIOR-



STÂLP CADRU -LA INTERIOR-



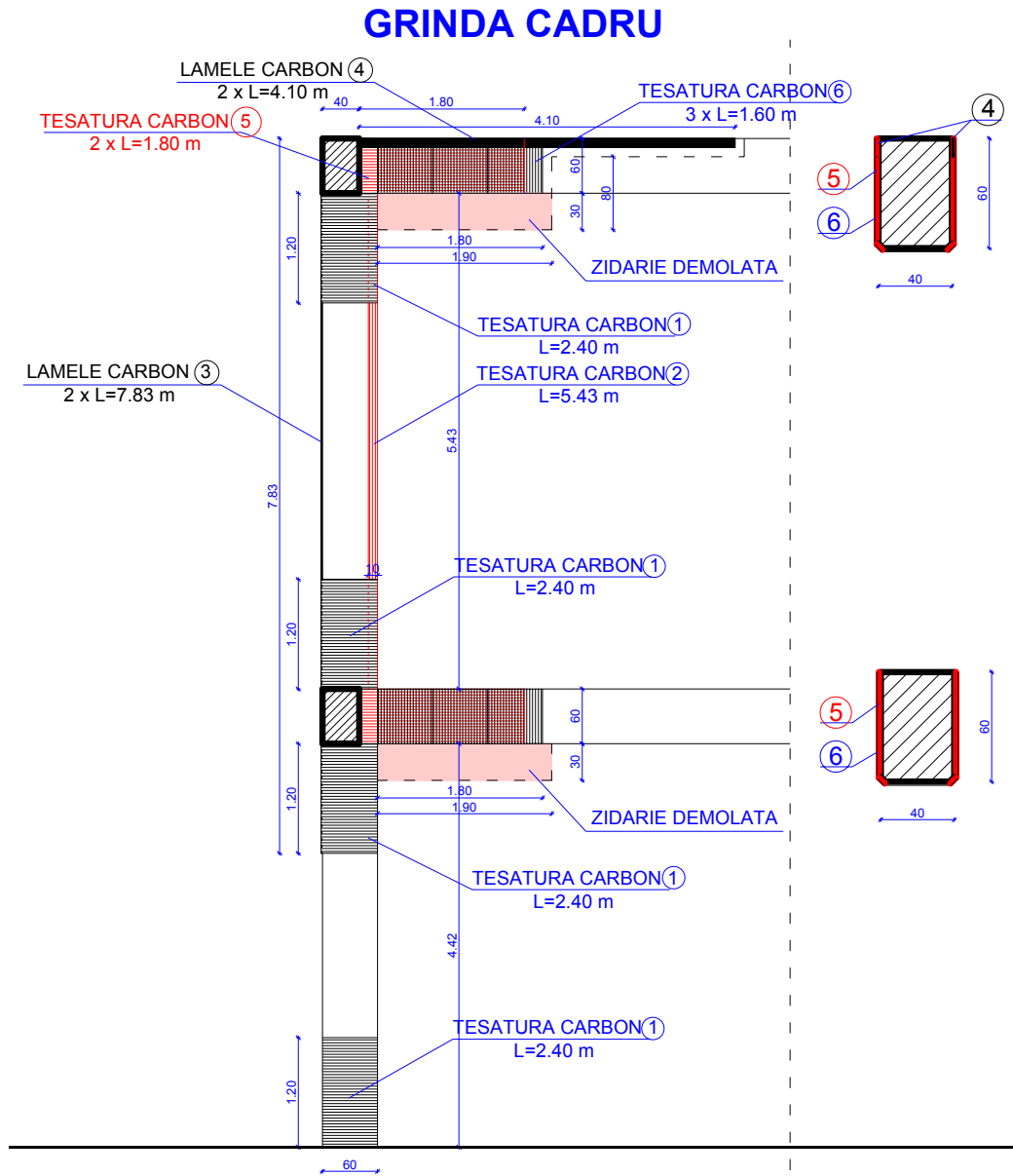


Figura 8.4. Schema de consolidare a cadrelor din beton armat



Spargerea zidăriei în jurul stâlpului



Confinarea stâlpului de la parter cu țesătură



Capăt grindă parter, consolidat cu țesătură



Grinzi etaj consolidate la încovoiere și tăiere



Grindă și stâlp etaj consolidate



Figura 8.5. Starea structurală după consolidare

Întrucât două din cele cinci cadre consolidate au fost alipite de alte hale, rostul seismic de aproximativ 10...15 cm nu a permis parcurgerea tuturor pașilor premergători consolidării cu materiale compozite. Astfel, șlefuirea acelei fețe a stâlpilor din zona rostului a fost aproape imposibil de realizat. Acest lucru a condus la simularea în laboratorul facultății a unei consolidări cu lamele pultrudate din fibre de carbon ancorate la capete prin înfășurare cu țesătură de carbon, în situația critică

În care suprafața betonului nu mai este pregătită prin șlefuire respectiv aspirare și suflare cu aer comprimat. Simularea cu pricina s-a realizat pe o grindă similară cu cele folosite în programul experimental, rezultând elementele consolidate R-2S-W și R-2S-W-2. În urma rezultatelor obținute și relatate în capitolele 6 și 7 ale tezei s-a concluzionat că respectiva consolidare a stâlpilor învecinați cu alte hale poate continua, nefiind periclitată calitatea consolidării.

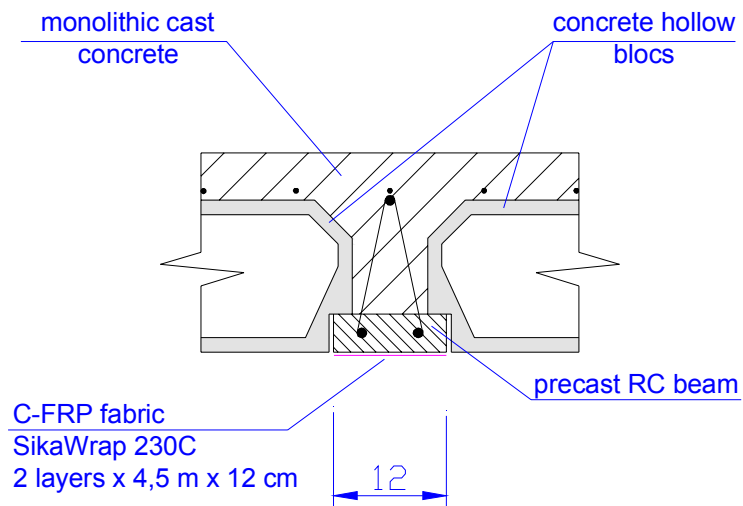
8.3. Consolidarea nervurilor unui planșeu modular

Studiul de caz se referă la un planșeu modular (compus din nervuri, corpuri de umplură și suprabetonare) ale cărui nervuri, din cauza unor greșeli în execuție, au fost consolidate cu țesătură din fibre de carbon.

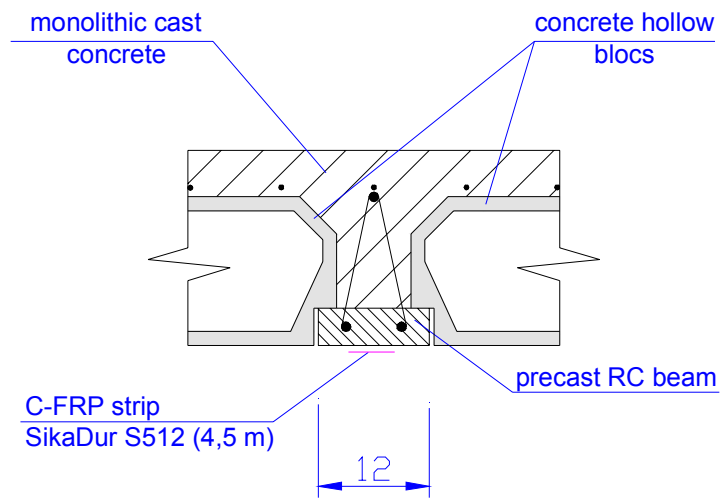
La solicitarea beneficiarului s-a procedat la efectuarea expertizei tehnice a clădirii situate în Timișoara, deoarece s-au constatat fisuri în nervurile planșeului în urma încovoierii exagerate a acestora. Deformațiile mari au apărut în prima fază datorită manipulării greșite a nervurilor la montare, iar în a doua fază ca urmare a suprabetonării, nefiind realizată o sprijinire corespunzătoare a nervurilor. Astfel, în zona de mijloc a planșeului s-a adunat betonul, ceea ce a dus la accentuarea deformațiilor în nervuri. Având în vedere intenția beneficiarului de a utiliza în continuare clădirea s-a impus consolidarea acestor nervuri cu scopul de a stopa deformațiile lor.

