

STUDIUL PERFORMANȚELOR ELEMENTELOR SOLICITATE LA ÎNCOVOIERE CONSOLIDATE CU MATERIALE COMPOZITE POLIMERICE

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

Ing. Sorin-Codruț FLORUȚ

Conducător științific: prof.univ.dr.ing. Valeriu STOIAN
Referenți științifici: prof.univ.dr.ing. Nicolae JĂRANU
prof.univ.dr.ing. Zoltan KISS
prof.univ.dr.ing. Corneliu BOB

Ziua susținerii tezei: 28 Septembrie 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, 2011

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, în perioada 2007-2011. Consider acest pas ca fiind cel mai important în pregătirea mea profesională și țin să le mulțumesc tuturor celor ce au contribuit la această reușită.

Mulțumiri deosebite se cuvin conducătorului de doctorat Prof. dr. ing. Valeriu Augustin STOIAN pentru șansa oferită și pentru încrederea acordată în momentul înscrierii la doctorat. Mă simt profund îndatorat și recunoscător pentru constanta și neprețuita dumneavoastră îndrumare, precum și pentru aportul semnificativ avut în dezvoltarea mea profesională!

Le mulțumesc în mod deosebit mult mai experimentaților mei colegi Ș.I. dr. ing. Tamás NAGY-GYÖRGY și Conf. dr. ing. Daniel DAN, pentru sfaturile și aprecierile extrem de pertinente, acordate fără rezerve pe întreaga perioadă de desfășurare a stagiului de doctorat.

Țin să le mulțumesc dl. Prof. dr. ing. Valeriu STOIAN și Ș.I. dr. ing. Tamás NAGY-GYÖRGY, aceștia fiind cei care au identificat oportunitatea de cercetare în acest domeniu și au inițiat cercetarea prin proiectele CNCSIS Cod 355 și CEEEX 1436/2006.

Mulțumiri speciale adresez și colegului drd. ing. Dan DIACONU pentru ajutorul constant acordat în timpul desfășurării programului experimental. Fără de priceperea lui deosebită privind problematica practică a tezei, aș fi fost cu siguranță pierdut...

Le mulțumesc în mod deosebit referenților științifici: prof. dr. ing. Corneliu BOB (Universitatea "Politehnica" din Timișoara), prof. dr. ing. Zoltan KISS (Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca) și prof. dr. ing. Nicolae ȚĂRANU (Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași) pentru observațiile și aprecierile dânsilor, simțindu-mă onorat că au acceptat să facă parte din comisia de evaluare.

Tuturor cadrelor didactice ale Departamentului C.C.I.A. precum și personalului auxiliar care și-a adus contribuția la bunul mers al programului de cercetare.

Soției mele Mirona, pentru răbdarea și sprijinul de care a dat dovadă în această perioadă.

Părinților mei pentru iubirea, grija și încrederea pe care mi le-au dăruit dintotdeauna, neconținut. Voi sunteți artizanii principali ai acestei reușite și v-o dedic întru totul. Vă iubesc necondiționat!

Timișoara, Septembrie 2011

Ing. Sorin-Codruț FLORUȚ

„Până acum oamenii n-au găsit alt drum spre adevăr decât greșeala.”

N. Iorga

„Dans les champs de l'observation le hasard ne favorise que les esprits préparés.”

L. Pasteur

Floruț, Sorin-Codruț

Studiul performanțelor elementelor solicitate la încovoiere consolidate cu materiale compozite polimerice

Teze de doctorat ale UPT, Seria 5, Nr. 79, Editura Politehnica, 2011, 219 pagini, 170 figuri, 22 tabele.

ISSN: 1842-581X

ISBN: 978-606-554-334-8

Cuvinte cheie: beton armat, plăci plane încovoiate, goluri tăiate ulterior, consolidare, materiale FRP, NSMR-FRP.

Rezumat: Teza de doctorat studiază comportare plăcilor plane încovoiate, cu sau fără goluri, consolidate utilizând materiale compozite polimerice.

Teza conține două capitole ce stabilesc cadrul cercetării prin abordarea problematicii plăcilor cu goluri și a utilizării compozitelor polimerice în industria construcțiilor precum și un capitol ce prezintă un studiu bibliografic al cercetărilor anterioare relevante. Contribuția principală a autorului se concentrează în Cap. 5, 6, 7 și 8, fiind prezentate rezultatele teoretice și ale programului experimental desfășurat de acesta, precum și două studii de caz elocvente în care doctorandul a fost implicat direct. Concluziile ce rezultă în urma efectuării cercetării sunt evidențiate în cadrul Cap. 9.

INDEX DE NOTAȚII

| Notație | Definiție | Prima mențiune |
|------------------|--|-----------------------|
| Capitol 2 | | |
| L_x | - deschiderea unei plăci pe direcția x | 4 |
| L_y | - deschiderea unei plăci pe direcția y | 4 |
| L_1 | - distanța dintre stâlpi la planșee dală pe direcția x | 7 |
| L_2 | - distanța dintre stâlpi la planșee dală pe direcția y | 7 |
| a | - deschiderea unui gol de placă pe direcție y | 8 |
| b | - deschiderea unui gol de placă pe direcție x | 8 |
| $m_{x,1}$ | - moment încovoietor pentru dimensionarea armăturii de pe direcția x, acționând la marginea unui gol | 9 |
| $m_{x,2}$ | - moment încovoietor pentru dimensionarea armăturii de pe direcția x, acționând în zona unui gol | 9 |
| $m_{x,3}$ | - moment încovoietor pentru dimensionarea armăturii de pe direcția x, acționând la marginea unui gol | 9 |
| $m_{y,1}$ | - moment încovoietor pentru dimensionarea armăturii de pe direcția y, acționând la marginea unui gol | 9 |
| $m_{y,2}$ | - moment încovoietor pentru dimensionarea armăturii de pe direcția y, acționând în zona unui gol | 9 |
| $m_{y,3}$ | - moment încovoietor pentru dimensionarea armăturii de pe direcția y, acționând la marginea unui gol | 9 |
| h_s | - grosime de placă b.a. | 9 |
| $A_{s,g1}$ | - aria de armătură de pe direcția y secționată de prezența unui gol | 10 |
| $A_{s,g2}$ | - aria de armătură de pe direcția x secționată de prezența unui gol | 10 |
| q | - încărcare uniform distribuită ce acționează pe o placă | 11 |
| b_m | - lățimea fâșiei armate suplimentar în jurul golului, pe direcție paralelă cu latura scurtă a unei plăci | 11 |
| b | - distanța de la marginea golului până la reazem, măsurată pe direcția y | 11 |
| L | - deschiderea scurtă a unei plăci unidirecționale rezemată pe laturile lungi | 11 |
| m_{ym} | - moment încovoietor pentru dimensionarea armăturii de pe direcția y, acționând la marginea unui gol | 11 |
| a | - deschiderea golului pe direcția x | 11 |
| m_{xr} | - moment încovoietor pentru dimensionarea armăturii de pe direcția x, acționând la marginea unui gol | 11 |
| b_m | - lățimea fâșiei armate suplimentar la partea inferioară în zona de câmp, în jurul golului, pe direcție paralelă cu latura scurtă a unei plăci | 12 |
| b_{me} | - lățimea fâșiei armate suplimentar la partea inferioară în zona de reazem, în jurul golului, pe direcție paralelă cu latura scurtă a unei plăci | 12 |

| Notăție | Definiție | Prima mențiune |
|------------------|---|-----------------------|
| m_{ym} | - moment încovoietor pentru dimensionarea armăturii inferioare de pe direcția y , acționând în câmp, la marginea unui gol | 12 |
| m_{yer} | - moment încovoietor pentru dimensionarea armăturii superioare de pe direcția y , acționând în reazem, la marginea unui gol | 12 |
| m_{yem} | - moment încovoietor pentru dimensionarea armăturii superioare de pe direcția y , acționând în reazem, în dreptul unui gol | 12 |
| L_1 | - dimensiunea laturii lungi a unui ochi unidirecțional de placă | 15 |
| L_2 | - dimensiunea laturii scurte a unui ochi unidirecțional de placă | 15 |
| L_x | - distanța dintre stâlpi la planșee dală pe direcția x | 18 |
| L_y | - distanța dintre stâlpi la planșee dală pe direcția y | 18 |
| Capitol 3 | | |
| E_f | - modulul de elasticitate al materialului FRP în direcția fibrelor | 29 |
| E_{fib} | - modulul de elasticitate al fibrelor | 29 |
| E_m | - modulul de elasticitate al matricei | 29 |
| V_{fib} | - ponderea volumului de fibre în volumul materialului FRP | 29 |
| V_m | - ponderea volumului matricei în volumul materialului FRP | 29 |
| f_f | - rezistența la întindere a materialului FRP în direcția fibrelor | 29 |
| f_{fib} | - rezistența la întindere a fibrelor | 29 |
| f_m | - rezistența la întindere a matricei | 29 |
| T_g | - temperatura de tranziție sticloasă | 32 |
| t_f | - lățimea S.T. a benzii sau a barei FRP montată în șlițuri | 40 |
| h_f | - înălțimea S.T. a benzii sau a barei FRP montată în șlițuri | 40 |
| b_g | - lățimea S.T. a șlițului | 40 |
| h_g | - înălțimea S.T. a șlițului | 40 |
| d_b | - diametrul S.T. a barelor circulare FRP montate în șlițuri | 41 |
| Capitol 4 | | |
| b_g | - lățimea S.T. a șlițului | 62 |
| h_g | - înălțimea S.T. a șlițului | 62 |
| a_e | - distanța de la primul șliț la extremitatea elementului | 63 |
| a_g | - distanța dintre două șlițuri | 63 |
| f_{ult} | - rezistența ultimă a fibrelor materialului FRP | 64 |
| τ | - efortului unitar tangențial | 64 |
| V | - forța tăietoare ultimă | 64 |

| Notație | Definiție | Prima mențiune |
|--------------------|---|-----------------------|
| a_f | - raportul dintre modulele de elasticitate ale compozitului și betonului | 64 |
| E_{fd} | - valoarea de calcul a modulului de elasticitate al compozitului | 64 |
| E_C | - valoarea de calcul a modulului de elasticitate al betonului | 64 |
| A_f | - aria lamelei FRP | 64 |
| h | - înălțimea secțiunii transversale | 64 |
| x | - poziția axei neutre a secțiunii consolidate | 64 |
| I_{CS} | - momentul de inerție al secțiunii echivalente de beton consolidată fisurată | 64 |
| b_a | - grosimea stratului de adeziv | 64 |
| ε_{fd} | - valoarea deformației specifice în elementul | 65 |
| f'_C | - rezistența specifică la compresiune a betonului | 65 |
| n | - numărul de straturi din sistemul FRP | 65 |
| E_f | - modulul de elasticitate al sistemului FRP | 65 |
| t_f | - grosimea unui strat a sistemului FRP | 65 |
| ε_{fu} | - valoarea de calcul a rezistenței la rupere a elementului FRP | 65 |
| E_f | - valoarea de calcul a modulului de elasticitate a elementului FRP | 66 |
| E_{fk} | - valoarea caracteristică a modulului de elasticitate a elementului FRP | 65 |
| η | - factor ce ia în considerare diferențele dintre proprietățile unei epruvete și cele ale unei construcții | 65 |
| γ_m | - coeficient parțial de siguranță pentru proprietățile materialului | 65 |
| γ_n | - coeficient ce ține seama de clasa (importanța) construcției | 65 |
| l_{df} | - lungimea de ancoraj minimă pentru tehnica EB-FRP | 66 |
| n | - numărul de straturi din sistemul FRP | 66 |
| E_f | - modulul de elasticitate al sistemului FRP | 66 |
| t_f | - grosimea unui strat a sistemului FRP | 66 |
| f'_C | - rezistența specifică la compresiune a betonului | 66 |
| l_{db} | - lungimea de ancoraj minimă pentru tehnica NSMR-FRP | 67 |
| a_b | - latura scurtă a secțiunii transversale a armăturii FRP dreptunghiulare | 67 |
| b_b | - latura lungă a secțiunii transversale a armăturii FRP dreptunghiulare | 67 |
| d_b | - diametrul secțiunii transversale a armăturii FRP circulare | 67 |
| f_{fd} | - rezistența de calcul a armăturii FRP | 67 |
| τ_b | - valoarea medie a efortului tangențial de aderență | 67 |
| $T_{k,max}$ | - forța de aderență critică | 67 |
| $l_{t,max}$ | - lungimea critică de ancoraj | 67 |

| Notăție | Definiție | Prima mențiune |
|------------------|--|-----------------------|
| k_b | - factor de geometrie | 68 |
| b_f | - lățimea elementului FRP | 68 |
| b_w | - dimensiune efectivă a S.T. a elementului | 68 |
| t_f | - grosimea elementului FRP | 68 |
| E_f | - modulul de elasticitate al elementului FRP | 68 |
| f_{ctm} | - rezistența la întindere a stratului de acoperire din beton | 68 |
| l_t | - lungimea de ancoraj | 68 |
| a | - factor de reducere | 68 |
| c_1 | - coeficient adimensional | 68 |
| k_c | - coeficient ce ține seama de starea de compactare a betonului pe care este lipit materialul FRP | 68 |
| k_b | - factor de geometrie | 68 |
| b | - dimensiune efectivă a S.T. a elementului | 68 |
| f_{ctm} | - rezistența la întindere a stratului de acoperire din beton | 68 |
| c_2 | - coeficient adimensional | 68 |
| N_{fa} | - forța de aderență capabilă | 69 |
| $N_{fa,max}$ | - forța maximă ancorabilă a elementului FRP | 69 |
| l_b | - lungimea de ancoraj | 69 |
| $l_{b,max}$ | - lungimea maximă ancorabilă | 69 |
| $s_{f,max}$ | - distanța maximă dintre elementele FRP de consolidare | 70 |
| h | - grosimea elementului de beton armat | 70 |
| l_c | - lungimea consolei | 70 |
| Capitol 6 | | |
| $f_{cm,cube}$ | - rezistență medie cubică la compresiune | 86 |
| P | - forța de tracțiune | 86 |
| Δ | - deplasare | 86 |
| σ | - efort unitar normal | 86 |
| ε | - deformație specifică | 86 |
| $R_{p,02}$ | - limita de curgere convențională la 0,2% | 87 |
| R_m | - rezistența la tracțiune | 87 |
| A_t | - alungire totală la rupere | 87 |
| F_s | - forța de întindere din armătură | 93 |
| F_f | - forța de întindere din fibra compozitului | 93 |
| A_f | - aria de fibre din compozitul CFRP | 93 |
| f_{yd} | - rezistența de calcul a oțelului din care este confecționată armătura | 93 |
| E_f | - modulul de elasticitate al fibrei din compozitul CFRP | 93 |

| Notație | Definiție | Prima mențiune |
|------------------|---|-----------------------|
| ε_f | - deformația specifică din fibra compozitului CFRP | 93 |
| A_s | - aria de armătură | 93 |
| Capitol 8 | | |
| $A_{f,y}$ | - aria totală a S.T. a elementelor de consolidare CFRP dispuse pe direcția y | 164 |
| f_{yd} | - rezistența de calcul a oțelului din care este confecționată armătura | 164 |
| E_f | - modulul de elasticitate al fibrei din compozitul CFRP | 164 |
| ε_f | - deformația specifică din fibra compozitului CFRP | 164 |
| $A_{s,y}$ | - aria totală de armătură de pe direcția y echivalată cu aria totală a S.T. a elementelor de consolidare CFRP | 164 |
| $b_{f,y}$ | - lățimea S.T. a fâșiei montate prin EB-FRP pe direcția y | 165 |
| t_f | - grosimea S.T. a fâșiei montate prin EB-FRP | 165 |
| F_s | - forța de întindere din armătură | 167 |
| F_f | - forța de întindere din fibra compozitului | 167 |
| A_f | - aria de fibre din compozitul CFRP | 167 |
| f_{yd} | - rezistența de calcul a oțelului din care este confecționată armătura | 167 |
| f_{yk} | - rezistența caracteristică a oțelului din care este confecționată armătura | 167 |
| γ_s | - coeficient parțial de siguranță pentru calitatea oțelului | 167 |
| E_f | - modulul de elasticitate al fibrei din compozitul CFRP | 167 |
| ε_f | - deformația specifică din fibra compozitului CFRP | 167 |
| A_s | - aria de armătură | 167 |
| $A_{s,t}$ | - aria de armătură de pe direcția transversală eliminată prin introducerea golului | 167 |
| $A_{s,l}$ | - aria de armătură de pe direcția longitudinală eliminată prin introducerea golului | 167 |
| $A_{f,t}$ | - aria totală a S.T. a elementelor de consolidare CFRP dispuse în jurul golului, pe direcție transversală | 168 |
| $A_{f,l}$ | - aria totală a S.T. a elementelor de consolidare CFRP dispuse în jurul golului, pe direcție longitudinală | 168 |
| $b_{f,t}$ | - lățimea S.T. a fâșiei montate în jurul golului, prin EB-FRP, pe direcția transversală | 168 |
| $b_{f,l}$ | - lățimea S.T. a fâșiei montate în jurul golului, prin EB-FRP, pe direcția longitudinală | 168 |
| Anexa I | | |
| F_s | - forța de întindere din armătură | 175 |
| F_f | - forța de întindere din fibra compozitului | 175 |
| A_f | - aria de fibre din compozitul CFRP | 175 |

| Notație | Definiție | Prima mențiune |
|-----------------|--|-----------------------|
| f_{yd} | - rezistența de calcul a oțelului din care este confecționată armătura | 175 |
| f_{yk} | - rezistența caracteristică a oțelului din care este confecționată armătura | 175 |
| γ_s | - coeficient parțial de siguranță pentru calitatea oțelului | 175 |
| E_f | - modulul de elasticitate al fibrei din compozitul CFRP | 175 |
| ε_f | - deformația specifică din fibra compozitului CFRP | 175 |
| A_s | - aria de armătură | 175 |
| d | - diametrul barelor de armătură | 175 |
| s | - pasul armării | 175 |
| b | - lățimea fâșiei de calcul | 175 |
| $A_{s,l}$ | - aria totală de armătură dintr-o fâșie unitară | 176 |
| $A_{s,t}$ | - aria totală de armătură de pe direcția transversală | 176 |
| L_p | - lungimea liberă a plăcii | 176 |
| $A_{s,l}$ | - aria totală de armătură de pe direcția longitudinală | 176 |
| l_p | - lățimea liberă a plăcii | 176 |
| t_f | - lățimea S.T. a benzii montate în șliț prin NSMR-FRP | 176 |
| h_f | - înălțimea S.T. a benzii montate în șliț prin NSMR-FRP | 176 |
| b_f | - lățimea S.T. a fâșiei montate prin EB-FRP | 176 |
| t_f | - grosimea S.T. a fâșiei montate prin EB-FRP | 176 |
| $A_{f,NSMR}$ | - aria S.T. a unei benzi montate în șliț prin NSMR-FRP | 176 |
| $A_{f,EB}$ | - aria S.T. a unui element montat prin EB-FRP | 176 |
| $A_{f,t}$ | - aria totală a S.T. a elementelor de consolidare CFRP dispuse pe direcție transversală | 177 |
| $A_{f,l}$ | - aria totală a S.T. a elementelor de consolidare CFRP dispuse pe direcție longitudinală | 177 |
| n_{NSMR} | - numărul total al elementelor CFRP montate prin NSMR-FRP | 177 |
| n_{EB} | - numărul total al elementelor CFRP montate prin EB-FRP | 177 |
| L_g | - lumina golului pe direcție longitudinală | 178 |
| l_g | - lumina golului pe direcție transversală | 178 |
| $A_{s,t,e}$ | - aria de armătură de pe direcția transversală eliminată prin crearea golului | 181 |
| $A_{s,t,c}$ | - aria totală de armătură de pe direcția transversală | 181 |
| $A_{s,l,c}$ | - aria totală de armătură de pe direcția longitudinală | 181 |
| $A_{f,t,e}$ | - aria totală a S.T. a elementelor de consolidare CFRP dispuse pe direcție transversală pentru substituirea armăturilor eliminate prin tăierea golului | 181 |
| $A_{f,t,c}$ | - aria totală a S.T. a elementelor de consolidare CFRP dispuse pe direcție transversală pentru sporire capacității portante a elementului | 182 |

| Notăție | Definiție | Prima mențiune |
|----------------|---|---------------------------|
| $A_{f,l,c}$ | - aria totală a S.T. a elementelor de consolidare CFRP dispuse pe direcție transversală pentru sporire capacității portante a elementului | 182 |

INDEX DE FIGURI

| Număr | Definiție | Pag |
|------------------|---|------------|
| Capitol 2 | | |
| Fig. 2.1. | - Plăci unidirecționale cu raportul lățime/lungime mai mare decât 2 | 4 |
| Fig. 2.2. | - Plăci unidirecționale sau bidirecționale cu raportul lățime/lungime mai mic decât 2 | 5 |
| Fig. 2.3. | - Recomandări din codul ACI 318-08 referitoare la dimensiunile admise ale golurilor în plăcile planșelor dală | 7 |
| Fig. 2.4. | - Dimensiunile maxime ale golurilor mici conform BBK 04 | 8 |
| Fig. 2.5. | - Recomandare BBK 04 pentru calculul armăturilor în jurul golurilor mici - Pas 1 | 8 |
| Fig. 2.6. | - Recomandare BBK 04 pentru calculul armăturilor în jurul golurilor mici - Pas 2 | 9 |
| Fig. 2.7. | - Recomandare BBK 04 pentru calculul armăturilor în jurul golurilor mici - Pas 3 | 9 |
| Fig. 2.8. | - Recomandare PN-B-03264 pentru calculul armăturilor în jurul golurilor mici - Pas 1 | 10 |
| Fig. 2.9. | - Recomandare PN-B-03264 pentru calculul armăturilor în jurul golurilor mici - Pas 2 | 10 |
| Fig. 2.10. | - Recomandare PN-B-03264 pentru calculul armăturilor în jurul golurilor mici - Pas 2 | 11 |
| Fig. 2.11. | - Principiul metodei grinzilor ascunse propusă de Leonhardt | 12 |
| Fig. 2.12. | - Recomandările lui Stiglat și Wippel placa unidirecțională dublu încastrată | 12 |
| Fig. 2.13. | - Divizarea plăcii în panouri | 13 |
| Fig. 2.14. | - Goluri tăiate ulterior în plăci unidirecționale | 15 |
| Fig. 2.15. | - Tipuri de zone în ordinea preferinței creării golurilor în plăci bidirecționale rezemate pe grinzi de contur | 17 |
| Fig. 2.16. | - Tipuri de zone în ordinea preferinței creării golurilor în plăci bidirecționale ale planșelor dală | 18 |
| Fig. 2.17. | - Instalarea unui ansamblu structural metalic pentru scurtarea deschiderilor unui planșeu într-un garaj | 20 |
| Fig. 2.18. | - Instalarea unui ansamblu structural metalic ancorat mecanic | 21 |
| Fig. 2.19. | - Schematizarea soluției de consolidare prin post-tensionare aplicată nervurilor unui pod de beton armat din zona orașului Washington | 21 |
| Fig. 2.20. | - Soluția de consolidare prin post-tensionare a planșeului de beton armat a unui garaj multi-etajat | 22 |
| Fig. 2.21. | - Secvență din procedeul de consolidare prin post-tensionare a plăcilor de beton armat | 22 |
| Fig. 2.22. | - Secvență din procedeul de consolidare prin Mărirea dimensiunilor secțiunilor transversale | 23 |
| Capitol 3 | | |
| Fig. 3.1. | - Comportarea oțelului moale și a anumitor tipuri de materiale CFRP, GFRP și AFRP cf buletinul nr. 14 al „fib” | 31 |

| Număr | Definiție | Pag |
|------------------|---|------------|
| Fig. 3.2. | - Comportarea oțelului moale și a anumitor tipuri de materiale CFRP, GFRP și AFRP cf buletinul nr. 35 al „fib” | 32 |
| Fig. 3.3. | - Armături înglobate în șlițuri sub formă de benzi FRP | 40 |
| Fig. 3.4. | - Armături înglobate în șlițuri sub formă de bare dreptunghiulare/pătrate FRP | 41 |
| Fig. 3.5. | - Armături înglobate în șlițuri sub formă de bare circulare FRP | 41 |
| Fig. 3.6. | - Posibile cedări prin pierderea aderenței | 44 |
| Fig. 3.7. | - Diferite planuri de dezlipire în interiorul betonului | 45 |
| Fig. 3.8. | - Forme de cedare prin distrugerea aderenței la un elemente consolidat cu EB-FRP | 46 |
| Capitol 4 | | |
| Fig. 4.1. | - Sistemul de încercare a consolelor de beton armat | 50 |
| Fig. 4.2. | - Configurația soluțiilor de consolidare | 51 |
| Fig. 4.3. | - Sistemul de încercare a plăcilor de beton armat | 52 |
| Fig. 4.4. | - Sistemul de încercare a plăcilor de beton armat | 55 |
| Fig. 4.5. | - Modul de dispunere a elementelor de consolidare în jurul golurilor | 57 |
| Fig. 4.6. | - Principiul de consolidare utilizând armături compozite montate în șlițuri și un strat de beton armat disper cu fibre de oțel | 58 |
| Fig. 4.7. | - Configurații de dispunere a lamelor | 60 |
| Fig. 4.8. | - Caracteristicile celor două serii de elemente experimentale | 61 |
| Fig. 4.9. | - Configurații de dispunere a țesăturilor | 62 |
| Fig. 4.10. | - Recomandări constructive pentru șlițuri conform ACI 440.2R-08 | 63 |
| Fig. 4.11. | - Relația forță de aderență - lungime de ancoraj | 67 |
| Capitol 5 | | |
| Fig. 5.1. | - Geometria modelului RCS-FS-01 | 72 |
| Fig. 5.2. | - Geometria modelului RCS-RSC-01 | 72 |
| Fig. 5.3. | - Geometria modelelor RCS-RLC-01 și RCS-RLC-02 | 73 |
| Fig. 5.4. | - Geometria elementelor de tip CCIsoBrick cu 20 noduri de integrare | 73 |
| Fig. 5.5. | - Legea uniaxială efort unitar - deformație specifică ce caracterizează comportarea materialului de tip 3D Nonlinear Cementitious 2 | 74 |
| Fig. 5.6. | - Funcția de cedare biaxială implementată pentru beton | 74 |
| Fig. 5.7. | - Geometria elementelor de tip CCIsoTruss | 75 |
| Fig. 5.8. | - Curbe de comportare efort unitar - deformație specifică pentru armătura de oțel și pentru elementele CFRP de consolidare | 75 |
| Capitol 6 | | |
| Fig. 6.1. | - Posibile situații privind starea elementelor la începutul fiecărui test prin prisma degradărilor și aplicării soluțiilor de consolidare | 78 |
| Fig. 6.2. | - Schematizarea modalității de definire a elementelor și testelor | 78 |
| Fig. 6.3. | - Vederi generale ale standului experimental | 79 |
| Fig. 6.4. | - Poziția reazemelor pentru toate cele patru elemente | 80 |
| Fig. 6.5. | - Secțiune verticală transversală prin ansamblul de încercare | 81 |
| Fig. 6.6. | - Poziția piesei de încărcare relativ la suprafața plăcilor | 81 |

| Număr | Definiție | Pag |
|--------------|---|------------|
| Fig. 6.7. | - Caracteristici geometrice și armare inferioară și superioară element RCS-FS-01 | 83 |
| Fig. 6.8. | - Caracteristici geometrice și armare inferioară și superioară element RCS-RSC-01 | 84 |
| Fig. 6.9. | - Caracteristici geometrice și armare inferioară și superioară elemente RCS-RLC-01 și RCS-RLC-02 | 85 |
| Fig. 6.10. | - Curbe de comportare σ - ε pentru barele de armatura prelevate din plasele utilizate la armarea inferioară a elementului RCS-FS-01 | 88 |
| Fig. 6.11. | - Curbe de comportare σ - ε pentru barele de armatura prelevate din plasele utilizate la armarea inferioară a elementului RCS-RSC-01 | 88 |
| Fig. 6.12. | - Curbe de comportare σ - ε pentru barele de armatura prelevate din plasele utilizate la armarea inferioară a elementului RCS-RLC-01 | 89 |
| Fig. 6.13. | - Curbe de comportare σ - ε pentru barele de armatura prelevate din plasele utilizate la armarea inferioară a elementului RCS-RLC-02 | 89 |
| Fig. 6.14. | - Pozițiile senzorilor | 90 |
| Fig. 6.15. | - Configurația fisurilor și conturul suprafeței de încărcare | 91 |
| Fig. 6.16. | - Diagramele F-D pentru cele 10 poziții ale captorilor de deplasare | 92 |
| Fig. 6.17. | - Diagramele F- ε | 92 |
| Fig. 6.18. | - Configurația și caracteristicile geometrice ale sistemului de consolidare | 94 |
| Fig. 6.19. | - Tăierea șlițurilor și aspectul feței inferioare după tăiere | 95 |
| Fig. 6.20. | - Șlefuirea suprafețelor pentru aplicarea fâșiilor de țesătură | 95 |
| Fig. 6.21. | - Curățarea șlițurilor și a suprafețelor șlefuite prin aspirare și suflare cu aer | 96 |
| Fig. 6.22. | - Curățarea benzilor de CFRP | 96 |
| Fig. 6.23. | - Umplerea șlițurilor cu rășină epoxidică | 96 |
| Fig. 6.24. | - Corectarea șlițului umplut cu rășină | 97 |
| Fig. 6.25. | - Inserarea benzilor de CFRP direcționate cu ajutorul penelor | 97 |
| Fig. 6.26. | - Finisarea suprafeței în zona șlițurilor | 97 |
| Fig. 6.27. | - Marcarea poziției fâșiilor de CFRP și pregătirea acestora pentru aplicare | 98 |
| Fig. 6.28. | - Întinderea și pregătirea primului strat de rășină | 98 |
| Fig. 6.29. | - Aplicarea fâșiilor de țesătură și o vedere a feței inferioare în timpul procesului de consolidare | 98 |
| Fig. 6.30. | - Vedere a feței inferioare a plăcii după finalizarea consolidării | 99 |
| Fig. 6.31. | - Volume de muncă pentru pregătire și aplicare | 101 |
| Fig. 6.32. | - Izolarea unei suprafețe de 1 m ² | 102 |
| Fig. 6.33. | - Pozițiile timbrelor tensometrice pe elemente CFRP | 103 |
| Fig. 6.34. | - Diagramele F-D pentru cele 10 poziții ale captorilor de deplasare | 104 |
| Fig. 6.35. | - Caracteristicile cedării elementului consolidat | 104 |
| Fig. 6.36. | - Poziția timbrelor relativ la distribuția finală a fisurilor | 105 |
| Fig. 6.37. | - Diagramele F- ε pentru cele nouă timbre montate pe elemente CFRP | 106 |
| Fig. 6.38. | - Comparație privind valorile maxime înregistrate de timbrele montate pe același element de consolidare | 106 |
| Fig. 6.39. | - Vedere de ansamblu a feței inferioare a elementului după cedare | 107 |

| Număr | Definiție | Pag |
|--------------|---|------------|
| Fig. 6.40. | - Vedere de ansamblu a feței inferioare a elementului după cedare | 107 |
| Fig. 6.41. | - Detalii de cedare ale benzilor (NSMR) | 108 |
| Fig. 6.42. | - Detalii de cedare în zone de intersecție bandă (NSMR) - fâșie (EB) | 109 |
| Fig. 6.43. | - Pozițiile senzorilor | 110 |
| Fig. 6.44. | - Configurația fisurilor și conturul suprafeței de încărcare | 111 |
| Fig. 6.45. | - Diagrame Forță-Deplasare | 112 |
| Fig. 6.46. | - Configurația și caracteristicile geometrice ale sistemului de consolidare | 113 |
| Fig. 6.47. | - Pozițiile timbrelor tensometrice pe elemente CFRP | 114 |
| Fig. 6.48. | - Diagramele Forță-Deplasare pentru cei 8 captori | 115 |
| Fig. 6.49. | - Distribuția fisurilor la finalul testului RCS-RSC-DS-01 | 116 |
| Fig. 6.50. | - Poziția timbrelor relativ la distribuția finală a fisurilor | 116 |
| Fig. 6.51. | - Diagramele F- ϵ în elemente CFRP de consolidare | 117 |
| Fig. 6.52. | - Variația deformației specifice maxime în timbrele montate pe banda NSM01 | 117 |
| Fig. 6.53. | - Vedere generală a suprafeței inferioare a plăcii | 118 |
| Fig. 6.54. | - Detaliu de cedare a unei benzi montate în șliț | 118 |
| Fig. 6.55. | - Cedarea prin pierderea aderenței a lamelei montate prin EB-FRP | 119 |
| Fig. 6.56. | - Inițierea cedării prin pierderea aderenței lamelei | 120 |
| Fig. 6.57. | - Detaliu de zonă în care cedarea s-a produs în interiorul compozitului | 120 |
| Fig. 6.58. | - Ruperea unei bare de armătură într-o zonă de nod a plasei inferioare | 121 |
| Fig. 6.59. | - Ridicarea colțurilor plăcii sub efectul încărcărilor aplicate | 121 |
| Fig. 6.60. | - Pozițiile senzorilor | 122 |
| Fig. 6.61. | - Configurația fisurilor și conturul suprafeței de încărcare | 123 |
| Fig. 6.62. | - Diagrame Forță-Deplasare | 124 |
| Fig. 6.63. | - Diagramele F- ϵ în armături | 124 |
| Fig. 6.64. | - Configurația și caracteristicile geometrice ale sistemului de consolidare | 125 |
| Fig. 6.65. | - Pozițiile timbrelor tensometrice pe elemente CFRP | 126 |
| Fig. 6.66. | - Diagramele Forță-Deplasare pentru cei 8 captori | 127 |
| Fig. 6.67. | - Distribuția fisurilor la finalul testului RCS-RSC-DS-01 | 128 |
| Fig. 6.68. | - Poziția timbrelor relativ la distribuția finală a fisurilor | 128 |
| Fig. 6.69. | - Diagramele F- ϵ în elemente CFRP de consolidare | 129 |
| Fig. 6.70. | - Variația deformației specifice maxime în timbrele montate pe banda NSM01 | 129 |
| Fig. 6.71. | - Starea plăcii la finalul încercării | 130 |
| Fig. 6.72. | - Vedere a fisurii principale în zona captorului D7 (armătură și elemente CFRP rupte) | 130 |
| Fig. 6.73. | - Detalii cedare - vecinătatea captorului D7 | 131 |
| Fig. 6.74. | - Configurația fisurilor și conturul suprafeței de încărcare | 132 |
| Fig. 6.75. | - Diagrame Forță-Deplasare | 133 |
| Fig. 6.76. | - Diagramele F- ϵ în armături | 133 |

| Număr | Definiție | Pag |
|------------------|--|------------|
| Fig. 6.77. | - Configurația și caracteristicile geometrice ale sistemului de consolidare | 134 |
| Fig. 6.78. | - Pozițiile timbrelor tensometrice pe elemente CFRP | 135 |
| Fig. 6.79. | - Diagrama Forță-Deplasare centrală (D1) | 136 |
| Fig. 6.80. | - Distribuția fisurilor la finalul testului RCS-RLC-DS-02 | 137 |
| Fig. 6.81. | - Poziția timbrelor relativ la distribuția finală a fisurilor | 137 |
| Fig. 6.82. | - Starea plăcii la finalul încercării | 138 |
| Fig. 6.83. | - Vedere a suprafeței superioare a plăcii la finalul încercării | 138 |
| Fig. 6.84. | - Detaliu de cedare țesătură intersectată de fisură principală | 139 |
| Fig. 6.85. | - Detaliu de cedare bandă și țesătură intersectate de fisură principală | 139 |
| Fig. 6.86. | - Detaliu de cedare armătură intersectate de fisură principală | 140 |
| Fig. 6.87. | - Detaliu de cedare armătură și bandă intersectate de fisură principală | 140 |
| Fig. 6.88. | - Diagrame de comportare Forță-Deplasare pentru toate testele | 141 |
| Fig. 6.89. | - Diagrame de comportare Forță-Deplasare pentru elementul RCS-FS-01 | 142 |
| Fig. 6.90. | - Diagrame de comportare Forță-Deplasare pentru elementul RCS-RSC-01 | 142 |
| Fig. 6.91. | - Diagrame de comportare Forță-Deplasare pentru elementul RCS-RLC-01 | 143 |
| Fig. 6.92. | - Diagrame de comportare Forță-Deplasare pentru elementul RCS-RLC-02 | 143 |
| Fig. 6.93. | - Capacități ultime ale elementelor înainte și după consolidare | 144 |
| Fig. 6.94. | - Valorile capacităților ultime în valoare absolută și relativ la suprafața plăcii înainte de consolidare | 146 |
| Fig. 6.95. | - Influența scăderii suprafeței efective a plăcii în urma tăierii golurilor asupra capacităților ultime | 146 |
| Fig. 6.96. | - Capacitățile la S.L.S. în valoare absolută și relativ la suprafața plăcii înainte și după consolidare | 147 |
| Fig. 6.97. | - Valorile rigidității la limita elastică și influența tăierii golurilor asupra rigidității elastice a elementelor neconsolidate | 149 |
| Fig. 6.98. | - Diagramele simplificate Forță-Deplasare | 150 |
| Fig. 6.99. | - Valorile energiei disipate la S.L.S. și la S.L.U. | 151 |
| Capitol 7 | | |
| Fig. 7.1. | - Comparație privind diagramele Forță-Deplasare centrală obținute teoretic și experimental pentru elementul RCS-FS-UU-01 | 154 |
| Fig. 7.2. | - Comparație privind diagramele Forță-Deplasare centrală obținute teoretic și experimental pentru elementul RCS-FS-01 | 154 |
| Fig. 7.3. | - Starea de fisurare obținută numeric la finalul încercării elementului neconsolidat | 155 |
| Fig. 7.4. | - Starea de fisurare obținută numeric și experimental la finalul încercării elementului consolidat | 155 |
| Fig. 7.5. | - Comparație privind diagramele Forță-Deplasare centrală obținute teoretic și experimental pentru elementul RCS-RSC-UU-01 | 156 |
| Fig. 7.6. | - Comparație privind diagramele Forță-Deplasare centrală obținute teoretic și experimental pentru elementul RCS-RSC-01 | 157 |

| Număr | Definiție | Pag |
|------------------|---|------------|
| Fig. 7.7. | - Starea de fisurare obținută numeric la finalul încercării elementului neconsolidat și consolidat | 157 |
| Fig. 7.8. | - Comparație privind diagramele Forță-Deplasare centrală obținute teoretic și experimental pentru elementul RCS-RLC-UU-01 | 158 |
| Fig. 7.9. | - Comparație privind diagramele Forță-Deplasare centrală obținute teoretic și experimental pentru elementul RCS-RLC-01 | 159 |
| Fig. 7.10. | - Starea de fisurare obținută numeric la finalul încercării elementului neconsolidat și consolidat | 159 |
| Fig. 7.11. | - Comparație privind diagramele Forță-Deplasare centrală obținute teoretic și experimental pentru elementul RCS-RLC-UU-02 | 160 |
| Fig. 7.12. | - Comparație privind diagramele Forță-Deplasare centrală obținute teoretic și experimental pentru elementul RCS-RLC-02 | 161 |
| Fig. 7.13. | - Starea de fisurare obținută numeric la finalul încercării elementului neconsolidat și consolidat | 161 |
| Capitol 8 | | |
| Fig. 8.1. | - Conturul plăcii | 164 |
| Fig. 8.2. | - Poziția pereților pe placă în zona ochiurilor A și B | 164 |
| Fig. 8.3. | - Vedere a plăcii într-o etapă intermediară a procesului de consolidare | 165 |
| Fig. 8.4. | - Vedere a plăcii într-o etapă intermediară a procesului de consolidare | 166 |
| Fig. 8.5. | - Suprafața inferioară a plăcii la finalul procesului de consolidare | 166 |
| Fig. 8.6. | - Propunerea de consolidare pentru golurile de 760x1000 mm | 169 |
| Fig. 8.7. | - Realizarea găurilor de ghidaj la colțurile viitoarelor goluri | 169 |
| Fig. 8.8. | - Marcarea și ghidarea tăierii; bucăți de placă eliminate prin tăierea golului | 170 |
| Fig. 8.9. | - Vedere a unei zone consolidate, înainte de tăierea golului | 170 |

INDEX DE TABELE

| Număr | Denumire | Pag |
|------------------|---|------------|
| Capitol 3 | | |
| Tabel 3.1. - | Caracteristici generale ale fibrelor | 26 |
| Tabel 3.2. - | Caracteristici generale ale matricelor termorigide | 27 |
| Tabel 3.3. - | Caracteristici generale ale matricelor termoplaste | 28 |
| Tabel 3.4. - | Comparație între materiale FRP pe bază de fibre de carbon, sticlă și aramidă | 29 |
| Tabel 3.5. - | Comparație între densitățile materialelor FRP și cea a oțelului | 30 |
| Tabel 3.6. - | Comparație între coeficienții de dilatare termică a materialelor FRP și a oțelului și betonului | 30 |
| Tabel 3.7. - | Proprietăți de comportare la întindere a unor laminate | 31 |
| Tabel 3.8. - | Factor de reducere pentru diverse sisteme FRP în funcție de condițiile de mediu | 35 |
| Capitol 6 | | |
| Tabel 6.1. - | Rezultate încercări la compresiune pe cuburi de beton | 86 |
| Tabel 6.2. - | Rezultate încercări la tracțiune pe epruvete din bare de armătură | 87 |
| Tabel 6.3. - | Proprietăți ale sistemului de consolidare | 93 |
| Tabel 6.4. - | Consum de materiale și manoperă | 100 |
| Tabel 6.5. - | Prețuri de materiale ale sistemului de consolidare | 101 |
| Tabel 6.6. - | Comparație economică a tehnicilor pentru o suprafață unitară | 102 |
| Tabel 6.7. - | Proprietăți ale sistemului de consolidare | 112 |
| Tabel 6.8. - | Caracteristici de rezistență și deformații | 144 |
| Tabel 6.9. - | Deformații specifice pentru stabilirea limitei elastice | 147 |
| Tabel 6.10. - | Rigidități la limita elastică și ductilități | 148 |
| Tabel 6.11. - | Energia disipată la S.L.S. și la S.L.U. | 150 |
| Capitol 7 | | |
| Tabel 7.1. - | Date caracteristice privind comportarea experimentală și teoretică a plăcilor | 162 |
| Anexa I | | |
| Tabel I.1. - | Proprietățile sistemelor de consolidare | 176 |
| Tabel I.2. - | Proprietăți ale sistemului de consolidare | 178 |

REZUMAT

Tema de cercetare din cadrul programului de doctorat se referă generic la elemente încovoiate consolidate cu materiale compozite polimerice. În acest cadru vast, cercetarea s-a axat pe studierea comportării plăcilor plane de beton armat consolidate cu materiale compozite polimerice. În același timp, plăcile de beton armat ce dobândesc o comportare deficitară prin crearea unor goluri, și mai ales consolidarea acestor tipuri de plăci, au reprezentat o direcție esențială de studiu.