În urma calculelor s-a constatat că momentul capabil pe nervură este mai mic decât cel efectiv. Astfel, pentru a mări capacitatea portantă a nervurilor peste valoarea momentului efectiv $M_{ef}=26,1$ kNm, au fost propuse patru metode de consolidare:

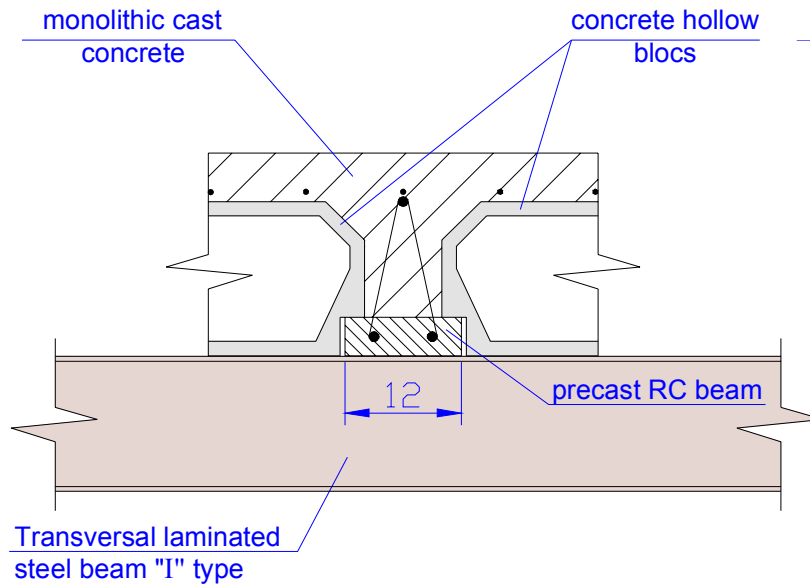
- prin aplicarea în două straturi a unor compozite din țesătura de fibre de carbon tip SikaWrap 230C de 12 cm lățime și 4,5 m lungime, ca în Figura 8.6.a;
- prin aplicarea unor compozite din lamele de fibre de carbon tip Sika Carbodur S512 de 5 cm lățime și 4,5 m lungime, ca în Figura 8.6.b;
- prin așezarea pe direcție transversală a unei grinzi din oțel laminat care să împartă nervurile în două părți egale, ca în Figura 8.6.c;
- prin aplicarea unor platbenzi din oțel de 10 cm lățime și 4,5 m lungime, ca în Figura 8.6.d;



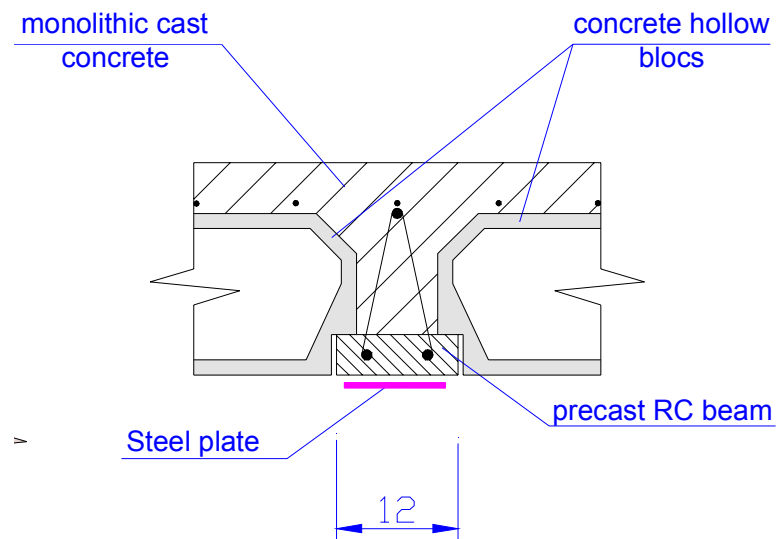
a. Cu două straturi de țesătură din fibre de carbon



b. Cu o lamelă din fibre de carbon cu grosimea de 1,2 mm



c. Cu două straturi de țesătură din fibre de carbon



d. Cu două straturi de țesătură din fibre de carbon

Figura 8.6. Soluții propuse pentru consolidarea nervurilor

Beneficiarul a optat pentru soluția de consolidare cu două straturi din fibre de carbon de 12 cm lățime și lungimea de 4,5 m, după cum se vede în schema de

consolidare din Figura 8.7.

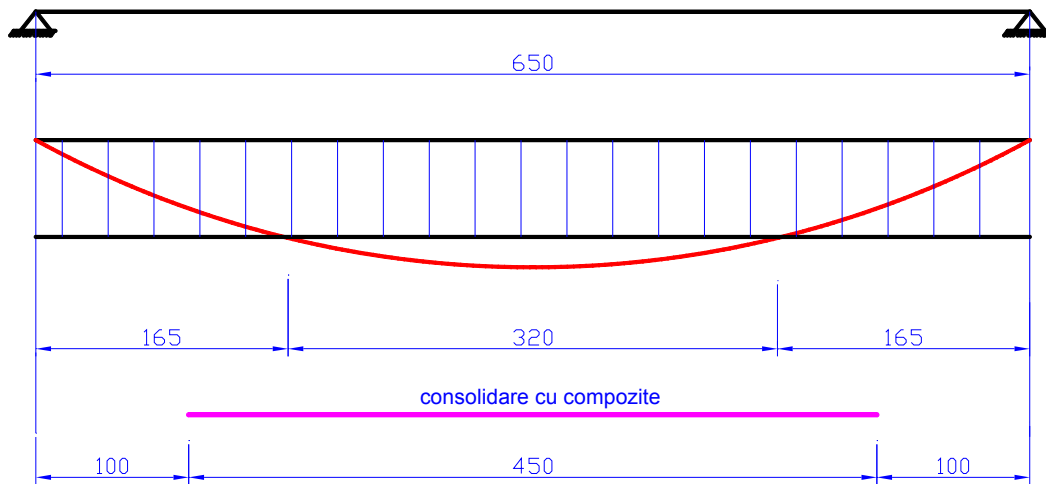


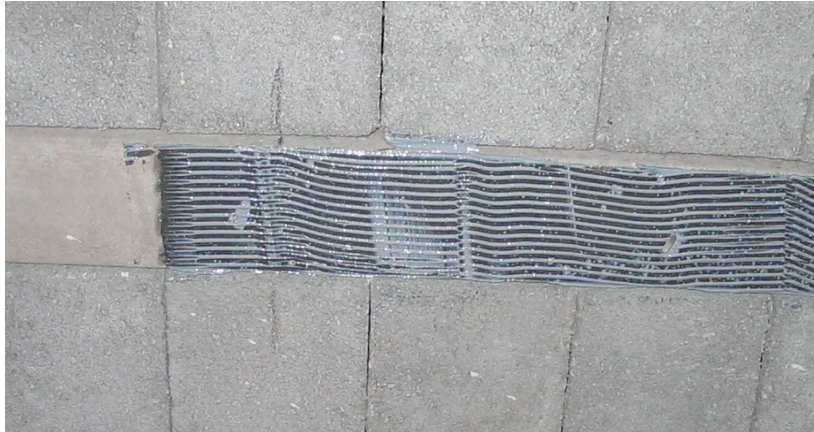
Figura 8.7. Schema de consolidare a nervurilor [cm]

S-au consolidat 12 nervuri, executând următoarele etape tehnologice (Figura 8.8):

- curățarea suprafeței prin șlefuire;
- îndepărtarea impurităților prin suflare cu aer comprimat;
- aplicarea rășinei epoxidice pe stratul suport;
- aplicarea celor două straturi de țesătură din fibre de carbon;
- completarea cu rășină epoxidică - strat protector.