Plăcile plane de beton armat reprezintă cu siguranță cea mai răspândită soluție constructivă pentru realizarea elementelor de rezistență ale planșeelor în cazul construcțiilor civile, fie ele realizate din zidărie, beton armat sau din elemente metalice. Plăcile de beton armat sunt folosite în aplicații structurale variate, de la planșee și sisteme de acoperișuri, până la pereți, rezervoare și tabliere de poduri, fiind supuse, de la caz la caz, unei lungi serii de solicitări și combinații de solicitări. Așa cum arată și titlul, în această teză, studiul va fi limitat la plăci de beton armat consolidate pentru a le spori capacitatea la încovoiere.

Una dintre soluțiile moderne de consolidare sau reabilitare constă în utilizarea materialelor compozite polimerice. Aplicația cea mai uzuală din domeniul consolidării cu materiale compozite este consolidarea pentru sporirea capacității la încovoiere a elementelor structurale, deoarece în acest caz se aplică regulile clasice de proiectare a betonului armat, cu anumite modificări pentru a ține cont de caracteristicile fizico-mecanice ale compozitelor. Metoda cea mai des întâlnită de consolidare a elementelor încovoiate presupune dispunerea lamelor sau a țesăturilor din FRP pe fața întinsă a elementului prin lipire cu ajutorul unor rășini epoxidice.

- Teza conține:
- rezumat
 - 9 capitole
 - 1 Anexă
 - Liste de Notații, Abrevieri și Acronime
 - 1 Index de Tabele
 - 1 Index de Figuri

Capitolul 1 - Introducere

Capitolul reprezintă o succintă introducere în problematica temei de cercetare, stabilind motivațiile și obiectivele tezei de doctorat.

Capitolul 2 - Aspecte generale privind plăcile și planșeele de beton armat

Această secțiune a tezei prezintă o serie de aspecte privind plăcile de beton armat, abordând în special problematica golurilor create în asemenea elemente. O primă clasificare a tipurilor de goluri se poate face în funcție de momentul creării acestora, astfel existând goluri considerate în proiectarea inițială și golurile create ulterior. Pentru fiecare categorie sunt prezentate o serie de recomandări și limitări enunțate de anumite coduri de proiectare sau specialiști. Recomandările vizează dimensiunile maxime admisibile ale golurilor fără soluții suplimentare de consolidare, poziționarea și orientarea optimă a acestora, precum și abordările uzuale privind calculul plăcilor cu goluri.

Subcapitolul 2.4. trece în revistă soluțiile clasice de reabilitare/consolidare ce se pot aplica atât în cazul plăcilor întregi cât și pentru cele cu goluri.

Capitolul 3 - Materiale compozite polimerice și aplicațiile lor în construcții

Capitolul este structurat pe două subcapitole, prezentând proprietățile generale ale materialelor compozite polimerice, principalele avantaje și dezavantaje, precum și posibilitățile uzuale de aplicare a acestora în industria construcțiilor. Proprietățile prezentate se referă atât la elementele constituente (fibra și matricea) cât și la materialul compozit în ansamblu, tratând probleme precum: proprietăți fizice și mecanice, efectele variației temperaturii și comportarea la acțiunea focului, proprietăți dependente de timp, durabilitate și măsuri de protecție.

Subcapitolul 3.2. "Consolidări cu materiale FRP" prezintă detalii privind cele mai răspândite două tehnici de consolidare utilizând compozite polimerice, EB-FRP și NSMR-FRP. Pentru fiecare tehnică în parte este prezentată tehnologia de execuție, însoțită de câteva considerente privind fenomenologia de cedare, pe baza modurilor de cedare identificate în literatură. În același timp, se prezintă și o scurtă comparație între cele două tehnici, evaluând avantajele și dezavantajele acestora din prisma comportării precum și a eficienței economice.

Capitolul 4 - Studii și aplicații similare

În cadrul acestui capitol sunt prezentate, cronologic, principalele rezultate și concluzii ale studiilor experimentale și teoretice referitoare la consolidarea plăcilor de beton armat utilizând materiale compozite polimerice. Trebuie menționat faptul că studiile ce se referă la această temă sunt disponibile în literatura de specialitate într-un număr relativ restrâns. Și mai rare sunt studiile care tratează consolidarea utilizând materiale compozite polimerice a plăcilor de beton armat cu goluri create ulterior (direcția principală de cercetare a acestei lucrări de doctorat).

Subcapitolul 4.2. înglobează o serie de principii călăuzitoare, prevederi constructive și recomandări privind consolidările cu materiale FRP. Se prezintă diverse abordări de calcul încorporate în coduri, norme și publicații ale diverșilor specialiști, făcând referire la: caracteristicile șlițurilor, abordarea de limitare a deformațiilor specifice și a eforturilor, lungimi de ancoraj, etc.

Capitolul 5 - Modelări numerice

În acest capitol sunt prezentate caracteristicile modelului numeric utilizat pentru a simula teoretic comportarea plăcilor încercate în laborator. Modelele numerice generate reproduc întocmai geometria elementelor experimentale, o serie de simplificări fiind aplicate doar în ceea ce privește elementele de rezemare, cu scopul de a reduce timpul necesar de rulare a analizelor. Componentele modelului descrise în capitol din punct de vedere al tipului de elemente finite utilizate și a comportării materialelor utilizate sunt: placa de b.a. cu modelele de definire a materialelor (beton, armătură din oțel și materiale de consolidare din CFRP), piesa metalică utilizată pentru distribuirea încărcărilor, elementele de reazem și interfețele piesă metalică-placă și placă-rezeme.

Capitolul 6 - Program experimental

Această secțiune a tezei prezintă caracteristicile programului experimental, rezultatele obținute în urma testelor pe materiale, precum și rezultatele înregistrate în urma efectuării testelor. Programul experimental este constituit din 8 teste efectuate pe 4 plăci din beton armat cu dimensiunile de 2650x3950x120 mm.

Strategia de încercare presupune încărcarea fiecărui element neconsolidat până la un nivel ce definește depășirea capacității (ultime sau de serviciu), stadiu ce ar implica necesitatea unei consolidări. Ulterior, se aplică sistemul de consolidare/reabilitare, urmând ca elementul să fie încărcat până la cedarea sa completă. Primul element a fost unul întreg (fără gol) în timp ce în restul de trei elemente s-a creat câte un gol. Fiecare subcapitol ce conține testele efectuat pe câte un element este structurat pe trei secțiuni: testul pe elementul neconsolidat, consolidarea elementului și testul pe elementul consolidat. Sunt prezentate rezultatele testelor, prin prisma măsurătorilor înregistrate de ansamblul de monitorizare (valoarea forței exterioare, deplasări în diverse puncte, deformații specifice în armături și pe elemente CFRP de consolidare). Capitolul prezintă și o serie de concluzii enunțate în urma comparării rezultatelor obținute experimental.

Capitolul 7 - Studiu comparativ privind concordanța rezultatelor teoretice cu cele obținute pe cale experimentală

Capitolul tratează rezultatele obținute teoretic, pe cale numerică, prin prisma comparării acestora cu rezultatele experimentale. Practic, capitolul prezintă o validare a modelului teoretic tocmai prin comparația elocventă cu încercările experimentale. Sunt prezentate punctele de convergență precum și cele de divergență ale rezultatelor obținute pe cele două căi, evidențiind atât plusurile cât și minusurile modelului numeric.

Capitolul 8 - Studii de caz

Această secvență a tezei prezintă în mod concis două studii de caz ce implică aplicații reale, practice, privind consolidarea plăcilor de beton armat cu și fără goluri utilizând materiale compozite polimerice. Cele două studii de caz, bazate pe lucrări efectuate de autorul tezei, au menirea de a evidenția aplicabilitatea practică sporită a temei de cercetare. Primul studiu de caz se referă la consolidarea unei plăci întregi din cadrul unei construcții unifamiliale P+M. Al doilea studiu se referă la consolidarea plăcilor de la mai multe niveluri ale unei clădiri industriale, consolidare a cărei necesitate rezultă în urma creării unui număr important de goluri.

Capitolul 9 - Concluzii și contribuții personale

În cadrul capitolului sunt enunțate principalele concluzii rezultate în urma programului de cercetare, precum și principalele contribuții ale autorului pe durata stagiului de doctorat. Contribuțiile esențiale ale doctorandului pot fi condensate astfel:

- întocmirea unui mini-compendiu al recomandărilor privind problematica golurilor în plăci de beton armat (atât considerate în proiectarea inițială cât și create ulterior)
- întocmirea unui studiu bibliografic sistematizat al cercetărilor curente din domeniul consolidării plăcilor de beton armat cu materiale FRP
- conceperea și construirea unui stand experimental pentru încercarea elementelor în Laboratorul Departamentului C.C.I.A.
- conceperea și desfășurarea unui program experimental ce prezintă o serie de particularități cu caracter inovator
 - elementele experimentale încercate prezintă goluri de dimensiuni mari, atipice pentru restul cercetărilor efectuate pe această temă
 - sistemele de consolidare propuse sunt mixte, utilizând două tehnici diferite, dar compatibile și complementare în cazul elementelor plane

- întocmirea unui studiu comparativ privind comportarea plăcilor de beton armat cu goluri tăiate ulterior și a soluțiilor de consolidare aplicabile acestui tip de elemente

- detalierea unei abordări simplificate de calcul a soluțiilor de consolidare, destinată în principal proiectanților

- calibrarea unor modele numerice cu rezultate promițătoare.

În același timp, capitolul centralizează și principalele lucrări publicate de candidat (ca prin autor și co-autor) precum și implicarea în diversele granturi și burse de cercetare.

CUPRINS

| | |
|--|-------|
| Index de notații | v |
| Index de figuri | xii |
| Index de tabele | xviii |
| Rezumat | xix |
| Cuprins | xxiii |
| 1. Introducere | 1 |
| 1.1. Generalități..... | 1 |
| 1.2. Motivații și obiective..... | 2 |
| 1.4. Potențiale aplicații ale temei de cercetare..... | 2 |
| 2. Aspecte generale privind plăcile și planșeele de beton armat | 3 |
| 2.1. Tipuri de planșee de beton armat și utilizarea acestora..... | 3 |
| 2.2. Plăci cu goluri considerate în proiectarea inițială..... | 5 |
| 2.3. Problematika plăcilor de beton armat cu goluri tăiate ulterior..... | 14 |
| 2.3.1. Goluri tăiate ulterior în plăci unidireționale..... | 14 |
| 2.3.2. Goluri tăiate ulterior în plăci bidireționale..... | 16 |
| 2.4. Soluții clasice de reabilitare/consolidare a planșeelor de beton armat..... | 18 |
| 3. Materiale compozite polimerice și aplicațiile lor în construcții | 25 |
| 3.1. Compozite polimerice - componente și caracteristici..... | 25 |
| 3.1.1. Fibre utilizate la producerea compozitelor..... | 25 |
| 3.1.2. Matrice polimerice..... | 27 |
| 3.1.3. Materiale FRP..... | 28 |
| 3.1.4. Proprietăți ale materialelor FRP..... | 30 |
| 3.1.4.1. Proprietăți fizice..... | 30 |
| 3.1.4.2. Proprietăți mecanice..... | 30 |
| 3.1.4.3. Efectele variației temperaturii și comportarea la acțiunea focului..... | 32 |
| 3.1.4.4. Proprietăți dependente de timp..... | 33 |
| 3.1.4.5. Durabilitatea și măsuri de protecție..... | 35 |
| 3.1.5. Utilizarea compozitelor în industria construcțiilor; principalele avantaje și dezavantaje..... | 37 |
| 3.2. Consolidări cu materiale FRP..... | 38 |
| 3.2.1. Sisteme și tehnici de consolidare a elementelor de construcții utilizând compozite polimerice..... | 38 |
| 3.2.1.1. Tehnica montării la exterior (EB-FRP)..... | 38 |
| 3.2.1.2. Tehnica armăturilor montate în șlițuri (NSMR-FRP)..... | 40 |
| 3.2.1.3. Sisteme speciale de consolidare cu compozite..... | 42 |
| 3.2.2. Câteva considerente privind fenomenologia de cedare a elementelor consolidate utilizând tehnicile EB-FRP și NSM-FRP..... | 43 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2.3. Scurtă comparație între metodele EB-FRP și NSMR-FRP; avantaje și dezavantaje..... | 47 |
| 4. Studii și aplicații similare..... | 49 |
| 4.1. Rezultate preluate din literatura de specialitate..... | 49 |
| 4.1.1. Cercetări efectuate de Teng, Lam, Chan și Wang - 2000..... | 49 |
| 4.1.2. Cercetări efectuate de grupul de cercetători de la Luleå University of Technology (Carolin, Enochsson, Lundqvist, Olafsson, Rusinowski, Täljsten) - 2002 - 2007..... | 50 |
| 4.1.3. Cercetări efectuate de Ebead, Marzouk ș.a. - 2003..... | 51 |
| 4.1.4. Cercetări efectuate de Limam, Foret și Ehlacher - 2003..... | 52 |
| 4.1.5. Cercetări efectuate de Mosallam ș.a. - 2003..... | 52 |
| 4.1.6. Cercetări efectuate de Piyong, Silva și Nanni - 2003..... | 53 |
| 4.1.7. Cercetări efectuate de Vasquez și Karbhari - 2003..... | 54 |
| 4.1.8. Cercetări efectuate de Arduini, Nanni și Romagnolo - 2004..... | 55 |
| 4.1.9. Cercetări efectuate de Shahrooz și Boy - 2004..... | 56 |
| 4.1.10. Cercetări efectuate de Tan și Zhao - 2004..... | 56 |
| 4.1.11. Cercetări efectuate de Bonaldo, Barros și Lourenço - 2008..... | 58 |
| 4.1.12. Cercetări efectuate de Foret și Limam - 2008..... | 58 |
| 4.1.13. Cercetări efectuate de Elsayed, Ebead și Neale - 2009..... | 59 |
| 4.1.14. Cercetări efectuate de Smith și Kim - 2009..... | 60 |
| 4.2. Principii, prevederi și recomandări privind consolidarea cu CFRP..... | 62 |
| 4.2.1. Caracteristicile șlițurilor..... | 62 |
| 4.2.2. Limitări ale deformațiilor specifice și ale eforturilor..... | 64 |
| 4.2.3. Lungimi de ancoraj..... | 66 |
| 4.2.4. Distanțe între elementele de consolidare..... | 70 |
| 5. Modelări numerice..... | 71 |
| 5.1. Noțiuni generale..... | 71 |
| 5.2. Similitudini încercări experimentale - modele numerice..... | 71 |
| 5.2.1. Modelul de ansamblu..... | 71 |
| 5.2.2. Elementul propriu-zis..... | 73 |
| 5.2.2.1. Beton..... | 73 |
| 5.2.2.2. Armătura de oțel..... | 75 |
| 5.2.2.3. Elementele CFRP de consolidare..... | 75 |
| 5.2.3. Piesa de încărcare..... | 76 |
| 5.2.4. Rezemare..... | 76 |
| 5.2.5. Interfețe..... | 76 |
| 5.2.3. Aplicarea încărcării..... | 76 |
| 6. Program experimental..... | 77 |
| 6.1. Introducere, repere..... | 77 |
| 6.2. Strategie de încercare, rezemări, încărcare..... | 77 |
| 6.3. Caracteristici elemente și detalii de alcătuire..... | 82 |

| | |
|--|------------|
| 6.3.1. Caracteristici geometrice, alcătuire..... | 82 |
| 6.3.2. Proprietăți de materiale..... | 86 |
| 6.4. Încercări efectuate pe elementul întreg (fără gol) - (RCS-FS-01)..... | 90 |
| 6.4.1. Încercarea elementului în starea inițială (fără consolidare) - Test RCS-FS-UU-01..... | 90 |
| 6.4.2. Consolidarea elementului..... | 93 |
| 6.4.3. Încercarea elementului consolidat - Test RCS-FS-DS-01..... | 103 |
| 6.5. Încercări efectuate pe elementul cu gol dreptunghiular mic - (RCS-RSC- 01)..... | 110 |
| 6.5.1. Încercarea elementului în starea inițială (fără consolidare) - Test RCS-RSC-UU-01..... | 110 |
| 6.5.2. Consolidarea elementului..... | 112 |
| 6.5.3. Încercarea elementului consolidat - Test RCS-RSC-DS-01..... | 114 |
| 6.6. Încercări efectuate pe primul element cu gol dreptunghiular mare - (RCS-RLC-01)..... | 122 |
| 6.6.1. Încercarea elementului în starea inițială (fără consolidare) - Test RCS-RLC-UU-01..... | 122 |
| 6.6.2. Consolidarea elementului..... | 125 |
| 6.6.3. Încercarea elementului consolidat - Test RCS-RLC-DS-01..... | 126 |
| 6.7. Încercări efectuate pe al doilea element cu gol dreptunghiular mare - (RCS-RLC-02)..... | 132 |
| 6.7.1. Încercarea elementului în starea inițială (fără consolidare) - Test RCS-RLC-UU-02..... | 132 |
| 6.7.2. Consolidarea elementului..... | 134 |
| 6.7.3. Încercarea elementului consolidat - Test RCS-RLC-DS-02..... | 135 |
| 6.8. Concluzii ale programului experimental..... | 141 |
| 6.8.1. Rezistențe; Capacități..... | 141 |
| 6.8.2. Limite elastice..... | 147 |
| 6.8.3. Rigiditate; Ductilitate..... | 148 |
| 6.8.4. Energia disipată..... | 149 |
| 6.8.5. Moduri de cedare..... | 151 |
| 7. Studiu privind concordanța rezultatelor teoretice cu cele experimentale..... | 153 |
| 7.1. Modelarea comportării elementului RCS-FS-01..... | 153 |
| 7.2. Modelarea comportării elementului RCS-RSC-01..... | 156 |
| 7.3. Modelarea comportării elementului RCS-RLC-01..... | 158 |
| 7.4. Modelarea comportării elementului RCS-RLC-02..... | 160 |
| 7.5. Concluzii..... | 162 |
| 8. Studii de caz..... | 163 |
| 8.1. Studiu de caz nr. I..... | 163 |
| 8.1.1. Formularea problemei..... | 163 |
| 8.1.2. Stabilirea soluției de consolidare..... | 164 |
| 8.1.3. Aplicarea consolidării..... | 165 |
| 8.1.4. Rezultate și concluzii..... | 166 |

| | |
|--|------------|
| 8.2. Studiu de caz nr. II..... | 167 |
| 8.2.1. Formularea problemei..... | 167 |
| 8.2.2. Stabilirea soluției de consolidare..... | 167 |
| 8.2.3. Aplicarea consolidării..... | 169 |
| 8.2.4. Rezultate și concluzii..... | 170 |
| 9. Concluzii și contribuții personale..... | 171 |
| 9.1. Concluzii..... | 171 |
| 9.2. Contribuții personale..... | 172 |
| 9.3. Activitate; diseminare rezultate..... | 172 |
| Anexa I - Proiectarea soluțiilor de consolidare..... | 175 |
| I.1. Calculul soluției de consolidare pentru elementul întreg RCS-FS-01..... | 175 |
| I.2. Calculul soluției de consolidare pentru elementul RCS-RSC-01..... | 178 |
| I.3. Calculul soluției de consolidare pentru elementul RCS-RLC-01..... | 180 |
| I.4. Calculul soluției de consolidare pentru elementul RCS-RLC-02..... | 181 |
| Abrevieri și acronime..... | 183 |
| Referințe bibliografice..... | 185 |

1. INTRODUCERE

1.1. Generalități

Tema de cercetare din cadrul programului de doctorat se referă generic la elemente încovoiate consolidate cu materiale compozite polimerice. În acest cadru vast, cercetarea s-a axat pe studierea comportării plăcilor plane de beton armat consolidate cu materiale compozite polimerice. În același timp, plăcile de beton armat ce dobândesc o comportare deficitară prin crearea unor goluri, și mai ales consolidarea acestor tipuri de plăci, au reprezentat o direcție esențială de studiu.

Plăcile plane de beton armat reprezintă cu siguranță cea mai răspândită soluție constructivă pentru realizarea elementelor de rezistență ale planșelor în cazul construcțiilor civile, fie ele realizate din zidărie, beton armat sau din elemente metalice. Plăcile de beton armat sunt folosite în aplicații structurale variate, de la planșee și sisteme de acoperișuri, până la pereți, rezervoare și tabliere de poduri, fiind supuse, de la caz la caz, unei lungi serii de solicitări și combinații de solicitări. Așa cum arată și titlul, în această teză, studiul va fi limitat la plăci de beton armat consolidate pentru a le spori capacitatea la încovoiere.

La ora actuală în ingineria construcțiilor se acordă o atenție crescândă materialelor compozite, în special Polimerilor Armați cu Fibre (în engleză denumiți Fiber Reinforced Polymer, FRP). Proprietățile compozitelor au făcut ca utilizarea lor în o serie de aplicații, de la consolidări locale și până la lucrări de complexitate ridicată (construcții noi, în special poduri), să se dovedească a fi un real succes. O serie de caracteristici ale compozitelor FRP, precum: greutate specifică redusă, rezistențe ridicate, rezistență totală la coroziune și faptul că sunt non-magnetice, le recomandă ca soluția optimă în foarte multe situații. Costul relativ ridicat precum și existența unor breșe în nivelul de cunoștințe referitoare la modurile de încercare, detalieri, comportare, durabilitate în timp (inclusiv în ceea ce privește rezistența la acțiunea focului) reprezintă dezavantajele principale ale acestor materiale și o piedică importantă în utilizarea lor pe o scară mult mai largă decât în prezent.

Datorită numărului crescând de structuri de beton armat îmbătrânite, și interesul acordat găsirii unor metode de sporire a duratei de viață a acestora este foarte însemnat. Procesul continuu de degradare a acestor structuri aflate sub exploatare și la granița duratei de viață (sau poate chiar având durata de viață depășită) împreună cu noile cerințe de proiectare la încărcări sporite contribuie la intensificarea acestui interes. Deteriorarea elementelor structurale ale clădirilor civile, industriale, agricole sau ale lucrărilor de artă poate fi atribuită unei serii de factori precum îmbătrânirea, degradare indusă de condițiile de mediu, proiectare sau construire deficitară, lipsa unei întrețineri corespunzătoare, acțiunea unor solicitări accidentale (acțiuni seismice, explozii, incendii, etc.).

Una dintre soluțiile moderne de consolidare sau reabilitare constă în utilizarea materialelor compozite polimerice. Aplicația cea mai uzuală din domeniul consolidării cu materiale compozite este consolidarea pentru sporirea capacității la încovoiere a elementelor structurale, deoarece în acest caz se aplică regulile clasice de proiectare a betonului armat, cu anumite modificări pentru a ține cont de caracteristicile fizico-mecanice ale compozitelor. Metoda cea mai des întâlnită de

consolidare a elementelor încovoiate presupune dispunerea lamelelor sau a țesăturilor din FRP pe fața întinsă a elementului prin lipire cu ajutorul unor rășini epoxidice.

1.2. Motivații și obiective

După cunoștința autorului, consolidarea plăcilor de beton armat utilizând materiale compozite polimerice armate cu fibre este raportată în literatura de specialitate începând cu anul 1998 [086]. Cu toate că tema ar putea părea nu foarte recentă, studiile practice și teoretice sunt disponibile într-un număr restrâns în literatura de specialitate. Majoritatea lucrărilor publicate în acest domeniu se referă la consolidarea sau reabilitarea plăcilor unidirecționale, fie ele cu sau fără goluri, în timp ce studiile teoretice și practice din cadrul prezentei teze au ca obiect plăcile bidirecționale de beton armat cu și fără goluri create ulterior. Această lipsă de studii teoretice și practice (și implicit existența unor lacune referitoare la comportarea acestor elemente) a indus necesitatea inițierii unor programe de cercetare care să răspundă la unele din necunoscute și să lărgască aria de cunoștințe.

În multe cazuri sunt necesare anumite goluri după terminarea construcției în locuri neprevăzute inițial, în principal datorită unei schimbări a funcționalității. Există și cazul în care anumite goluri au fost prevăzute în cadrul proiectării inițiale dar datorită schimbărilor de funcționalitate sau destinație, cresc încărcările pe planșee iar comportarea acestora în ansamblu devine defectuoasă atât ca rezistență cât și ca rigiditate. Apariția acestor situații nu se traduce doar prin o simplă reducere a capacității portante și a rigidității plăcilor de beton armat, ci și prin o modificare a modului inițial de cedare în forme de cedare neașteptate.

În același timp, consolidarea structurilor existente reprezintă o alternativă de o importanță financiară extremă. Prelungirea duratei de viață a unei structuri existente prin reabilitare/consolidare poate economisi în multe situații sume uriașe de bani, destinate altfel cheltuielilor de demolare și reconstrucție.

Toate argumentele menționate mai sus constituie motivația efectuării programului teoretic și experimental ce stă la baza prezentei teze de doctorat, aplicațiile practice ale temei fiind vaste.

Obiectivul principal al temei îl reprezintă studiul amănunțit al comportării plăcilor plane bidirecționale de beton armat încovoiate, consolidate cu materiale compozite polimerice. Studiul a fost canalizat îndeosebi în direcția plăcilor cu goluri create ulterior, însă s-a studiat amănunțit și comportarea plăcilor întregi, fără goluri. În același timp, evaluarea eficacității anumitor soluții de consolidare propuse, soluții ce întrebuințează materiale compozite polimerice, reprezintă o prioritate.

1.3. Potențiale aplicații ale temei de cercetare

Tema de cercetare are o aplicabilitate practică sporită. Rezultatele experimentale și teoretice obținute conferă o serie de informații utilizabile atât de mediul academic cât și de practicieni în situații ce prevăd consolidarea plăcilor de beton armat utilizând materiale compozite polimerice. Elementele la care face referire lucrarea pot fi încadrate în două categorii: plăci întregi și plăci cu goluri create ulterior. Practic, orice situație în care un astfel de element trebuie consolidat pentru refacerea sau sporirea capacității poate deveni o posibilă aplicație a prezentei teme.

2. ASPECTE GENERALE PRIVIND PLĂCILE ȘI PLANȘEELE DE BETON ARMAT

2.1. Tipuri de planșee de beton armat și utilizarea acestora

Planșeele reprezintă elemente de suprafață, orizontale sau înclinate, ce compartimentează clădirile pe verticală, alcătuind, împreună cu elementele portante verticale, structura de rezistență. Ele sunt de regulă sollicitate la încovoiere, fiind supuse la încărcări exterioare aplicate perpendicular pe suprafața lor. Uneori pot fi sollicitate și la compresiune, întindere sau torsiune.

Planșeele, ca și componentă orizontală a structurii de rezistență, îndeplinesc rolul de șaibă rigidă (diafragmă) prin preluarea forțelor orizontale și transmiterea acestora structurii verticale de rezistență (stâlpi, pereți). Acest rol al planșeelor este foarte important, în special în cazul construcțiilor amplasate în zone de risc seismic. În anumite cazuri, planșeele intră și în componența anvelopei construcției prin planșeele de peste subsoluri neîncălzite sau planșeele terasă.

În alcătuirea oricărui planșeu se pot identifica trei zone componente:

- pardoseala
- structura de rezistență
- tavanul.

Pardoseala reprezintă zona superioară a unui planșeu, rolul său principal fiind acela de strat de uzură. Tipul de pardoseală utilizat pentru fiecare planșeu în parte, depinde de destinația încăperii în care se montează pardoseala. Dacă se discută de planșee terasă, pardoseala este cea care asigură protecția împotriva factorilor de mediu (prin hidroizolații, izolații higrotermice, etc.). De regulă, pardoseala este alcătuită ca element multistrat, de la caz la caz, având în componență: strat de uzură, strat suport, strat de izolator termic și/sau fonic.

Tavanul reprezintă zona inferioară a planșeului, având în general un rol estetic și decorativ. În multe cazuri însă, poate avea rol de protecție acustică, de ignifugare, sau de mascare a anumitor elemente de ventilație, iluminat, etc.

Structura de rezistență a planșeelor reprezintă elementul ce trebuie să reziste acțiunii încărcărilor verticale directe ce acționează asupra sa (din greutatea proprie a planșeului, încărcări variabile, greutate proprie a pereților despărțitori, etc.) precum și să confere, în special în zonele seismice, rigiditatea orizontală necesară. Structura de rezistență a planșeelor poate fi realizată din elemente prefabricate (fâșii, panouri mari prefabricate) sau din elemente realizate monolit (plăci monolite izolate sau continue). Acestea pot rezema direct pe elemente portante ale structurii verticale de rezistență (planșee dală) sau indirect prin intermediul unor grinzi sau capiteluri executate simultan cu placa. Există și soluții constructive ce implică atât utilizarea de elemente prefabricate cât și de elemente monolite la structura de rezistență a unui planșeu (planșee predală).

Dintre toate tipurile de structuri de rezistență ale planșeelor, prezenta lucrare se referă la două variante: plăci de beton monolite și varianta prefabricată a panourilor mari. În continuare, în cadrul prezentei lucrări, termenul de plăci plane va defini aceste două soluții, care din punct de vedere al comportării la încărcări perpendiculare pe planul lor ce acționează ulterior momentelor post întărire respectiv post montaj, sunt similare.

Plăcile plane de beton armat sunt utilizate pentru a asigura suprafețe utile plane, line și, de regulă, orizontale în orice fel de construcții civile, industriale sau agricole. Plăcile plane de beton armat reprezintă cu siguranță cea mai răspândită soluție constructivă pentru realizarea elementelor de rezistență ale planșeelor în cazul construcțiilor civile, fie ele realizate din zidărie, beton armat sau din elemente metalice.

Din punct de vedere al modului de lucru și de transmitere a eforturilor către reazeme, plăcile plane încovoiate se pot încadra în două categorii. Dacă o placă dreptunghiulară de beton armat are raportul dintre dimensiunile în plan (lungime/lățime) mai mare decât 2, placa va fi unidirecțională (transmite încărcările perpendiculare pe planul ei la reazeme după o singură direcție), în funcție de rezemări, direcția de transmitere a eforturilor putând fi atât direcția paralelă cu laturile scurte cât și direcția paralelă cu laturile lungi ale plăcii. Dacă însă raportul dintre lungimea și lățimea plăcii este mai mic decât 2, iar placa este rezemată pe trei laturi sau pe toate cele patru laturi, atunci placa va fi bidirecțională (transmite încărcările perpendiculare pe planul ei la reazeme după două direcții). În funcție de rezemări, și plăcile la care raportul dintre lungime și lățime este mai mic decât 2, pot reprezenta plăci unidirecționale. Aceste situații sunt exemplificate grafic în Fig. 2.1. și 2.2.

În cadrul acestei lucrări prezintă interes doar plăcile plane bidirecționale, dreptunghiulare, având raportul laturilor lungime/lățime mai mic decât 2, și rezemate trei sau patru laturi.

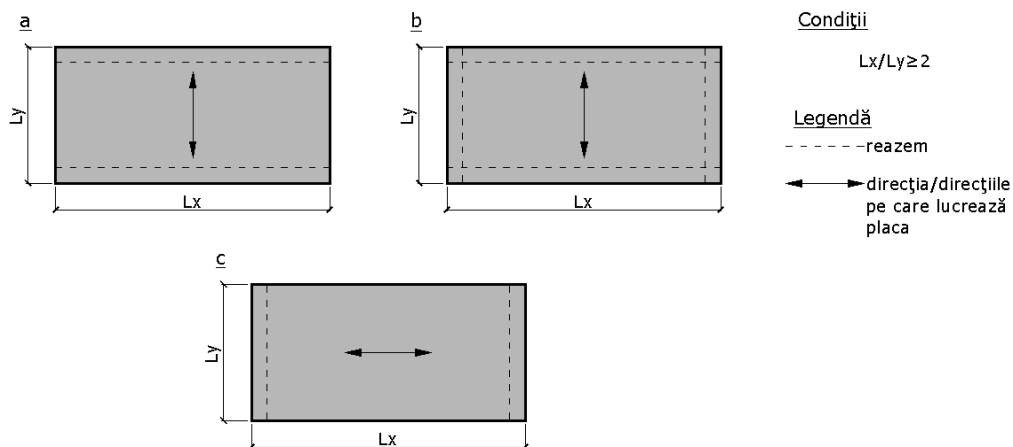


Fig. 2.1. - Plăci unidirecționale cu raportul lățime/lungime mai mare decât 2

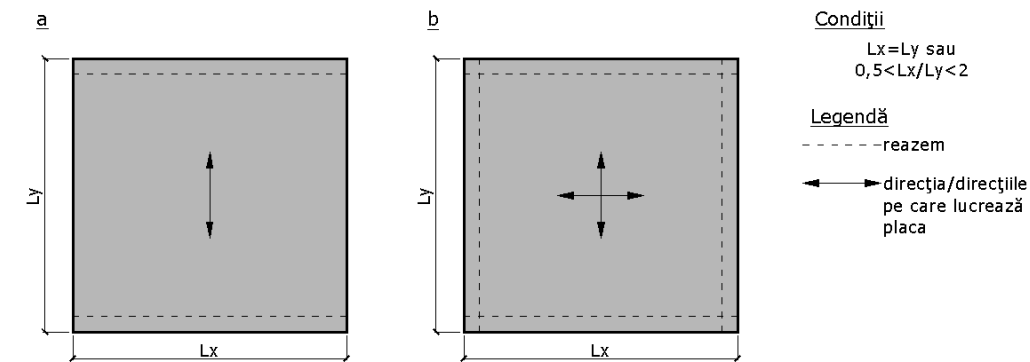


Fig. 2.2. - Plăci unidirecționale sau bidirecționale cu raportul lățime/lungime mai mic decât 2

2.2. Plăci cu goluri considerate în proiectarea inițială

Aproape inevitabil, în mai toate plăcile plane de beton armat din cadrul structurilor construcțiilor civile, industriale sau agricole, trebuie să existe goluri, dintr-o serie de considerente de funcționalitate. Acestea pot avea dimensiuni reduse, pentru a permite montarea diverselor instalații (termice, canalizare, alimentare cu apă, conducte pluviale, etc.), sau pot avea dimensiuni semnificative, necesare instalării de ascensoare și/sau scări.

Prezența golurilor modifică schema liniilor de rupere, colțurile lor fiind, de cele mai multe ori, zone de inițiere a fenomenelor de fisurare și cedare. Schema nouă a liniilor de rupere va reprezenta, aproape întotdeauna, o schemă ce caracterizează capacități portante mult mai reduse decât schema inițială a liniilor de rupere (fără prezența golurilor). Această modificare semnificativă a modului de lucru a unei plăci cu gol față de placa echivalentă omogenă (fără gol) se datorează faptului că golurile reprezintă zone cu capacitate nulă la încovoiere. Însă, pe de altă parte, prin crearea unui gol într-o placă, aproape în toate situațiile, încărcarea totală pe care trebuie să o suporte placa respectivă scade, magnitudinea variației încărcării fiind în directă proporționalitate cu dimensiunile golului. Prin suprapunerea acestor fenomene, de la caz la caz, se obțin comportări variate ale elementelor. Astfel se poate studia o comparație între o placă omogenă încărcată uniform pe toată suprafața sa și o placă echivalentă ce are în componența sa un gol, supusă unei încărcări uniform distribuite având aceeași intensitate dar acționând doar pe suprafața rămasă în urma considerării golului. Se va constata că, de la caz la caz, forța capabilă ultimă raportată la unitate de suprafață încărcată, va da valori fie mai mari, fie mai mici pentru placa omogenă decât pentru placa cu gol [019].