Curățarea suprafeței prin șlefuire și apoi suflare cu aer comprimat



Întinderea rășinii epoxidice pe suprafața suport



Aplicarea țesăturii din fibre de carbon în strat dublu

Figura 8.8. Consolidarea nervurilor cu țesătură din fibre de carbon

În urma consolidării s-au oprit deformațiile în nervuri, stratul de țesătură aplicat fiind aproape insesizabil, nemodificând forma și starea planșeului (Figura 8.9). Durata de execuție a lucrării a fost de aproape o zi de muncă.



Înainte de consolidare



După consolidare

Figura 8.9. Planșeul modular consolidat

9. CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE

Prezenta teză de doctorat cu titlul „GRINZI DIN BETON ARMAT CONSOLIDATE LA ÎNCOVOIERE CU MATERIALE COMPOZITE POLIMERICE. SISTEME DE ANCORARE” a fost elaborată în cadrul Universității Politehnica din Timișoara, Facultatea de Construcții, Departamentul de Construcții Civile, Industriale și Agricole, sub conducerea științifică a domnului prof. Dr. ing. Valeriu Stoian.

În cadrul tezei s-au studiat materialele compozite polimerice armate cu fibre, modurile de utilizare ale acestora, respectiv contribuția lor la consolidarea grinzilor din beton armat. Pentru atingerea obiectivelor au fost realizate o serie de încercări experimentale în cadrul Centrului de Cercetare pentru Materiale, Structuri și Tehnologii pentru Construcții (CES-MAST).

9.1. Concluzii privind consolidarea grinzilor din beton armat cu materiale compozite și sistemele de ancorare

Sintetizarea rezultatelor obținute în urma efectuării încercărilor pe cele 14 elemente ale programului experimental, se găsește în anexă.

Diagramele forță-deformație pentru toate elementele încercate este prezentată în anexa 3, iar cele pentru elementele grupate pe cele două grupe principale de consolidări (cu țesătură din fibre de carbon respectiv cu lamele pultrudate) sunt prezentate în figurile 9.1. și 9.2.

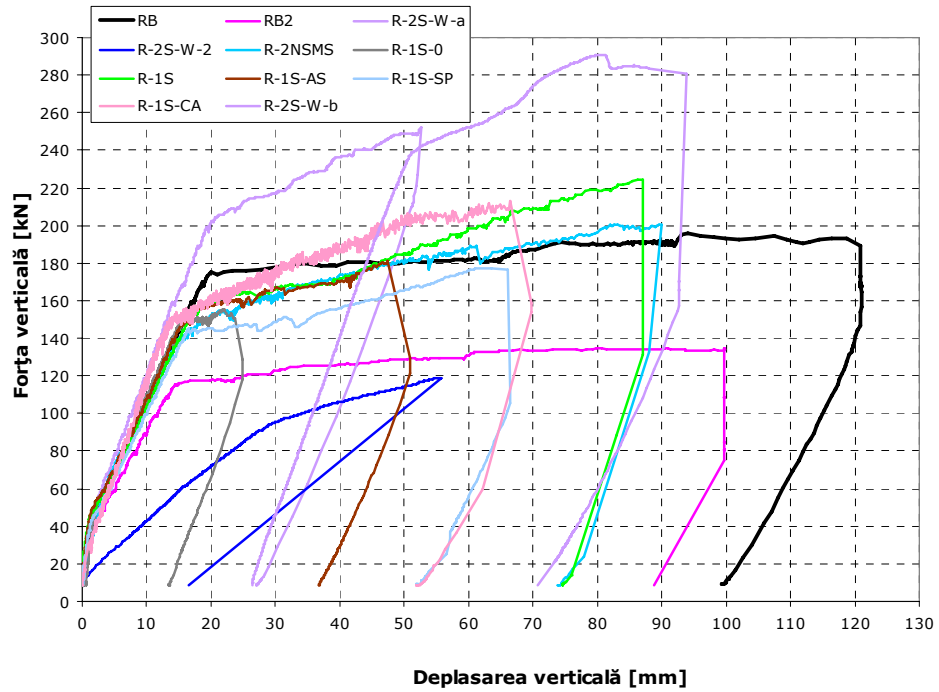


Figura 9.1. Diagramele forță-deplasare pentru grinziile consolidate cu lamele pultrudate din fibre de carbon

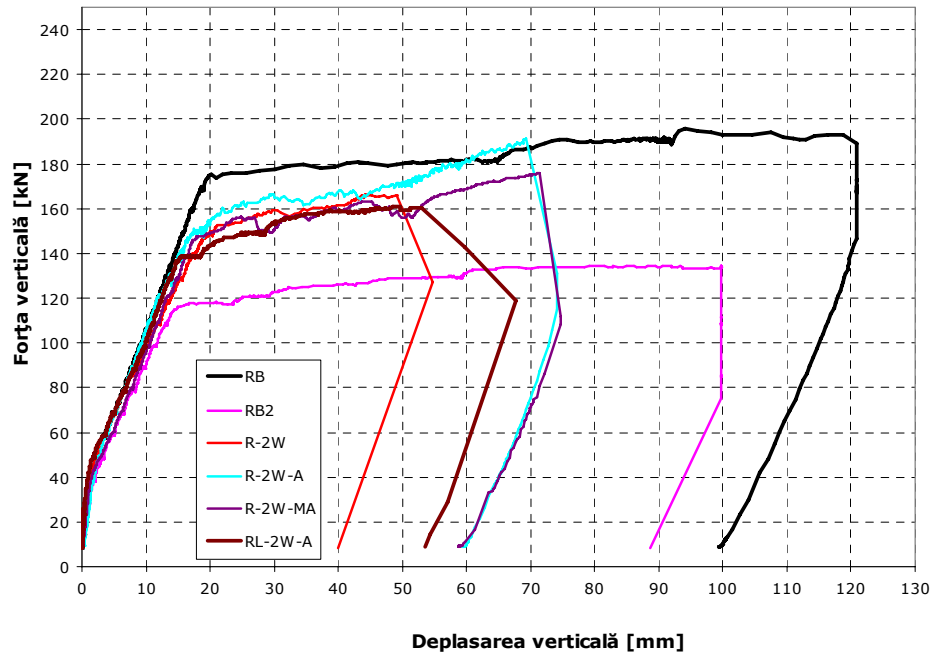


Figura 9.2. Diagramele forță-deplasare pentru grinziile consolidate cu țesătură din fibre de carbon

Astfel, în urma analizării rezultatelor obținute, se observă că utilizarea materialelor compozite la consolidarea grinzilor din beton armat a condus la o creștere semnificativă a capacității portante ultime față de valoarea impusă de 160 kN, pentru majoritatea soluțiilor de consolidare adoptate. Pentru o vizualizare mai bună s-a calculat randamentul acestor sisteme de consolidare propuse în raport cu valoarea capacității ultime impuse, rezultând diagrama de mai jos.

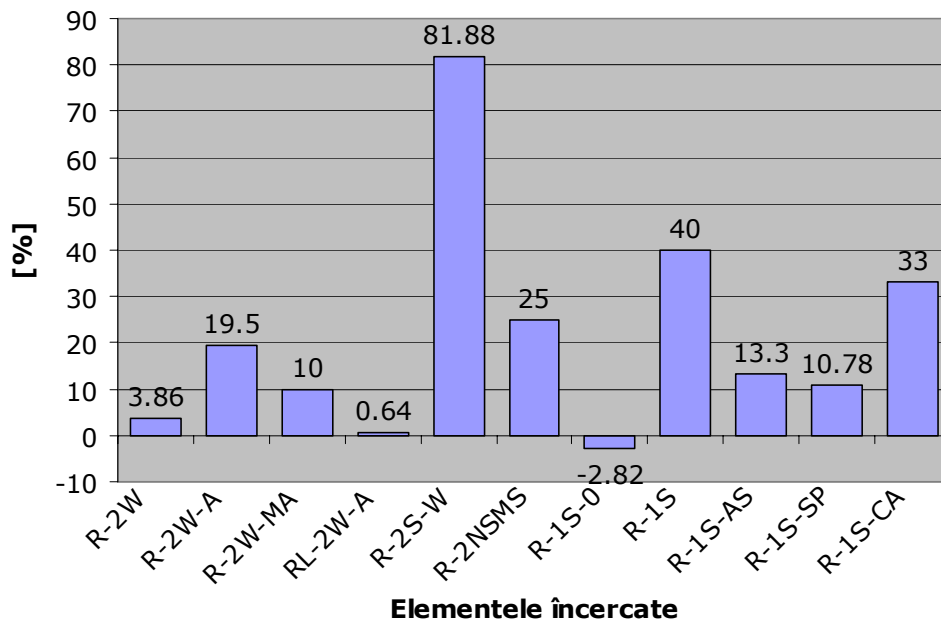


Figura 9.3. Randamentul sistemelor de consolidare

După cum se vede majoritatea sistemelor de consolidare au îndeplinit obiectivul impus al capacității maxime de 160 kN, un singur element, R-1S-0 având un randament negativ, atingând doar 97.18% din capacitatea maximă impusă. După cum s-a observat, acest lucru s-a datorat dezlipirii compozitului de pe suprafața betonului și nu cedării acestuia. Prin urmare, aplicarea diferitelor tipuri de ancoraje a condus la creșterea randamentului soluției de consolidare și implicit a compozitului până la 87%. Acest lucru subliniază **rolul important pe care-l au ancorajele în comportamentul elementelor consolidate cu materiale compozite** cărora li s-a aplicat o încărcare vreticală monoton crescătoare.