O distincție între cele două tipuri de goluri în funcție de dimensiunile lor (goluri mici și goluri mari) este cea mai importantă din punct de vedere structural. Astfel, dacă de regulă, golurile foarte mici nu influențează comportarea de ansamblu a unei plăci, golurile mari sunt definitorii pentru capacitatea și rigiditatea plăcilor în interiorul cărora sunt generate.

Golurile relativ mici nu sunt determinante în cadrul plăcilor ce fac parte din planșee cu grinzi sau în cazul panourilor mari prefabricate, poziția lor fiind însă destul de importantă în cazul plăcilor planșeelor dală, cu sau fără capiteluri la capetele stâlpilor. O abordare general valabilă, practică pentru a elimina efectele nedorite generate de prezența unor goluri mici, este aceea de a dispune în jurul

acestora, bare de armătură ce au o arie echivalentă cu cea a barelor întrerupte prin crearea golului. Practic, orice armătură întreruptă de goluri ar trebui înlocuită cu bare de armătură de arii echivalente, dispuse pe marginile golului, suprapuse corespunzător pentru a putea transmite eforturi prin aderență. Adicional, există recomandări care presupun amplasarea unor armături diagonale în zonele de colț ale golurilor pentru a controla fenomenele de fisurare ce se vor iniția aproape întotdeauna în aceste zone.

Influența golurilor mici asupra comportării plăcilor componente ale planșeelor dală, variază semnificativ în funcție de poziția golurilor relativ la poziția stâlpilor. Din punct de vedere structural, golurile ar fi indicat să fie poziționate departe de stâlpi, de preferat în zona fâșiilor de câmp. Rațiunile de ordin funcțional și arhitectural împiedică însă, de cele mai multe ori, astfel de abordări, preferându-se amplasarea golurilor în zone din vecinătatea stâlpilor. În această situație, intercalarea unor goluri cu perimetrul de control de referință din zona stâlpilor duce, de regulă, la reduceri semnificative a capacității portante la tăiere și străpungere, zona de intersecție dintre gol și perimetrul de control trebuind exclusă la calculul capacității.

Această problemă a plăcilor cu goluri considerate în proiectarea inițială este abordată într-o serie de coduri naționale, precum cel al SUA (ACI 318-08) [031], [032], cel suedez (BBK 04) [042] sau cel polonez (PN-B-03264) [041], precum și în lucrările unor specialiști.

Ca o mențiune general valabilă, atât pentru plăcile planșeelor cu grinzi cât și pentru plăcile planșeelor dală, codul american ACI 318-08 permite existența oricărui tip de goluri, fără a face distincție în funcție de dimensiuni, dacă se demonstrează prin calcule că placa va respecta toate exigențele de rezistență precum și cele impuse de limitele de serviciu (fisurare, deformații). Pentru a evita o analiză ce poate fi de multe ori destul de laborioasă, acest cod emite o serie de recomandări valabile doar în cazul planșeelor dală. Aceste recomandări sunt enumerate mai jos:

1. - goluri de orice dimensiuni pot fi proiectate în zona de intersecție a două fâșii de câmp perpendiculare, fiind însă obligatoriu ca întreaga arie de armătură rezultată din calcule pentru placa fără gol să fie menținută

2. - în zonele corespunzătoare intersecției fâșiilor de reazem, nu mai mult de o optime din lățimea fâșiei respective poate fi întreruptă de gol. O cantitate de armătură echivalentă celei întrerupte de gol va fi adăugată în placă, pe laturile golului

3. - în zona corespunzătoare intersecției dintre o fâșie de reazem și o fâșie de câmp, nu mai mult de un sfert din armăturile din fiecare fâșie vor fi întrerupte de gol. Cantități de armătură echivalente cu cele întrerupte pe cele două direcții de prezența golului, se vor dispune pe marginile acestuia.

O însușire comună a acestor recomandări este reprezentată de obligativitatea dispunerii în elementul cu gol, a întregii arii de armătură rezultată din calcul considerând panoul întreg, prin dispunerea în jurul golului a unor bare având ariile de armătură echivalente cu cea a barelor întrerupte. Aceste recomandări sunt ilustrate grafic în Fig. 2.3., fiind valabile pentru situația în care $L_2 \geq L_1$.

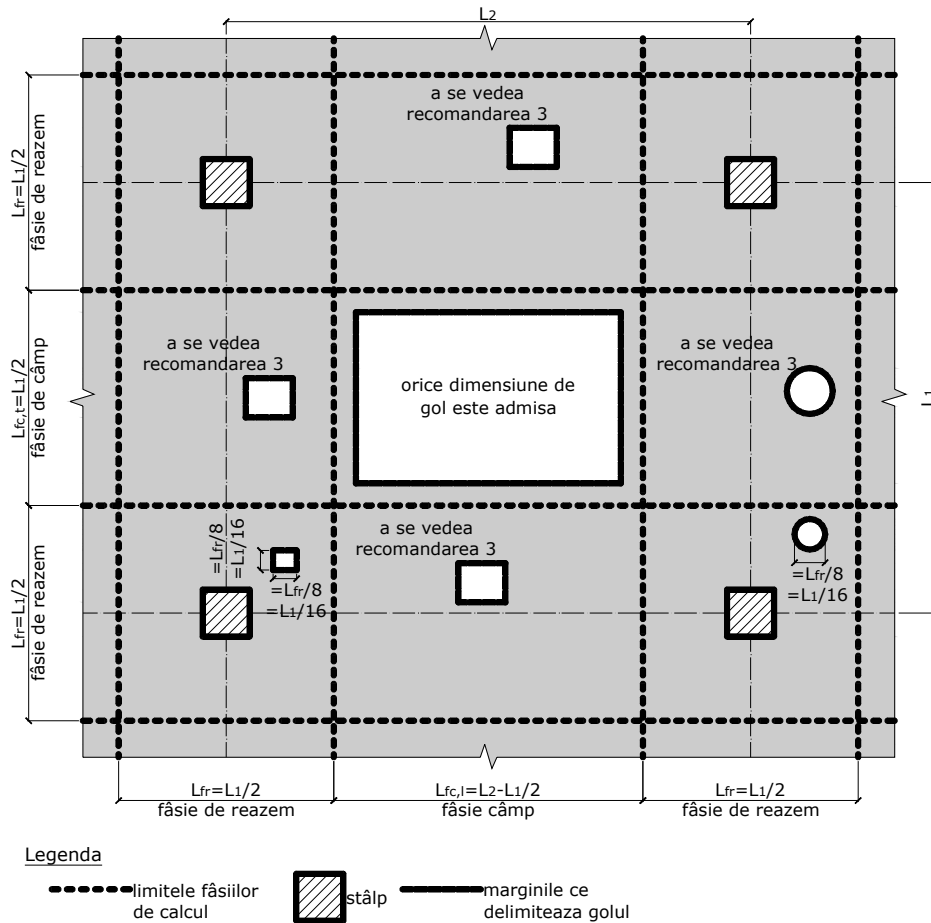


Fig. 2.3. - Recomandări din codul ACI 318-08 referitoare la dimensiunile admise ale golurilor în plăcile planșeelor dală

Codul suedez BBK04 [042] tratează problema plăcilor cu goluri considerate în proiectarea inițială în două moduri distincte, în funcție de dimensiunile golurilor raportate la geometria plăcilor. Astfel, pentru plăci supuse unei încărcări uniforme distribuite, un gol se consideră a fi gol mic dacă lungimea sa este mai mică decât o treime din lungimea laturii celei mai scurte a plăcii. Dacă însă lungimea unui gol este mai mare decât o treime din lungimea laturii celei mai scurte a plăcii, golul respectiv se definește ca fiind gol mare. Dimensiunile maxime ale golurilor mici sunt ilustrate în Fig. 2.4.

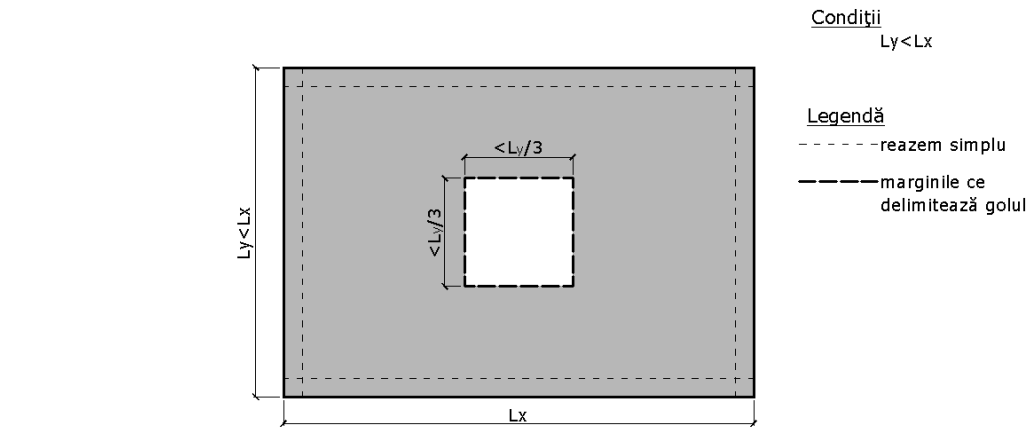


Fig. 2.4. - Dimensiunile maxime ale golurilor mici conform BBK 04

În cazul golurilor mici, placa este dimensionată ca un element omogen (ca și când golul nu ar exista). Apoi, momentele care acționează pe cele două direcții în zona de mijloc a golului sunt repartizate și adăugate la momentele ce acționează de-a lungul celei mai apropiate margini corespunzătoare a golului, în intervalul unei fâșii ce trebuie să aibă lățimea mai mică decât de trei ori grosimea plăcii. Se obțin astfel fâșii de calcul în jurul golului, paralele cu fiecare margine în parte. În lățimea acestor fâșii se vor îngloba armăturile suplimentare ce se dispun pentru a prelua eforturile suplimentare ce se dezvoltă în placă datorită existenței golului. Lungimea acestor armături trebuie să fie cel puțin egală cu lungimea pe care ar fi avut-o în cazul în care golul nu ar fi existat. Calculul la forță tăietoare respectă aceeași metodologie. În cazul unor elemente nesimetrice cu un gol ce nu este amplasat central, bineînțeles că momentele m_{x1} , m_{x2} , m_{x3} , m_{y1} , m_{y2} , m_{y3} nu se vor referi neapărat la momentele ce acționează la mijlocul golului sau în zona de mijloc a marginilor, ci aceste momente vor fi cele maxime înregistrate pentru zonele în care ele acționează. Reprezentarea grafică a acestei proceduri însoțită de explicații este ilustrată în Fig. 2.5. - 2.7.

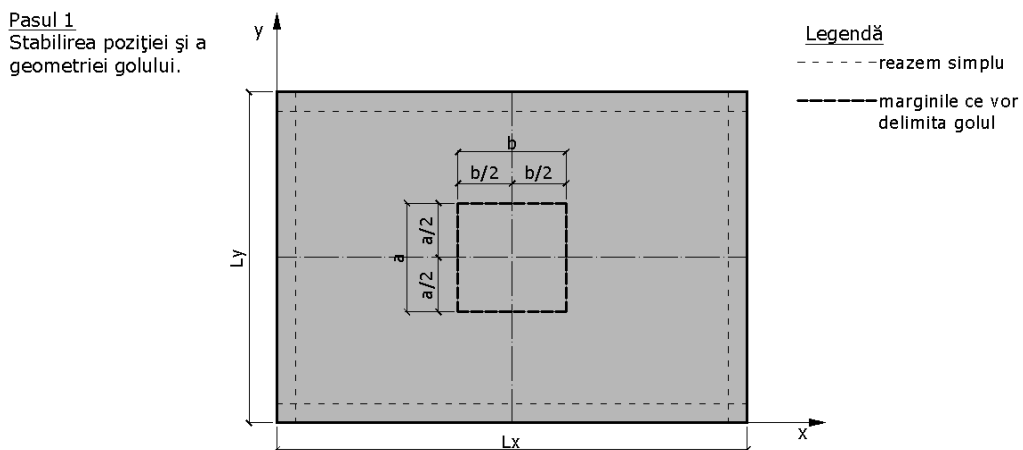


Fig. 2.5. - Recomandare BBK 04 pentru calculul armăturilor în jurul golurilor mici - Pas 1

Pasul 2
Calculul eforturilor necesare în cadrul dimensionării, considerând placa omogenă.

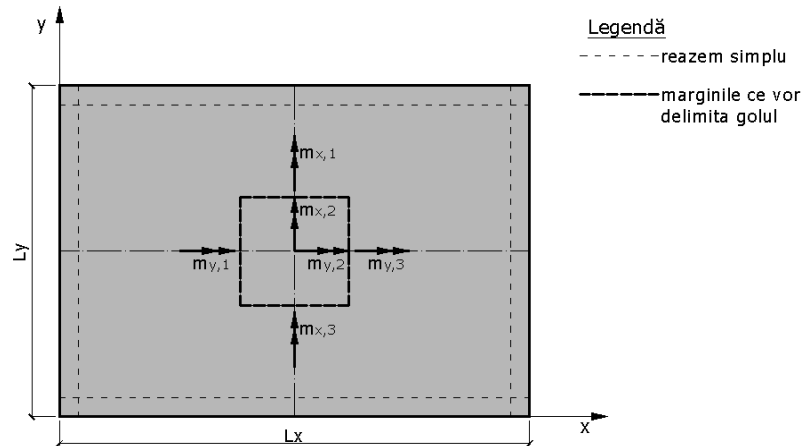


Fig. 2.6. - Recomandare BBK 04 pentru calculul armăturilor în jurul golurilor mici - Pas 2

Pasul 3
Stabilirea fâșiilor de calcul și dimensionarea ariilor de armătură necesară în jurul golului.

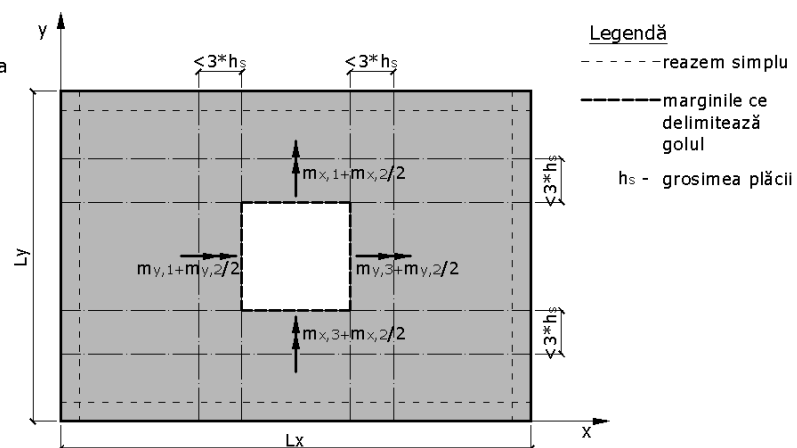


Fig. 2.7. - Recomandare BBK 04 pentru calculul armăturilor în jurul golurilor mici - Pas 3

În cazul golurilor mari, codul suedez prezintă foarte succint o abordare care presupune ca marginile golurilor să fie considerate ca fiind muchii nerezamate (libere), momentele care acționează în aceeași direcție cu marginile fiind redistribuite pentru a fi mai concentrate în jurul golurilor.

Golurile foarte mici, cum ar fi străpungerile pentru rețele electrice sau țevi având diametre relativ mici, nu sunt definite de codul suedez ca și goluri, influența lor asupra comportării plăcii fiind considerată total nesemnificativă.

Codul polonez PN-B-03264 [041] conține și el o serie de prescripții pentru dimensionarea și alcătuirea plăcilor cu goluri considerate în proiectare inițială. Prima deosebire față de abordarea suedeză, este că acest cod limitează lungimea maximă a marginilor golurilor la un sfert din lungimea laturii corespunzătoare a plăcii (latura paralelă cu marginea respectivă a golului). Procedul de calcul prezintă și el o

abordare diferită față de cea suedeză, presupunând dimensionarea plăcii ca pentru o placă omogenă, după care cantitatea de armătură întreruptă de gol este distribuită în jurul acestuia. Față de codul suedez, se permite ca armăturile ce se dispun în jurul golurilor să fie mai scurte, fiind însă obligatorie asigurarea unei ancorări corecte. În același timp, codul polonez limitează intensitatea încărcării ce acționează uniform distribuit pe suprafața plăcii la valoare de 10 kN/m^2 . Acest cod nu face nici o recomandare asupra lățimii fâșiei în care se vor dispune armăturile suplimentare ce sunt necesare în jurul golului. Recomandările din codul PN-B-03264 [041] precum și etapele procedurii de dimensionare sunt ilustrate în Fig. 2.8. - 2.10.

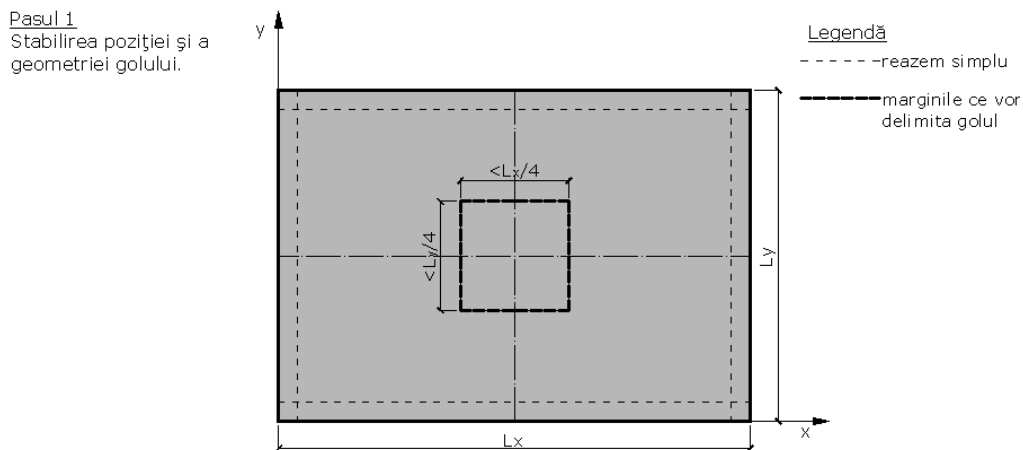


Fig. 2.8. - Recomandare PN-B-03264 pentru calculul armăturilor în jurul golurilor mici - Pas 1

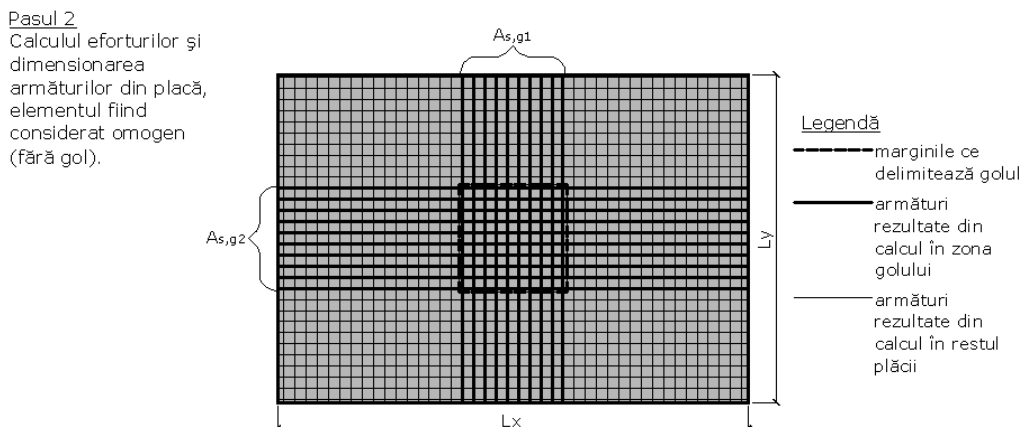


Fig. 2.9. - Recomandare PN-B-03264 pentru calculul armăturilor în jurul golurilor mici - Pas 2

Pasul 3

Disponerea armăturilor suplimentare necesare în jurul golului, utilizând bare de același diametru sau de diametre diferite.

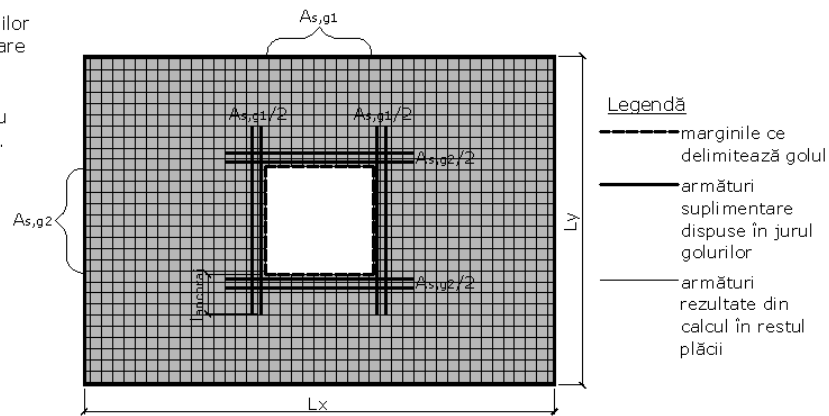


Fig. 2.10. - Recomandare PN-B-03264 pentru calculul armăturilor în jurul golurilor mici - Pas 2

În cazul în care există situații în care limitările impuse de cod trebuie depășite (valori mai mari ale încărcărilor decât 10 kN/m^2 , dimensiuni mai mari ale golurilor decât un sfert din latura paralelă corespunzătoare a plăcii), codul obligă la dimensionare unor grinzi ascuse ce vor borda golul, având înălțimea egală cu grosimea plăcii. Procedura de dimensionare a fâșiilor sub formă de grinzi ascuse are la bază procedeul propus de Leonhardt [013] pentru plăci unidirecționale simplu rezemate și de Stiglat și Wippel [023] pentru plăci unidirecționale încastrate.

Metoda propusă de Leonhardt se referă strict la plăci unidirecționale, conținând recomandări foarte precise privind calculul și dispunerea armăturilor în jurul golului. Considerând o placă unidirecțională simplu rezemată, supusă unei încărcări uniforme distribuite notată cu „q” conform Fig. 2.11., placa trebuie armată suplimentar în zona delimitată de fâșia „ b_m ”, fâșie paralelă cu latura scurtă a plăcii. În același timp, trebuie dispuse și armături suplimentare în direcția paralelă cu latura lungă. Lățimea fâșiei în care se vor dispune armăturile suplimentare se calculează cu Rel. 2.1., iar valoarea momentului ce acționează în această zonă se determină pe baza Rel. 2.2.

$$b_m \approx \left(0,8 - \frac{b}{L}\right) \cdot L \quad (2.1.)$$

$$m_{ym} \approx \left[0,125 + 0,19 \cdot \frac{a}{L} \cdot \left(\frac{2 \cdot b}{L}\right)^2\right] \cdot q \cdot L^2 \quad (2.2.)$$

Valoarea momentului ce se va utiliza pentru dimensionarea armăturilor suplimentare dispuse în jurul golului, paralel cu laturile lungi ale plăcii se determină cu Rel. 2.3. Formula este valabilă în cazul respectării condiției $b/a \geq 0,5$. Altfel, valoarea momentului se va determina pe baza unui calcul considerând zona de placă ce are dimensiunile „a” * „b” ca o placă rezemată pe trei laturi.

$$m_{xr} \approx 0,125 \cdot q \cdot a \cdot (a + 2 \cdot b_m) \quad (2.3.)$$

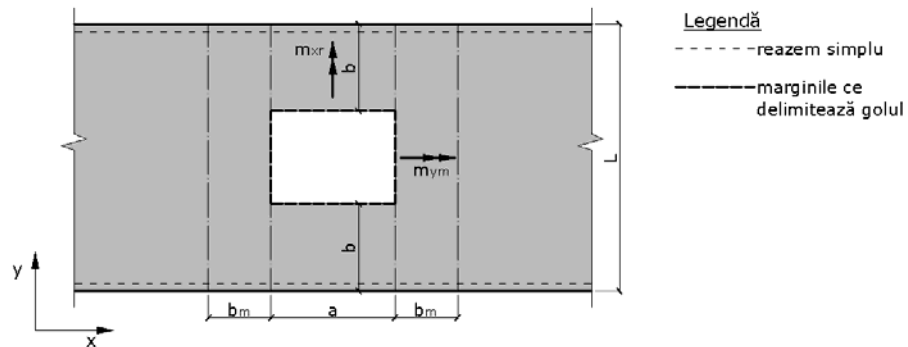


Fig. 2.11. - Principiul metodei grinzilor ascunse propusă de Leonhardt

Stiglat și Wippl [023] au propus pentru plăci unidirecționale încastrate o variantă a metodei recomandate de Leonhardt [013]. Astfel, pentru o placă unidirecțională dublu încastrată și încărcată cu o sarcină uniform distribuită notată cu „q” conform Fig. 2.12., armăturile suplimentare se vor dispune pe direcția scurtă pe o lățime delimitată de fâșia „b_m” în zona de câmp și pe o lățime delimitată de fâșia „b_{me}” în zona de reazem.

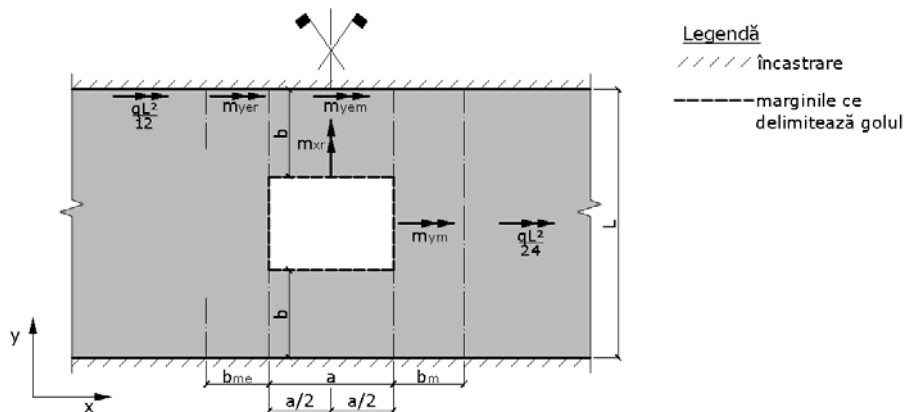


Fig. 2.12. - Recomandările lui Stiglat și Wippl placa unidirecțională dublu încastrată

Lățimile „b_m” și „b_{me}” se calculează pe baze Rel. 2.4. și respectiv Rel. 2.5.

$$b_m \approx 0,6 \cdot \left(0,8 - \frac{b}{L}\right) \cdot L \quad (2.4.)$$

$$b_{me} \approx 0,18 \cdot L \quad (2.5.)$$

Momentul „ m_{xr} ” ce acționează pe direcția lungă în zonele din jurul golului se poate determina utilizând Rel 2.3. În cazul situației în care $b/a \geq 0,5$, momentul „ m_{yem} ” se va determina pe baza unui calcul considerând zona de placă ce are dimensiunile „ a ” * „ b ” ca o placă încastată pe o latură, simplu rezemată pe alte două laturi și cu a patra latură liberă. Restul momentelor se determină pe baza formulelor 2.6, 2.7, 2.8 și 2.9.

$$m_{ym} = \left(0,042 + 0,19 \frac{a}{L} \right) \cdot q \cdot L^2 \quad \text{pentru } \frac{b}{L} \geq 0,4 \quad (2.6.)$$

$$m_{ym} = \left(0,042 + 0,33 \frac{b^3}{b_m \cdot L^2} \right) \cdot q \cdot L^2 \quad \text{pentru } \frac{b}{L} < 0,4 \quad (2.7.)$$

$$m_{yer} = - \left(0,083 + 0,33 \frac{b^2}{b_{me} \cdot L} \right) \cdot \left(1,5 - \frac{b}{L} \right) \cdot q \cdot L^2 \quad \text{pentru } \frac{b}{a} \geq 0,5 \quad (2.8.)$$

$$m_{yer} = m_{yem} \approx - \frac{q \cdot b^2}{2} \quad \text{pentru } \frac{b}{a} < 0,5 \quad (2.9.)$$

Calculul plăcilor bidirecționale cu goluri mari, se poate aborda considerând toate panourile ca fiind rezemate pe 3 laturi, conform Fig. 2.13. Astfel, se consideră de fapt că panourile 2 și 3 descarcă pe panourile 1 și 4, reacțiunile de pe laturile de pe direcția x ale panourilor 2 și 3 devenind încărcări distribuite aplicate pe latura liberă a panourilor 1 și 4. [012]

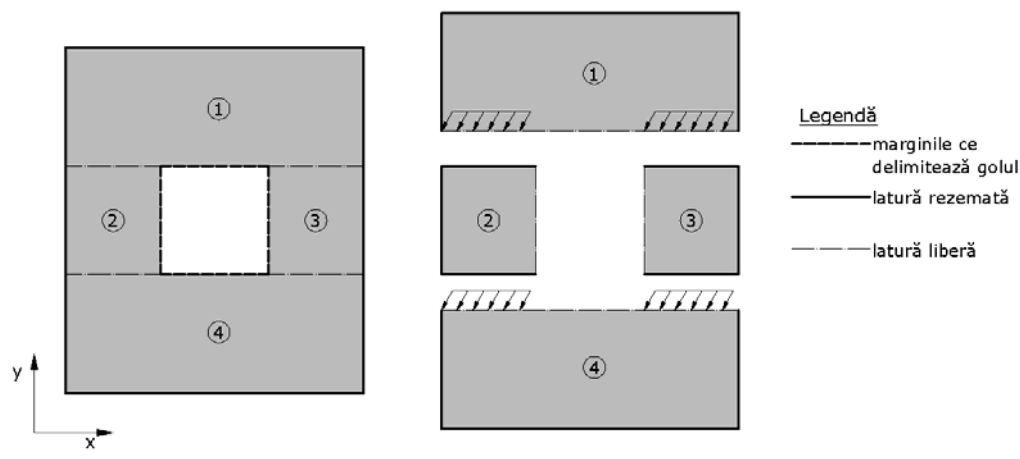


Fig. 2.13. - Divizarea plăcii în panouri (cf. [012])

Recomandările unor specialiști [018] presupun ca golurile foarte mari să fie bordate de grinzi sau de fâșii de placă având grosimi mai mari decât restul plăcii, pentru a reda pe cât posibil, continuitatea acesteia. Un neajuns al acestor recomandări este dat de faptul că nu se face o distincție clară între diferitele tipuri de goluri la care se face referire prin termeni ca: goluri foarte mici, goluri mici,

goluri mari sau goluri foarte mari. Astfel, aceste recomandări nu au o aplicabilitate foarte exactă, conducând, în funcție de experiența fiecărui specialist, la interpretări destul de variate.

2.3. Problematika plăcilor de beton armat cu goluri tăiate ulterior

Este puțin probabil ca un proiect de reabilitare/refuncționalizare să nu presupună și lucrări de tăiere de noi goluri în planșeele existente. Aceste goluri, realizate pentru a permite integrarea unor noi sisteme de instalații (alimentare cu apă, canalizare, încălzire, climatizare, ventilație, etc.) sau a unor noi elemente de circulație (scări, lifturi) pot varia foarte mult din punct de vedere al mărimii, de la caz la caz. Astfel, dacă pentru anumite instalații sunt necesare goluri cu diametru foarte mic, pentru înglobarea elementelor de circulație sau din rațiuni arhitectonice, dimensiunile golurilor cresc, existând situații când se pot crea goluri de dimensiunea unui ochi de placă.

Ca orice lucrare de intervenție asupra unor elemente structurale, „tăierea golurilor în plăci existente ar trebui abordată cu precauție și evitată pe cât posibil” - [017]. În mod normal, inginerul structurist ar trebui să aibă un cuvânt important de spus în alegerea locațiilor golurilor și a mărimii acestora. În consecință, cunoașterea zonelor recomandate pentru limitarea efectelor defavorabile generate de crearea unor goluri este imperios necesară.

2.3.1. Goluri tăiate ulterior în plăci unidirecționale

De regulă, plăcile unidirecționale de beton armat fac parte dintr-un planșeu cu mai multe deschideri, placa fiind continuă din punct de vedere structural. Continuitatea plăcii este benefică pe de-o parte, deoarece permite o oarecare redistribuire a eforturilor. Spre exemplu, slăbirea unei plăci prin crearea unui gol central (tăierea unor armături în zona centrală) reduce capacitatea la încovoiere în această zonă, dar poate fi acceptabilă dacă există rezerve de capacitate în zona reazemelor. Pe de altă parte, din cauza continuității, realizarea unui gol mare poate perturba echilibrul structural al plăcii.

Pentru a stabili zona recomandată în care să se creeze un gol, structuristul ar trebui să dispună de planurile inițiale ale clădirii sau să cunoască în detaliu armarea plăcii, stabilită în urma unor încercări distructive sau nedistructive. Apoi, pe baza calculului trebuie stabilit care dintre ariile de armătură (armătura din câmp de la partea inferioară sau armătura de pe reazeme de la partea superioară) guvernează (stabilește) capacitatea limită a plăcii. În cazul în care cantitatea de armătură din câmp de la partea inferioară este insuficientă sau doar cu puțin mai mare decât aria de armătură necesară din calcule, este recomandat ca golurile să fie realizate în apropierea zonelor de reazem (ex Fig. 2.14. - gol 1). Similar, arii de armătură insuficiente la partea superioară în zona reazemelor, indică faptul că golurile ar trebui localizate în apropierea mijlocului câmpurilor (ex Fig. 2.14. - gol 2 și gol 3). În același timp, orientarea golului este extrem de importantă. Astfel, un gol cu latura lungă paralelă cu latura scurtă a ochiului în care este tăiat (ex Fig. 2.14. - gol 2), secționează mai puține bare de armătură decât un gol ce are latura lungă paralelă cu latura lungă a ochiului de placă (ex Fig. 2.14. - gol 3). Aceste recomandări sunt ilustrate în Fig. 2.14.

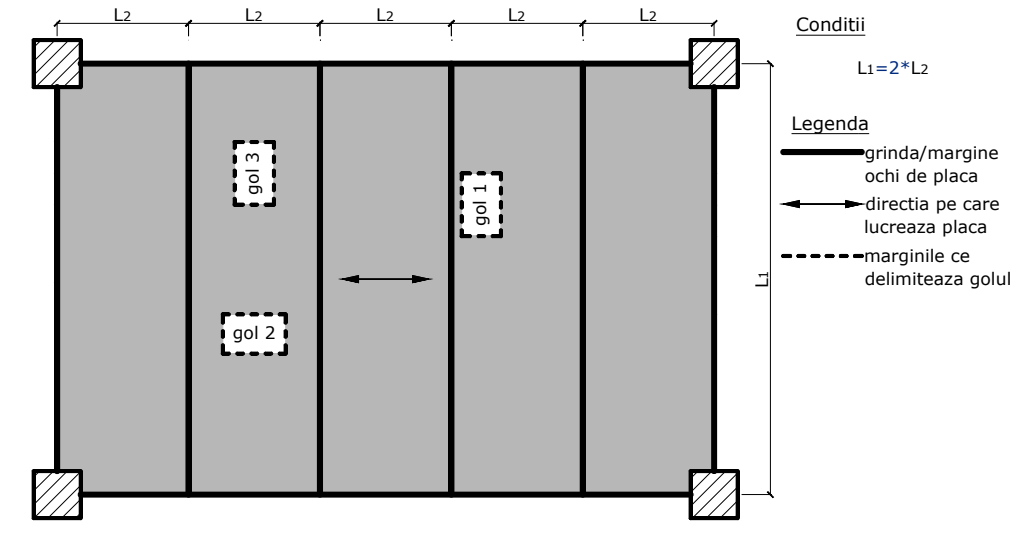


Fig. 2.14. - Goluri tăiate ulterior în plăci unidirecționale (cf. [017])

Bineînțeles că analiza capacității la încovoiere a diferitelor zone ale plăcii reprezintă doar primul pas spre stabilirea corectă a pozițiilor optime ale golurilor, existând o serie de alți factori la fel de importanți. Spre exemplu, capacitatea la tăiere a plăcii poate fi parametrul determinant. În același timp, există situații în care grinzile au fost calculate ca și grinzi T de beton armat sau grinzi compuse oțel-beton. În oricare dintre aceste situații, deși din punct de vedere al capacității plăcii, un gol creat în apropierea reazemelor ar putea reprezenta soluția optimă, capacitatea grinzii ar fi afectată.

În anumite situații se dorește crearea unui gol având dimensiunile maxime acceptate din punct de vedere practic, ceea ce ar presupune ca placa să se demolează pe toată suprafața unui ochi, între marginile elementelor de reazem. O astfel de abordare este de evitat, echilibrul structural al plăcii fiind degradat. Ochiurile de placă interioare din cadrul plăcilor cu mai multe deschideri se dimensionează, de regulă, astfel încât zonele de reazem să posede capacități mari la momente încovoietoare negative. Astfel, armăturile superioare de pe reazem sunt dimensionate din valori superioare de momente încovoietoare decât armăturile din inferioare din zonele de câmp. Dacă se taie barele superioare de armătură, acestea sunt evident scoase din lucru și contribuția lor este exclusă. Acest fenomen va conduce la o modificare a schemei statice și la o redistribuire a eforturilor către barele inferioare. Cu excepția situațiilor în care aceste bare au fost grosolan supradimensionate, armătura inferioară nu va avea capacitatea de a prelua eforturile suplimentare, necesitând intervenții de consolidare. În lipsa unor astfel de intervenții, deformațiile elementului ar fi cu siguranță excesive.

2.3.2. Goluri tăiate ulterior în plăci bidirecționale

Una din regulile general valabile la proiectarea unei plăci cu goluri este reprezentată de obligativitatea dispunerii în elementul cu gol, a întregii arii de armătură rezultată din calcul considerând panoul întreg, prin dispunerea în jurul golului a unor bare având ariile de armătură echivalente cu cea a barelor întrerupte. Această regulă stă la baza abordărilor privind soluțiile de consolidare cu materiale compozite polimerice. Există însă și situații în care nu se justifică intervenții asupra plăcii, aceasta dispunând de o rezervă de capacitate ce poate fi sacrificată sau se poate conta pe o redistribuire a eforturilor din jurul golului. Pentru a evita o analiză foarte laborioasă, există o serie de recomandări și reguli ce pot fi utilizate cel puțin într-o fază de evaluare preliminară a poziției optime a golului.

Pentru a ilustra aceste recomandări propuse de Newman A. [017] sau Mota s.a. [090] se împarte placa în trei tipuri de zone, notate cu cifrele arabe 1, 2 și 3. Pentru a obține aceste zone se poate apela la o abordare similară cu împărțirea plăcilor planșeelor dală în fâșii de reazem și de câmp, rezultând trei tipuri de intersecții între aceste fâșii. Modalitatea de stabilire a acestor trei tipuri de zone este ilustrată grafic în Fig. 2.15. pentru plăci rezemate pe grinzi de contur și în Fig. 2.16. pentru planșee dală. Numerotarea zonelor indică de fapt și ordinea de preferință pentru crearea golurilor, 1 - zona cea mai recomandată, 3 - zona cea mai puțin recomandată.