S-a calculat randamentul sistemelor de ancorare pentru cele două clase principale de consolidări ale grinzilor la efort din încovoiere: cu țesătură din fibre de carbon și cu lamele pultrudate din fibre de carbon. Pentru prima categorie, toate elementele la consolidarea cărora țesătura a fost ancorată folosind diferite soluții s-au raportat la grinda R-2W (la care nu au fost utilizate ancoraje). Pentru a doua categorie, toate elementele la consolidarea cărora lamela pultrudată a fost ancorată folosind diferite soluții s-au raportat la grinda R-1S-0 (la care nu au fost utilizate ancoraje).

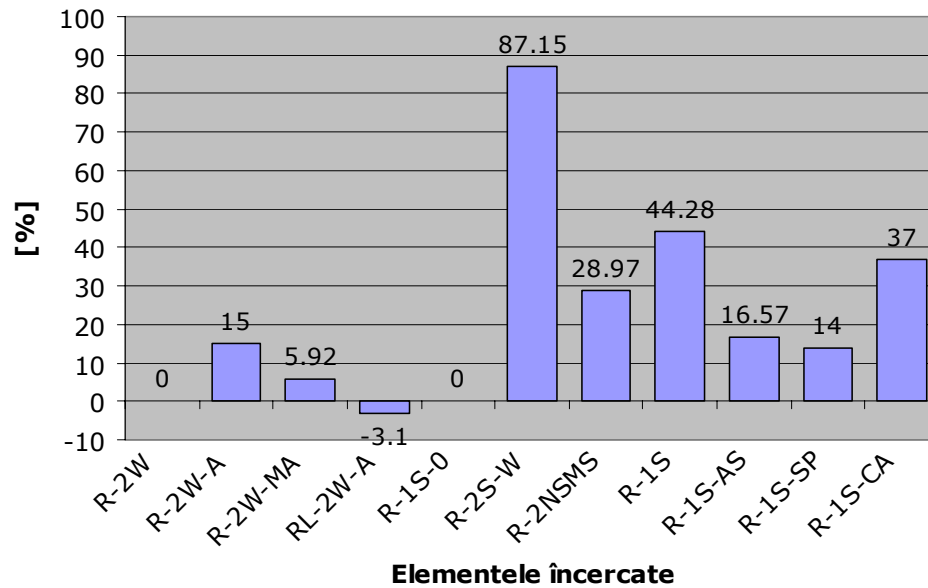


Figura 9.4. Randamentul sistemelor de ancorare

Patru dintre soluții, R-2S-W, R-2NSMS, R-1S și R-1S-CA, au dus la atingerea unei capacități portante ultime mai mari chiar decât grinda martor RB.

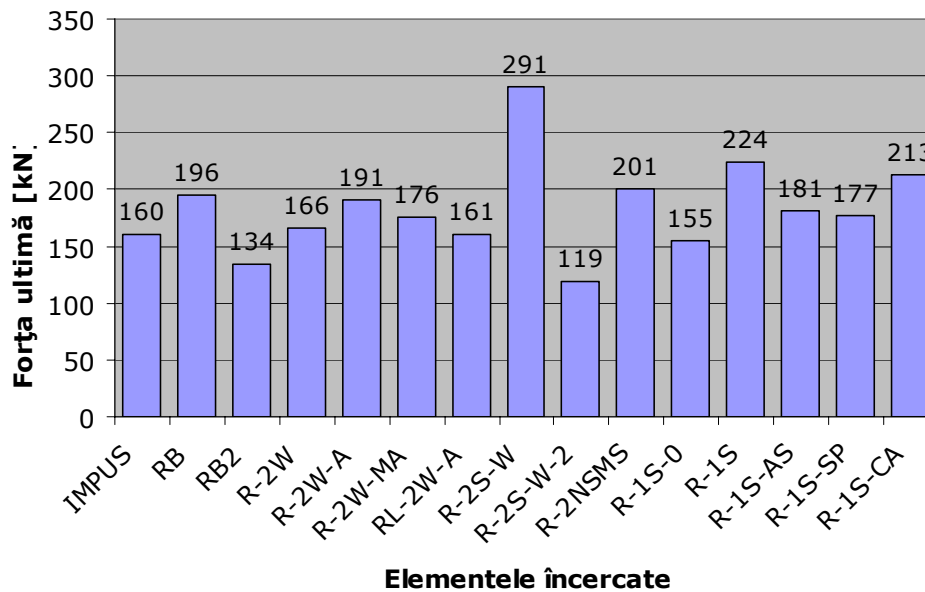


Figura 9.5. Capacitatea portantă ultimă pentru elementele încercate

Un rol deosebit al compozitului a fost în împiedicarea deschiderii fisurilor.

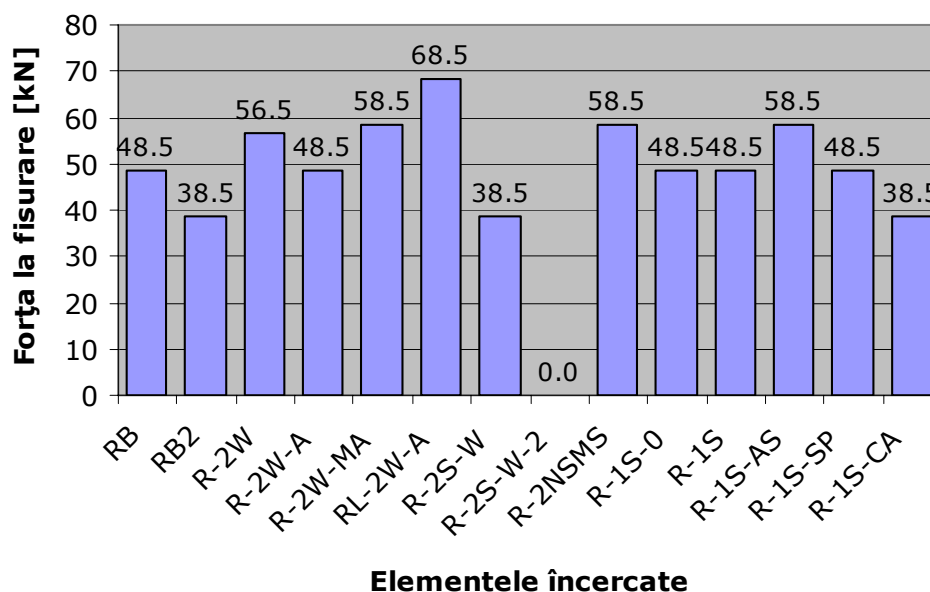


Figura 9.6. Forța la fisurare pentru elementele încercate

Ancorajele gen tijă compozită cu capăt floare (Anchor Spike) sunt o soluție viabilă de valorificare a resturilor de țesătură și chiar au avut un rol important în ancorarea diferitelor materiale compozite utilizate la consolidarea grinzilor, oferind un randament de peste 16% sistemelor de consolidare.

O altă soluție ce sprijină reciclarea materialelor, este folosirea discurilor diamantate uzate ca sisteme de ancorare. Acest tip de ancoraje a crescut randamentul consolidării cu aproape 6%.

Aplicarea compozitelor este foarte pretențioasă, respectarea cu strictețe a pașilor recomandați la efectuarea consolidărilor fiind hotărâtoare în viitorul comportament, sub încărcări, al elementului consolidat.

9.2. Contribuții personale

1. Sistematizarea datelor din literatura de specialitate privind soluțiile de consolidare a grinzilor din beton armat la încovoiere cu materiale compozite polimerice, precum și soluțiile de ancorare.
2. Efectuarea unor analize numerice în scopul evaluării stării de eforturi și de deformare a modelelor experimentale, identificarea modurilor de cedare și a valorilor aproximative a forțelor verticale maxime la care are loc cedarea acestora.
3. Stabilirea și efectuarea de teste pe materiale și sisteme de consolidare.
4. Efectuarea unui program experimental de încercări pe 14 grinzi din beton armat. Două dintre ele au fost încercate până la rupere, constituindu-se în repere pentru restul. Două dintre grinzi au fost consolidate direct, fără sisteme de ancorare, una cu țesătură din

fibre de carbon și una cu lamelă din fibre de carbon. Alte trei grinzi s-au consolidat cu țesătură din fibre de carbon ancorată prin diverse metode, iar alte șapte cu lamele ancorate.

5. Participarea efectivă la executarea consolidărilor, la pregătirea elementului în vederea încercării prin lipirea timbrelor tensiometrice pe compozit și montarea captorilor de deplasare, la încercarea propriu-zisă a încercării și la prelucrarea datelor.
6. Gândirea, promovarea și aplicarea unor soluții de ancorare prin care se reciclează materiale catalogate ca deșeuri (resturi de țesătură, discuri diamantate uzate).
7. Aplicarea în practică a rezultatelor obținute în laborator.
8. Recomandarea folosirii ancorajelor la consolidarea cu materiale compozite polimerice a elementelor structurale din beton armat.

Valorificarea rezultatelor s-a făcut prin:

- publicarea a două lucrări ca prim autor în volumul indexat ISI, al unor manifestări științifice internaționale
- publicarea a 3 lucrări ca și coautor în volumul indexat ISI, al unor manifestări științifice internaționale
- publicarea a 28 de lucrări în volumele unor manifestări științifice naționale și internaționale
- participarea în colectivul de cercetare a 5 granturi derulate în intervalul 2003-2011.

BIBLIOGRAFIE

- [1] „Strengthening of RC Elements By CFRP Plates. Local Failure” – Mazen M. Almakht, György L. Balázs, Kypros Pilakoutas – 2nd PhD Symposium In Civil Engineering, Budapest, 2002.
- [2] „Strengthening of Shear-Damaged Reinforced Concrete T-Beam Bridges with CFRP Strips” – Riadh Al-Mahaidi, Geoff Taplin, John Susa – Publicat în „Composites: Innovations and Structural Applications”, Universitatea New South Wales.
- [3] „Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of Flexural Members” – Ahmed Khalifa, William J. Gold, Antonio Nanni, Abdel Aziz M.I. – Publicat în „ASCE-Journal of Composites for Construction”, Vol. 2, Nr.4, pag. 195- 203, Noiembrie 1998.
- [4] „Static And Fatigue Performance Of RC Beams Strengthened With CFRP Laminates” – Mohsen Shahawy, Thomas E. Beitelman – Publicat în Journal of Structural Engineering, Vol. 125, No. 6, June, 1999.
- [5] „Shear Strengthening Of Continuous RC Beams Using Externally Bonded CFRP Sheets” – Ahmed Khalifa, Gustavo Tumialan, Antonio Nanni, Abdeldjelil Belarbi – Publicat în Simpozionul ACI „4th International Symposium on FRP for Reinforcement of Concrete Structures” (FRPRCS4), Baltimore, pag. 995-1008, Noiembrie 1999.
- [6] „Repair and Retrofit of Wooden Members using Advanced Composites” – Ayman S. Mosallam – Publicat de către „Center for Advanced Composites & Smart Systems for Repair and Rehabilitation”, California State University, USA, 2000.
- [7] „Bond Of FRP Laminates To Concrete” – Laura De Lorenzis, Brian Miller, Antonio Nanni – ACI Structures Journal, Iulie 2000.
- [8] „Strengthening of Reinforced Concrete Structures with Near Surface Mounted FRP Rods” – Laura De Lorenzis, Antonio Nanni, Antonio La Tegola – International Meeting on Composite Materials, PLAST 2000, Milan, Italy, May 9-11, 2000.

- [9] „An Assessment Of In-Situ FRP Shear And Flexural Strengthening Of Reinforced Concrete Joists” – Annaiah Raghu, John J. Myers, Antonio Nanni – Conference Proceeding Paper, Structures Congress - Advanced Technology in Structural Engineering, 2000.
- [10] „Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates” – D. Kachlakeva, D.D. McCurry – Publicat în „Composites: Part B 31” , Editura Elsevier, 2000.
- [11] „FRP Composites For Shear Strengthening Of RC Beams” – Ahmed Khalifa, Laura De Lorenzis, Antonio Nanni – Publicat la „3rd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures”, Ottawa, Canada, Editat de J. Humar și A.G. Razaqpur, pag. 137-144, 15-18 August 2000.
- [12] „Improving Shear Capacity of Existing RC T-Section Beams Using CFRP Composites” – Ahmed Khalifa, Antonio Nanni – Publicat în „Cement and Concrete Composites”, Vol. 22, Nr.2, pag. 165-174, Iulie 2000.
- [13] „Seismic Upgrade of Beam-Column Joints with FRP Reinforcement” – A. Prota, A. Nanni, G. Manfredi, E. Cosenza – Publicat la simpozionul „Industria Italiana del Cemento”, Niembrie 2000.
- [14] „Sprayed-up FRP strengthening for concrete structures” - Tomoki Furuta, Toshiyuki Kanakubo, Takeshi Nemoto, Keisuke Takahashi and Hiroshi Fukuyama - International Symposium on Earthquake Engineering Commemorating Tenth Anniversary of the 1995 Kobe Earthquake, Abstract Volume, p.118, 2001.
- [15] "Composite retrofits to increase the blast resistance of reinforced concrete buildings" – John E. Crawford, Javier Malvar, Kenneth B. Morrill, John M. Ferritto – Tenth International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Mai, 2001
- [16] „Evaluation And Performance Monitoring Of Corrosion Protection By Fiber-Reinforced Composite Wrapping” – S. M. Verhulst, L. A. Fuentes, J. O. Jirsa, D. W. Fowler, H. G. Wheat, and T. Moon - Report de Cercetare No. 1774-1, Conduc pentru „Texas Department of Transportation”, Ianuarie 2001.

- [17] „Overview Of The Japanese Guidelines For Seismic Retrofitting Of RC Columns Using FRP Materials” – Tumialan, G., H. Fukuyama, and A. Nanni - Structures 2001, Washington DC, May 21-23, 2001.
- [18] „Effect Of Corner Radius On The Performance Of Externally Bonded FRP Reinforcement” – Xinbao Yang, Antonio Yang, Genda Chen - Proceedings of FRPRCS5, Non-metallic reinforcement for Concrete Structures, Cambridge, July 16th-18th, 2001.
- [19] „Concrete Beams Strengthened with Misaligned CFRP Laminates” – Xinbao Yang, Antonio Yang – Proceedings of FRPRCS5, Non-metallic reinforcement for Concrete Structures, Cambridge, July 16th-18th, 2001.
- [20] „Interfacial stresses in reinforced concrete beams bonded with a soffit plate: a finite element study” – J.G. Teng, J.W. Zhang, S.T. Smith – Publicată în „Construction and Building Materials 16”, Editura Elsevier, 2002.
- [21] „Finite Element Modeling Of Reinforced Concrete Structures Strengthened With FRP Laminates” – Damian Kachlakev, Thomas Miller, Solomon Yim, Kasidit Chansawat, Tanarat Potisuk – Final Report SPR 316, Oregon Department of Transportation, Mai, 2001.
- [22] „Design Recommendations For Concrete Structures Prestressed With FRP Tendons” – Charles W. Dolan, H.R. Hamilton III, Charles E. Bakis, Antonio Nanni – FHWA CONTRACT, Nr. DTFH61-96-C-00019, August, 2001.
- [23] „Mechanics of Bonds in an FRP Bonded Concrete Beam” – K.T. Lau, P.K. Dutta, L.M. Zhou, D. Hui – Publicat în „Composites Part B 32 (2001)”, pag. 491-502, Editura Elsevier, 2001.
- [24] „Anchorage of externally bonded reinforcements subjected to combined shear/bending action” – K. Brosens, D. Van Gemert – Conferința CICE, HK, China, 2001.
- [25] „Shear Performances Of RC Beams Strengthened In Situ With FRP Composites” – Raghu H Annaiah, Francesco Micelli, Antonio Nanni – Publicat în „Proceedings - Composites In Construction”, Porto, Portugalia, 10-12 Octombrie, 2001.
- [26] „Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer Rods” – Laura De Lorenzis, Antonio Nanni – Publicat în „ACI Structural Journal”, Titlul Nr. 98-S6, Ian-Febr, 2001.