Pentru plăci rezemate pe grinzi de contur, în zona de intersecția a fâșiilor de reazem (zone de tip 1), se pot crea goluri cu dimensiuni de până la un sfert din deschidere, bineînțeles, lăsând grinzile intacte. Aceste zone de colț lucrează preponderent la tăiere, care, de regulă, nu reprezintă o problemă din punct de vedere al capacității unor astfel de elemente. În zonele de tip 2, rezultate prin intersecția unei fâșii de reazem cu o fâșie de câmp, este mai puțin oportună crearea de goluri decât în zonele de tip 1, fiind obligatorie o verificare a proiectării grinzilor pentru a se stabili dacă acestea au fost sau nu proiectate ca grinzi T sau grinzi compuse oțel-beton. Zona rezultată prin intersecția a două fâșii centrale (zona de tip 3) este cea mai puțin convenabilă pentru crearea de goluri, dar și în această zonă, conform recomandărilor lui Newman, goluri pătrate ale căror dimensiuni nu depășesc o optime din deschidere, se pot crea, de regulă fără nici un fel de consolidare. Pentru goluri ale căror dimensiuni depășesc aceste limitări sunt necesare analize suplimentare.

Bineînțeles că și în cazul plăcilor bidirecționale rezemate pe grinzi de contur este de preferat să nu se creeze un gol mare cât întreg ochiul de placă, fiind necesară păstrarea unei anumite lățimi de placă pe tot conturul, pentru a permite ancorarea armăturilor superioare din ochiurile de placă adiacente. În același timp, în cazul înlăturării unui întreg ochi de placă, grinzile adiacente vor fi supuse unei solicitări de torsiune ce nu a fost evaluată inițial. În cazul în care este obligatorie eliminarea unui întreg ochi de placă, grinzile și ochiurile de placă adiacente necesită, de regulă, aplicarea unor soluții de consolidare.

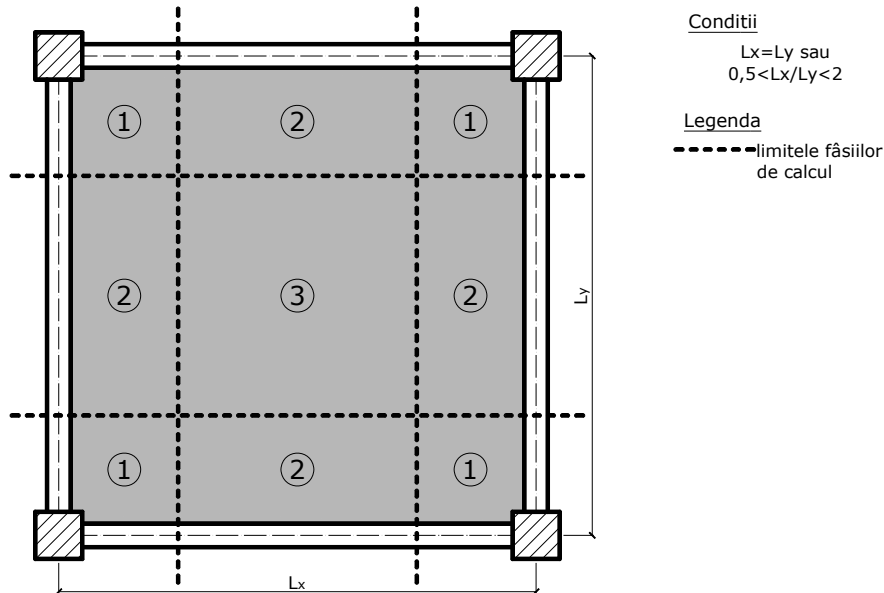


Fig. 2.15. - Tipuri de zone în ordinea preferinței creării golurilor în plăci bidirecționale rezemate pe grinzi de contur (cf. [017])

Pentru plăcile planșeelor dală, situația se inversează, detalierea acestor tipuri de plăci fiind guvernată, de regulă, de capacitatea la străpungere a plăcii în jurul stâlpilor. Din acest motiv, nici un gol cu dimensiuni mai mari de aproximativ 300 mm nu ar trebui să fie tăiat în zonele rezultate la intersecția fâșiilor de reazem (zone de tip 3). Zonele de tip 2, rezultate la intersecția unei fâșii de câmp cu o fâșie de reazem, sunt mai potrivite pentru crearea de goluri. În aceste zone, goluri cu dimensiuni mai mici de 15% din deschidere se pot crea fără a necesita intervenții de consolidare. Cea mai recomandată zonă pentru crearea de goluri este cea de la intersecția fâșiilor de câmp (zona de tip 1). Conform unor specialiști, [017] această zonă poate fi îndepărtată în întregime, fără a genera efecte defavorabile, deoarece doar ar reduce încărcarea pe și din planșeu.

Pentru goluri având dimensiuni mai mari decât cele prescrise mai sus, este necesară efectuarea unor analize numerice pe baza cărora să se stabilească necesitatea intervențiilor de reabilitare/consolidare.

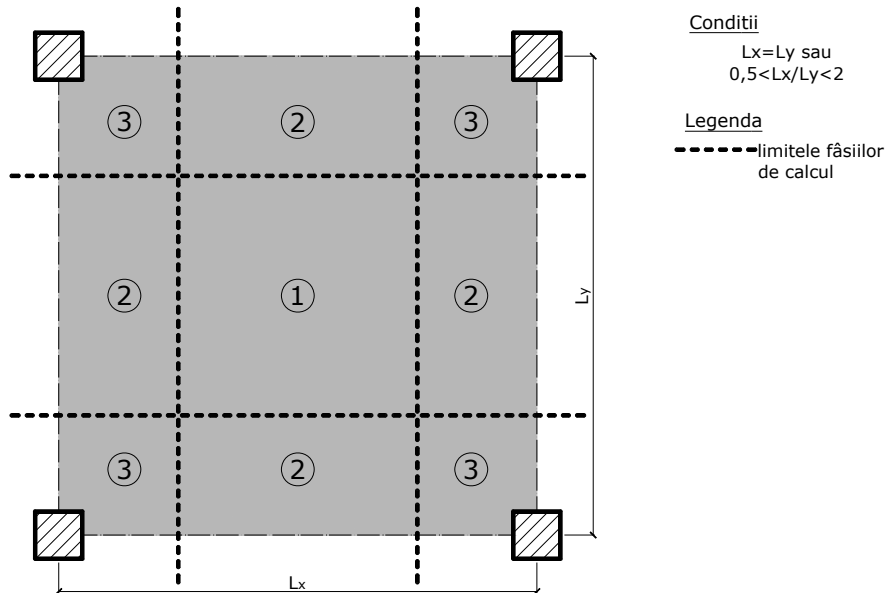


Fig. 2.16. - Tipuri de zone în ordinea preferinței creării golurilor în plăci bidirecționale ale planșeelor dală (cf. [017])

În cazul în care golurile sunt prea mari și/sau în locuri nepotrivite zonele de margine a acestora trebuie consolidate. Analizând prescripțiile prezentate anterior precum și caracteristicile elementelor experimentale din cadrul prezentei teze de doctorat (Cap. 6) este limpede că acestea nu satisfac limitările impuse, fiind evidentă necesitatea intervențiilor de reabilitare.

2.4. Soluții clasice de reabilitare/consolidare a planșeelor de beton armat

Lucrările de reabilitare/consolidare a unui element sau structuri din beton sau beton armat implică, de regulă, îmbinarea utilizării materialelor tradiționale cu materiale și tehnologii moderne. Contrar opiniei valabile în general în industria construcțiilor, lucrările de reabilitare sunt mult mai complexe și mai laborioase decât lucrările de execuție a unei construcții noi, atât din punct de vedere al calculului și al detalierei, cât și din punct de vedere al execuției. Dificultățile apar de regulă din necunoașterea în detaliu a caracteristicilor elementelor structurale existente, precum calitatea materialelor, cantitatea, traseul și tipul armăturilor, efortul în armăturile pretensionate, etc. O altă caracteristică de maximă importanță este reprezentată de modalitatea de distribuire a eforturilor între elementul existent și elementele sistemului de consolidare. Aceasta trebuie evaluată corespunzător, calculul, detalierea și execuția sistemului de consolidare fiind în concordanță cu starea fizică reală a elementelor.

Deși până în acest punct al tezei cât și în viitoarele capitole, termenii de „reabilitare” și „consolidare” apar în unele situații laolaltă pentru a exprima natura

sau necesitatea aplicării unor intervenții asupra elementelor structurale sau nestructurale, termenii prezintă înțelesuri diferite, prin prisma scopului inițial al intervențiilor. Astfel, termenul de „reabilitare” se referă de regulă la lucrări executate asupra unor elemente cu scopul de a reface capacitatea inițială a acestora, capacitate redusă din diverse cauze. Necesitatea reabilitării este justificată în principal de degradări petrecute în timp (cauzate de expunerea elementelor la anumite condiții ambientale nefavorabile, săruri pentru dezghețare, alte chimicale) ori degradări petrecute în urma unor evenimente accidentale. Termenul de „consolidare” se referă de regulă la lucrări executate asupra unor elemente cu scopul de a spori capacitatea inițială a acestora. În general, lucrările de consolidare devin necesare din cauza modificărilor codurilor de proiectare sau a schimbărilor funcționale ce duc la încărcări sporite, pentru îmbunătățirea comportamentului sub efectul acțiunilor seismice sau pentru a înlătura deficiențe rezultate dintr-o proiectare sau execuție defectuoasă. Bineînțeles că cei doi termeni nu sunt nici pe departe antagonici și nu se exclud reciproc, ci mai degrabă se întrepătrund. Spre exemplu, de cele mai multe ori, lucrările de reabilitare duc la o sporire a capacității elementelor reabilitate și nu doar la simpla refacere a acestora. În același timp, soluțiile și procedeele tehnice și tehnologice aplicate pentru a reabilita un element sunt identice cu cele aplicate pentru a consolida același element, existând diferențe, ce rezidă spre exemplu în cantități.

În general, ținând cont de scopul lucrărilor de reabilitare, intervențiile sunt locale, pentru a elimina efectele de fisurare, coroziune a armăturii, exfoliere a unor straturi de beton, acestea reprezentând efectele nefavorabile cel mai des întâlnite în cazul elementelor de beton armat. În cazul în care aceste efecte sunt substanțiale, se pot aplica unele dintre soluțiile de consolidare prezentate mai jos.

În încercarea de a consolida unul sau mai multe elemente ale unei structuri, sau chiar întreaga structură în ansamblu, se poate opta pentru o serie de soluții clasice precum: diminuarea deschiderilor, lipirea unor elemente metalice, utilizarea unor sisteme externe sau interne de post-tensionare, mărirea dimensiunilor secțiunilor transversale, sau o combinație a acestor metode. Indiferent de opțiunea făcută, sistemul de consolidare trebuie să fie eficient, comportându-se într-o manieră compozită cu elementul existent consolidat și preluând fracțiunea convenită din eforturile totale.

Diminuarea deschiderilor se realizează prin instalarea unor noi reazeme intermediare pentru elementul consolidat. Reazemele pot fi realizate în diverse configurații și materiale, cele mai uzuale fiind realizate din beton armat sau oțel. Îmbinările reazemelor noi cu elementele consolidate trebuie să fie compatibile cu solicitările ce acționează asupra acestora.

Neajunsurile acestei soluții pot fi reprezentate de o pierdere semnificativă de spațiu și o micșorare a înălțimii utile.

Un exemplu al acestei soluții de consolidare este prezentat de Alkhrdaji și Thomas, fiind reprodus în Fig. 2.17. extrasă din [045]. Ansamblul metalic structural a fost instalat într-un garaj pentru a scurta deschiderile și pentru a transfera, prin intermediul său, o parte din încărcări către elementele structurale verticale existente.



Fig. 2.17. - Instalarea unui ansamblu structural metalic pentru scurtarea deschiderilor unui planșeu într-un garaj (cf. [045])

Lipirea unor elemente metalice a fost dezvoltată în Elveția și Germania în anii 1960, fiind practic precursora metodei de consolidare cu materiale compozite polimerice. Metoda presupune lipirea pe elementul de beton ce se consolidează a unor elemente de oțel prin intermediul unor compuși epoxidici. Elementele de oțel pot fi platbenzi sau chiar profile L sau U. Fiind de regulă lipite pe laturile inferioare sau laterale ale elementului de consolidat, se reușește sporirea capacității la încovoiere și/sau tăiere.

O alternativă la lipirea cu rășini epoxidice este reprezentată de utilizarea unor ancoraje mecanice. Dezavantajul acestei soluții derivă din necesitatea unei întrețineri continue a elementelor de oțel prin protecții anticorozive.

Una dintre primele aplicații practice ale acestei soluții a fost efectuată în 1975 prin consolidarea a patru poduri din cadrul autostrăzii M5, soluția dovedindu-și eficiența, cu toate că a fost extrem de laborioasă [021]. Un alt exemplu al acestei soluții de consolidare este prezentat de Alkhrdaji și Thomas, fiind reprodus în Fig. 2.18. extrasă din [045]. Ansamblul metalic a fost ancorat mecanic pe un planșeu din fâșii precomprimate cu goluri pentru a consolida zona adiacentă unor deschideri create cu scopul de a introduce un luminator.



Fig. 2.18. - Instalarea unui ansamblu structural metalic ancorat mecanic (cf. [045])

Tehnica de utilizare a unor sisteme externe de post-tensionare este utilizată cu succes pentru sporirea capacității la încovoiere și tăiere a elementelor de beton armat și precomprimat încă din anii 1950. Tehnica s-a dovedit eficientă și economică, fiind aplicată cu succes pentru a reduce deformațiile și fisurile din grinzi, plăci, elemente în consolă. Tendoanele post-tensionate sunt conectate de elementul structural prin intermediul unor ancore situate de regulă la extremitățile elementelor, existând în multe cazuri și deflectoare. În Fig. 2.19. este schematizată varianta de consolidare prin utilizarea sistemelor externe de post-tensionare aplicată unui pod din zona orașului Washington. Podul a fost puternic degradat în urma unui accident rutier.

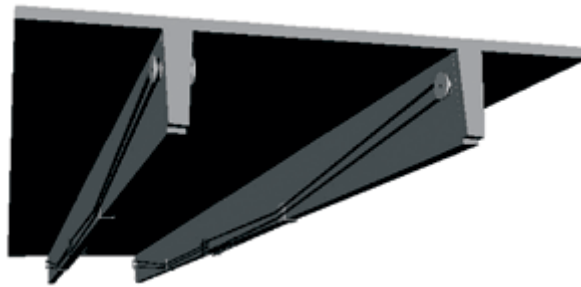


Fig. 2.19. - Schematizarea soluției de consolidare prin post-tensionare aplicată nervurilor unui pod de beton armat din zona orașului Washington (cf. [045])

În Fig. 2.20. este prezentată soluția de consolidare prin post-tensionare a planșei de beton armat a unui garaj multi-etajat. Lucrările au fost realizate de VSL CONSTRUCTION SYSTEMS [112]. În Fig. 2.21. este prezentată o secvență din procedeul de consolidare prin post-tensionare a plăcilor de beton armat [112].



Fig. 2.20. - Soluția de consolidare prin post-tensionare a planșeului de beton armat a unui garaj multi-etajat (cf. [112])



Fig. 2.21. - Secvență din procedeele de consolidare prin post-tensionare a plăcilor de beton armat (cf. [112])

Mărirea dimensiunilor secțiunilor transversale presupune dispunerea de straturi adiționale de beton armat sub forma unor straturi de acoperire sau a unor cămășuieli, straturi ce conlucrează cu betonul existent. Prin acest procedeu se pot consolida stâlpi, pereți, grinzi și plăci, obținându-se, de la caz la caz, creșteri ale capacităților portante la diverse solicitări precum și sporiri ale rigidității elementelor. O atenție deosebită trebuie acordată conlucrării dintre materialele elementului existent și a straturilor de consolidare. Grosimile uzuale ale straturilor cămășuielilor și suprabetonărilor variază între aproximativ 50...80 mm pentru plăci și 70...120 mm pentru grinzi și stâlpi.

Un exemplu al acestei metode este prezentat în Fig. 2.22., în imagine observându-se soluția de consolidare a unei grinzi principale pentru a spori capacitatea acesteia la încovoiere și tăiere. [112]



Fig. 2.22. - Secvență din procedeeul de consolidare prin Mărirea dimensiunilor secțiunilor transversale (cf. [112])

Relativ recent s-a dezvoltat o tehnică nouă, bazată pe utilizarea materialelor compozite polimerice, înlocuind însă elementele din FRP cu polimeri armați cu oțel (SRP). Aceștia din urmă reprezintă o familie de materiale realizate din fire de oțel de ultra-înaltă rezistență, răsucite împreună pentru a forma corzi. Acesta sunt înglobate într-o matrice, dând naștere unor elemente relativ similare cu elementele din FRP. [050].

Aceste tehnici de consolidare menționate mai sus, deși valabile în cazul planșelor, nu se referă strict la soluții de consolidare a planșelor sau a elementelor acestora, fiind tehnici aplicabile pentru a varietate largă de elemente structurale de beton armat. Fiecare tehnică în parte prezintă avantaje și dezavantaje, atât din punct de vedere al unei comparații între ele cât și comparativ cu soluțiile de consolidare pe bază de materiale compozite polimerice. Optarea pentru una din aceste tehnici sau pentru o tehnică mai nouă utilizând FRP (Polimeri Armați cu Fibre) sau poate chiar SRP (Polimeri Armați cu Oțel) cade în principal în sarcina proiectantului, acesta trebuind să stabilească oportunitatea unei soluții sau a alteia.

Pentru consolidarea unor planșee în care se creează goluri tăiate ulterior, abordarea uzuală presupune bordarea golului cu o serie de grinzi metalice sau de beton armat, această soluție încadrându-se în categoria de intervenții ce diminuează deschiderile, modificând în același timp sistemul structural.

Cu toate că în foarte multe cazuri se consideră că problema generată de tăierea unor goluri în plăci este rezolvată printr-o consolidare locală, acest lucru nu este valabil întotdeauna. Consolidările locale sunt de regulă dimensionate doar pe baza încărcărilor verticale generate de acțiunile permanente și variabile. În multe situații, crearea unor goluri în plăcile planșelor poate conduce la o transformare defavorabilă a comportării de ansamblu a întregii structuri și nu doar a plăcii (ex: reducerea sau pierderea totală a efectelor generate de continuitatea plăcii, modificarea componentei de efort axial în elementele structurii verticale de rezistență, alterarea locală sau la nivel global a rolului de saibă rigidă a plăcii

planșeului, schimbarea frecvenței proprii de vibrație a întregii structuri, etc.). Chiar dacă unele dintre efectele enumerate mai sus pot fi evitate printr-o abordare corectă a intervențiilor ce urmează a fi efectuate, iar altele sunt destul de rare (apar doar în cazul tăierii unui număr ridicat de goluri mari în întreaga structură), problema trebuie tratată cu foarte mare atenție, studiindu-se comportarea întregii structuri atunci când este cazul.

3. MATERIALE COMPOZITE POLIMERICE ȘI APLICAȚIILE LOR ÎN CONSTRUCȚII

3.1. Compozite polimerice - componente și caracteristici

Termenul de material compozit definește orice material alcătuit din două sau mai multe materiale diferite, având interfețe identificabile între ele. Materialele compozite polimerice sunt alcătuite din o matrice de material polimeric armată cu fibre. De aici provine și denumirea din engleză: fiber reinforced polymer (FRP), într-o traducere mot-a-mot însemnând „polimer armat cu fibre”. Fibrele utilizate la alcătuirea materialelor compozite polimerice sunt de regulă fibre de carbon sau de sticlă, iar matricele în care sunt înglobate, de regulă sunt matrice poliesterice, epoxidice sau vinilesterice.

Materialele compozite polimerice nu mai reprezintă materiale ale viitorului ci, fără îndoială, materiale ale prezentului, utilizarea lor în construcții începând la o scară crescândă încă din anii 1980. Astfel, la nivel mondial există deja o serie de lucrări de referință ce tratează în detaliu toate procedeele și procesele de fabricație, proprietățile fizice și mecanice ale materialelor constituente, diferitele tipuri de forme și elemente sub care se prezintă, etc. Din acest motiv, prezenta lucrare nu va insista în detaliu asupra tuturor acestor caracteristici, punctând însă parametrii esențiali ai materialelor compozite polimerice, cu scopul de a prezenta un set minim de cunoștințe generale, necesare înțelegerii comprehensive a comportării atât a materialelor în sine, precum și a elementelor structurale la alcătuirea cărora se întrebuițează.

Bineînțeles că domeniul nu este nici pe departe epuizat, existând în continuare o serie de necunoscute, cercetările evoluând pe diverse linii de interes, în încercarea de limpezire a tuturor neclarităților. Toate aceste noi cercetări aduc tot mai multe informații, domeniul fiind într-o expansiune și transformare continuă.

3.1.1. Fibre utilizate la producerea compozitelor

Fibra reprezintă una dintre cele două componente ale materialelor compozite polimerice. Fibrele se obțin în urma unor procese tehnologice complexe, fiind alcătuite din un număr foarte mare de subcomponente denumite unități de bază. Aceste unități de bază sunt elemente de nivel molecular sau submolecular. Unitățile de bază utilizate la alcătuirea fibrelor prezintă proprietăți mecanice diferite pe fiecare direcție. Prin alinierea în cadrul unui proces tehnologic a unităților de bază după direcția de rezistență și rigiditate maximă, se obțin fibrele sub forma unor fire lungi. Dimensiunile secțiunilor transversale ale fibrelor sunt de ordinul micronilor, variind de regulă, între 3 și 20 μm . Dacă mai multe fibre (ordinul a sute de mii de fibre) sunt grupate, se obține un câlț.

În funcție de raportul lungime/diametru, fibrele pot fi de două tipuri: fibre continue, la care raportul lungime/diametru ia valori mai mari decât 1000 și fibre discontinue, la care raportul lungime/diametru ia valori mai mici decât 1000. Fibrele discontinue se pot clasifica la rândul lor în fibre lungi, scurte și foarte scurte. Cele

trei tipuri importante de fibre care se utilizează la realizarea materialelor compozite polimerice sunt: fibre pe bază de carbon sau grafit, fibre pe bază de sticlă și fibre din aramidă.

În cadrul procesului tehnologic de fabricare a fibrelor de bază de carbon, se utilizează un așa-numit precursor. Cel mai des se utilizează fibre precursori din gudron și din poli-acrilo-nitril (PAN). Fibrele din gudron se obțin prin stabilizarea la căldură a petrolului rafinat ce trece printr-un orificiu foarte mic. Fibrele PAN sunt realizate din poli-acrilo-nitril carbonizat prin ardere. Diametrul fibrelor obținute din gudron variază între 9 și 18 μm , iar cel al fibrelor PAN între 5 și 8 μm .

Fibrele continue pe bază de sticlă sunt clasificate conform buletinului nr. 14 al „fib” [037] (Fédération internationale du béton - federația internațională de beton) în trei categorii: fibre de sticlă de tip E, de tip S și de tip AR. Tipul E (sticlă Electrică) este cea mai utilizată în aplicațiile generale cu compozite. Conține cantități mari de acid boric și aluminat, prezentând dezavantajul unei rezistențe reduse la acțiunea alcalilor. Fibrele de tipul S (sticlă Structurală) prezintă rezistență și rigiditate sporită în comparație cu cele de tipul E, însă nu dețin capacitate de rezistență la acțiunea alcalilor. Fibrele de tip AR (Alcali Resistant) se obțin prin adăugarea unor cantități considerabile de zirconiu, și prezintă proprietăți mecanice similare cu fibrele de tipul E, dobândind însă și rezistență la acțiunea alcalilor. Un aspect important al fibrelor pe bază de sticlă îl reprezintă costul redus al acestora în comparație cu fibrele pe bază de carbon.

Fibrele de aramidă (polimerice) au fost introduse încă din 1971. Ele pot atinge valori ale rezistențelor și rigidităților foarte ridicate, prin alinierea legăturilor polimerului de-a lungul axei fibrei, rezultând o structură puternic anizotropă. Diametrul fibrelor este de aproximativ 12 μm . Fibrele de aramidă se comportă elastic la întindere, dar când sunt supuse la compresiune, prezintă o comportare neliniară și ductilă. În același timp, aceste fibre prezintă duritate și rezistență la oboseală bună. Probabil cel mai cunoscut tip de fibră polimerică este Kevlar-ul.

O caracteristică generală a tuturor fibrelor utilizate la producerea materialelor compozite polimerice, o reprezintă comportarea liniar-elastică a acestora până la cedare, fără paliere de curgere. O serie de proprietăți ale fibrelor sunt prezentate în tabelul 3.1.

Tabel 3.1. - Caracteristici generale ale fibrelor

| Proprietăți | Tipul de fibre | | |
|---|-----------------|-----------------|------------------|
| | Fibre de carbon | Fibre de sticlă | Fibre de aramidă |
| Diametru [μm] | 6,5 - 11 | 8 - 14 | 12 - 38 |
| Densitate [kg/m^3] | 1530 - 2020 | 2490 - 2700 | 970 - 1479 |
| Modul de elasticitate [N/mm^2] | 41000 - 517000 | 68900 - 85500 | 62000 - 131000 |
| Rezistență la întindere [N/mm^2] | 620 - 2930 | 3160 - 4590 | 2580 - 3792 |
| Alungire la rupere [%] | 0,3 - 2,5 | 1,8 - 5,7 | 2,2 - 5 |

3.1.2. Matrice polimerice

Matricele utilizate la realizarea materialelor compozite polimerice se pot încadra în două categorii generale: matrice termorigide și matrice termoplaste. Prima categorie este cea mai utilizată în prezent la aplicațiile structurale.

Matricele polimerice termorigide sunt materiale cu temperatură de topire joasă, care în procesul de întărire își formează legături covalente între lanțuri. Aceste legături sunt ireversibile, întărirea putându-se realiza fie prin încălzire și presare, fie prin adăugarea unor agenți de întărire. Legăturile covalente formate reduc posibilitatea de deplasare a lanțurilor polimerice, crescând astfel temperatura de tranziție sticloasă până la valori mai mari decât temperatura ambiantă. În consecință, matricele sunt rigide și fragile la această temperatură, neputându-și modifica forma prin încălzire, ci se degradează [024]. De cele mai multe ori, rășinile polimerice sunt utilizate în stare lichidă cu vâscozitate mică, putându-se astfel realiza o impregnare corespunzătoare a fibrelor, fără a se recurge la temperaturi și presiuni ridicate. Principalele tipuri de matrice termorigide utilizate la producerea compozitelor sunt matricele poliesterice, epoxidice, vinilesterice, fenolice și poliamidice. Câteva proprietăți generale sunt prezentate în tabelul 3.2.

Tabel 3.2. - Caracteristici generale ale matricelor termorigide

| Proprietăți | Tipul de matrice termorigidă | | | | |
|---|------------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| | Poliester | Vinilester | Epoxidică | Bismaldehid | Poliimid |
| Densitate [kg/m ³] | 1100 - 1500 | 1150 | 1100 - 1400 | 1320 | 1430 - 1890 |
| Modul de elasticitate [N/mm ²] | 1,2 - 4,5 | 3 - 4 | 2 - 6 | 3,6 | 3,1 - 4,9 |
| Rezistență la întindere [N/mm ²] | 40 - 90 | 65 - 90 | 35 - 130 | 48 - 78 | 70 - 120 |
| Rezistență la compresiune [N/mm ²] | 90 - 250 | 127 | 100 - 200 | 200 | - |
| Alungirea la rupere [%] | 2 - 5 | 1 - 5 | 1 - 8,5 | 1 - 6,6 | 1,5 - 3 |
| Temperatura de tranziție sticloasă [°C] | 50 - 110 | 100 - 150 | 50 - 250 | 250 - 300 | 280 - 320 |

Matricele termoplaste reprezintă materiale ce prin încălzire la temperaturi ridicate devin moi, permițând modelarea și turnarea lor în forme. În momentul la care revin la temperatura ambiantă, ele devin rigide. Dezavantajul major al matricelor termoplaste este reprezentat de vâscozitatea ridicată a acestora, îngreunând astfel combinarea lor cu fibre continue. Principalele matrice termoplaste sunt: poliamidele (PA), policarbonații (PC), polietersulfonele (PES),

polietereterchtona (PEEK), polieterchetona (PEK), polipropilen (PP) și polipropilensulfura (PPS) [024].

Tabel 3.3. - Caracteristici generale ale matricelor termoplaste

| Proprietăți | Tipul de matrice termorigidă | | | | | |
|--|------------------------------|-----------|----------|----------|-----------|---------|
| | PA | PC | PES | PEEK | PP | PPS |
| Densitate [kg/m ³] | 1400 | 1150 | 1240 | 1320 | 900 | 1340 |
| Modul de elasticitate [N/mm ²] | 5 | 2,2 - 2,4 | 2,5 | - | 1,0 - 1,4 | 3,3 |
| Rezistență la întindere [N/mm ²] | 95 - 185 | 45 - 70 | 70 - 75 | 92 - 100 | 25 - 38 | 70 - 75 |
| Rezistență la compresiune [N/mm ²] | 276 | 80 | - | - | - | 110 |
| Alungirea la rupere [%] | 12 - 18 | 50 - 80 | 50 - 100 | 150 | 300 | 3 |
| Temperatura de tranziție sticloasă [°C] | 243 - 275 | 130 | 190 | 143 | -2 - -5 | 85 |

Rolul principal al matricelor este acela de a îngloba fibrele și de a transfera eforturile către și între fibre. În același timp ele protejează fibrele, reprezentând o barieră între fibre și mediu exterior împotriva umezelii și a atacurilor chimice sau de oxidare. Matricea deține un rol important în ceea ce privește rezistențele la tăiere, întindere transversală și compresiune ale compozitului, guvernând în același timp performanțele termo-mecanice ale compozitului.

3.1.3. Materiale FRP

Materialele FRP sunt alcătuite dintr-un număr foarte mare de fibre nonmetalice continue, ordonate orientate, de dimensiuni de ordinul micronilor, înglobate într-o matrice de rășină. În funcție de tipul de fibre constituente (definite la pct. 3.1.1.), materialele sunt denumite AFRP (pentru fibre de aramidă), CFRP (pentru fibre de carbon) și GFRP (pentru fibre pe bază de sticlă). De regulă, procentul de fibre din ansamblul materialului FRP variază între 50-70% pentru lamele (benzi), și între 25-35% pentru țesături. Fibrele reprezintă componenta ce preia eforturile, în timp ce matricea are rolul de a transfera și distribui eforturile între fibre, precum și de a le proteja pe acestea.

Proprietățile de bază ale materialelor FRP pot fi estimate dacă se cunosc proprietățile fibrelor și matricei constituente, precum și ponderea acestora în masa materialului FRP. La aceste proprietăți se poate ajunge aplicând formule extrem de

simple, precum legea amestecurilor recomandată de buletinul nr. 14 al „fib”, formule ce exprimă de fapt caracteristica materialului FRP ca pe o medie ponderată între proprietățile fibrelor și ale matricelor:

$$E_f = E_{fib} \cdot V_{fib} + E_m \cdot V_m \quad (3.1.)$$

$$f_f \approx f_{fib} \cdot V_{fib} + f_m \cdot V_m \quad (3.2.)$$

unde:

- E_f - modulul de elasticitate al materialului FRP în direcția fibrelor
- E_{fib} - modulul de elasticitate al fibrelor
- E_m - modulul de elasticitate al matricei
- V_{fib} - ponderea volumului de fibre în volumul materialului FRP
- V_m - ponderea volumului matricei în volumul materialului FRP
- f_f - rezistența la întindere a materialului FRP în direcția fibrelor
- f_{fib} - rezistența la întindere a fibrelor
- f_m - rezistența la întindere a matricei

Aceste formule reprezintă însă o aproximare a comportării materialelor, proprietățile reale putând fi determinate prin încercări de laborator. Producătorii, de regulă, pun la dispoziția clienților caracteristicile de ansamblu ale materialului FRP pe baza testelor de laborator, ținând astfel cont și de o serie de aspecte micro-structurale, precum diametrul, distribuția și paralelismul fibrelor, defecte locale sau caracteristici de conlucrare superficială fibre-matrice.

O comparație la nivel calitativ între caracteristicile fâșiilor alcătuite pe bază de fibre de carbon, sticlă și aramidă, oferită de Meier și Winistorfer, este prezentată în tabelul 3.4. [027]. O astfel de comparație oferă asistență în alegerea materialelor optime ce ar trebui utilizate, în funcție de aplicația structurală la care sunt folosite.

Tabel 3.4. - Comparație între materiale FRP pe bază de fibre de carbon, sticlă și aramidă

| Criteriu | Tipul de fibre din care sunt realizate fâșiile de FRP | | |
|----------------------------------|---|-----------------|------------------|
| | Fibre de sticlă E | Fibre de carbon | Fibre de aramidă |
| Rezistență de întindere | Foarte bună | Foarte bună | Foarte bună |
| Rezistență la compresiune | Bună | Foarte bună | Nedecvată |
| Modul de elasticitate | Adecat | Foarte bun | Bun |
| Comportare în timp | Adecată | Foarte bună | Bună |
| Comportare la oboseală | Adecată | Excelentă | Bună |
| Densitatea | Adecată | Bună | Excelentă |
| Rezistență la acțiunea alcalilor | Nedecvată | Foarte bună | Bună |
| Preț | Foarte bun | Adecat | Adecat |

3.1.4. Proprietățile materialelor FRP

3.1.4.1. Proprietăți fizice [024]

Densitatea materialelor FRP variază între valorile 1,20...2,10 g/cm³, fiind de 4 până la 6 ori mai mică decât a oțelului. Această densitate redusă, raportată la rezistențele materialelor compozite, va conduce la o greutate mai mică a elementelor de consolidare, reprezentând un avantaj semnificativ din punct de vedere al costurilor de manipulare și de transport, precum și la încărcări mai reduse în structuri.

Tabel 3.5. - Comparatie între densitățile materialelor FRP și cea a oțelului

| Densitate [g/cm ³] | | | |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Oțel | CFRP | GFRP | AFRP |
| 7,85 | 1,5...1,6 | 1,2...2,1 | 1,2...1,5 |

Coeficientul de dilatare termică a materialelor compozite polimerice unidirecționale este diferit pe cele două direcții (longitudinală și transversală), valoarea acestuia depinzând de tipul fibrei și a rășinii precum și de fracțiunea volumetrică a acestora.

Tabel 3.6. - Comparatie între coeficienții de dilatare termică a materialelor FRP și a oțelului și betonului

| Coeficientul de dilatare termică [10 ⁻⁶ / °C] | | | | | |
|--|---------|---------|---------|--------|------|
| Direcție | CFRP | GFRP | AFRP | Beton | Oțel |
| Longitudinal | -1...0 | 6...10 | -6...-2 | 7...11 | 11,7 |
| Transversal | 22...50 | 19...23 | 60...80 | | |

3.1.4.2. Proprietăți mecanice

Deoarece materialele FRP se utilizează în industria construcțiilor în special la consolidări pentru a adăuga elemente ce preiau eforturi unitare de întindere, proprietățile mecanice ce definesc comportarea la acest tip de solicitare sunt cele mai importante. Compozitele alcătuite dintr-un singur tip de fibre, sunt definite, pentru solicitarea de întindere, de o comportare liniar-elastică până în momentul ruperii, fără a prezenta nici un fel de deformații plastice. Proprietățile mecanice ale materialelor FRP sunt dependente de o serie de factori, cei mai importanți fiind tipul fibrelor precum și orientarea și cantitatea acestora. Proprietățile unor laminate cu conținut de fibre de 40...60% sunt prezentate în tabelul 3.7. Valorile 0, 0/90 și +45/-45 reprezintă orientarea fibrelor (0 - fibre unidirecționale, 0/90 și +45/-45 fibre dispuse pe două direcții ortogonale). Stabilirea proprietăților mecanice cade în sarcina producătorului, acesta fiind obligat să specifice rezistența ultimă la întindere

și alungirea specifică ultimă (la rupere) pentru toate produsele pe care le comercializează.

Tabel 3.7. - Proprietăți de comportare la întindere a unor laminate

| Tipul de fibră și orientarea fibrelor | Modul de elasticitate | | Rezistența ultimă la întindere | | Alungirea la rupere la 0° |
|---|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|----------------------|---------------------------|
| | Proprietatea la 0° | Proprietatea la 90° | Proprietatea la 0° | Proprietatea la 90° | |
| | [10 ³ N/mm ²] | [10 ³ N/mm ²] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [%] |
| Carbon de mare rezistență 0 0/90 +45/-45 | 100...145 | 2...7 | 1025...2075 | 35...75 | 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 |
| Sticlă E 0 0/90 +45/-45 | 20...40 | 2...7 | 525...1400 | 35...75 | 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 mare performanță 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 |

O comparație între comportarea oțelului moale și cea a diferitelor materiale CFRP, GFRP și AFRP este prezentată de buletinul nr. 14 al „fib” [037] sub forma graficului din Fig. 3.1. iar în buletinul nr. 35 al „fib” [038] sub forma graficului din Fig. 3.2.

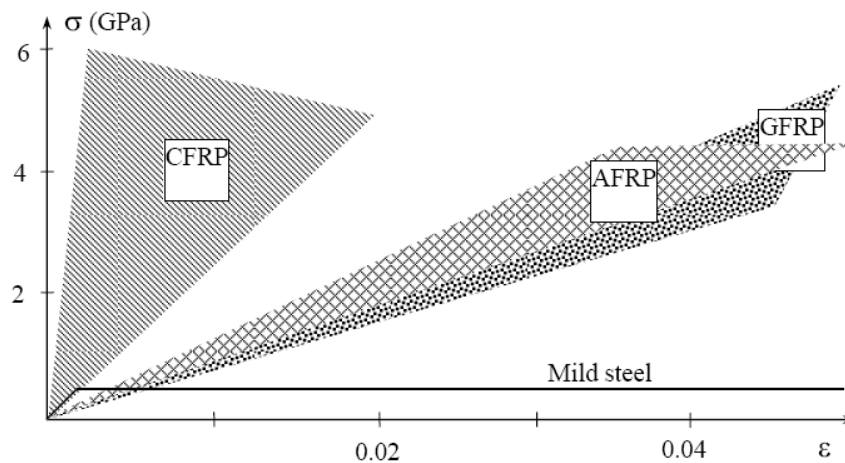


Fig. 3.1. - Comportarea oțelului moale și a anumitor tipuri de materiale CFRP, GFRP și AFRP cf buletinul nr. 14 al „fib” [037]

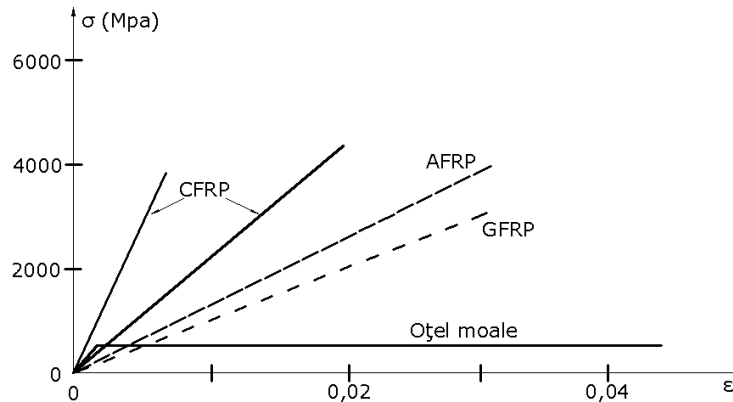


Fig. 3.2. - Comportarea oțelului moale și a anumitor tipuri de materiale CFRP, GFRP și AFRP cf buletinul nr. 35 al „fib” (cf. [038])

Cedarea la compresiune a materialelor compozite se produce fie datorită eforturilor transversale, fie datorită microflambajului fibrelor. Valorile proprietăților mecanice ale materialelor compozite solicitate la compresiune sunt date în literatură ca fracțiuni din valorile înregistrate la întindere ale respectivelor materiale. Astfel, rezistența la compresiune reprezintă 78% pentru CFRP, 55% pentru GFRP și 20% pentru AFRP din rezistența la întindere, iar modulul de elasticitate la compresiune reprezintă aproximativ 85% pentru CFRP, 80% pentru GFRP și 100% pentru AFRP din modulul de elasticitate la întindere.

3.1.4.3. Efectele variației temperaturii și comportarea la acțiunea focului

Coeficientul de dilatare termică a materialelor FRP realizate din fibre unidirecționale este influențat de o serie de factori precum tipul de fibră și de rășină precum și de procentul de fibre. Aceste materiale pot avea proprietăți de expansiune termică diferite de cele ale betonului. Fibrele de carbon au un coeficient de dilatare termică aproape de zero în timp ce acela al fibrelor de sticlă este similar cu cel al betonului. Polimerii utilizați în sisteme de consolidări cu FRP de obicei au coeficienții de dilatare termică mai mari de aproximativ cinci ori decât cei ai betonului.

Calculul deformațiilor specifice produse de efectul variației de temperatură este laborios, variind în funcție de orientarea fibrelor, procentul de fibre, grosimea stratului de adeziv. Pe baza experienței, în urma cercetărilor lui Motavalli, Soudki, Green ș.a. se poate afirma că deformațiile datorate diferențelor dintre proprietățile de expansiune termică nu afectează capacitatea de adezivitate a sistemului.

Variația temperaturii induce o serie de modificări ale proprietăților fizice și mecanice ale materialelor compozite. Temperatura maximă la care se pot utiliza materiale FRP depinde de doi factori primordiali: temperatura de tranziție sticloasă (T_g) și temperatura la care descompunerea chimică începe să devină semnificativă. Temperatura de tranziție sticloasă este un parametru de material (al rășinii), reprezentând temperatura la care polimerul se înmoaie. Deși există anumite rășini la care temperatura de tranziție sticloasă atinge valori de 400°C, valoarea uzuală a acestei temperaturi este de 60...80°C.

Fibrele de sticlă și cele de carbon pot rezista la temperaturi ridicate, temperatura de distrugere atingând pragul de 1000°C în cazul celor de sticlă și 275 în cazul celor de carbon. Fibrele de aramidă neprotejate își pierd aproximativ 75% din rezistența la întindere în jurul valorii de 175°C.

Acțiunea unor temperaturi ridicate accelerează procesele de degradare, existând posibilitatea ca datorită dilatării termice și incompatibilității termice dintre cele două materiale cu coeficienți de dilatare diferiți, să se producă dezlipirea materialului FRP. În același timp, mai multe serii de șocuri termice pot cauza fisurarea compozitului. Temperatura de descompunere chimică se atinge foarte rar pe durata de serviciu a materialelor compozite.

Comportarea materialelor FRP în domeniul de temperaturi negative este definită de o creștere semnificativă a rigidității dar și de o rupere extrem de fragilă pentru temperaturi ce variază între valorile -30...-10°C. În astfel de condiții, performanțele la impact se reduc considerabil.

Acțiunea focului asupra elementelor structurale și nestructurale ale construcțiilor reprezintă o problemă esențială a ingineriei civile. Comportarea materialelor compozite polimerice la acțiunea focului depinde bineînțeles de tipul de rășină și de fibre constituențe.

Fibrele influențează această comportare de ansamblu prin natura și alcătuirea lor. Astfel, fibrele de carbon au capacitatea de a conduce căldura departe de zona de combustie, limitând astfel descompunerea materialului FRP. În același timp, o alcătuire tridimensională poate preveni delaminarea și expunerea straturilor bogate în rășină.

Rășina în sine nu arde, însă datorită acțiunii temperaturii ridicate, aceasta emană produse foarte volatile care ard în formă de gaz pe suprafața polimerului. Căldura generată de combustia acestor gaze accelerează degradarea în continuare a polimerului, ducând la apariția unor noi volatile inflamabile și astfel, la un ciclu de degradare continuă. Problema majoră generată de acest comportament la acțiunea focului (bineînțeles suplimentar efectului de distrugere a proprietăților mecanice) este reprezentată de producerea fumului, care, prin toxicitatea și densitatea sa, reprezintă o amenințare ce pune în pericol viața persoanelor rămase eventual în interiorul clădirii. Arderea fiind dependentă de prezența oxigenului, combustia este câteodată incompletă, ducând la producerea de cantități însemnate de dioxid de carbon, acest gaz fiind responsabil de cele mai multe decese în astfel de cazuri.

Pentru a diminua și chiar elimina efectele nefaste ale acestei comportări deficitare la acțiunea focului, se pot utiliza o serie de aditivi, de ignifuganți inhibitori de foc și/sau de sisteme de protecție pentru a limita expunerea materialelor FRP la temperaturile ridicate și la acțiunea directă a focului.

3.1.4.4. Proprietăți dependente de timp

Materialele FRP supuse unei încărcări constante de-a lungul unei perioade îndelungate de timp pot ceda brusc după o anumită perioadă numită „perioada de anduranță” (în engleză „endurance time”). Acest tip de cedare este cunoscut sub denumirea de fluj. Cu cât raportul dintre efortul la întindere la care este supus pentru o perioadă îndelungată și efortul capabil pe termen scurt materialului FRP crește, timpul de anduranță scade. Perioada de anduranță scade de asemenea la expunerea în condiții dificile de mediu precum temperatura ridicată, expunerea la radiații ultraviolete, alcalinitate ridicată, cicluri umed-uscat sau îngheț-dezgeț. În general, fibrele de carbon sunt cele mai puțin susceptibile la cedarea datorată

fluaajului, cele de aramidă sunt moderat susceptibile iar fibrele de sticlă sunt cele mai susceptibile.

Materialele compozite polimerice au o comportare la oboseală superioară comportării oțelului sau betonului, depinzând bineînțeles de tipul fibrelor și a rășinilor. Fibrele care dovedesc cea mai bună comportare la oboseală sunt cele de carbon, urmate de cele de aramidă, în timp ce fibrele de sticlă au comportarea la oboseală cea mai precară. În ceea ce privește rășinile, cele epoxidice prezintă comportarea cea mai bună urmate de cele vinilesterice și cele poliesterice. Materialele CFRP au dovedit o limită de durabilitate de 60...70% din limita de rezistență inițială statică. Pe un grafic al eforturilor unitare raportate la logaritmul numărului de cicluri la cedare, panta descendentă pentru CFRP este, de obicei de aproximativ 5% din limita rezistenței inițiale statice pe deceniu de viață logaritmă. La 1 milion de cicluri, rezistența la oboseală este în general între 60...70% din rezistența inițială statică și este relativ neafectată de expunerile structurilor de beton la umiditate și temperatură cu excepția cazului în care rășina sau fibra/rășina interfeței este substanțial degradată de mediu.

În teste de laborator în condiții de mediu înconjurător - (Mandell și Meier 1983), fibrele de sticlă individuale au demonstrat o rupătură întârziată cauzată de coroziunea sub efort care a fost indusă de creșterea defectelor de suprafață, în prezența chiar și a unei cantități infime de umiditate. Când mai multe fibre de sticlă au fost incluse într-o matrice pentru a forma un material FRP compozit, s-a observat un efect de pierdere a aproximativ 10% din rezistența inițială statică pe deceniu de viață logaritmă pentru elemente întinse supuse la oboseală ciclică (Mandell 1982). Acest efect de oboseală este considerat a fi determinat de interacțiuni fibră-fibră și nu este dependent de mecanismul de coroziune sub efort. De obicei, nici o limită de oboseală nu poate fi clar definită. Factorii de mediu pot juca un rol important în comportarea la oboseală a fibrelor de sticlă datorită sensibilității lor la umiditate, ori la soluții alcaline sau acide.

Fibrele de aramidă, pentru care există volume importante de date privitoare la durabilitate, par să se comporte rezonabil la oboseală. Neglijând slaba durabilitate a tuturor fibrelor de aramidă la compresiune, comportarea la oboseală în cicluri de întindere-întindere pentru o împletitură de fibre de aramidă impregnată este excelentă. Degradarea efortului capabil pe deceniu de viață logaritmă este de circa 5...6% (Roylance și Roylance 1981). Deși nu se cunoaște nici o limită de durabilitate deosebită pentru materialele AFRP, s-au raportat limite de durabilitate de 2 milioane de cicluri la tendoane de AFRP aplicate pe elemente de beton, înscriindu-se într-o plajă cuprinsă între 54...73% din limita rezistenței la rupere. (Odagiri și alții 1997). Pe baza acestor determinări, unii specialiști sugerează ca efortul maxim să fie limitat la fracțiuni de 0,54...0,73 ori din rezistența la întindere. Mecanismul de limitare a duratei de viață la barele comerciale de AFRP este accelerat de expunerea la umiditate și temperatură ridicată (Roylance și Roylance 1981; Rostasy 1997).

În situația în care mediul ambiant este de natură corozivă, sub acțiunea sarcinilor de lungă durată, se poate instala un fenomen de cedare a elementelor din materiale FRP, fenomen denumit coroziune sub efort. Intensitatea fenomenului este dependentă de timp, mediu, nivelul de solicitare, tipul de fibre și de matrice. Și în cazul acestui fenomen, fibrele de carbon se dovedesc a fi cele mai performante, fiind neafectate până la valori de 80% din efortul ultim, în timp ce fibrele de sticlă și de aramidă sunt susceptibile la coroziune sub efort.

3.1.4.5. Durabilitatea și măsuri de protecție [034]

Condițiile de mediu afectează rășinile și fibrele diverselor sisteme de materiale FRP. Proprietățile mecanice (rezistența la tracțiune, deformația specifică la rupere, precum și modulul de elasticitate) ale unor sisteme FRP se degradează în funcție de expunerea la anumite medii, cum ar fi cele alcaline, apa sărată, anumite substanțe chimice, lumina ultravioletă, temperaturi și/sau umiditate ridicate, cicluri îngheț - dezgheț. Proprietățile materialelor utilizate în proiectare ar trebui să ia în considerare această degradare, în conformitate cu mediul în care sistemele FRP vor fi aplicate. Codul american ACI 440.2R-08 recomandă să se țină cont de aceste degradări printr-un factor de reducere al caracteristicilor (rezistență ultimă la întindere și deformație specifică ultimă) datorită efectelor condițiilor de mediu. În tabelul 3.8 este dată valoarea acestui coeficient în funcție de tipul de fibre și de condițiile de mediu.

Tabel 3.8. - Factor de reducere pentru diverse sisteme FRP în funcție de condițiile de mediu

| Condiții de mediu | Tipul de fibre | Factorul de reducere C_E |
|--|----------------|----------------------------|
| Interiorul clădirilor | Carbon | 0,95 |
| | Sticlă | 0,75 |
| | Aramidă | 0,85 |
| Mediu exterior (poduri, piloni, garaje supraterane deschise) | Carbon | 0,85 |
| | Sticlă | 0,65 |
| | Aramidă | 0,75 |
| Mediu agresiv (combinat chimice, stații de tratare a apelor uzate) | Carbon | 0,85 |
| | Sticlă | 0,5 |
| | Aramidă | 0,70 |

Performanța unui sistem FRP de-a lungul timpului într-un mediu alcalin sau acid depinde de tipul matricei și a fibrelor. Fibrele de carbon uscate, nesaturate sau neprotejate, sunt rezistente la acțiunea distructivă atât a mediilor alcaline cât și a celor acide, în timp ce fibra de sticlă neprotejată se poate degrada în timp, în aceste medii. O matrice de rășină corect aplicată, ar trebui totuși să izoleze și să protejeze fibrele de mediul alcalin/acid și să întârzie deteriorarea. În cazul aplicațiilor în site-uri cu alcalinitate/aciditate ridicată, sistemul FRP selectat ar trebui să includă o matrice de rășină rezistentă la mediile alcalin și acid. În astfel de situații, se recomandă utilizarea unor sisteme pe bază de fibre de carbon în detrimentul celor din fibră de sticlă.

Durabilitatea sistemelor de FRP este obiectul unor cercetări considerabile. Proiectantul autorizat ar trebui să aleagă un sistem de FRP care a fost supus unor teste de durabilitate în concordanță cu mediul de aplicare. Testele de durabilitate pot include cicluri uscat - umed, imersiune alcalina, îngheț - dezgheț, expunerea la ultraviolete, căldură uscată, apă sărată.

Orice sistem FRP care înglobează complet sau acoperă o secțiune de beton ar trebui să fie cercetat pentru efectele unei diversități de condiții de mediu, inclusiv

cele de îngheț/dezghet, coroziunea oțelului, reacții agregate alcaline și de dioxid de siliciu, apa captivă, presiunea vaporilor și de transmisie de vapori de umiditate (Masoud și Soudki 2006; Soudki și Green, 1997; Porter et al. 1997; Christensen et al. 1996; Toutanji 1999).

Multe sisteme de FRP au creat un strat impermeabil la umiditate pe suprafața betonului. În zonele în care se așteaptă transmiterea de vapori de umiditate, ar trebui să fie furnizate mijloace și măsuri adecvate.

Învelișul de protecție ferește materialele FRP de potențiale efecte mecanice și de mediu dăunătoare. Învelișurile sunt de obicei aplicate pe suprafața exterioară a sistemului de FRP conservat, după ce s-a protejat adezivul sau rășina. Sistemele de protecție sunt disponibile într-o varietate de forme. Acestea includ:

- suprafețele de acoperire din polimeri, care sunt, în general, epoxidice sau poliuretani

- acoperire de acril, care poate fi ori dintre sistemele acrilice obișnuite ori dintre sistemele pe bază de ciment acrilic

- sisteme de cimentare care ar putea necesita durificarea suprafeței de FRP (cum ar fi de răspândire a nisipului în rășina umedă) și poate fi instalat în același mod în care acestea s-ar fi instalat pe o suprafață de beton

- acoperiri umflate care sunt acoperiri pe bază de polimeri, folosite pentru a controla propagarea flăcărilor și producerea fumului

Există mai multe motive pentru care straturile de protecție sunt utilizate pentru a proteja sistemele FRP care au fost instalate pe suprafețe de beton:

- protecția de radiații ultraviolete - rășina epoxidică utilizată ca parte a sistemului de consolidare a FRP va fi afectată în timp, prin expunere la lumină ultravioletă. Există o serie de metode disponibile utilizate pentru a proteja sistemul de radiații ultraviolete: acoperiri acrilice, suprafețe cementate, acoperiri poliuretan alifatic și altele. Anumite tipuri de rășini de vinylester au o durabilitate mai înaltă la lumina ultravioletă decât rășina epoxidică

- vandalismul - sistemele de protecție, care trebuie să reziste vandalismului ar trebui să fie tari și durabile. Există diferite niveluri de protecție împotriva actelor de vandalism de la acoperirea cu poliuretan, care va rezista la tăiere și răzuire până la straturile cementate care oferă mult mai multă protecție

- impact, abraziune, uzură - sisteme de protecție la impact, abraziune și uzură sunt similare cu cele utilizate pentru protecția împotriva vandalismului. Cu toate acestea, abraziunea și uzura sunt diferite de vandalism prin aceea că ele rezultă din expunerea continuă mai degrabă decât un eveniment unic și sistemele de protecție sunt alese de obicei pentru duritatea și durabilitatea lor

- estetica - straturile finale de vopsea de protecție pot fi utilizate pentru a ascunde sistemul de FRP. Acestea pot fi acoperiri din latex acrilic, care sunt de culoare gri, și se folosesc pentru a se potrivi cu betonul aparent, sau pot fi de diverse alte culori și texturi pentru a corespunde structurii existente

- rezistența chimică - expunerea la produse chimice concentrate, cum ar fi acizii puternici, poate deteriora sistemul de FRP. În astfel de medii, pot fi utilizate acoperiri cu rezistență chimică mai bună, cum ar fi uretanii și epoxizii novolac

- submersia în apă potabilă - în aplicațiile în care sistemul de FRP trebuie să fie scufundat în apă potabilă, acesta poate elibera compuși în alimentarea cu apă. Stratul de protecție care nu permite eliberarea de produse chimice dăunătoare în apă pot fi utilizate ca o barieră între sistemul de FRP și alimentarea cu apă potabilă.

3.1.5. Utilizarea compozitelor în industria construcțiilor; principalele avantaje și dezavantaje

Aplicațiile din industria construcțiilor în care se utilizează materiale compozite polimerice sunt destul de variate, pornind de la simple consolidări locale și până la lucrări de complexitate ridicată ce implică utilizarea extensivă a acestor materiale. Chiar dacă nu există la momentul actual structuri alcătuite în întregime din materiale compozite polimerice (și probabil nici nu vor exista în viitorul apropiat), la o serie de pasarele, poduri sau podețe, mare parte din structura de rezistență este realizată din materiale FRP. Aplicațiile uzuale ale compozitelor sunt:

- consolidarea structurilor cu lamele pultrudate sau țesături unidireționale sau bidireționale

- consolidări cu armături compozite

- producerea betonului armat utilizând armături compozite pentru a înlocui parțial sau total armăturile de oțel

- realizarea panourilor compozite de tip sandwich

- utilizarea unor profile liniare de diverse forme din material compozit

- realizarea unor conducte sau construcții maritime.

Principalele avantaje ale materialelor compozite polimerice, în comparație cu alte materiale sau tehnici tradiționale sunt următoarele:

- rezistențele foarte ridicate ale materialelor compozite, care pot varia în funcție de aplicația structurală în cadrul căreia se folosesc. Pentru consolidări cu materiale compozite, de regulă, rezistența acestora este de cel puțin trei ori mai mare decât rezistența ultimă a oțelului.

- densitatea elementelor din compozite polimerice este destul de redusă, având valori de aproximativ 20% din densitatea oțelului. Această densitate redusă, combinată cu rezistențele mai mari, va duce întotdeauna la greutatea totală mai mică comparativ cu sistemele ce utilizează oțelul. Pe lângă reducerea de cheltuieli cu transportul acestor materiale comparativ cu elemente similare din oțel, o economisire importantă se poate realiza și în momentul instalării, necesitând o utilizare minimă a echipamentelor și mașinilor grele de ridicat.

- durabilitate ridicată datorată faptului că nu corodează, putând fi astfel utilizate în medii agresive

- proprietăți excelente de comportare la oboseală

- conductivitate termică redusă

- conductivitate electrică redusă

- durată de execuție redusă în cazul sistemelor de consolidare ce utilizează compozite comparativ cu tehnicile tradiționale (cămășuieli de beton armat, plăci metalice, etc.)

- intervenții minime asupra geometriei elementelor consolidate, datorată dimensiunilor reduse ale elementelor de consolidare

- estetică adecvată.

Aceste materiale prezintă o serie de dezavantaje, cele mai importante fiind:

- prețul relativ ridicat

- elementele de construcții realizate din materiale compozite sunt sensibile la o serie de acțiuni mecanice distructive (vandalism), implicând necesitatea unei protecții, dacă ele se găsesc în zone expuse

- pentru aplicare necesită mână de lucru calificată și o manipulare atentă

- sensibilitate ridicată a materialelor compozite la acțiunea radiațiilor ultraviolete impune protejarea acestora, în cazul montării lor în locuri expuse

- rezistența la foc este destul de scăzută, pentru temperaturi ce depășesc temperatura de tranziție sticloasă a rășinii, fiind necesare adoptarea unor soluții de protecție

- dezavantajul cel mai important din punct de vedere structural este dat de modulul de elasticitate și alungirea la rupere ce au valori mai reduse decât în cazul oțelului.

Toate problemele de construcții au întotdeauna mai mult decât o singură soluție, decizia finală luându-se, de cele mai multe ori, din anumite rațiuni și considerente economice. Întotdeauna, specialiștii împreună cu beneficiarii vor trebui să analizeze toate soluțiile posibile și să stabilească, de la caz la caz, oportunitatea utilizării materialelor compozite.

3.2. Consolidări cu materiale FRP

Primele consolidări de elemente de construcții utilizând materiale FRP au fost efectuate încă din anii '50, tehnologiile de consolidare ce utilizează țesături și lamele fiind dezvoltate în Japonia și Europa. Consolidarea pentru sporirea capacității portante sau a ductilității utilizând materiale FRP reprezintă o alternativă viabilă la soluțiile „tradiționale” ce implică materiale și tehnici convenționale de consolidare (cămășuieli de beton armat, montarea unor profile de oțel, lamele/plăci de oțel dispuse prin lipire, post-tensionare exterioară utilizând cabluri de oțel, etc.). Consolidarea elementelor de construcții se realizează prin dispunerea materialelor FRP în cantitatea și direcția necesară, astfel încât elementul structural să prezinte capacitatea portantă, ductilitatea și capacitatea de deformație dorită, aplicând o cantitate minimă de materiale de consolidare, obținând astfel o eficiență maximă. Optarea pentru o soluție de consolidare pe bază de materiale compozite se dovedește a fi foarte oportună în cazul în care durata de desfășurare a lucrărilor de intervenție se dorește a fi cât mai redusă, precum și în cazul în care încărcările suplimentare aduse de sistemul de consolidare trebuie să fie cât mai mici.

Situațiile uzuale în care se pretează utilizarea materialelor FRP la consolidări sunt:

- deteriorări structurale sporite de regulă de o serie de factori de mediu
- suprasolicitări cauzate de modificări funcționale, ale destinației sau ale încărcărilor
- suprasolicitări cauzate de exploatarea neadecvată a structurii
- nevoia de a minimiza perioada în care o structură este închisă total sau parțial pentru reparații
- nevoia de a crește durata de viață a unei construcții minimizând costurile
- pierderea tensiunii din armătura din elementele de beton precomprimat
- sporirea capacității de deformație a elementelor de beton armat
- sporirea cerințelor de siguranță.

3.2.1. Sisteme și tehnici de consolidare a elementelor de construcții utilizând compozite polimerice

3.2.1.1. Tehnica montării la exterior (EB-FRP)

Pentru consolidarea elementelor de construcții, tehnica montării la exterior a materialelor compozite este cea uzuală. Această tehnică de consolidare presupune

dispunere lamelelor sau a țesăturilor compozite pe fața întinsă a elementului prin lipire cu ajutorul unor adezivi (de regulă rășini epoxidice). Această tehnică poartă numele de lipire la exterior (în engleză „Externally Bonded”, EB).

Sistemul de consolidare ce utilizează lamele (denumite în anumite terminologii și laminate) din materiale compozite a fost pentru prima dată utilizat la începutul anilor '90, în Elveția. Sistemul constă în utilizare unor lamele înguste cu grosimi ce variază de regulă între 1,20 și 1,40 mm, și cu lățimi de 50, 100 mm. Caracteristicile secționale ale lamelelor pot varia considerabil, procesul de producție permițând acest lucru, însă, de regulă, producătorii dezvoltă sisteme ce se încadrează în tiparele dimensionale prezentate mai sus. Lungimea unor astfel de lamele poate fi teoretic nelimitată, însă din considerente practice, aceasta este limitată la 20 m. Celelalte componente ale sistemului de lamele lipite la exterior sunt amorsa/grundul (în engleză „primer”) și adezivul. Rolul amorsei este de a spori calitatea lipirii dintre adeziv și stratul suport din beton. De regulă, adezivul utilizat în astfel de aplicații este reprezentat de o rășină epoxidică. Dimensiunile uzuale ale stratului de adeziv variază între 1,00 și 2,00 mm. Tehnologia de aplicare constă în pregătirea suprafeței de beton, urmată de aplicarea pe lamelă a stratului de adeziv, iar în unele cazuri aplicarea unui strat de adeziv și pe suprafața de beton. Apoi lamela este montată pe element printr-o presare ușoară. Utilizarea lamelelor este recomandată în cazul unor suprafețe plane și netede.

Sistemul ce întrebuințează fâșii compozite are la bază țesături uscate de fibre unidirecționale, utilizându-se însă, mai rar ce-i drept, și pânze țesute bidirecționale. Țesăturile cel mai des întâlnite au lățime cuprinse între 200 și 400 mm, și grosimi de ordinul a 0,10...0,40 mm. Sistemul tipic constă în următoarele componente: amorsa / grundul, chitul (în engleză „putty”), fibrele sau țesăturile fie ele uscate sau preimpregnate și rășinile. Procesul de aplicare a acestui sistem este puțin mai laborios decât cel de aplicare a sistemului cu lamele, fazele care trebuie parcurse fiind mai multe. Astfel, pentru început, suprafața de beton este tratată printr-o șlefuire atentă, urmând apoi să se întindă un strat de amorsă / grund, iar în cazul în care există goluri și neuniformități importante în suprafața de beton se utilizează chitul. Apoi se aplică un strat subțire de rășină epoxidică pe suprafața pretrată și se întinde prin derulare țesătura, apăsând ușor pe toată suprafața fâșiei cu o rolă pentru a îndepărta eventualele bule de aer. Peste fâșia astfel întinsă se mai aplică un strat de rășină. Acest proces se poate repeta până la un număr de 10-15 straturi, în funcție de natura sistemului de consolidare dorit. În foarte multe situații, sistemul astfel obținut se protejează împotriva unor potențiale efecte distrugătoare ale mediului ambiant, prin vopsire, sau prin aplicarea unui strat subțire de mortar sau beton polimeric. Acest sistem pe bază de fâșii este mult mai sensibil la iregularitățile suprafeței de beton pe care este aplicat, necesitând o pregătire suplimentară ce sporește costul final. Tehnica este însă optimă pentru consolidarea elementelor curbe (silozuri, rezervoare, turnuri de răcire, coșuri de fum, etc.).

Fazele tehnologice parcurse pentru finalizarea unei consolidări utilizând această tehnică sunt prezentate în Cap. 6, exemplificându-se pe elementul experimental RCS-FS-01.

3.2.1.2. Tehnica armăturilor montate în șlițuri (NSMR-FRP)

Tehnica utilizării armăturilor compozite montate în șlițuri (în engleză denumită „Near Surface Mounted Reinforcement”, NSMR) înseamnă, într-o traducere mot-a-mot, „armături montate lângă suprafață”. Această tehnică presupune tăierea în direcția dorită a unor șlițuri (șanțuri mici) în zona de acoperire cu beton a armăturilor întinse. Șlițurile sunt apoi umplute pe aproximativ jumătate din adâncimea lor cu adeziv (de regulă o rășină epoxidică). Apoi elementul FRP de consolidare este introdus în șanțuri prin presare ușoară. Prin această apăsare, adezivul tinde să iasă, curgând în jurul elementului de FRP și umplând perfect spațiul dintre armătură și pereții șlițului. La final, se mai adaugă adeziv, umplând complet șanțul și nivelând apoi suprafața elementului consolidat. Abordarea tehnologică este foarte importantă, fiind imperios necesar ca șlițurile să fie curățate imediat după tăierea lor, îndepărtând orice urme de schije de beton, beton ud sau praf de beton. Cel mai important parametru de care trebuie să se țină cont la aplicarea soluției este grosimea stratului de beton, și implicit distanța până la armăturile existente, pentru a se evita secționarea acestora.

Ideea acestei tehnici nu este tocmai nouă, fiind raportată în literatura de specialitate încă din anul 1948. Pe atunci însă, aplicațiile practice utilizau bare sau tije de oțel în loc de armăturile compozite din prezent, iar în loc de adezivi epoxidici, se utilizau mortare de ciment. Primele cercetări și aplicații practice din „era materialelor compozite”, bazate pe această tehnică, prevedeau utilizarea unor elemente FRP de consolidare cu secțiunea transversală de formă circulară, asemenea armăturilor de oțel. Aceste prime cercetări, începute la sfârșitul anilor '90, au fost urmate de o serie de studii intensive cu scopul de a determina performanțele diferitelor sisteme și oportunitatea aplicării acestora pe o variată gamă de elemente structurale, axându-se pe influența diversilor parametri, cum ar fi: forma și dimensiunile șlițurilor, tipul adezivului, forma materialului FRP. Astfel, au fost dezvoltate sisteme care utilizează elemente cu secțiuni transversale pătrate, ovale și dreptunghiulare. În cadrul prezentei lucrări, termenul generic de bandă FRP (bineînțeles pentru tehnica armăturilor montate în șlițuri) se va referi la armăturile FRP cu secțiune dreptunghiulară îngustă (conform Fig. 3.3.), în timp ce termenul de bară FRP se va referi la restul tipurilor de secțiuni transversale. Mai recent au fost raportate în literatură [078] și bare cu secțiuni atipice (trapezoidale). În Fig. 3.3, 3.4, 3.5 sunt prezentate caracteristicile secționale ale sistemelor NSMR-FRP.



Fig. 3.3. - Armături înglobate în șlițuri sub formă de benzi FRP

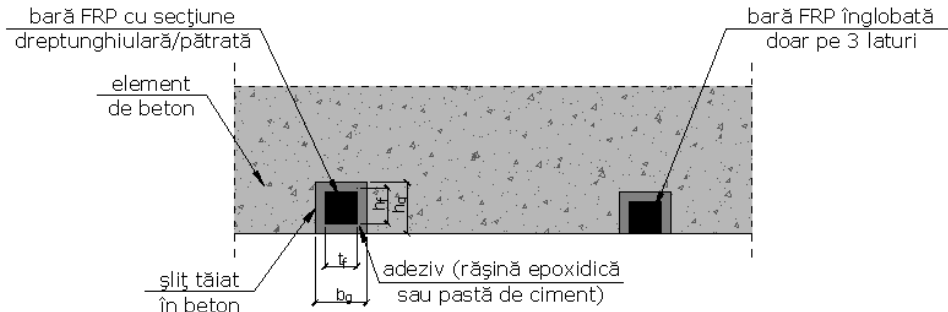


Fig. 3.4. - Armături înglobate în șlițuri sub formă de bare dreptunghiulare/pătrate FRP

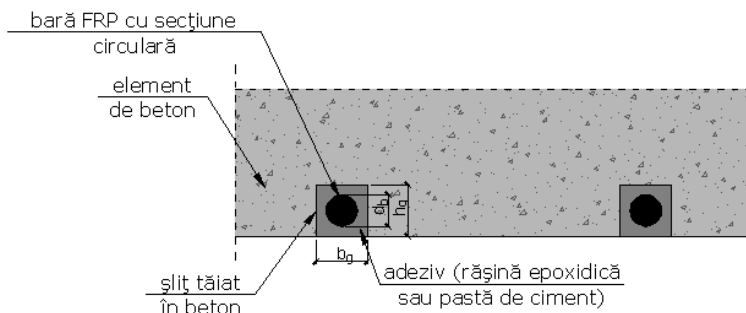


Fig. 3.5. - Armături înglobate în șlițuri sub formă de bare circulare FRP

Sistemele care utilizează benzi de FRP au apărut din necesitatea de a obține eforturi unitare cât mai mari în elementul FRP, premergător producerii fenomenului de cedare prin „debonding” (dezlipire). De regulă, pentru restul de parametri identici, capacitatea de aderență este superioară în cazul benzilor de FRP în comparație cu barele circulare de FRP. Această comportare superioară este pusă pe seama distribuției tridimensionale a eforturilor de aderență ce se dezvoltă diferit în betonul din jurul benzilor FRP decât în betonul din jurul barelor FRP circulare. Astfel, pentru benzi, marea majoritate a eforturilor de aderență și de întindere acționează într-un plan paralel cu suprafața de beton în interiorul căreia sunt înglobate acestea (sau mai bine zis în mai multe planuri paralele cu această suprafață). În același timp, prin utilizarea unor bare FRP cu secțiunea transversală circulară, apar o serie de eforturi perpendiculare pe suprafața betonului care tind să împingă armătura înspre exteriorul șlițului, contribuind la cedarea prin pierderea aderenței. Mai mult, deoarece benzile au un raport perimetru/arie secțiune transversală mult mai mare, eforturile de aderență (lunecare) pentru o forță de întindere dată sunt mai mici decât în cazul armăturilor circulare.

Există o serie de cercetări experimentale ce se ocupă cu studiul performanței soluțiilor de lipire dintre beton și armătura FRP. Bazându-se pe teste de tip „pull-out” (tragere), pentru grinzi la care lungimea de lipire a armăturilor variază între 850 și 1200 mm, se obține chiar o conlucrare totală între armătura FRP și beton (în engleză: „full composite action”). Aceste rezultate demonstrează, fără

tăgadă, că se poate utiliza întreaga rezistență a armăturii FRP cu secțiune transversală dreptunghiulară, contrastând cu rezultatele obținute pe sisteme ce utilizează armături circulare, sisteme care prezintă cedare prin „debonding” (dezlipire) indiferent de lungimile de ancorare (lipire).

Tehnica de montare a armăturilor compozite în șlițuri este recomandată în cazurile în care sistemul de consolidare trebuie protejat de o serie de acțiuni mecanice distructive, precum și în cazul în care suprafața de beton în care se înglobează este puternic neuniformă.

Este deosebit de important de menționat că primele cercetări pe această temă a tehnicii NSMR în România au fost efectuate de către d-na Liana Bob [005], pentru elemente structurale de lemn.

Fazele tehnologice parcurse pentru finalizarea unei consolidări utilizând această tehnică sunt prezentate în Cap. 6, exemplificându-se pe elementul experimental RCS-FS-01.

3.2.1.3. Sisteme speciale de consolidare cu compozite

Există și alte sisteme de aplicare a materialelor compozite, cel mai important fiind reprezentat de aplicarea prin pretensionare a acestora [080], [081], [093]. Tehnica dispune de o serie de avantaje extrem de importante, cum ar fi:

- contribuie la o comportare mai rigidă a elementului deoarece betonul, în stadii inițiale de lucru este în compresiune, contribuind astfel la momentul rezistent al secțiunii

- apariția fisurilor e întârziată iar când acestea apar, ele sunt mult mai dese și au deschideri mai mici

- închide fisurile preexistente

- sporește limita de serviciu și durabilitatea

- sporește capacitatea portantă la forță tăietoare, din moment ce întreaga secțiune de beton armat contribuie la preluarea eforturilor de tăiere

- necesită o arie transversală mai mică a fâșiei decât în cazul unei fâșii nepretensionate pentru a produce același efect

- utilizând ancoraje adecvate, cedarea prin (descojire) „peeling-off” poate fi evitată

- nivelul de solicitare la care armătura de oțel a elementului consolidat intră în curgere este superior pentru o fâșie pretensionată, comparativ cu o fâșie nepretensionată.

Cele mai importante dezavantaje ale acestei tehnici sunt reprezentate de costurile mai mari și de timpul mai îndelungat pe care îl necesită, precum și de faptul că necesită ancoraje și aparatură specială pentru a aplica pretensionare.

Ținând cont de problemele legate de sistemul de lipire a elementelor FRP pe/în elementele de beton (probleme legate de cedarea prematură a acestuia), o tehnică a fixării lor prin intermediul unor ancoraje mecanice a fost dezvoltată (în engleză, tehnica poartă denumirea de „Mechanically Fastened”, MF). Ancorarea mecanică a fâșiilor are marele avantaj de a exclude parțial sau complet utilizarea rășinilor epoxidice, materiale extrem de toxice, ce impune utilizarea unor forme speciale de protecție.

Un alt sistem special de aplicare a materialelor compozite este reprezentat de aplicarea mecanizată a soluțiilor de consolidare, sistem ce este foarte potrivit în cazul înfășurării stâlpilor pentru a-i confina.

Mai există o serie de tehnici speciale descrise în literatura de specialitate, însă ele sunt folosite la o scară extrem de redusă, astfel încât la momentul actual nu prezintă un interes deosebit.

3.2.2. Câteva considerente privind fenomenologia de cedare a elementelor consolidate utilizând tehnicile EB-FRP și NSMR-FRP

În funcție de o serie de factori precum: caracteristici geometrice, mod de alcătuire, natura solicitării complexe și influența fiecărui tip de solicitare în ansamblul solicitării complexe care acționează asupra unui element structural, acesta poate ceda în diverse forme și moduri. Aceste moduri foarte variate de cedare presupun bineînțeles și comportări foarte diferite ale elementelor de la un caz la altul. Pentru o situație dată, modul de cedare care caracterizează respectivul element trebuie determinat încă din momentul proiectării sistemului de consolidare. Faptul că un mod sau altul reprezintă modul caracteristic de cedare este influențat major de o serie de parametri precum: cantitatea de armătură din element, proprietățile materialelor constitutive (beton, armătură, materiale FRP), geometria elementului, calitatea adezivului utilizat la montarea lamelelor sau a țesăturilor, etc. Modul care guvernează cedarea unui anumit element se determină pe baza unor metode analitice propuse de normative, neexistând însă prevederi pentru toate tipurile de elemente structurale. Stabilirea modului caracteristic de cedare încă din timpul proiectării este foarte importantă, deoarece respectivul mod va limita capacitatea de rezistență a întregului sistem.

Toate formele de cedare a elementelor de beton armat consolidate cu materiale compozite polimerice se pot încadra în două mari categorii, în funcție de momentul în care se pierde conlucrarea dintre elementul structural și sistemul de consolidare, astfel:

- în categoria I se încadrează modurile de cedare caracterizate de menținerea acțiunii compozite dintre FRP și beton până în momentul în care betonul se zdrobește și/sau lamelele, fâșiile, țesăturile sau fibrele elementelor FRP de consolidare se rup. Modurile de cedare ce implică ruperea materialului FRP sunt cele ideale, cele spre care ar trebui să tindă o proiectare rațională. Doar în cazul unui element care cedează în această manieră se poate considera că proprietățile elementului FRP (și implicit a materialului din care este confecționat acesta) sunt valorificate la adevăratul potențial.

- categoria II este reprezentată de moduri de cedare ce presupun pierderea aderenței dintre beton și sistemul de consolidare înainte ca betonul să se zdrobească și/sau elementul FRP să se rupă. Practic, pentru aceste forme de cedare, elementul structural este distrus înainte ca materialul FRP să-și fi valorificat rezistențele.

Pentru elementele de beton armat supuse la încovoiere și consolidate utilizând tehnica EB-FRP, modurile de cedare uzuale sunt:

1. **Zdrobirea betonului** din zona comprimată premergător curgerii armăturilor de oțel. Acest mod de cedare se consideră că apare atunci când deformația specifică de compresiune atinge valoare capabilă a betonului ($\epsilon_c = \epsilon_{cu} = 0,003$). Elementele la care se poate obține o astfel de cedare sunt elemente cu procente de armare ridicate atât pentru oțel cât și pentru compozit.