- [27] „Constitutive Modelling of Concrete in Compression” – Peter GRASSL, Teză de Licență în Inginerie Civilă, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Göteborg, Sweden 2002
- [28] „A Numerical Method Of Mixed Modeling On Shear Design Of Reinforced Concrete Members Strengthened With CFRP Laminates” – Yu Liu, Tiecheng Wang, Lijun Wang - 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University, New York, NY, June 2-5, 2002.
- [29] „Strengthening Of Corbels Using CFRP. An Experimental Program” – Mohamed A. Elgwady, Mohamed Rabie, Mohamed T. Mostafa - 3rd International Conference for Composite in Infrastructure ICCI’02, San Francisco, 2002.
- [30] „Simplified Load-Deflection Calculations Of FRP Strengthened RC Beams Based On A Rigorous Approach” – Hasan Charkas, Hayder A. Rasheed, Hani Melhem - 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University, New York, NY, June 2-5, 2002.
- [31] „Strength and Ductility of Concrete Beams Reinforced with Carbon FRP and Steel” – Dat Duthinh, Monica Starnes – Contract „NSTIR 6830”, U.S. Department of Commerce, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, USA, 2002.
- [32] „Static and dynamic behaviour of RC beam model strengthened by CFRP-sheets” – R. Capozucca, M. Nilde Cerri – Publicat în „Construction and Building Materials 16 (2002)”, pag. 91-99, Editura Elsevier, 2002.
- [33] „Strengthening Prestressed Concrete Beams with Carbon Fiber Reinforced Polymer Plates” – Peter F. Takács, Terje Kanstad – Publicat pe site-ul „Nordic Concrete Research”, la adresa: <http://www.itn.is/ncr/publications/pub-25.htm>
- [34] „FRP Strengthening of RC Flexural Members - Ductility Issues” – R . Delpak – Conferința ACIC, Southampton, 2002.
- [35] „Size of FRP laminates to strengthen reinforced concrete sections in flexure” – A. F. Ashour – Publicat în „Structures & Buildings” Nr. 152 , Partea 3, 2002.

- [36] „FRP Strengthened Behaviour of RC Flexural Elements Subjected to Degradation Influences” – R. Delpak, D.B. Tann, E. Andreou, M. Abuwarda, D.K. Pugh – Conferința ACIC, Southampton, 2002.
- [37] „Debonding in RC cantilever slabs strengthened with FRP strips ” – J. Yao, J.G. Teng, L. Lam – Proceedings of the „International Conference on Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction”, UK, , pp. 125-133, 15-17 April 2002.
- [38] „Premature Failure of RC Continuous Beams Strengthened with CFRP Laminates” – A.A. El-Refaie, A.F. Ashour, S.W. Garrity – Conferința ACIC, Southampton, 2002.
- [39] „Interfacial Stresses in Plated RC Beams Under Arbitrary Symmetric Loads: a High-Order Closed-Form Solution” – J. Yang, J.F.Chen, J.G. Teng – Presentation, University of Leeds, 2002.
- [40] „A New Prepreg Material Used In Conjunction With Concrete To Form A Structural Unit” – Jonathan Hulatt, Prof Len Hollaway, Anthony Thorne – Conferința ACIC, Southampton, 2002.
- [41] „Characterization And Modeling Of Debonding In RC Beams Strengthened With FRP Composites” – Oral Buyukozturk, Oguz Gunes, Erdem Karaca – 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University, New York, June 2-5, 2002.
- [42] „A Fracture-Based Model For Debonding Of FRP Plate From Concrete Substrate” – Christopher K.Y. Leung, Yong Yang – 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University, New York, June 2-5, 2002.
- [43] „Strengthening Of Concrete Beams With Mechanically Fastened FRP Strips” – Anthony J. Lamanna, Lawrence C. Bank, David T. Borowicz, Dushyant Arora – Publicat la „Third International Conference on Composites in Infrastructure”, University of Arizona, 2002.
- [44] „Effect of Flexural Cracking on Plate End Shear Stresses in FRP-Strengthened Beams” – Herman C.Y. LUK, Christopher K.Y. LEUNG – Universitatea de Știință și Tehnologie, Hong Kong , Departamentul Inginerie Civilă, Prezentare, 2002.
- [45] „Shear Strengthening Of RC Beams Using Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips” – Zhichao Zhang, Cheng-Tzu Thomas Hsu – 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University, New York, June 2-5, 2002.

- [46] „Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites” – Ahmed Khalifa, Antonio Nanni – Publicat în „Construction and Building Materials 16”, pag. 135-146, Editura Elsevier, 2002.
- [47] „FRP Seismic Strengthening Of Frames” – Mihaela-Anca CIUPALA, Kypros PILAKOUTAS – Proceedings of fib Symposium „Concrete Structures in Seismic Regions”, Atena, 2003.
- [48] „Design Approach for Carbon Fiber-Reinforced Polymer Prestressed Concrete Bridge Beams” – Nabil F. Grace, S.B. Singh – Publicat în „ACI Structural Journal”, Titlul nr. 100-S40, Mai-Iunie, 2003.
- [49] „Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding” – J.F. Chen, J.G. Teng – Publicat în „Construction and Building Materials 17”, Pag. 27-41, Editura Elsevier, 2003.
- [50] „Deflection and crack-width prediction of concrete beams reinforced with glass FRP rods” – Houssam Toutanji, Yong Deng – Publicat în „Construction and Building Materials 17”, Pag. 69-74, Editura Elsevier, 2003.
- [51] „Finite element modelling of concrete cover separation failure in FRP plated RC beams” – Z.J. Yang, J.F. Chen, D. Proverbsc – Publicat în „Construction and Building Materials 17”, Pag. 3-13, Editura Elsevier, 2003.
- [52] „Behavior Of Historic Reinforced Concrete Bridge Retrofited For Flexure And Shear Deficiencies With Externally Applied FRP Composites: Testing, Strengthening Design Method, And Finite Element Modeling” – Damian I. KACHLAKEV – fib Symposium „Concrete Structures in Seismic Regions”, Atena, 2003.
- [53] „Design And Evaluation Of Full-Size Beams Strengthened For Shear And Flexure With FRP Composites: Testing, Parametric Studies And FEM Analysis” – Damian I. KACHLAKEV – fib Symposium „Concrete Structures in Seismic Regions”, Atena, 2003.
- [54] „Preservation Of Existing Bridges In Kentucky Using Advanced Composites” – Issam HARIK, Tong ZHAO, Ching Chiaw CHOO – Publicat în „19th US-Japan Bridge Engineering Workshop”, 27-29 Oct. 2003.