2. **Curgerea armăturilor de oțel** urmată de **ruperea lamelei / fâșiei FRP**. Ruperea materialului FRP se consideră că se instalează atunci când deformația specifică în compozit atinge valoarea deformației specifice ultime ($\epsilon_f = \epsilon_{fu}$) înainte de atingerea limitei de deformație specifică din beton. O astfel de cedare se poate

întâlni la elemente cu procente relativ reduse de armare atât pentru oțel cât și pentru compozit.

3. **Curgerea armăturilor de oțel** urmată de **zdrobirea betonului** din zona comprimată. Acest mod apare la elemente cu procente optime de armare pentru oțel dar cu procente de armare ridicate pentru materialul compozit.

4. **Dezlipirea** (în engleză „debonding”) și **moduri de cedare prin pierderea aderenței**. Pierderea aderenței dintre stratul suport de beton și compozit presupune degradarea completă a conlucrării dintre acestea și se produce la interfața celor două straturi. Dezlipirea locală (în engleză „localised debonding”) presupune o pierdere localizată a aderenței la nivelul unei arii reduse, spre exemplu zone de câțiva milimetri în vecinătatea unor fisuri. Fenomenul de dezlipire locală nu reprezintă un mod de cedare în sine, însă când această dezlipire se propagă în asemenea manieră încât materialul compozit nu mai este capabil să preia eforturi, se produce modul de cedare denumit **descojire** (în engleză „peeling-off”). Cedarea prin pierderea aderenței dintre beton și compozit se poate instala în mai multe zone ale elementului consolidat, în funcție de modul de propagare a planului de cedare, precum și de caracteristicile materialelor constituente și de calitatea aplicării soluției de consolidare. În Fig. 3.6. sunt prezentate posibilele situații de dezlipire, în conformitate cu buletinul nr. 14 al „*fib*” (fédération internationale du béton - federația internațională de beton).

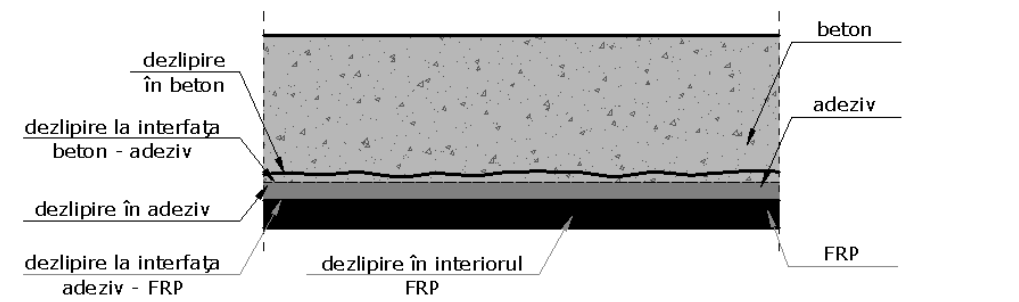


Fig. 3.6. - Posibile cedări prin pierderea aderenței (cf. [037])

Propagarea dezlipirii în beton se poate produce atât într-un plan din vecinătatea suprafeței de beton consolidate, cât și în lungul unei zone slăbite (spre exemplu în vecinătatea armăturilor de oțel), conform reprezentării grafice din Fig. 3.7.

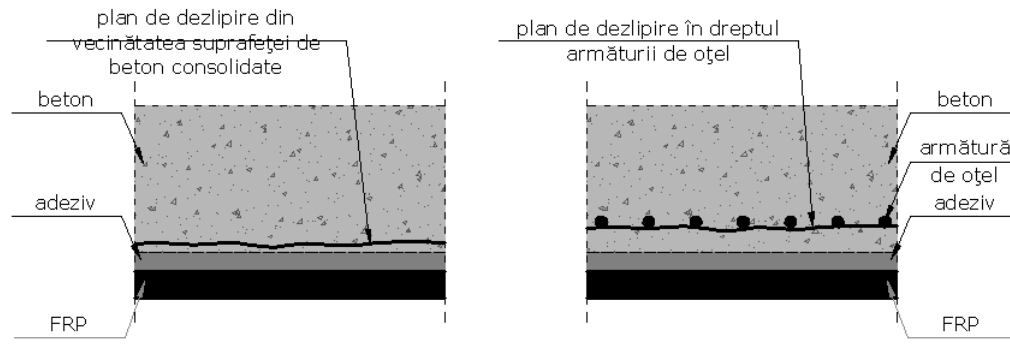


Fig. 3.7. - Diferite planuri de dezlipire în interiorul betonului (cf. [037])

Dezlipirea în interiorul stratului de adeziv (cedare de coeziune) se poate produce arareori, de regulă, dezlipirea având loc în stratul de beton. Explicația acestui fenomen constă în faptul că rezistențele la întindere și tăiere sunt mai mari în cazul adezivului (de regulă o rășină epoxidică) decât rezistențele betonului. Astfel, cedare se va produce de regulă prin desprinderea unui strat subțire de beton împreună cu materialul compozit. Singura situație în care dezlipirea se poate produce în interiorul stratului de adeziv corespunde unei diminuări semnificative a rezistențelor adezivului până la valori mai mici decât rezistențele betonului (spre exemplu la temperaturi ridicate sau pentru betoane cu rezistențe mari).

Dezlipirea la interfața beton-adeziv sau adeziv-FRP se va produce doar în cazurile în care pregătirea suprafeței înainte de aplicarea sistemului de consolidare este necorespunzătoare. Acest fenomen se datorează caracteristicilor rășinilor epoxidice care prezintă de regulă rezistențe de aderență mai ridicate decât rezistențele de coeziune.

Deoarece materialul FRP este în sine un material compozit, cedarea prin dezlipire în interiorul său se poate produce, însă reprezintă un mod de cedare secundar, apărând ulterior dezvoltării fisurilor și inițierii fenomenelor de cedare prin pierderea aderenței din stratul de beton.

Modurile de cedare enumerate la primele trei puncte se încadrează în categoria I, restul încadrându-se în categoria II.

Cele mai multe moduri de cedare observate în urma studierii comportării elementelor de beton armat consolidate utilizând tehnica EB-FRP sunt cauzate de modul de descojire. În funcție de zona în care se inițiază cedarea, se pot identifica patru forme de descojire:

- forma I - descojirea într-o zonă nefisurată de ancorare
- forma II - descojire produsă într-o zonă cu fisuri de încovoiere
- forma III - descojirea se inițiază în zona unor fisuri de tăiere
- forma IV - descojirea se inițiază într-o zonă cu neregularități ale suprafeței

de beton.

O reprezentare grafică a acestor patru forme de cedare este prezentată în Fig. 3.8.

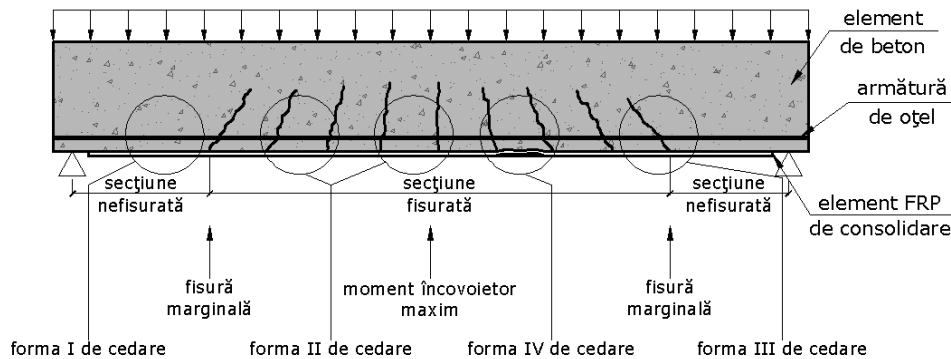


Fig. 3.8. - Forme de cedare prin distrugerea aderenței la un element consolidat cu EB-FRP (cf. [037])

Din studiul literaturii de specialitate, s-au constatat șase moduri posibile de cedare a sistemului de consolidare a elementelor de beton armat atunci când se utilizează tehnica NSMR-FRP, acestea fiind:

1. Modul de cedare prin **zdrobirea betonului** implică atingerea și depășirea rezistenței la compresiune a betonului din zona comprimată a elementului, înainte ca materialul FRP de consolidare să se rupă sau să se desprindă într-un anumit fel. Acest mod de cedare este dependent de o serie de factori precum: geometria elementului, cantitate și modul de dispunere a armăturii de oțel și a armăturii FRP precum și de capacitatea sistemului NSMR de a nu se desprinde prematur de pe element.

2. **Ruperea elementului FRP** poate avea loc în situația unui element a cărui geometrie este de asemenea natură încât zdrobirea betonului este împiedicată iar sistemul de consolidare are suficientă rezistență pentru a întârzi suficient apariția unei forme de desprindere. Așa cum se poate concluziona și din ideile enunțate la paragraful anterior, acest tip de cedare este mult mai probabil în cazul armăturilor FRP cu secțiune dreptunghiulară decât în cazul celor cu secțiune circulară. După cunoștința autorului, acest mod de cedare nu s-a produs în nici o încercare experimentală efectuată până în prezent la care să se fi folosit bare circulare de armătură FRP. Cerința esențială ce trebuie îndeplinită pentru a se obține acest mecanism de cedare este aceea de a furniza lungimi de ancorare (lipire) mari, ancorând foarte bine elementul FRP în zonele cu momente încovoietoare nesemnificative ca valoare.

3. **Despicarea adezivului** reprezintă un mod de cedare caracterizat prin valori mari ale anumitor eforturi (eforturi radiale pentru elementele FRP cu secțiune transversală circulară și eforturi de tăiere pentru elementele FRP cu secțiune transversală dreptunghiulară), conducând la o cedare a adezivului în proximitatea interfeței dintre elementul FRP și adeziv, rezultând o despicare a acestuia în jurul armăturii FRP. Acest mod de cedare este mult mai probabil în cazul armăturilor cu secțiune circulară decât în cazul armăturilor cu secțiune dreptunghiulară, din cauza unor eforturi radiale semnificative, cauzate de rotunjimea barelor. Din studiile din literatură se poate trage concluzia că prin mărirea adâncimii șlițului, apariția acestui mod de cedare poate fi minimizată.

4. **Despicarea betonului** se produce din cauza cedării betonului adiacent interfeței dintre beton și adeziv. Forțele mari de întindere la care este supus betonul

în zona de transfer a eforturilor de la adeziv la elementul de beton armat, coroborate cu rezistența redusă la întindere a betonului, duc la desplicarea betonului din jurul șlițurilor. Acest mod de cedare este caracteristic utilizării elementelor FRP cu secțiune transversală dreptunghiulară.

5. **Despicarea combinată** este caracterizată prin survenirea simultană a celor două moduri de cedare anterioare. Astfel, în unele zone se va despica adezivul, în timp ce în alte zone se va despica betonul din jurul șlițurilor.

6. **Separarea stratului de beton de acoperire** a armăturii întinse de oțel se poate produce în momentul în care toată masa de beton care alcătuiește stratul de acoperire se desprinde de restul elementului de beton armat după un plan longitudinal de cedare situat la nivelul armăturii întinse. Acest mod de cedare se produce de regulă, în zonele de capăt ale elementelor FRP, în zone cu eforturi de tăiere semnificative. În cele mai multe cazuri apariția acestei maniere de cedare se datorează existenței unui număr ridicat de șlițuri, și a unei secțiuni transversale relativ îngustă la nivelul fibrei extreme întinse.

Modurile de cedare enumerate la primele trei puncte se încadrează în categoria I, iar modurile descrise la ultimele trei puncte se încadrează în categoria II.

În Cap. 4 al prezentei teze sunt rezumate rezultatele obținute de diverși cercetători în cadrul unor programe experimentale similare cu cel cuprins în această teză. Pentru a exista o imagine de ansamblu asupra modului de cedare a plăcilor de beton armat consolidate cu materiale compozite, fie prin tehnica EB-FRP fie prin NSMR-FRP, s-au inventariat toate modurile de cedare din încovoiere observate în cadrul acestor programe.

Pe baza acestei inventarieri, s-a observat că elementele consolidate utilizând tehnica EB-FRP prezintă în marea majoritate a cazurilor (80%) cedări premature prin pierderea aderenței, de tip „debonding” sau „peeling-off”. Doar utilizând ancoraje s-au obținut cedări prin ruperea fibrelor la elementele consolidate cu tehnica EB-FRP. În același timp, pentru elementele consolidate utilizând tehnica NSMR-FRP, nu s-au observat cedări premature în niciunul dintre programele experimentale.

3.2.3. Scurtă comparație între metodele EB-FRP și NSMR-FRP; avantaje și dezavantaje

Utilizarea tehnicii NSMR-FRP pentru consolidarea structurilor de beton armat, aduce o serie de avantaje importante în raport cu tehnica „tradițională” EB-FRP, inclusiv o utilizare mai corectă a materialelor componente, ținând cont de riscul redus de apariție a modurilor de cedare caracterizate prin pierderea conlucrării dintre elemente. Un al doilea avantaj major este reprezentat de o protecție sporită a materialelor FRP în fața unor surse externe de degradare (vandalism, acțiuni mecanice accidentale, acțiunea focului). În același timp, argumentele de ordin estetic sunt demne de luat în considerare.

Din o serie de studii legate de costurile celor două metode, se observă că tehnica NSMR-FRP generează costuri mai ridicate în comparație cu EB-FRP. Această sporire se datorează, în principal, operațiilor de tăiere a șlițurilor (în special costuri cu manopera ridicate) și faptului că în aceste șlițuri trebuie introdusă o cantitate relativ mare de rășină. Comparativ cu sistemele EB-FRP la care se utilizează țesături, în cazul tehnicii NSMR-FRP cresc și costurile materialelor (benzile și barele

de FRP sunt mai scumpe decât țesăturile). Din punct de vedere tehnologic, tehnica EB-FRP prezintă un dezavantaj destul de însemnat ce derivă din necesitatea pregătirii unei suprafețe de beton mult mai mare decât în cazul sistemului NSMR-FRP. Dacă în cazul unor elemente liniare, această problemă nu pare foarte însemnată, în cazul elementelor plane, cu suprafețe mari pe care se aplică materialele de consolidare, neajunsul este unul foarte important.

Ca o concluzie generală, se poate afirma că, deși sistemele de consolidare bazate pe tehnica NSMR-FRP utilizează într-o mai mare măsură proprietățile materialelor constituate comparativ cu sisteme echivalente bazate pe EB-FRP, din punct de vedere al costurilor, aceste sisteme sunt inferioare.

4. STUDII ȘI APLICAȚII SIMILARE

În cadrul acestui capitol sunt prezentate, cronologic, principalele rezultate și concluzii ale studiilor experimentale și teoretice referitoare la consolidarea plăcilor de beton armat utilizând materiale compozite polimerice. Trebuie menționat faptul că studiile ce se referă la tema mai sus menționată sunt disponibile în literatura de specialitate într-un număr relativ restrâns. Și mai rare sunt studiile care tratează consolidarea utilizând materiale compozite polimerice a plăcilor de beton armat cu goluri create ulterior (direcția principală de cercetare a acestei lucrări de doctorat).

4.1. Rezultate preluate din literatura de specialitate

4.1.1. Cercetări efectuate de Teng, Lam, Chan și Wang - 2000

[100]

Lucrarea prezintă rezultatele unui studiu experimental asupra fezabilității consolidării cu fâșii/benzi de GFRP a plăcilor din beton armat în consolă care prezintă anumite deficiențe. Deoarece problema esențială întâlnită în cazul unor asemenea consolidări este reprezentată de eficiența ancorării fâșiilor/benzilor de GFRP, în cadrul studiului se pune un accent deosebit pe determinarea eficienței diferitor tipuri de ancoraje. Pe baza rezultatelor experimentale s-a dezvoltat o metodă simplă și eficientă de ancorare a fâșiilor/benzilor de GFRP.

S-au efectuat șapte teste pe șase elemente (un element fiind folosit în două teste) supuse unei încărcări liniare, distribuită uniform, aplicată pe marginea liberă a elementului. Fiecare element a fost compus din două porțiuni principale, placa și peretele în care a fost încastrată aceasta. Placa a avut dimensiunile 700x500x100 mm. Peretele a fost astfel dimensionat încât să fie mult mai puternic decât solicitările la care ar putea fi solicitat, pentru a evita astfel o deteriorare prematură a acestuia. Placa a fost realizată deliberat mai slabă printr-o poziționare greșită a armăturilor, această măsură având ca și consecință imposibilitatea elementelor de a prelua încărcările la care au fost dimensionate.

Concluzia studiului este că prin consolidarea cu GFRP și prin aplicarea sistemului de ancorare cu fante se obține o creștere semnificativă a capacității ultime și a ductilității elementelor. Efectul consolidării este și mai însemnat dacă sunt instalate ancore din țesături din FRP sau dacă extremitățile fâșiilor/benzilor sunt înfășurate în jurul capătului liber al elementului. Sporul de forță capabilă ultimă, obținut prin soluțiile de consolidare și ancorare utilizate, variază între 76% și 288%. În Fig. 4.1. este prezentat sistemul de încercare a elementelor.

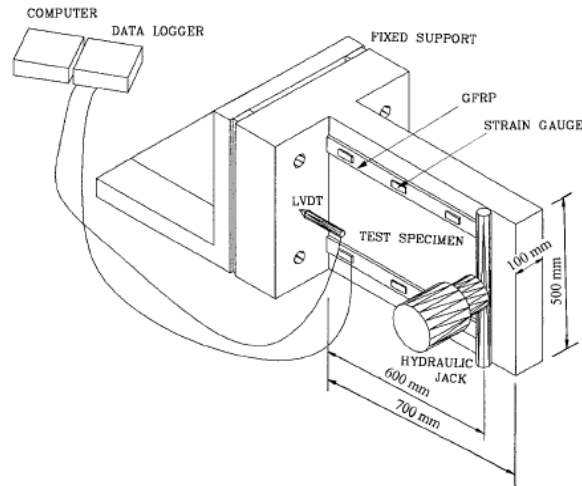


Fig. 4.1. - Sistemul de încercare a consolelor de beton armat [100]

4.1.2. Cercetări efectuate de grupul de cercetători de la Luleå University of Technology (Carolin, Enochsson, Lundqvist, Olafsson, Rusinowski, Täljsten B.) - 2002 - 2007 [010], [014], [022], [065]

În cadrul unor programe de cercetare desfășurate la Universitatea Tehnică din Luleå, s-au realizat o serie de încercări experimentale și studii teoretice referitoare la comportarea plăcilor de beton armat bidirecționale cu și fără goluri, consolidate prin metode tradiționale și prin metode moderne utilizând materiale compozite polimerice. Aceste programe de cercetare s-au finalizat cu o serie de teze de doctorat, lucrări de licențiat sau teze de masterat precum și o serie de articole științifice publicate în literatura de specialitate. Toate au avut însă la bază un singur program experimental. În cadrul acestuia au fost testate în laborator unsprezece plăci de beton armat cu și fără goluri. O placă a fost întreagă (fără gol) servind ca martor. Restul de zece plăci au avut goluri centrale, șase dintre ele fiind consolidate utilizând materiale compozite polimerice, iar patru au avut zona din jurul golului armată conform standardelor suedeze, considerând golul în proiectarea inițială.

Plăcile au avut dimensiunile de 2600x2600x100 mm, au fost încărcate cu o încărcare uniform distribuită utilizând un sac cu aer sub presiune și au fost simplu rezemate pe contur. Două tipuri de goluri centrale au fost create, având dimensiunile de 850x850 mm, respectiv 1200x1200 mm.

În articole se prezintă și o metodă analitică utilizată pentru a determina cantitatea de FRP necesară pentru consolidarea din jurul golului, metodă bazată pe echivalarea efectului FRP-ului cu efectul armăturii suplimentare ce ar trebui dispusă în jurul golului conform codului BBK 04.

Rezultatele au arătat că soluția de consolidare cu FRP-uri este viabilă, plăcile consolidate astfel având în unele situații performanțe superioare plăcilor armate cu golul considerat în proiectarea inițială. Pentru plăcile consolidate cu CFRP capacitatea portantă la starea limită ultimă a crescut cu valori cuprinse între 24% și 125% comparativ cu plăcile cu goluri neconsolidate corespondente și cu valori cuprinse între 22% și 110% comparativ cu placa întreagă (fără gol). Configurația soluțiilor de consolidare este prezentată în Fig. 4.2.

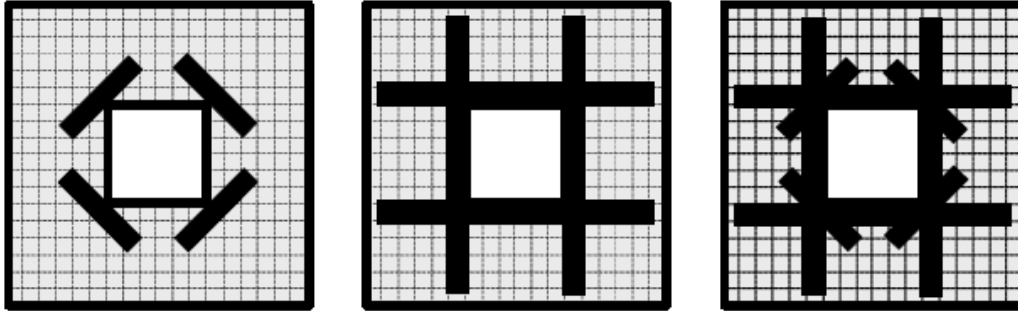


Fig. 4.2. - Configurația soluțiilor de consolidare [065]

4.1.3. Cercetări efectuate de Ebead, Marzouk ș.a. - 2002 [009], [056], [057]

Cercetările efectuate de Ebead și Marzouk în 2003 au la bază un program experimental ce constă în încercarea în laborator a șase plăci de beton armat, pătrate, cu latura de 1900 mm și 150 mm grosime. Plăcile bidirecționale, simplu rezemate pe contur, au fost încărcate prin aplicarea unei forțe distribuite pe o suprafață pătrată cu latura de 250 mm, ce a acționat în zona centrală.

În primă fază s-au încercat plăcile martor până la rupere și s-a determinat forța corespunzătoare stadiului ultim. Jumătate din această forță a fost aplicată pe fiecare dintre cele patru plăci rămase încă neconsolidate, simulând astfel un nivel de solicitare la o structură în lucru care ar avea nevoie de consolidare. Plăcile au fost apoi consolidate utilizând diferite sisteme de fâșii și lamele de GFRP și CFRP și încercate după o săptămână. Cedarea elementelor consolidate s-a produs prin desprinderea fâșiilor de CFRP și GFRP de pe placa de beton armat, fără a se produce ruperea materialelor FRP.

Încărcarea capabilă ultimă a crescut pentru elementele consolidate cu valori cuprinse între 25.8% și 44.4%. Atât ductilitatea cât și valoarea deplasării ultime a elementelor consolidate rezultă în urma testelor ca fiind mai mică decât cea a elementelor neconsolidate. Rigiditatea inițială a elementelor sporește prin consolidare, ajungând la valori de 2.37 ori și 1.99 ori mai mari decât rigiditatea inițială a elementelor neconsolidate.

Pe baza acestui program experimental, autorii evaluează exactitatea unei formule analitice de verificare a capacității ultime a plăcilor de beton armat pătrate, consolidate. Rapoartele dintre forța calculată și forța determinată experimental pentru cele patru elemente consolidate sunt: 0.92, 0.94, 0.93, 0.99.

Trebuie menționat faptul că modul de încercare adoptat de către autori pentru testarea acestor elemente, induce efecte suplimentare de tăiere și mai ales de străpungere. Totuși, elementele CFRP și GFRP utilizate pentru consolidare se aplică doar pentru sporirea capacității la încovoiere. În Fig. 4.3. este prezentat sistemul de încercare a elementelor.

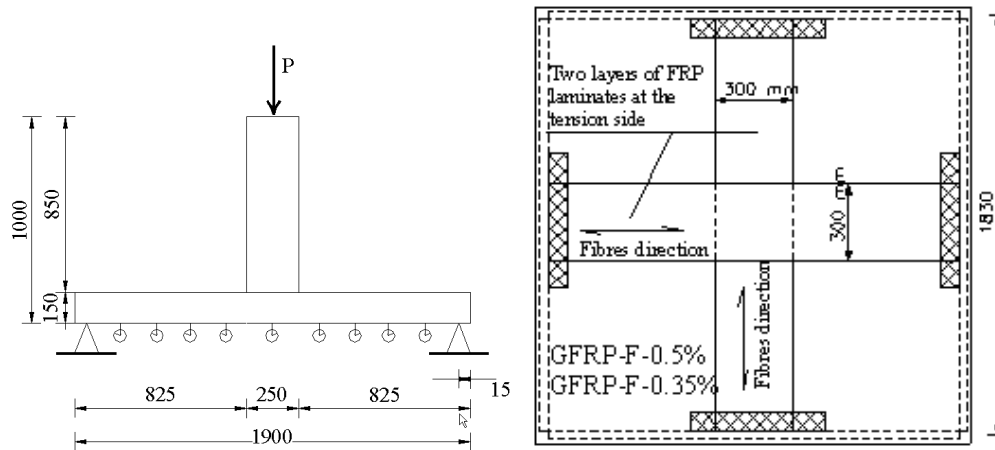


Fig. 4.3. - Sistemul de încercare a plăcilor de beton armat [057]

4.1.4. Cercetări efectuate de Limam, Foret și Ehrlicher - 2003, 2005 [082], [083]

Articolul se ocupă de consolidarea plăcilor de beton armat cu fâșii de CFRP lipite pe partea întinsă a elementelor. Prima parte tratează un studiu experimental. A doua parte se ocupă cu modelarea unei analize limite a elementelor de acest tip.

În cadrul programului experimental au fost încercate două plăci din beton armat, una neconsolidată, pe post de element martor, iar cealaltă consolidată cu fâșii de CFRP dispuse la exterior, pe partea întinsă. Elementele încercate au dimensiunile 70x1300x1700 mm și sunt armate cu bare de armătură cu diametru de 6 mm dispuse între ele la distanța de 20 cm. Consolidarea se face cu lamele de CFRP cu grosime de 1.4 mm și lățime de 5 cm dispuse la 15 cm între ele.

Plăcile au fost încărcate cu o forță concentrată ce a acționat în centrul plăcii. Prin consolidarea elementului forța capabilă ultimă a crescut de la 48 kN la 120 kN.

Modelul propus pentru a analiza capacitatea ultimă a elementului asimilează placa de beton armat, consolidată cu fibre de CFRP, cu o placă alcătuită din trei straturi: stratul inferior considerat din CFRP, stratul mijlociu considerat din oțel și stratul superior considerat din beton. Caroiajul de CFRP este considerat în model ca fiind o membrană.

Ținând cont de rezultatele obținute se poate spune că metoda de consolidare a plăcilor din beton armat cu CFRP este una fezabilă iar modelul propus poate fi utilizat pentru determinarea capacității ultime.

4.1.5. Cercetări efectuate de Mosallam ș.a. - 2003 [088], [089]

Articolul prezintă o investigație experimentală și analitică realizată pentru a evalua răspunsul ultim al plăcilor de beton simplu (foarte slab armat) și beton armat reparate și consolidate cu fâșii de FRP. Elementele din beton simplu conțin armături care nu influențează comportarea acestora și care au fost prevăzute pentru a

împiedica fisurarea la transport. Aceste elemente simulează elemente cu armătură foarte corodată.

Programul experimental a presupus încercarea distructivă a zece plăci având dimensiunile 2670x2670x76 mm reparate și consolidate cu fibre de carbon și de sticlă. Suplimentar acestor teste s-au încercat și două elemente până la 85% din capacitatea portantă prezisă. Toate elementele au fost simplu rezemate pe contur și supuse acțiunii unei forțe uniform distribuite ce acționează pe două direcții. Forța a fost aplicată folosind o pungă de apă sub mare presiune. Forța acționează de jos în sus, parte superioară fiind cea întinsă.

Pentru plăcile din beton simplu au fost încercate trei elemente de control; unul până la rupere iar alte două până la 85% din capacitatea ultimă înregistrată la primul element. Aceste două elemente au fost apoi reparate utilizând câte două fâșii unidirecționale de fibră de carbon cu lățimea de 457 mm dispuse la 457 mm între ele pentru fiecare direcție. Au fost încercate și două elemente din beton simplu consolidate utilizând același sistem ca și pentru elementele reparate cu observația că aplicarea materialelor compozite s-a făcut pe elemente nedeteriorate. Suplimentar s-au încercat și două elemente nedeteriorate consolidate cu fibre de sticlă dispunând câte trei fâșii pe cele două direcții.

În cadrul testelor pentru elementele din beton armat au fost realizate încercări pe trei plăci: un element de control, o placă reparată cu fibre de carbon și o placă consolidată cu fibre de carbon.

În articol se prezintă și un exemplu de modelare cu metoda elementului finit. Modelul propus spre utilizare este susținut de rezultatele experimentale acestea confirmând validitatea rezultatelor obținute teoretic.

Pentru aplicațiile de reparare a plăcilor din beton simplu s-a demonstrat că utilizarea materialelor compozite nu numai că reface capacitatea inițială ci crește rezistența cu o medie de 540%. Pentru aplicațiile de consolidare s-a obținut o creștere a capacității de până la 500% pentru elementele din beton simplu și de până la 200% pentru elementele din beton armat. În toate cazurile cedarea a fost precedată de deformații relativ mari (mai mult de 1/45 din lungimea liberă) ceea ce furnizează suficiente avertizări vizuale înainte de cedarea finală. În nici un test nu s-a produs cedare în materialul compozit cu excepția unei singure desprinderi (debonding) a fibrei de sticlă de pe un element consolidat. Modul uzual de cedare este reprezentat de o cedare locală la compresiune.

4.1.6. Cercetări efectuate de Piyong, Silva și Nanni - 2003

[093]

În cadrul acestui program se investighează performanțele la încovoiere a unei plăci din beton armat consolidată cu un sistem de pretensionare în trei trepte utilizând lamele de CFRP. Un element similar din beton însă neconsolidat a fost în prealabil încercat în cadrul unui alt program de cercetare și a fost considerat ca o sursă de comparație. Avantajele utilizării acestui tip de consolidare sunt: lamelele de FRP pretensionate întârzie formarea și propagarea fisurilor iar capacitatea în starea limită de serviciu și starea limită ultimă la încovoiere sunt sporite. Desprinderea fâșiilor de CFRP este împiedicată prin instalarea a trei ancore din GFRP la fiecare din capetele fâșiilor pretensionate de CFRP.

Consolidarea elementelor din beton armat cu sisteme de pretensionare se încadrează în general în trei categorii. Fiecare din aceste metode include trei faze pentru a obține nivelul de pretensionare dorit în fâșiile de FRP. În primă fază fâșiile

de FRP sunt pretensionate prin intermediul unui cric hidraulic sau a altui dispozitiv. În cadrul celui de-al doilea pas fâșiile de FRP sunt lipite pe suprafața betonului cu un adeziv. În ultima etapă, după ce adezivul s-a întărit, fâșiile de FRP sunt tăiate la capete și dispozitivul de pretensionare este înlăturat.

O problemă esențială la consolidarea elementelor din beton armat cu FRP este reprezentată de desprinderea materialului compozit de elementul din beton, desprindere ce limitează capacitatea portantă a sistemului sub capacitatea ultimă la încovoiere. Suplimentar acestui neajuns al limitării capacității portante, modul acesta de cedare poate fi caracterizat și prin separarea bruscă a fâșiilor de FRP de beton.

Elementul încercat având dimensiunile 6300x1000x220 mm a fost simplu rezemat și încărcat în patru puncte cu forțe concentrate. Cedarea s-a produs prin inițierea simultană a ruperii a două fâșii la mijlocul deschiderii. Ruperea fâșiilor de FRP nu s-a produs în toată secțiunea.

Capacitatea la încovoiere la starea limită ultimă a crescut cu 80% față de elementul martor din beton armat neconsolidat cu FRP. Deformația maximă înregistrată la mijlocul deschiderii elementului a fost de 141 mm pentru elementul consolidat cu CFRP comparativ cu 100 mm pentru elementul neconsolidat. Desprinderea fâșiilor de CFRP nu s-a produs datorită prezenței ancorelor de GFRP. Rezultatul testului indică eficiență ancorelor de GFRP utilizate.

4.1.7. Cercetări efectuate de Vasquez și Karbhari - 2003 [107]

Articolul prezintă rezultatele experimentale și teoretice ale unui studiu privind comportarea la încovoiere a plăcilor de beton armat cu goluri tăiate ulterior și consolidate cu benzi unidirecționale din materiale FRP.

Șase plăci având dimensiunile de 6000x3200x180 mm au fost încercate în două configurații de încărcare diferite, de-a lungul și de-a latul deschiderii lungi. Au fost tăiate goluri de 1600x1000 mm în fiecare element, golul fiind dispus central. Pentru a simula condițiile reale golurile au fost create după realizarea elementelor de beton armat. Două elemente au fost consolidate prin aplicarea unor benzi de FRP în jurul golului, cu rolul de a întări zona în care prin tăiere s-a creat o lipsă de armătură și cu rolul de a redistribui eforturile.

Armătura de rezistență (dispusă la partea inferioară) a constat din bare din oțel $\Phi 15.8/210$ mm pe direcția longitudinală și cu bare $\Phi 9.5/300$ mm pe direcția transversală. Suplimentar au mai fost dispuse la partea superioară bare de armătură cu diametrul de 9.5 mm la distanța de 285 mm pe direcția longitudinală respectiv 300 mm pe direcția transversală.

Golurile au fost create în fiecare element astfel încât să înjumătățească aria de armătură de pe direcția longitudinală. Înjumătățirea ariei de armătură de pe direcția longitudinală combinată cu efectul de concentrare a eforturilor la colțurile golurilor au ca efect o reducere a capacității portante cu 50%.

Au fost încercate șase elemente, câte trei în fiecare variantă de încărcare. Din fiecare serie un element s-a încercat fără gol, un element cu gol fără să fie consolidat și un element cu gol consolidat cu FRP.

Încărcările au fost aplicate în două puncte în apropierea golului, în prima variantă pe direcția scurtă iar în a doua variantă pe direcția lungă. Efectul acestor încărcări concentrate (sau mai bine zis distribuite pe o suprafață relativ mică) este similar unei încărcări distribuite uniform. Toate elementele au fost simplu rezemate în lungul laturilor scurte.

După consolidarea elementelor s-a restabilit capacitatea portantă ultimă înregistrată la elementul de control din beton armat fără gol.

Suplimentar întăririi elementelor în jurul golului, prezența benzilor din FRP a redus și nivelul de solicitare din armătură rezultând o distribuție a fisurilor și crăpăturilor mult mai favorabilă. Cu toate că benzile de FRP au o capacitate ultimă mult mai mare, cedarea se prezice prin fenomenul de decojire (peeling off) în beton în general după inițierea crăpăturilor în adeziv la un nivel de solicitare de aproximativ 65% din capacitatea benzilor de FRP. În Fig. 4.4. este prezentat sistemul de încercare a elementelor.

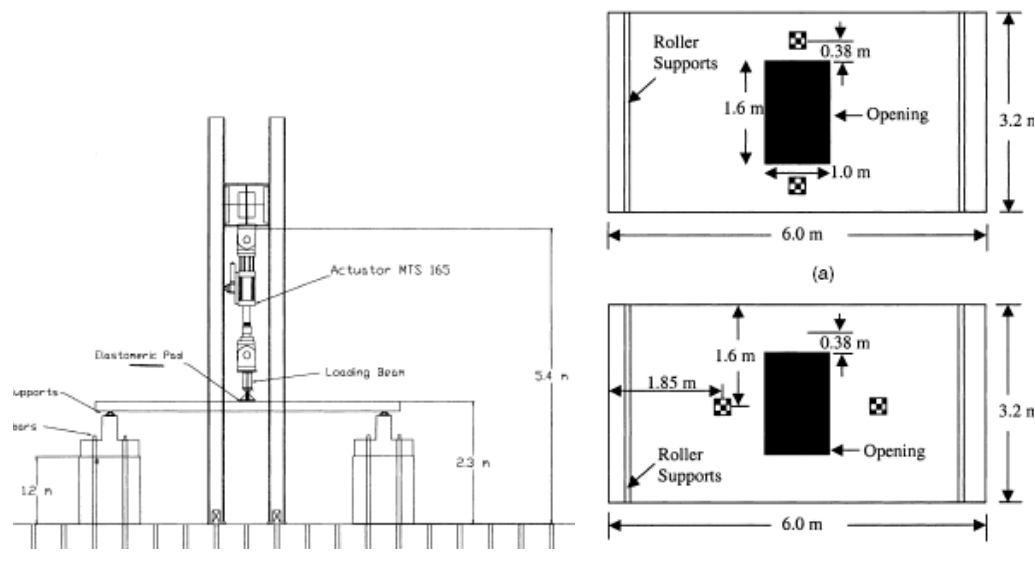


Fig. 4.4. - Sistemul de încercare a plăcilor de beton armat [103]

4.1.8. Cercetări efectuate de Arduini, Nanni și Romagnolo - 2003-2004 [046], [092]

Articolul prezintă rezultatele cercetării experimentale efectuate pe plăci unidirecționale din beton armat. Au fost încercate douăzeci și șase de plăci unidirecționale simplu rezemate (14 fără consolă și 12 cu o consolă). Geometria plăcilor și modalitatea de încercare au permis studierea regiunilor supuse atât la moment încovoietor pozitiv cât și la moment încovoietor negativ. Elementele fără consolă au avut dimensiunile 5000x1500x240 mm iar cele cu consolă 6500x1500x240 mm. Elementele au fost împărțite în câte patru subgrupe în funcție de armătura utilizată (8Φ12; 11Φ18; 8Φ14; 11Φ20).

Consolidarea cu CFRP are ca efect o creștere considerabilă a capacității portante a elementului. Creșterea este mai semnificativă în cazul consolidării la moment încovoietor pozitiv decât la moment încovoietor negativ deoarece în cazul consolidării pentru moment negativ nu există o zonă de încovoiere pură ca în situația consolidării la moment pozitiv. S-a considerat că prefisurarea elementelor

înainte de instalarea FRP-ului nu are o influență semnificativă asupra capacității portante de ansamblu la încovoiere.

Creșterea de capacitate portantă variază până la 122% fiind mult mai mare în cazul elementelor cu arii de armătură mai mici.

4.1.9. Cercetări efectuate de Shahrooz și Boy - 2004 [097]

În cadrul articolului se prezintă modul de consolidare a unui pod cu trei deschideri, vechi de 45 de ani cu insuficientă capacitate portantă. Consolidarea s-a realizat utilizând fâșii de CFRP lipite, cu lățimea de 76.2 mm și 127 mm, fâșii de CFRP lipite, cu lățimea de 102 mm, fixate cu ancore chimice la capete și țesături de FRP lipite. Utilizarea a patru sisteme diferite oferă o imagine de ansamblu asupra eficacității utilizării acestor sisteme în condițiile unei aplicări diferite in situ de la sistem la sistem, precum și examinarea performanțelor pe termen lung în aceleași condiții de trafic și expunere.

Podul a fost încercat înainte de consolidare, la scurt timp după consolidare și apoi la un an de la consolidare în condițiile în care podul fusese dat spre exploatare. Încercarea podului s-a făcut cu ajutorul a două camioane, în șapte poziții diferite, conform standardelor.

Consolidarea cu FRP a podului a avut ca efect o creștere neînsemnată a rigidității de ansamblu a podului. Câștigul l-a reprezentat creșterea de capacitate portantă cu 22%. Teste efectuate asupra podului la un an după instalare au demonstrat faptul că eficacitatea consolidării cu FRP persistă.

4.1.10. Cercetări efectuate de Tan și Zhao - 2004 [099]

În cadrul programului de cercetare șase tipuri de plăci din beton armat cu goluri au fost consolidate cu materiale CFRP și supuse unor încărcări liniare uniform distribuite. Rezultatele au fost comparate cu cele obținute în urma încercărilor efectuate pe o placă de beton armat fără gol și pe o placă din beton armat cu gol dar neconsolidată cu FRP. Opt plăci având dimensiunile 2700x2400x150 mm au fost încercate. Două grinzi cu dimensiunile 200x300 mm au fost turnate împreună cu plăcile, rezultând astfel o deschidere netă de 2300 mm. Plăcile lucrează pe o direcție și au fost armate cu bare de armătură $\Phi 10/100$ în direcția în care lucrează și $\Phi 8/200$ în direcția transversală.

Golurile din plăci au fost amplasate central la șase dintre cele șapte plăci și au avut dimensiunile: 1100x1000 mm, 700x600 mm, 1100x1400 mm și 1000x600 mm. La o singură placă golul este poziționat la marginea elementului și are dimensiunile 1100x1000 mm (1100 mm în direcția pe care lucrează elementul).

Elementele consolidate cu CFRP au dovedit o rigiditate similară cu cea a plăcii fără gol. În ceea ce privește capacitatea portantă, două dintre elementele consolidate au rezistat la o încărcare foarte apropiată ca valoare de cea a plăcii întregi. Neajunsul acestei metode de consolidare este reprezentat de faptul că elementele consolidate cu CFRP au cedat într-o manieră casantă (fragilă) în contrast cu cedarea ductilă a elementului fără gol neconsolidat. Trei dintre elemente: cel cu golul de 1100x1400 mm, cel cu golul de 1100x1000 consolidat cu benzi de CFRP și cel cu golul dispus la margine au cedat la o încărcare mult mai mică decât încărcarea la care a cedat elementul fără gol neconsolidat.

În cadrul experimentului au fost observate patru moduri de cedare pentru astfel de elemente; trei moduri de cedare la încovoiere și unul de cedare la tăiere.

Modul I – cedarea e caracterizată prin apariția unor fisuri de încovoiere care unesc colțurile golului cu capetele reazemelor. Acest mod de cedare caracterizează elementele la care raportul dintre deschiderea golului și deschiderea totală a elementului este mare.

Modul II – cedarea e caracterizată de desprinderea materialului FRP inițiată de o fisură de încovoiere sau de încovoiere cu tăiere, desprindere care se propagă spre un capăt al FRP-ului. Acest mod de cedare s-a produs la elementul la care golul a fost plasat în marginea elementului.

Modul III – cedarea e caracterizată de desprinderea FRP-ului inițiată la capătul sau aproape de capătul fâșiilor. Acest tip de cedare s-a produs la elementele consolidate cu elemente groase din FRP cu o rigiditate mare.

Modul IV – cedarea la tăiere. Această cedare se produce la elementele la care capacitatea de rezistență la încovoiere depășește capacitatea de rezistență la tăiere. Acest mod de cedare s-a produs la un singur element, element care în final a atins cea mai mare capacitate portantă.

În articol se propune și un model analitic pentru evaluarea capacității ultime a plăcilor din beton armat consolidate cu FRP, model a cărui acuratețe este demonstrată de încercările experimentale.

Prin consolidarea cu CFRP se obține o refacere a rigidității și capacității portante a elementelor. Toate elementele consolidate au avut o capacitate mai mare decât elementul cu gol neconsolidat iar unele din elementele consolidate au avut capacitate mai mare chiar și decât elementul fără gol. S-a observat că lățimea golului are o influență mai mare asupra capacității portante ultime a elementului decât lungimea golului. În Fig. 4.5. este prezentat modul de dispunere a elementelor de consolidare în jurul golurilor [099]

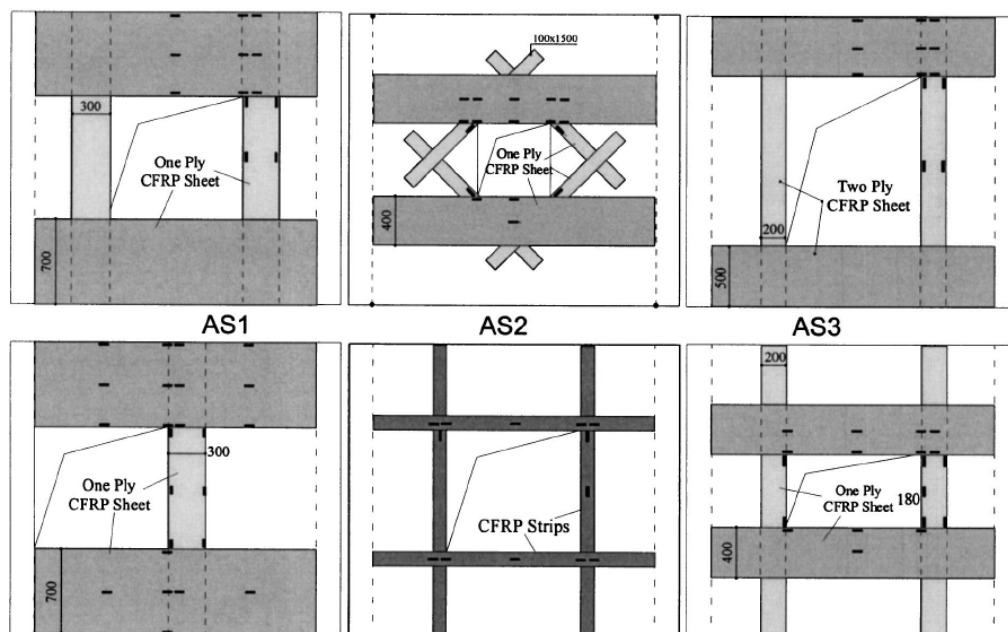


Fig. 4.5. - Modul de dispunere a elementelor de consolidare în jurul golurilor [099]

4.1.11. Cercetări efectuate de Bonaldo, Barros și Lourenço - 2008 [048]

Încercările experimentale efectuate de acest grup de cercetători a avut ca scop o investigare a soluției de consolidare a plăcilor unidirecționale de beton armat cu armături compozite montate în șlițuri. În același timp, este evaluată și performanța structurală a unei tehnici hibride de consolidare a acestor tipuri de elemente. Tehnica presupune utilizarea compozitelor polimerice lipite în zona întinsă a elementului, concomitent cu turnarea pe suprafața comprimată a unui strat de beton armat dispers cu fibre de oțel.

Elementele încercate au fost plăci unidirecționale, simplu rezemate pe latura scurtă, având dimensiunile de 1800x300x80 mm. Au fost încercate trei serii de elemente: 1 - elemente de referință (neconsolidate); 2 - elemente consolidate cu compozite montate în șlițuri; 3 - elemente consolidate cu compozite montate în șlițuri și cu strat de beton armat dispers cu fibre de oțel.

Concluziile cercetărilor au fost că tehnica hibridă de consolidare propusă este una foarte eficientă și promițătoare. Creșterea de capacitate la limita de serviciu înregistrată pentru elementele consolidate cu această tehnică a fost de 244% față de plăcile neconsolidate. Capacitatea portantă în starea limită ultimă a crescut cu 350%. Ambele tehnici de consolidare îmbunătățesc foarte mult comportarea elementelor din punct de vedere al apariției, deschiderii și propagării fisurilor, distanța medie dintre fisuri scăzând semnificativ. Ductilitatea elementelor din seria 3 nu este afectată, fiind similară cu cea a elementelor neconsolidate. Principiul de consolidare utilizând tehnica hibridă propusă este prezentat în Fig. 4.6.

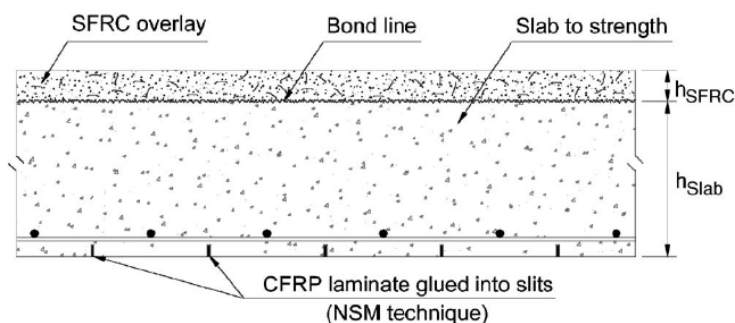


Fig. 4.6. - Principiul de consolidare utilizând armături compozite montate în șlițuri și un strat de beton armat dispers cu fibre de oțel [048]

4.1.12. Cercetări efectuate de Foret și Limam - 2008 [076]

Secțiunea experimentală a programului de cercetare constă în încercarea până la rupere a patru plăci plane de beton armat având dimensiunile de 1150x1650x70 mm. Pentru armarea elementelor s-au utilizat bare de oțel având diametrul de 6 mm, dispuse la câte 30 cm. Plăcile au fost simplu rezemate pe întreg conturul și au fost supuse unei încărcări concentrate ce acționează în centrul plăcilor. O placă neconsolidată a servit ca martor pentru restul de trei plăci consolidate cu materiale compozite polimerice. Pentru consolidarea a două plăci s-au folosit lamele de CFRP, iar pentru consolidarea celei de-a treia s-au folosit

armături de CFRP montate în șlițuri. Lamelele și armăturile de CFRP prezintă valori identice ale modulului de elasticitate.

Ambele tehnici de consolidare sporesc capacitatea portantă a elementelor, obținându-se valori cu aproximativ 67% mai mari decât pentru elementele neconsolidate.

Concluzia studiului este că tehnica de montare a armăturilor în șlițuri este mai economică din punct de vedere al consumului de material compozit față de tehnica lamelelor lipite pe suprafața exterioară. Sporul de capacitate adus de cele două tehnici nu variază semnificativ, însă consumul de fibre este mai mare cu 40% în cazul utilizării lamelelor lipite pe suprafața exterioară. În același timp, utilizarea armăturilor montate în șlițuri duce la o comportare mai ductilă a elementului consolidat în raport cu elementele la care s-au folosit lamele.

4.1.13. Cercetări efectuate de Elsayed, Ebead și Neale - 2009

[064]

Programul de cercetare este compus din două secțiuni, una experimentală și una teoretică. În cadrul secțiunii experimentale sunt prezentate rezultatele obținute prin încercarea în laborator a nouă plăci de beton armat. Cele nouă elemente au fost grupate în două serii. Astfel, prima serie a constat în cinci plăci fără goluri, în timp ce a doua serie a fost constituită din restul de patru plăci ce au avut un gol central pătrat de 800 mm. Câte un element din fiecare serie a fost testat neconsolidat, servind ca martor.

Plăcile au fost pătrate, având dimensiunile de 2600x2600x120 mm, au fost simplu rezemate pe contur, colțurile fiind blocate pentru a împiedica ridicarea acestora. Elementele au fost poziționate orizontal, încărcarea acționând gravitațional. Pentru elementele întregi, încărcarea a fost distribuită pe o suprafață centrală de 400x400 mm, în timp ce, pentru elementele cu goluri, s-a creat o rețea de grinzi ce a distribuit încărcarea totală sub formă de încărcări liniare ce acționau în jurul golurilor, de-a lungul unui perimetru de 1000x1000 mm. Încercările au fost efectuate în control de deplasare.

Pentru consolidarea plăcilor s-au aplicat două soluții diferite: cea „clasică”, în care lamelele au fost lipite pe suprafața de beton prin intermediul unei rășini epoxidice (EB-FRP) și o altă metodă, prin care, fixarea elementului FRP de consolidare a fost asigurată prin o serie de ancore mecanice (MF-FRP). Lamelele utilizate la consolidare au avut dimensiunile de 2000x100x3,4 mm. Pentru elementele fără gol s-au utilizat șase lamele (câte trei de-a lungul fiecărei direcții) fiind dispuse în două configurații diferite, conform Fig. 4.7. Pentru elementele fără gol s-au utilizat patru lamele dispuse în jurul golului, câte una pe fiecare latură, conform Fig. 4.7.

Pentru plăcile fără gol, în conformitate cu rezultatele prezentate de autori, se poate considera că tehnica de fixare mecanică utilizată de aceștia (MF-FRP), conduce la o comportare superioară tehnicii tradiționale (EB-FRP) atât din punct de vedere al ductilității cât și a capacității ultime și a limitei de serviciu. Totuși, în cazul seriei de elemente cu gol, tehnica EB-FRP s-a dovedit a da rezultate superioare. Ambele soluții au condus la forțe ultime capabile mai mari decât în cazul elementelor neconsolidate cu valori ce variază între 28% și 66% pentru elementele fără gol și între 32% și 47% pentru elementele cu gol.

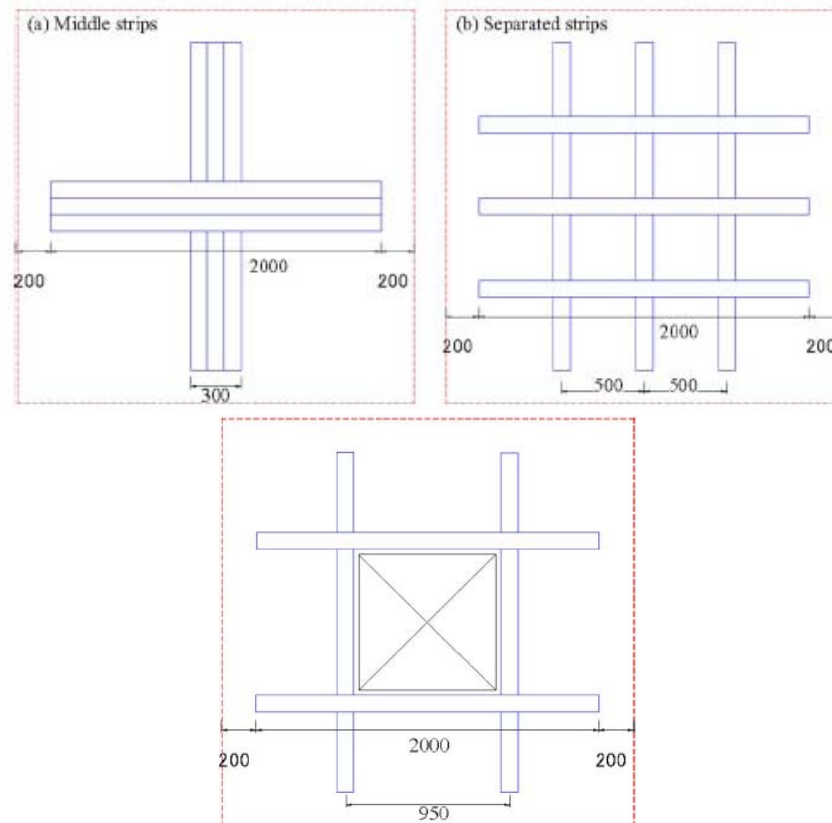


Fig. 4.7. - Configurații de dispunere a lamelor [064]

4.1.14. Cercetări efectuate de Smith și Kim - 2009 [098]

Programul de cercetare efectuat de către autori conține încercări pe plăci de beton armat unidirecționale cu goluri amplasate central. Au fost încercate șase elemente, patru definite de autori ca fiind late și două înguste. Cele patru plăci late au avut dimensiunile de 2500x3400x160 mm fiind simplu rezemate de-a lungul laturii scurte. În interiorul acestor plăci s-a creat câte un gol de 900x1200 mm. Astfel, aceste plăci se pot împărți în trei zone distincte: o fâșie centrală, paralelă cu latura lungă a plăcii și având lățimea de 900 mm (înglobând golul) și două fâșii marginale, paralele tot cu latura lungă, situate în lateralul golului. Cele două plăci înguste au avut dimensiunile de 800x3400x160 mm, fiind și ele simplu rezemate de-a lungul laturii scurte. Practic, elementele înguste sunt identice cu fâșiile marginale din cadrul elementelor late. Elementele au fost testate în poziție orizontală, fiind încărcate în sens antigravitațional prin intermediul unor forțe distribuite liniar poziționate paralel cu laturile scurte în vecinătatea golului. Două configurații de încărcare au fost utilizate. În prima configurație, s-au utilizat forțe distribuite liniar în zona fâșiilor marginale, în timp ce în a doua configurație, forța a fost distribuită doar pe lățimea fâșiei centrale. În Fig. 4.8. se pot observa caracteristicile

geometrice ale celor două tipuri de plăci, poziția și dimensiunile golurilor, poziția liniilor de încărcare și a reazemelor.

Trei plăci din totalul de șase au servit ca elemente de control, două fiind plăci din prima serie (plăci late) iar a treia din a doua serie (plăci înguste). Celelalte trei plăci au fost consolidate.

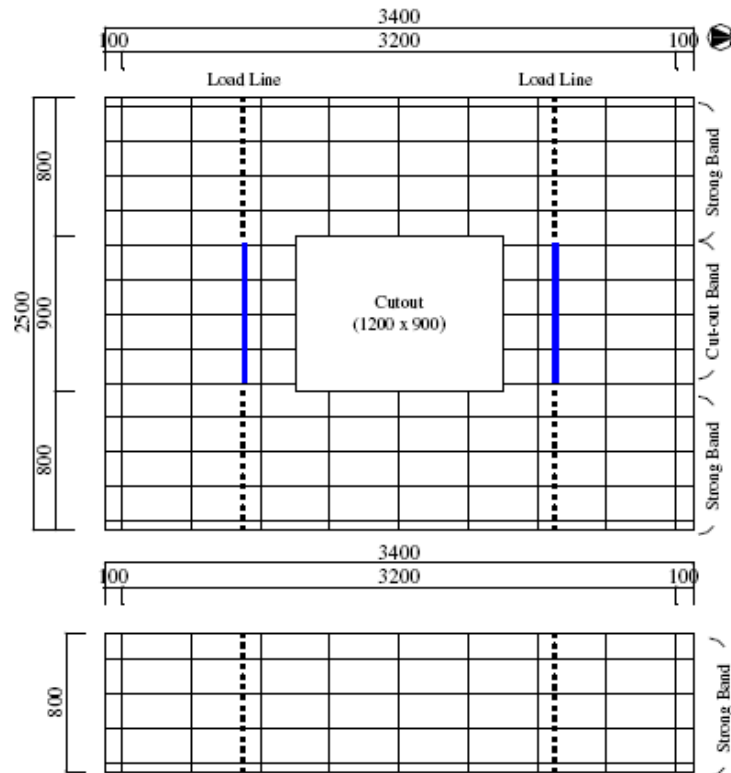


Fig. 4.8. - Caracteristicile celor două serii de elemente experimentale [098]

Pentru consolidarea celor trei plăci s-au utilizat fâșii de CFRP a câte două straturi de țesături aplicate prin procedura umedă. Grosimea fiecărui strat de țesătură a fost de 0,117 mm, având o lățime de 175 mm. Pentru cele două plăci late s-au utilizat patru astfel de fâșii, iar pentru elementul îngust, două. Configurația în care au fost aplicate elementele compozite pentru consolidare este prezentată în Fig. 4.9. Cantitatea de material FRP aplicat pentru a consolida placa a fost determinată pe baza unei echivalări cu cantitatea de armătură de oțel eliminată prin tăierea golului, ținându-se cont și de dezlipirea prematură a fâșiilor de țesătură din moment ce nu s-au folosit ancoraje speciale.

Cele trei elemente de control au fost încercate până în momentul în care deplasarea verticală de la mijlocul acestora a atins o valoare de aproximativ 100 mm, din cauza limitei de cursă a pistonului. În momentul în care încercarea a fost oprită, armăturile întinse erau în curgere, betonul comprimat nefiind zdrobit.

Elementele consolidate au cedat după instalarea unei forme a fenomenului de dezlipire. După dezlipire, elementele au fost încărcate în continuare, încercările fiind oprite în momentul în care deplasarea verticală de la mijlocul acestora a atins o valoare de aproximativ 100 mm, tot din cauza limitei de cursă a pistonului.

Prin aplicarea sistemelor de consolidare, plăcile au avut capacități portante sporite cu 56%, 52% și respectiv 60% față de elementele de control corespunzătoare, neconsolidate. În același timp, prin consolidare, s-a înregistrat și o sporire a rigidității elementelor dar, așa cum era de așteptat, o scădere a ductilității.

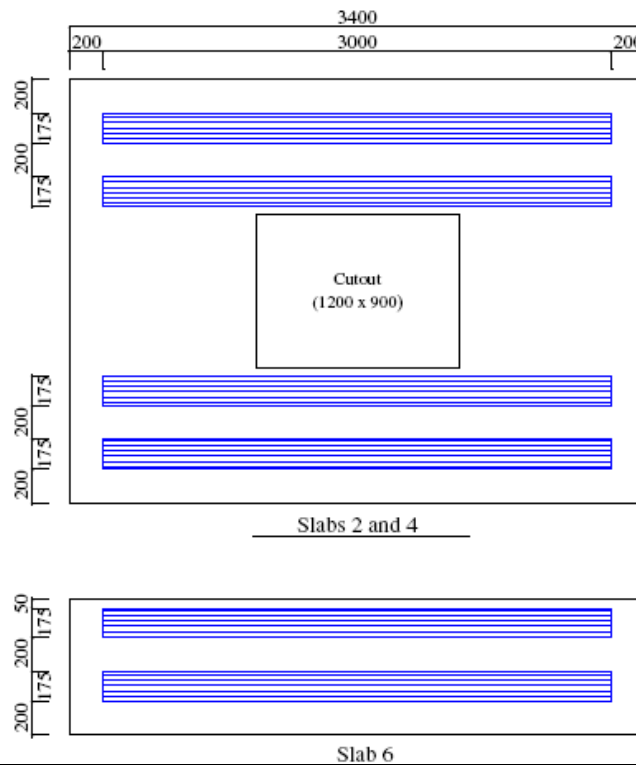


Fig. 4.9. - Configurații de dispunere a țesăturilor [098]

4.2. Principii, prevederi și recomandări privind consolidarea cu CFRP

4.2.1. Caracteristicile șlițurilor

Așa cum se poate observa în figurile 3.3., 3.4. și 3.5., cele două dimensiuni ale șlițurilor (lățime și adâncime) sunt notate „ b_g ” și respectiv „ h_g ”. Codul american ACI 440.2R-08 [032] recomandă ca lățimea șlițului să fie cel puțin egală cu valoarea obținută prin înmulțirea lățimii armăturii FRP cu 1,5. Totuși, când se utilizează benzi și nu bare de FRP, această recomandare nu prea poate fi respectată din considerente constructive ce ar impune lățimi foarte mici ale șlițurilor (pentru lățimi uzuale de benzi de 1,2 mm, ar rezulta lățimi de șlițuri de 1,8 mm, ceea ce ar implica

o aplicare practică extrem de laborioasă). Pentru benzi de FRP, recomandarea făcută de ACI 440.2R-08 [032] este ca lățimea șlițului să fie cel puțin egală cu valoarea obținută prin înmulțirea lățimii armăturii FRP cu 3. Adâncimea minimă a șlițurilor este recomandată atât pentru cazul utilizării barelor FRP cât și pentru cazul utilizării benzilor FRP, să fie cel puțin egală cu valoarea obținută prin înmulțirea înălțimii armăturii FRP cu 1,5. Bineînțeles că, termenii „lățime” și „înălțime” utilizați pentru armăturile FRP în formulările anterioare, se referă, în cazul barelor circulare, la diametrul acestora.

Conform unor recomandări din codrul american ACI 440.2R-08 [032], distanța liberă dintre două șlițuri alăturate trebuie să fie mai mare decât valoarea obținută prin înmulțirea adâncimii șlițurilor cu 2, pentru a evita suprapunerea eforturilor unitare de întindere ce se dezvoltă în jurul barelor și a benzilor de FRP. În același timp, distanța minimă la care se poate amplasa un șliț față de marginea elementului consolidat trebuie să fie mai mare decât valoarea obținută prin înmulțirea adâncimii șlițurilor cu 4, pentru a minimaliza efectele de margine ce pot accelera cedarea prin pierderea aderenței. Toate recomandările menționate mai sus sunt ilustrate grafic în Fig. 4.10. În aceeași figură cele două tipuri de armături FRP (bandă și bară circulară) coexistă în aceeași soluție de consolidare din rațiuni legate pur de reprezentare. De regulă, pentru a consolida un element de beton armat, nu se utilizează decât un tip de armătură FRP.

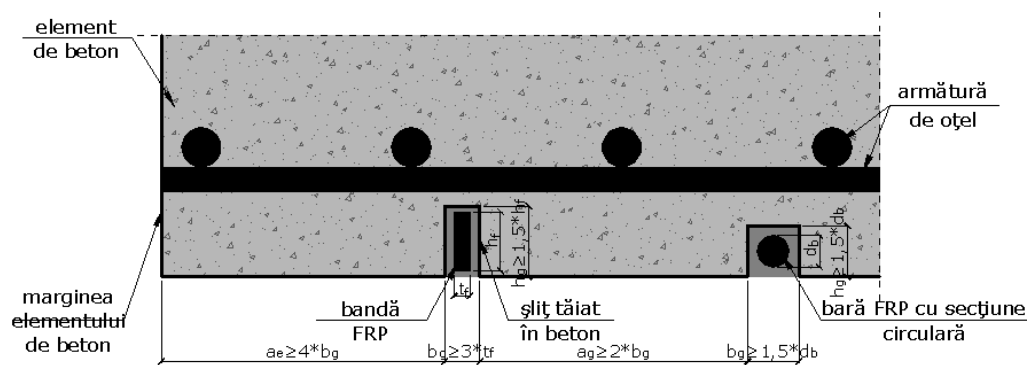


Fig. 4.10. - Recomandări constructive pentru șlițuri conform ACI 440.2R-08

Încercări experimentale efectuate de De Lorenzis [054] au dovedit că limitările impuse de ACI 440.2R-08 [032] cu privire la distanțele „ a_e ” și „ a_g ” pentru a elimina interacțiunea dintre armătura FRP și marginea grinzii sunt totuși insuficiente, din moment ce una dintre grinzile încercate de acest cercetător au cedat prin fenomenul de dezlipire a armăturii FRP, simultan cu exfolierea stratului de acoperire cu beton a armăturilor marginale.

Blaschko, într-o lucrare din 2003 [049] recomanda ca lățimea și adâncimea șlițurilor să fie cu aproximativ 3 mm mai mari decât lățimea și înălțimea benzilor de FRP, pentru a obține o grosime a stratului de adeziv de 1-2 mm. Tot Blaschko [049] recomanda ca distanța de la marginea elementului la centrul șlițului marginal să fie mai mare decât minimul dintre 30 mm și dimensiunea maximă a agregatului utilizat la realizarea betonului.

Un studiu experimental al lui Boldano ș.a. publicat în 2008 [048], în care s-au folosit benzi de FRP având lățimi de 1,20 mm montate în șlițuri cu lățimi variind între 4,00 și 14,00 mm, a demonstrat că pentru tipul respectiv de elemente

consolidate (plăci unidirecționale de beton armat), lățimea șlițului nu a avut nici o influență asupra comportării elementului.

Codul canadian pentru proiectarea podurilor (CAN/CSA-S6-2006) [035] nu permite utilizarea tehnicii NSMR pentru elemente de beton armat la care stratul de acoperire de beton este mai mic de 20 mm.

Cel mai uzual adeziv și care conduce la comportarea cea mai bună este reprezentat de rășinile epoxidice bi-componente. În marea majoritate a aplicațiilor acestei tehnici de consolidare, adezivul trebuie să aibă o vâscozitate ridicată pentru a conferi lucrabilitate corespunzătoare întregii operațiuni. În anumite situații (consolidarea zonelor superioare a elementelor de beton armat) se poate opta pentru un adeziv cu o vâscozitate redusă, acesta putându-se practic turna în șlițuri. [054].

4.2.2. Limitări ale deformațiilor specifice și ale eforturilor

Codul canadian pentru proiectarea podurilor (CAN/CSA-S6-2006) [035] include o secțiune ce conține câteva recomandări privind utilizarea sistemelor de consolidare cu materiale compozite polimerice, utilizând atât tehnica lipirii la exterior cât și tehnica montării în șlițuri. Se recomandă ca pentru starea limită ultimă, la elemente supuse la încovoiere, pentru ambele tehnici să se lucreze cu o deformație specifică în compozit de 0,006 (6‰). Limitările de eforturi unitare în compozit în stadiul limită de serviciu sunt recomandate diferit, în funcție de tipul de fibre utilizate, astfel: pentru fibre de sticlă $0,25 \cdot f_{ult}$, pentru fibre de aramidă $0,35 \cdot f_{ult}$, iar pentru fibre de carbon $0,65 \cdot f_{ult}$.

Raportul tehnic 55 (TCS-TR55) [044] al unui organism din Marea Britanie („The Concrete Society”, în traducere Societatea pentru Beton) prezintă o serie de recomandări și principii călăuzitoare pentru consolidarea structurilor de beton armat utilizând materiale compozite polimerice. Raportul se intitulează „Design Guidance for Strengthening Concrete Structures using Fibre Composite Materials” (în traducere „Principii pentru proiectarea consolidărilor structurilor de beton utilizând materiale compozite”) și reprezintă o chintesență a experienței britanice de aplicare a acestui tip de consolidare. Codul recomandă ca pentru starea limită ultimă, pentru elemente supuse la încovoiere, atât pentru tehnica EB-FRP cât și pentru NSMR-FRP, să se lucreze cu o deformație specifică în compozit de 0,008 (8‰). Dacă suplimentar solicitării de încovoiere, există solicitări semnificative de forță tăietoare, (spre exemplu zone cu forțe concentrate) codul recomandă să se lucreze cu o deformație specifică în compozit de 0,006 (6‰).

O limitare a efortului unitar tangențial longitudinal (de lunecare) pentru a împiedica propagarea fenomenului de dezlipire (debonding) este prezentată sub forma:

$$\tau = \frac{V \cdot a_f \cdot A_f \cdot (h - x)}{I_{CS} \cdot b_a} < 0,8 \frac{N}{mm^2} \quad (4.1.)$$

unde:

V - forța tăietoare ultimă

a_f - raportul dintre modulele de elasticitate ale compozitului și

betonului; $a_f = \frac{E_{fd}}{E_c}$

| | |
|----------|--|
| A_f | - aria lamelei FRP |
| h | - înălțimea secțiunii transversale |
| x | - poziția axei neutre a secțiunii consolidate |
| I_{CS} | - momentul de inerție al secțiunii echivalente de beton consolidată fisurată |
| b_a | - grosimea stratului de adeziv |

Pentru a evita apariția unui mod de cedare prin pierderea aderenței la elementele consolidate prin tehnica EB-FRP și respectiv NSMR-FRP, valoarea maximă a deformației specifice care poate să apară în elementul FRP trebuie limitată la valoarea deformației specifice la care se instalează fenomenul de desprindere („debonding”). Stabilirea acestei limitări propuse de codul american ACI-440.2R-08 [034] se face pe baza Rel. 4.2. pentru tehnica EB-FRP.

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f'_c}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0,9 \cdot \varepsilon_{fu} \quad (4.2.)$$

unde:

| | |
|--------------------|--|
| f'_c | - rezistența specifică la compresiune a betonului |
| n | - numărul de straturi din sistemul FRP |
| E_f | - modulul de elasticitate al sistemului FRP |
| t_f | - grosimea unui strat a sistemului FRP |
| ε_{fu} | - valoarea de calcul a rezistenței la rupere a elementului FRP |

Pentru tehnica NSM-FRP, valoarea deformației specifice la care se instalează fenomenul de desprindere („debonding”) nu se calculează conform Rel. 4.2., ci este recomandată în codul ACI-440.2R-08 [034] la valoarea din Rel. 4.3.:

$$\varepsilon_{fd} = 0,7 \cdot \varepsilon_{fu} \quad (4.3.)$$

Codul suedez BBK 94 [043] stabilește criteriul de cedare a elementelor de beton armat consolidate cu compozite la valori ale deformației specifice conform relației de mai jos:

$$\varepsilon_f = 0,6 \cdot \varepsilon_{fu} \quad (4.4.)$$

Același cod suedez impune utilizarea unei valori reduse a modulului de elasticitate a elementului FRP, evaluat pe baza formulei de mai jos:

$$E_f = \frac{E_{fk}}{\eta \cdot \gamma_m \cdot \gamma_n} \quad (4.5.)$$

unde:

- E_f - valoarea de calcul a modulul de elasticitate
 E_{fk} - valoarea caracteristică a modulul de elasticitate
 η - factor ce ia în considerare diferențele dintre proprietățile unei epruvete și cele ale unei construcții. Valoarea recomandată este $\eta = 1,10$
 γ_m - coeficient parțial de siguranță pentru proprietățile materialului
 γ_n - coeficient ce ține seama de clasa (importanța) construcției. Valorile acestui coeficient variază între $\gamma_n = 1,00 \dots 1,20$.

Există și o serie de recomandări făcute de anumiți cercetători și specialiști în domeniu în cadrul unor lucrări științifice. Astfel, spre exemplu, pentru elemente încovoiate, suedezul Taljsten [025] recomanda ca efortul în elementul CFRP să fie limitat la valoarea de 5‰, o valoare mai conservativă decât variantele recomandate de codurile existente.

Această abordare a limitării în calcule a deformațiilor specifice din materialul FRP pentru a evita cedarea prematură a elementelor prin pierderea aderenței este abordarea utilizată în calcule la momentul actual, fiind așa cum s-a arătat mai sus, înglobată în recomandările din codurile de proiectare existente. Totuși, s-a demonstrat că valoarea deformației specifice la care se inițiază fenomenele de dezlipire depinde de o serie întreagă de factori, cum ar fi: proprietățile materialului FRP și ale betonului, modul de încărcare, deschiderea, numărul și distribuția fisurilor, etc. Din acest motiv, o limitare a deformației specifice în compozit nu reprezintă o abordare foarte corectă pentru toată gama de aplicații, putând conduce, în unele situații, la o utilizare extrem de neeconomică a materialului FRP.

4.2.3. Lungimi de ancoraj

Lungimea de ancoraj reprezintă o caracteristică de o importanță esențială în detalierea corespunzătoare a unui sistem de consolidare cu materiale FRP.

Conform definiției din codul american ACI-440.2R-08 [034], lungimea de ancoraj reprezintă lungimea necesară pentru a obține rezistența necesară a unei armături într-o secțiune critică. Definită altfel, lungimea de ancoraj reprezintă zona pe care este distribuită capacitatea de aderență a sistemului de consolidare. Teste de laborator au demonstrat că există o așa-numită lungime critică de ancoraj, peste a cărei valoare ancorajele nu mai contribuie la sporirea capacității portante dar sporesc siguranța.

Pe baza formulelor propuse de Teng [101], codul american ACI-440.2R-08 [034] stabilește ca lungimile minime de ancoraj, pentru sisteme de consolidare cu materiale FRP utilizând tehnica EB-FRP, să fie calculate cu Rel. 4.6.

$$l_{df} = \sqrt{\frac{n \cdot E_f \cdot t_f}{\sqrt{f'_c}}} \quad (4.6.)$$

unde:

- n - numărul de straturi din sistemul FRP
 E_f - modulul de elasticitate al sistemului FRP

t_f - grosimea unui strat a sistemului FRP

f'_c - rezistența specifică la compresiune a betonului

Același cod american recomandă pentru calculul lungimii minime de ancoraj în cazul sistemelor de consolidare utilizând tehnica NSMR-FRP, Rel. 4.7. pentru sisteme ce utilizează armături FRP cu secțiuni dreptunghiulară și Rel. 4.8. pentru sisteme ce utilizează armături FRP cu secțiune circulară.

$$l_{db} = \frac{a_b \cdot b_b}{2 \cdot (a_b + b_b) \cdot (\tau_b)} \cdot f_{fd} \quad (4.7.)$$

$$l_{db} = \frac{d_b}{4 \cdot (\tau_b)} \cdot f_{fd} \quad (4.8.)$$

unde:

a_b - latura scurtă a secțiunii transversale a armăturii FRP dreptunghiulare

b_b - latura lungă a secțiunii transversale a armăturii FRP dreptunghiulare

d_b - diametrul secțiunii transversale a armăturii FRP circulare

f_{fd} - rezistența de calcul a armăturii FRP

τ_b - valoarea medie a efortului tangențial de aderență. Valoarea acestui efort este recomandată $\tau_b = 6,90 \text{ MPa}$.

Raportul TCS-TR55 [044] propune modelul prezentat de Neubauer și Rostasy expunând relația forță de aderență - lungime de ancoraj ($F_k - l_t$) sub forma unui grafic (Fig. 4.11.) ce are interpretarea expusă și în al doilea paragraf al prezentului subcapitol, și anume că forța de aderență crește odată cu creșterea lungimii de ancoraj, însă doar până la o anumită valoare limită (forță de aderență critică definită de lungimea critică de ancoraj). La valori superioare lungimii critice de ancoraj nu se mai pot atinge valori superioare ale forței de aderență.