- [55] „Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites” – Oral Buyukozturk, Oguz Gunes, Erdem Karaca – Publicat în „Construction and Building Materials 18”, Pag. 9-19, Editura Elsevier, 2004.
- [56] „Fiber-Section FE Of FRP-Strengthened RC Beam For Seismic Analysis” – Michele BARBATO, Giorgio MONTI, Federico SANTINELLI – fib Symposium „Concrete Structures in Seismic Regions”, Atena, 2003.
- [57] „A Study On Mechanical Anchorage For Shear Rehabilitation Of RC Structures” – Paul SCHUMAN, Vistasp M. KARBHARI – fib Symposium „Concrete Structures in Seismic Regions”, Atena, 2003.
- [58] „Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets” – Björn Täljsten – Publicat în „Construction and Building Materials 17”, pag. 15-26, Editura Elsevier, 2003.
- [59] „Materiale compozite pentru construcții” – Valeriu Stoian, Tamas Nagy-Gyorgy, Daniel Dan, Janos Gergely, Cosmin Dăescu –Editura Politehnica, 2004.
- [60] „Materiale compozite polimerice pentru consolidarea elementelor din zidărie și beton” –Tamas Nagy-Gyorgy –Editura Politehnica, 2007.
- [61] V. Stoian, T. Nagy-Gyorgy, D. Diaconu, C. Dăescu – “Studiu tehnico – economic și reabilitarea grinzilor din beton armat cu materiale compozite”, Simpozion AICPS, București 2005.
- [62] D. Diaconu, C. Dăescu, V. Stoian, T. Nagy-Gyorgy, “Consolidarea grinzilor la forță tăietoare folosind materiale compozite – studiu economic”, Sesiunea de comunicări științifice, Cluj-Napoca, ISBN 973-662-163-4, aprilie 2005.
- [63] D. Diaconu, S. Ianca, D. Tudor, S. Secula, T. Berar, T. Nagy-Gyorgy – “Comportarea pereților din zidărie de cărămidă-rezultate și perspective”, Zilele Academice Timișene, Timișoara, ISBN 973-661-652-5, 2005.
- [64] V. Stoian, D. Dan, T. Nagy-Gyorgy, C. Dăescu, D. Diaconu, G. Sas – “Studiul performanțelor unei fâșii prefabricate consolidate cu țesătură din fibră de carbon”, Simpozion Structuri Prefabricate din Beton, Cluj-Napoca 2005.
- [65] V. Stoian, T. Nagy-Gyorgy, C. Dăescu, D. Dan, M. Moșoarcă, D. Diaconu, G. Sas – “Compozite polimerice pentru reabilitări seismice – studii și cercetări”, Conferința Națională de Inginerie Seismică III, București, 2005.

- [66] V. Stoian, T. Nagy-Gyorgy, C. Dăescu, D. Diaconu, G. Sas – “Theoretical and experimental study of prestressed concrete beam support zone strengthened with composite materials”, Congresul FIB, Italia, Napoli, ISBN-10: 88-89972-06-8, 2006.
- [67] V. Stoian, T. Nagy-Gyorgy, D. Dan, C. Dăescu, M. Moșoarcă, D. Diaconu – “Polymeric composites for seismic rehabilitations – studies and research”, Simpozionul INDIS , Novi Sad, Serbia, ISBN 86-7892-016-5, 2006.
- [68] T. Nagy-Gyorgy, V. Stoian, D. Dan, D. Diaconu, C. Dăescu – “In-plan shear retrofit of masonry walls with FRP composites”, Buletinul Institutului Politehnic Iasi, Tomul LII (LVI), Fasc. 1-2, ISSN 1224-3884, 2006.
- [69] T. Nagy-Gyorgy, V. Stoian, D. Diaconu, C. Dăescu, D. Dan, G. Sas, M. Moșoarcă – “Pereți din beton armat și capete de grinzi consolidate cu materiale compozite-rezultatele încercărilor”, Buletinul AICPS, ISBN xxx, Nr. 1 / 2007.
- [70] A. Dogaru, N. Muntean, S. Bordea, C. Dăescu, D. Diaconu, I. Demeter, S.C. Floruț – “Studiu experimental al unei soluții de consolidare a zidăriei”, Sesiunea Națională de Comunicări Științifice Studentești, Cluj-Napoca 2007.
- [71] D. Diaconu, V. Stoian, T. Nagy-Gyorgy, D. Dan, C. Dăescu, I. Demeter, “FRP Bars Application in Construction Area”, Zilele Academice Timișene, Timișoara, pp. 107 - 116, mai 2007
- [72] D. Diaconu, V. Stoian, T. Nagy-Gyorgy, C. Dăescu, D. Dan, I. Demeter, “Reabilitarea grinzilor din beton armat cu materiale compozite – studiu de caz”, Zilele Academice Timișene, Timișoara, pp. 117 - 128, mai 2007.
- [73] S. Ianca, T. Nagy-Gyorgy, D. Diaconu, C. Dăescu – “Influența tehnologiei de reabilitare asupra rigidității elementelor de zidărie”, Zilele Academice Timișene, Timișoara, ISSN 1843-0910, mai 2007
- [74] T. Nagy-Gyorgy, V. Stoian, D. Dan, C. Dăescu, D. Diaconu, M. Moșoarcă – “Seismic retrofit of masonry and RC elements with FRP composite-research and application”, International Symposium in Seismic Risk Reduction – ISSR07, București, ISBN 978-973-638-312-0, 2007
- [75] T. Nagy-Gyorgy, V. Stoian, D. Dan, C. Dăescu, D. Diaconu, G. Sas, M. Moșoarcă – Research Results on RC Walls and Dapped Beam Ends Strengthened with FRP Composites, FRPRCS-8, Patras, Grece, ISBN 978-960-89691-0-0, July 2007.

- [76] D. Diaconu, T. Nagy-Gyorgy, V. Stoian, S.C. Floruț – “RC slabs strengthened with FRP composites – case studies” (Studii de caz privind reabilitarea unor planșee cu materiale compozite), International conference “Constructions 2008”, ISSN 1221-5848, Vol. 2, Cluj-Napoca, 2008.
- [77] S.C. Floruț, T. Nagy-Gyorgy, V. Stoian, D. Diaconu – “Strengthening of a hollow core precast slab using FRP composite materials – testing and rating” (Consolidarea unei fâșii cu goluri de beton precomprimat cu materiale compozite polimerice – testare și evaluare), International conference “Constructions 2008”, ISSN 1221-5848, Vol. 2, Cluj-Napoca, 2008.
- [78] T. Nagy-Gyorgy, V. Stoian, C. Dăescu, D. Diaconu, D. Dan – “Research Results On Dapped Beam Ends Strengthened With FRP Composites” (Capete de grinzi consolidate cu compozite polimerice – rezultatele cercetărilor), International conference “Constructions 2008”, ISSN 1221-5848, Vol. 2, Cluj-Napoca, 2008.
- [79] D. Tudor, C. Furdui, A. Tudor, S. Ianca, L. Nicolae, D. Diaconu – “Refunctionalizarea și reabilitarea clădirilor ce aparțin Palatului Culturii “corp vechi” OPERA din Timisoara”, Conferința Națională Tehnico-Științifică “Tehnologii moderne pentru mileniul III”, 14 pg. 266-279, ISSN 1454-4067, vol XI, Oradea, 2008.
- [80] D. Diaconu, T. Nagy-Gyorgy, V. Stoian, D. Dan, S. C. Floruț, C. Dăescu, I. Demeter – “Economic Assessment Of Different Shear Strengthening Methods For Clay Brick Masonry Walls”, Protection of Historical Buildings, PROHITECH 09, Roma, Italia, 6pg. 1275-1280, vol II, ISBN 978-0-415-55805-1 (pentru volumul 2) 978-0-415-55803-7 (pentru setul de 2 volume), Iunie 2009 – ISI Proceeding.
- [81] T. Nagy-Gyorgy, V. Stoian, D. Dan, C. Dăescu, I. Demeter, D. Diaconu – “Experimental Assessment On Shear Strengthening Of Clay Brick Masonry Walls Using Different Techniques”, Protection of Historical Buildings, PROHITECH 09, Roma, Italia, 6pg. 1653-1658, vol II, ISBN 978-0-415-55805-1 (pentru volumul 2) 978-0-415-55803-7 (pentru setul de 2 volume), Iunie 2009 - ISI Proceeding.
- [82] D. Diaconu, T. Nagy-Gyorgy, C. Dăescu, V. Stoian, S. C. Floruț – “RC Elements Strengthened With FRP Composite - Economical Study”, Proceedings of the 9th International Symposium on Fiber-Reinforced

- Polymer Reinforcement for Concrete Structures, Sydney, Australia, 4 pg. (abstract 1 pag. - 63), ISBN 978-0-9806755-0-4, July 2009.
- [83] D. Diaconu, V. Stoian, S. C. Floruț, "Anchoring Solutions for CFRP Lamellas Used in Flexural Strengthening of RC Beams", Tehnologii Moderne Pentru Mileniul III, Oradea, România, vol. XII, pp. 89 - 96, ISSN 1454-4067, Noiembrie 2009.
- [84] D. Diaconu, V. Stoian, S. C. Floruț, "Flexural Strengthening of RC Beams Using CFRP Lamellas - Anchoring Solutions", iNDiS 2009, Planning, Design, Construction and Renewal in the Civil Engineering, Novi Sad, pp. 165 - 172, ISBN 978-86-7892-221-3, November 2009.
- [85] D. Diaconu, V. Stoian, S.C. Floruț, "Anchoring Influence in RC Beams Flexural Strengthening Using CFRP Lamellas", Latest Trends on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology - Corfu Island, Greece, pp. 261 - 265, July 2010 - ISI Proceeding.
- [86] Floruț S. C., Stoian V. - "Strengthening of RC slabs with cut-out openings using FRP composite materials" - preliminary aspects of research program, Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on Sustainability in Science Engineering (SSE '09), Timișoara, România, pp. 496-501, Mai 2009 - ISI Proceeding.
- [87] Floruț S. C., Stoian V., Nagy-György T., Diaconu D. - "Two-way RC slabs strengthened using composite materials - reference points of research program, testing procedure and instrumentation", Annals of University of Oradea - Constructions and hydro-utility installations fascicle, Oradea, România, pp. 111-116, Nov 2009.
- [88] Floruț S. C., Stoian V., Nagy-György T., Dan D., Diaconu D. - "Retrofitting of two-way RC slabs with and without cut-out openings by using FRP composite materials", Latest trends on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology, 3rd WSEAS International Conference on ENGINEERING MECHANICS, STRUCTURES, ENGINEERING GEOLOGY (EMESEG '10) International Conference on Geography and Geology 2010 (WORLDGEO '10), Corfu, Grecia, pp. 245-250, July 2010 - ISI Proceeding.
- [89] Floruț S. C., Stoian V., Dan D., Nagy-György T., Diaconu D. - "Experimental investigations of the behavior of RC slabs retrofitted with CFRP materials", Analele Universității din Oradea - Fascicula "Construcții și

-
- Instalații Hidroedilitare", Oradea, România, XIII-2, pp. 43-50, November 2010.
- [90] Floruț S. C., Stoian V., Dan D. Nagy-György T., Diaconu D. – "Efficiency assessment of CFRP strengthening solution applied on two RC slabs", Analele Universității din Oradea - Fascicula "Construcții și Instalații Hidroedilitare", Oradea, România XIII-2 Supl 1, pp. 113 120, November 2010.
- [91] Floruț S. C., Stoian V., Nagy-György T., Dan D., Diaconu D. – "Combined NSMR-FRP and EB-FRP technique applied for retrofitting of RC slabs", Structural Faults and Repair-2010 - 13th International Conference, Edinburgh, Scoția, pp.113/6e, June 2010
- [92] Floruț S. C., Stoian V., Nagy-György T., Dan D., Diaconu D.- "Experimental evaluation of FRP retrofitting system for two-way RC slabs", CCC 2011 - 7th CCC CONGRESS BALATONFURED, Balatonfured, Hungary, September 2011.
- [93] Floruț S. C., Stoian V., Diaconu D., Dan D. – "Experimental investigations of the behavior of RC slabs retrofitted by a mixed NSMR-FRP and EB-FRP technique", SMAR 2011 Dubai, First Middle East Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures", Dubai, EAU, pp. 167/7e, February 2011.

ANEXA

A1. PROGRAMUL EXPERIMENTAL

Nr. Crt.	NUME ELEMENT	DESCRIERE	
1	RB	grindă martor din beton armat cu 3 bare Ø16	MAR TOR
2	RB2	grindă martor din beton armat cu 2 bare Ø16	
3	R-2W	grindă consolidată pe fața inferioară cu 2 straturi de țesătură din carbon (SW 230C), b=180 mm, L=3700 mm	ȚESĂTURĂ
4	R-2W-A	grindă consolidată la fața inferioară cu 2 straturi de țesătură din carbon (SW 230C), b=180 mm, L=3700 mm, ancorate la capete cu câte 3 tije tip floare din fibre de carbon (Ankor Spikes)	
5	R-2W-MA	grindă consolidată la fața inferioară cu 2 straturi de țesătură din carbon (SW 230C), b=180 mm, L=3700 mm, ancorate la capete cu câte 2 discuri metalice diamantate Ø112 mm reciclate , prinse în beton cu conexpanduri	
6	RL-2W-A	grindă consolidată pe fețele laterale cu 2 straturi de țesătură din carbon (SW 230C), b=90 mm, L=3700 mm, ancorate la capete cu câte 3 tije tip floare din fibre de carbon (Ankor Spikes)	LAMELĂ
7	R-2S-W	grindă consolidată la fețele inferioară și superioară cu câte 1 lamelă din carbon (SD S512), h=1.2 mm, b=50 mm, L=3700 mm, ancorate la capete prin înfășurarea grinzii într-un strat cu țesătură din carbon (SW 230C) pe o lățime de 1200 mm	
8	R-2S-W-2	grinda precedentă rotită cu fața superioară în jos	
9	R-2NSMS	grindă consolidată la fața inferioară cu 2 lamele din carbon, h=1.2 mm, b=20 mm, L=3700 mm, montate în șlițuri tăiate în beton (Near Surface Mounted Strenghtening)	
10	R-1S-0	grindă consolidată la fața inferioară cu 1 lamelă din carbon (SD S512), h=1.2 mm, b=50 mm, L=3700 mm	
11	R-1S	grindă consolidată la fața inferioară cu 1 lamelă din carbon (SD S512), h=1.2 mm, b=50 mm, L=3700 mm, ancorată la capete cu plăcuțe metalice prinse în beton cu buloane ancorate chimic	
12	R-1S-AS	grindă consolidată la fața inferioară cu 1 lamelă din carbon (SD S512), h=1.2 mm, b=50 mm, L=3700 mm, ancorată la capete cu câte 2 tije tip floare din fibre de carbon (Ankor Spikes)	
13	R-1S-SP	grindă consolidată la fața inferioară cu 1 lamelă din carbon (SD S512), h=1.2 mm, b=50 mm, L=3700 mm, ancorată la capete cu câte 3 plăcuțe metalice (h=10 mm, b=40 mm) prinse în beton cu conexpanduri	
14	R-1S-CA	grindă consolidată la fața inferioară cu 1 lamelă din carbon (SD S512), h=1.2 mm, b=50 mm, L=3700 mm, ancorată pe toată lungimea cu buloane prinse chimic în beton	

A2. SINTEZA REZULTATELOR PROGRAMULUI EXPERIMENTAL

Nr. Crt.	NUME ELEMENT	F_{fisurare} [kN]	F_{el} [kN]	F_{max} [kN]	Δ_{fisurare} [mm]	Δ_u [mm]	Randamentul consolidării [%]	Randamentul ancorajului [%]
1	RB	48.5	78	196	2.25	120.94	-	-
2	RB2	38.5	54	134	1.98	99.72	-	-
3	IMPUS	-	-	160	-	-	-	-
4	R-2W	56.5	66	166	3.21	49.09	+3.86	-
5	R-2W-A	48.5	76	191	2.70	69.32	+19.50	+15.00
6	R-2W-MA	58.5	70	176	4.45	71.42	+10.00	+5.92
7	RL-2W-A	68.5	64	161	4.85	52.99	+0.64	-3.10
8	R-2S-W	38.5	116	291	1.18	93.87	+81.88	+87.15
9	R-2S-W-2	-	48	119	-	55.86	-	-
10	R-2NSMS	58.5	80	201	3.40	89.89	+25.00	+28.97
11	R-1S-0	48.5	62	155	2.09	23.67	-2.82	-
12	R-1S	48.5	90	224	1.80	87.11	+40.00	+44.28
13	R-1S-AS	58.5	73	181	3.29	47.44	+13.30	+16.57
14	R-1S-SP	48.5	71	177	2.36	66.06	+10.78	+14.00
15	R-1S-CA	38.5	85	213	2.14	66.27	+33.00	+37.00

A3. DIAGRAMA FORȚĂ-DEFORMAȚIE PENTRU TOATE ELEMENTELE ÎNCERCATE