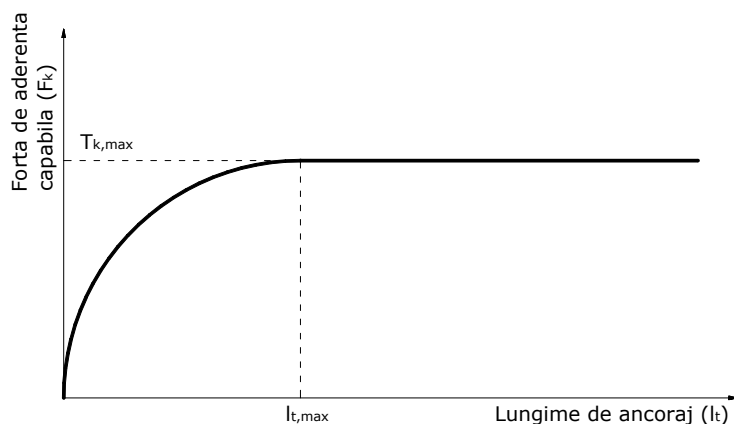


Fig. 4.11. - Relația forță de aderență - lungime de ancoraj (cf. [044])

Forță de aderență capabilă maximă și lungimea critică de ancoraj se evaluează pe baza Rel. 4.9. și respectiv Rel. 4.10.

$$T_{k,max} = 0,5 \cdot k_b \cdot b_f \cdot \sqrt{E_f \cdot t_f \cdot f_{ctm}} \quad (4.9.)$$

$$l_{t,max} = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{f_{ctm}}} \quad (4.10.)$$

unde:

$$k_b \quad - \text{factor de geometrie evaluat astfel: } k_b = 1,06 \cdot \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b_w}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1,00$$

b_f - lățimea elementului FRP

b_w - dimensiune efectivă a secțiunii (lățimea secțiunii transversale a grinzii sau distanța dintre elementele FRP în cazul plăcilor)

t_f - grosimea elementului FRP

E_f - modulul de elasticitate al elementului FRP

f_{ctm} - rezistența la întindere a stratului de acoperire din beton

$$f_{ctm} = (f_{cu})^{2/3}.$$

În cazul în care din diverse rațiuni tehnologice nu se poate asigura lungimea critică de ancoraj, ci se asigură doar o anumită lungime (l_t), forța de aderență capabilă va fi bineînțeles mai mică decât valoarea maximă, putând fi calculată cu Rel. 4.11.

$$T_k = \left(T_{k,max} \cdot \frac{l_t}{l_{t,max}} \right) \cdot \left(2 - \frac{l_t}{l_{t,max}} \right) \quad (4.11.)$$

Buletinul nr. 14 al „fib” [037] propune același model al lui Holzenkämpfer modificat de Neubauer și Rostasy, existând însă diferențe de notații precum și o abordare mai exactă și diferențiată în funcție de diverse situații, față de TCS-TR55 [044]. Forța de aderență capabilă maximă și lungimea critică de ancoraj se evaluează pe baza Rel. 4.12. și respectiv Rel. 4.13.

$$N_{fa,max} = a \cdot c_1 \cdot k_c \cdot k_b \cdot b_f \cdot \sqrt{E_f \cdot t_f \cdot f_{ctm}} \quad (4.12.)$$

$$l_{b,max} = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{c_2 \cdot f_{ctm}}} \quad (4.13.)$$

unde:

a - factor de reducere aplicat pentru a ține cont de influența fisurilor înclinate asupra capacității de aderență. Uzual $a = 0,90$, dar $a = 1,00$ în cazul grinzilor cu suficientă armătură de tăiere și la plăci

- c_1 - coeficient ce poate fi determinat experimental (pentru lamele din CFRP $c_1 = 0,64$)
- k_C - coeficient ce ține seama de starea de compactare a betonului pe care este lipit materialul FRP. În general $k_C = 1,00$, dar pentru situații în care materialul FRP este lipit pe fețe cu compactare redusă (ex: fețe care nu sunt în contact cu cofrajul în timpul betonării) $k_C = 0,67$
- k_b - factor de geometrie evaluat astfel: $k_b = 1,06 \cdot \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1,00$
- b_f - lățimea elementului FRP
- b - dimensiune efectivă a secțiunii (lățimea secțiunii transversale a grinzii sau distanța dintre elementele FRP în cazul plăcilor)
- t_f - grosimea elementului FRP
- E_f - modulul de elasticitate al elementului FRP
- f_{ctm} - rezistența la întindere a stratului de acoperire din beton
- c_2 - coeficient ce poate fi determinat experimental (pentru lamele din CFRP $c_2 = 2,00$)

Pentru lungimi de ancoraj mai mici decât lungimea critică de ancoraj, formula de calcul a forței de aderență capabilă este dată sub forma Rel. 4.14., fiind identică din punct de vedere conceptual cu Rel. 4.11.

$$N_{fa} = N_{fa,max} \cdot \frac{l_b}{l_{b,max}} \cdot \left(2 - \frac{l_b}{l_{b,max}} \right) \quad (4.14.)$$

Între diversele coduri, există și diferențe de abordare cu privire la stabilirea punctului de la care se extinde lungimea de ancoraj. Astfel, în codul britanic [044] se specifică faptul că cedarea zonei de ancoraj poate fi evitată respectând două condiții: limitarea eforturilor longitudinale dintre materialul FRP și substrat (la 0,80 MPa la SLU) și ancorarea materialului FRP prin extinderea sa după punctul în care teoretic materialul FRP nu mai este necesar.

Buletinul nr. 14 al „fib” [037] recomandă ca pentru consolidarea în zona de câmp a grinzilor simplu rezemate, elementele cu o singură deschidere, distanța dintre marginea elementului FRP și fața reazemului să nu depășească 50 mm. În cazul armării în zonele de reazem a grinzilor continue, elementele FRP trebuie ancorate în zona comprimată.

Codrul american [034] stabilește ca pentru elementele simplu rezemate de beton armat, elementele FRP să se dispună în așa fel încât ele să depășească cu lungimea de ancoraj punctul în care pe diagrama de momente încovoietoare se determină momentul de fisurare. Pentru elementele continue de beton armat, elementele FRP se dispun în așa fel încât ele să depășească cu lungimea de ancoraj punctul de inflexiune din diagrama de momente încovoietoare (pct cu M=0).

Codul german [036] impune ca zona de ancoraj să fie în afara zonei întinse.

4.2.4. Distanțe între elementele de consolidare

Distanțele maxime și minime dintre elementele FRP de consolidare reprezintă un parametru important în special în cazul consolidării elementelor plane. Referitor la plăcile de beton armat, detalierea de principiu a consolidării cu materiale FRP ar trebui să se realizeze pe baza principiilor care fundamentează armarea internă a unor astfel de elemente. Aceasta presupune, printre altele, că distanțele mari între lamelele sau țesăturile din materiale FRP trebuie evitate deoarece pot conduce la o cedare prematură, cauzată de străpungerea produsă în zonele rămase neconsolidate.

În cazul aplicării tehnicii EB-FRP buletinul nr. 14 al „fib” [037] stabilește o serie de limitări ce trebuie respectate privind distanțele maxime dintre elemente. Aceste limitări sunt reproduse în Rel. 4.15. Același document impune ca distanța minimă de la marginea elementului consolidat până la elementul FRP adiacent să fie cel puțin egală cu grosimea stratului de acoperire a armăturii interne.

$$s_{f,max} \leq \begin{cases} 0,20 \cdot l \\ 5 \cdot h \\ 0,40 \cdot l_c \end{cases} \quad (4.15.)$$

unde:

- $s_{f,max}$ - distanța maximă dintre elementele FRP de consolidare
- h - grosimea elementului de beton armat
- l_c - lungimea consolei

Recomandarea unor specialiști [079] este ca distanța dintre două elemente FRP de consolidare să fie mai mică decât triplul grosimii plăcii de beton armat consolidate, sau chiar să se utilizeze țesături aplicate continuu pe întreaga suprafață.

O serie de recomandări privind aceste caracteristici în cazul tehnicii de consolidare utilizând armături compozite montate în șlițuri (NSMR-FRP) sunt prezentate în cadrul paragrafului 4.2.1. Un neajuns al acestor recomandări este reprezentat de faptul că nu sunt specificate distanțe maxime admise între benzile sau barele FRP precum nici între marginea elementului de beton armat consolidat și elementele FRP de consolidare.

5. MODELĂRI NUMERICE

5.1. Noțiuni generale

Pentru calculul și modelarea elementelor de construcții se pot utiliza o serie de metode analitice și numerice. Metodele analitice, cu toate că sunt exacte, ridică o serie de dificultăți în găsirea funcțiilor matematice capabile să satisfacă o serie de condiții în întreg elementul analizat. Din acest considerent, metodele analitice sunt limitate ca utilizare doar în cazul unor situații relativ simple. Metodele numerice sunt întotdeauna aproximative, însă utilizarea lor se justifică pentru situații complexe. Provocarea ce trebuie depășită atunci când se utilizează metode numerice este reprezentată de găsirea unor posibilități de modelare ce implică erori rezonabile, acceptabile. Dintre metodele numerice existente, cea mai des utilizată în prezent este Metoda Elementelor Finite (MEF). Aceasta a fost introdusă în anii '60 de o serie de cercetători, fiind gândită pentru a rezolva aplicații din domeniul aeronauticii și a ingineriei civile. Metoda reprezintă în esență un mijloc de determinare a unor soluții aproximative pentru o serie de ecuații diferențiale. Ecuațiile diferențiale se rezolvă pe un anumit domeniu, acesta fiind împărțit în o rețea de sub-domenii (elemente finite) a căror mărime și tip depinde de modul de discretizare ales. Elementele finite rezultate în urma discretizării elementului sunt considerate ca elemente independente care sunt interconectate prin noduri situate la limita fiecărui element finit. Acuratețea metodei depinde în mare parte de dimensiunile elementelor finite și de tipul acestora.

Programul de calcul ales pentru efectuarea modelărilor numerice este ATENA 3D [007] (Advanced Tool for Engineering Nonlinear Analysis) dezvoltat de compania Cervenka Consulting.

5.2. Similitudini încercări experimentale - modele numerice

Elementele se modelează în totalitate, fără a introduce linii sau planuri de simetrie. Acest procedeu sporește considerabil durata fiecărei analize, însă elimină o serie de inexactități ce ar putea fi generate de aceste simetrii.

5.2.1. Modelul de ansamblu

Modelele numerice generate reproduc întocmai geometria elementelor experimentale, o serie de simplificări fiind aplicate doar în ceea ce privește elementele de rezemare, cu scopul de a reduce timpul necesar de rulare a analizelor. În același timp, modelul numeric nu ține cont de o serie de inexactități și abateri dimensionale ale acelorași elemente de rezemare. Vederi de ansamblu ale geometriei celor trei modele numerice sunt prezentate în Fig. 5.1. - Fig. 5.3.

Componentele modelului sunt exemplificate în Fig. 5.1. pentru modelul elementului întreg, fiind enumerate mai jos:

- elementul propriu-zis cu modelele de definire a materialelor (beton, armătură din oțel și materiale de consolidare din CFRP)
- piesa metalică utilizată pentru distribuirea încărcărilor
- elementele de reazem
- interfețe între piesă metalică - element și element - reazeme.

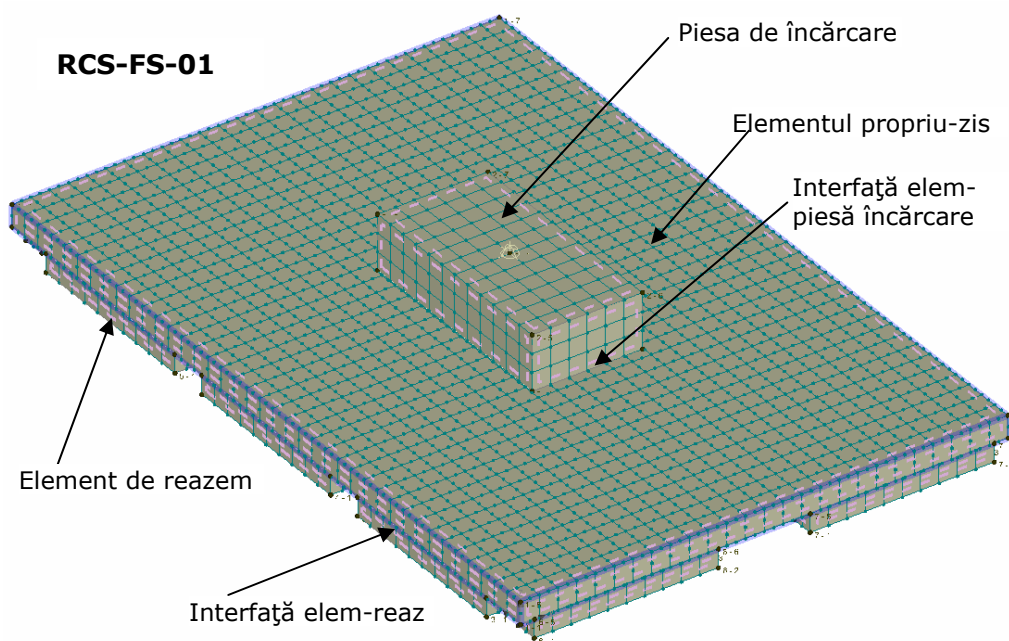


Fig. 5.1. - Geometria modelului RCS-FS-01

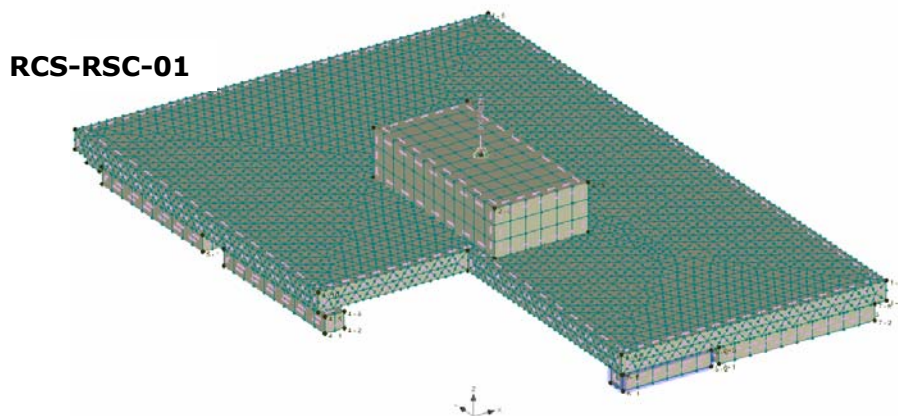


Fig. 5.2. - Geometria modelului RCS-RSC-01

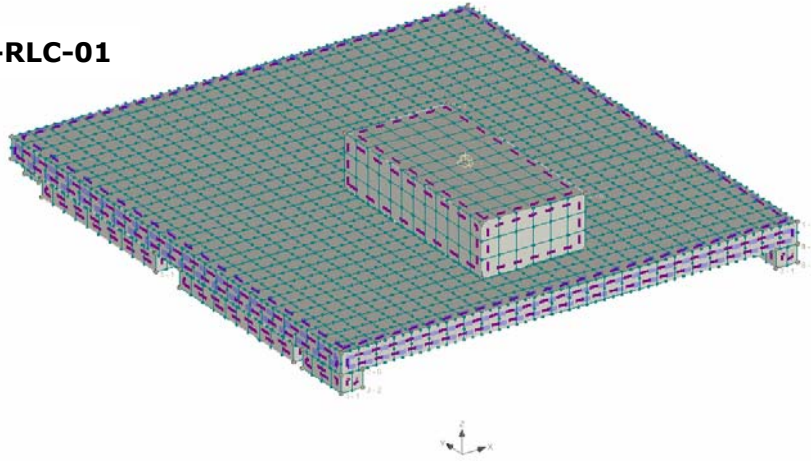
RCS-RLC-01

Fig. 5.3. - Geometria modelelor RCS-RLC-01 și RCS-RLC-02

5.2.2. Elementul propriu-zis

Specimenul este modelat utilizând elemente finite de volum, quadratice, de tip „Brick elements”. Elementele finite fac parte din familia CCIsoBrick, prezintă capacitate de comportare neliniară și dispun de maxim 20 de noduri de integrare. Dimensiunea la care a fost rafinată rețeaua de elemente finite este de 10 cm. Geometria acestora este prezentată în Fig. 5.4.

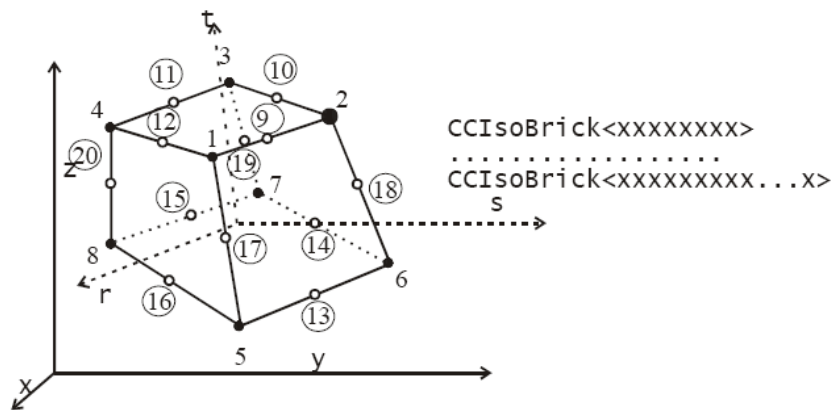


Fig. 5.4. - Geometria elementelor de tip CCIsoBrick cu 20 noduri de integrare (cf. [007])

5.2.2.1. Beton

Pentru beton s-a utilizat un model de material de tip „3D Nonlinear Cementitious 2”. Este un model ce combină modele constitutive de cedare la întindere (fisurare) și la compresiune (comportare plastică). Modelul de fisurare este

bazat pe formularea clasică a soluțiilor cu „smeared crack” precum și pe cea a benzilor fisurate. Modelul încorporează criteriul de cedare Rankine și comportare de plastifiere exponențială. Modelul de plasticizare se bazează pe cedarea de tip Menétrety-Willam a suprafețelor. Comportarea acestui tip de material este caracterizată de legea uniaxială efort unitar - deformație specifică prezentată în Fig. 5.5. și de o funcție de cedare biaxială ilustrată în Fig. 5.6.

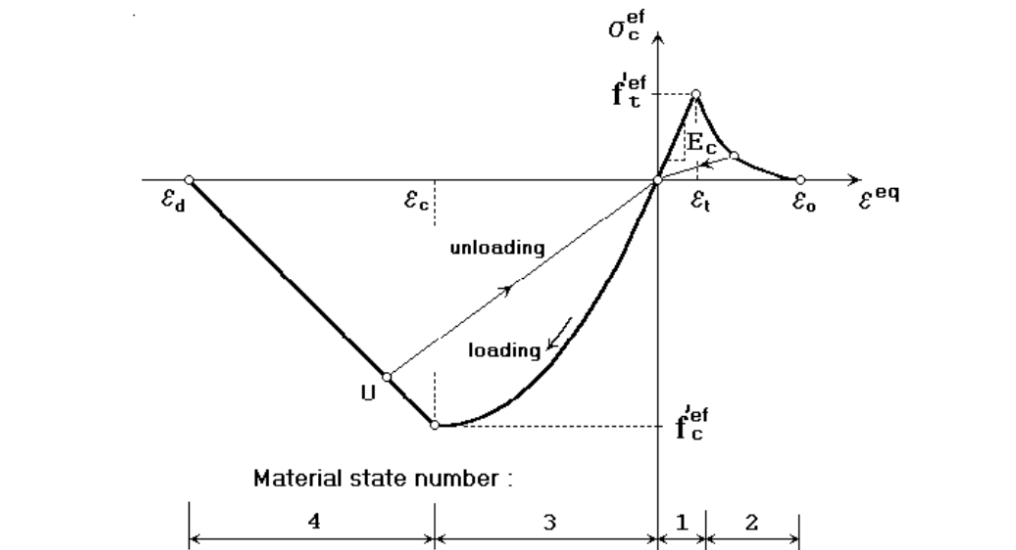


Fig. 5.5. - Legea uniaxială efort unitar - deformație specifică ce caracterizează comportarea materialului de tip 3D Nonlinear Cementitious 2 (cf. [007])

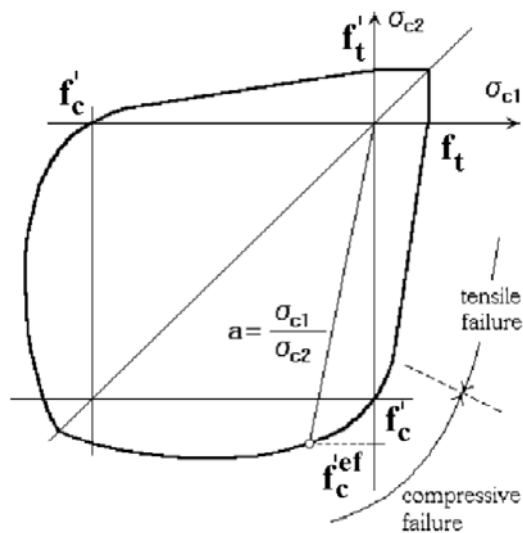


Fig. 5.6. - Funcția de cedare biaxială implementată pentru beton (cf. [007])

5.2.2.2. Armătura de oțel

Armăturile din oțel au fost modelate cu ajutorul unor elemente liniare, de tip „Truss”. Elementele finite fac parte din familia CCIsoTruss, sunt izoparametrice, prezintă capacitate de comportare neliniară și dispun de 2 de noduri de integrare. Fiecare bară de armătură a fost definită în parte, individual, neadoptându-se modele de genul „smeared reinforcement”. Se contează pe o aderență perfectă între armături și beton, nefiind modelate eventualele lunecări.

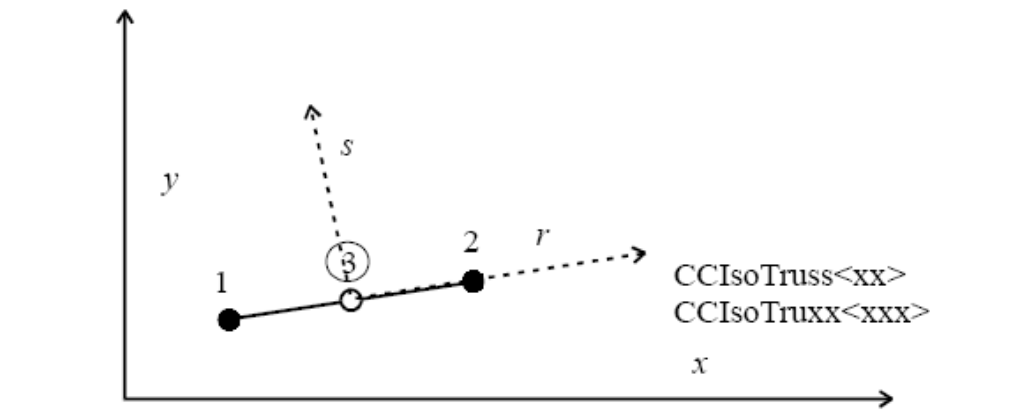


Fig. 5.7. - Geometria elementelor de tip CCIsoTruss (cf. [007])

Comportarea materialului este elastică - perfect plastică. Diagrama efort unitar - deformație specifică este prezentată în Fig. 5.8.

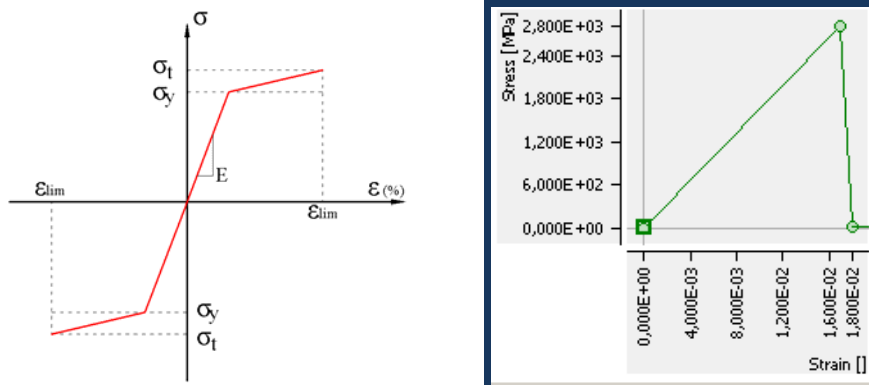


Fig. 5.8. - Curbe de comportare efort unitar - deformație specifică pentru armătura de oțel și pentru elementele CFRP de consolidare (cf. [007])

5.2.2.3. Elementele CFRP de consolidare

Elementele de CFRP au fost modelate utilizând același tip de element finit ca și în cazul armăturilor de oțel. Comportarea materialului este însă definită ca fiind

perfect liniară până la rupere, acest tip de material nedispunând de rezerve în domeniul plastic. O comportare neliniară a acestui tip de elemente se poate produce doar în cazul apariției unor fenomene de pierdere a aderenței, lunecări, etc. Cum însă modul de cedare dominant al elementelor de consolidare este prin ruperea fibrelor (excepție face lamela pultrudată montată pe elementul RCS-RSC-DS-01), adoptarea unui model de material cu comportare perfect elastică până la rupere este o soluție optimă. Conlucrarea dintre elementele CFRP și beton este considerată perfectă. Diagrama de comportare efort unitar - deformație specifică este prezentată în Fig. 5.8.

5.2.3. Piesa de încărcare

Piesa are rolul de a distribui încărcărea pe o suprafață de 600x1200 mm. Este modelată cu ajutorul elementelor de tip „Brick”, fiind alcătuită dintr-un material cu o comportare perfect elastică.

5.2.4. Rezemare

Așa cum este precizat în Cap. 6., plăcile sunt rezemate pe contur pe o zonă de 125 mm deasupra unor pereți din zidărie și beton armat. Aceștia sunt poziționați pe suprafața pardoselii halei de încercări. În cadrul modelărilor numerice, din volumul pereților doar colțul pe care reazemă plăcile a fost modelat. Pe latura inferioară a acestuia a fost definită o încastrare perfectă. Cum efortul la nivelul acestor elemente este foarte redus, modalitatea de modelare a acestora nu are nici o influență asupra rezultatelor modelului numeric. Astfel, s-a decis ca aceste reazeme ale plăcii să se modeleze cu elemente finite de tip „Brick” și să fie alcătuite dintr-un material cu o comportare perfect elastică.

5.2.5. Interfețe

Interfața dintre elementul propriu-zis și piesa de încărcare a fost modelată ca o conlucrare perfectă. Interfața dintre element și reazeme este însă extrem de importantă pentru acuratețea modelului numeric, aceasta fiind cea care simulează rezemarea reală a plăcilor pe reazeme prin intermediul patului de mortar. Aceasta trebuie să blocheze deplasările pe direcție gravitațională și să lase libere deplasările în sens antigravitațional, dând posibilitatea colțurilor să se ridice. S-a utilizat un model de material de tip CCIsoGap ce simulează această comportare.

5.2.3. Aplicarea încărcării

Încărcărea esteroară a fost aplicată concentrat în punctul central al piesei de încărcare. S-a luat în considerare și greutatea proprie a plăcii.

Rezultatele obținute pe modelele numerice sunt prezentate în Cap. 7., prin comparații cu rezultatele obținute pe cale experimentală.

6. PROGRAM EXPERIMENTAL

6.1. Introducere, repere

În multe situații sunt necesare anumite goluri după terminarea construcției în locuri neprevăzute inițial, în principal datorită unei schimbări a funcționalității. Există și cazul în care anumite goluri au fost prevăzute în cadrul proiectării inițiale dar datorită schimbărilor de funcționalitate sau destinație, cresc încărcările pe planșee iar comportarea acestora în ansamblu devine defectuoasă atât ca rezistență cât și ca rigiditate. Apariția acestor situații nu se traduce doar prin o simplă reducere a capacității portante și a rigidității plăcilor de beton armat, ci și printr-o modificare a modului inițial de cedare în forme de cedare neașteptate.

O mare parte din fondul construit din România a fost realizat în anii '70-'80. Locuințele multifamiliale realizate în această perioadă au fost construite în principal din beton armat în structuri prefabricate. În urma unui studiu amănunțit al proiectelor tip cu cea mai mare răspândire în Timișoara și în România s-a ales elementul de planșeu a cărui alcătuire s-a reprodus în cadrul prezentului program de cercetare. Practic, elementele încercate în cadrul prezentului program experimental sunt alcătuite într-un mod cvasi-similar cu plăcile de planșeu din cadrul structurilor din panouri mari prefabricate. Alegerea tipului de element reprodus în condiții de laborator a avut la bază și considerente funcționale, în sensul pretării doar a unor elemente de planșeu la soluțiile funcționale gândite.

Studiind toate elementele de placă de planșeu precum și planurile de arhitectură ale nivelurilor structurilor executate pe baza proiectelor tip, s-a stabilit elementul cel mai susceptibil la crearea de noi goluri. Apoi pentru fiecare situație în parte s-au gândit dimensiuni și posibile amplasamente de goluri. După stabilirea dimensiunilor și a poziției golurilor create, s-au gândit soluțiile de reabilitare. Astfel, în urma parcurgerii etapelor enunțate anterior, s-a stabilit ca programul experimental să fie constituit din opt încercări experimentale derulate pe patru elemente de beton armat, câte două teste pe fiecare element în parte.

6.2. Strategie de încercare, rezemări, încărcare

Strategia de încercare presupune încărcarea fiecărui element neconsolidat până la un nivel ce definește depășirea capacității (ultime sau de serviciu), stadiu ce ar implica necesitatea unei consolidări. Ulterior, se aplică sistemul de consolidare/reabilitare, urmând ca elementul să fie încărcat până la cedarea sa completă. Trebuie făcută încă de la început o distincție foarte clară între element și test/încercare. Elementul este definit de câte o placă de beton, în timp ce câte două teste se efectuează pe fiecare element. Modalitatea de denumire a fiecărui element și test în parte ține seama de geometria golului și a elementului precum și de starea acestuia prin prisma degradării și a aplicării sistemului de consolidare la debutul fiecărui test. Astfel, dintre cele patru situații posibile, s-a decis ca testele să se desfășoare în variantele I și IV (Fig. 6.1.). În Fig. 6.2. este ilustrată modalitatea de definire a elementelor și testelor, cu exemplificare pentru elementul întreg.

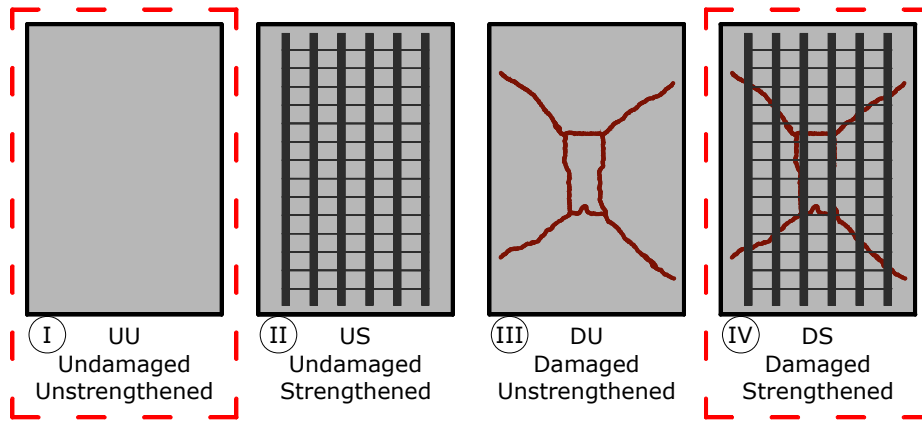


Fig. 6.1. - Posibile situații privind starea elementelor la începutul fiecărui test prin prisma degradărilor și aplicării soluțiilor de consolidare

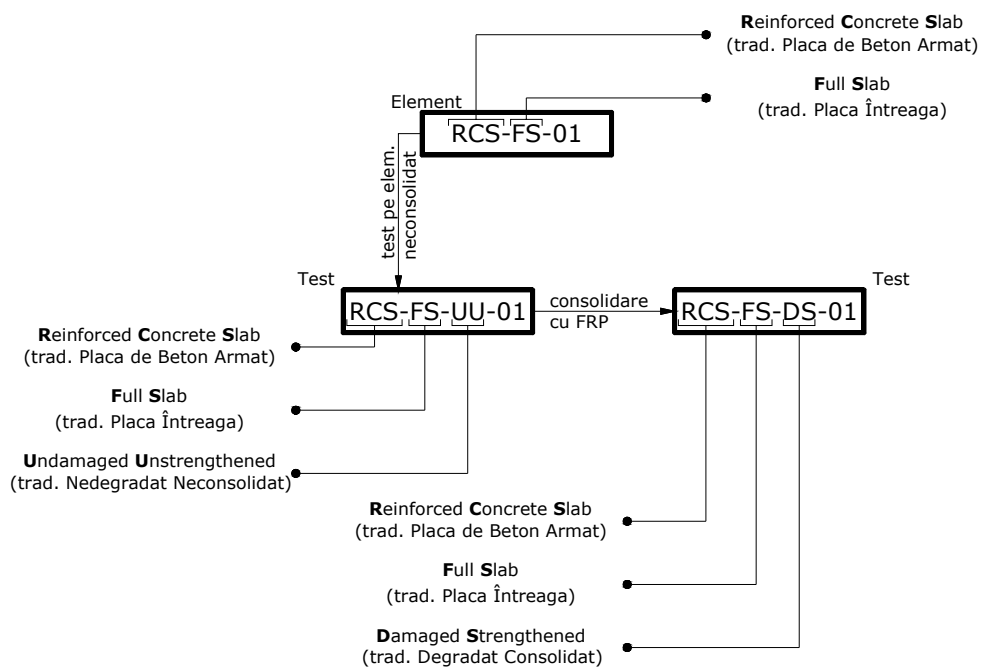


Fig. 6.2. - Schematizarea modalității de definire a elementelor și testelor

Primul element a fost unul întreg (fără gol), denumit RCS-FS-01. Testul efectuat pe elementul întreg neconsolidat a fost denumit RCS-FS-UU-01, în timp ce testul efectuat pe elementul întreg consolidat a fost denumit RCS-FS-DS-01. Al doilea specimen, denumit RCS-RSC-01, a avut un gol dreptunghiular mic, creat într-unul dintre colțurile sale. Testul efectuat pe elementul neconsolidat a fost denumit RCS-RSC-UU-01 (Reinforced Concrete Slab - Rectangular Small Cut-out -

Undamaged Unstrengthened), în timp ce testul efectuat pe elementul consolidat a fost denumit RCS-RSC-DS-01 (Reinforced Concrete Slab - Rectangular Small Cut-out - Damaged Strengthened). A treia placă, denumită RCS-RLC-01, a avut un gol dreptunghiular mare, creat la marginea sa, pe întreaga lățime. Testul efectuat pe elementul neconsolidat a fost denumit RCS-RLC-UU-01 (Reinforced Concrete Slab - Rectangular Large Cut-out - Undamaged Unstrengthened), în timp ce testul efectuat pe elementul consolidat a fost denumit RCS-RLC-DS-01 (Reinforced Concrete Slab - Rectangular Large Cut-out - Damaged Strengthened). Al patrulea element, denumit RCS-RLC-02, este identic din punct de vedere al alcătuirii cu specimenul RCS-RLC-01. Deosebirile rezidă în natura soluțiilor de consolidare aplicate pe cele două elemente. Testul efectuat pe elementul neconsolidat a fost denumit RCS-RLC-UU-02 (Reinforced Concrete Slab - Rectangular Large Cut-out - Undamaged Unstrengthened), în timp ce testul efectuat pe elementul consolidat a fost denumit RCS-RLC-DS-02 (Reinforced Concrete Slab - Rectangular Large Cut-out - Damaged Strengthened).

Pentru efectuarea experimentelor s-a construit un stand de încercare alcătuit din 10 pereți de zidărie și beton armat și un cadru metalic. În cadrul tuturor încercărilor, plăcile au fost dispuse în poziție orizontală, au fost simplu rezemate pe contur și supuse unei încărcări verticale în sens gravitațional. Astfel, fața inferioară a plăcilor a devenit întinsă iar fața superioară a acestora a fost comprimată. Pentru o monitorizare corespunzătoare a fenomenelor fizico-mecanice dezvoltate pe parcursul încercărilor, plăcile au fost montate la o înălțime de 1000 mm deasupra pardoselii halei de încercări. Două vederi generale ale stand-ului de încercare sunt prezentate în Fig. 6.3.



Fig. 6.3. - Vederi generale ale standului experimental

Rezemarea plăcilor s-a făcut prin simpla așezare a acestora pe un pat de mortar proaspăt, plăcile așezându-se astfel într-o poziție orizontală sub efectul greutății proprii. Lățimea zonei de rezemare a fost de 125 mm. Acest mod de rezemare blochează doar deplasarea pe verticală în sens gravitațional a muchiilor elementelor, ridicarea muchiilor și a colțurilor fiind permisă. Poziția rezemelor relativ la suprafața plăcilor se poate observa în Fig. 6.4. Această poziție a rezemelor este identică pentru ambele încercări efectuate pe același element.

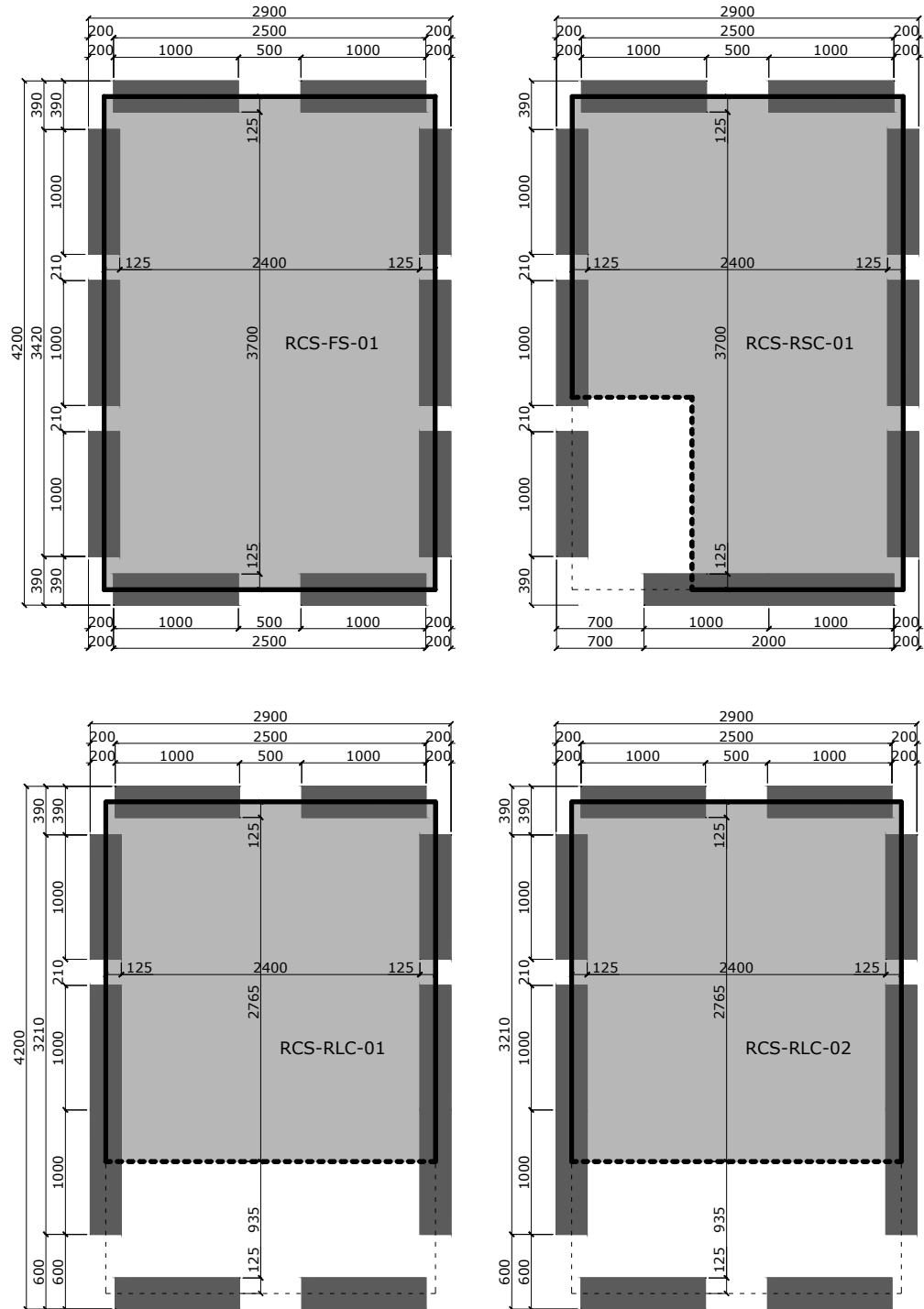


Fig. 6.4. - Poziția reazemelor pentru toate cele patru elemente

Încărcarea a fost indusă prin intermediul unui cric hidraulic cu o cursă a pistonului de 160 mm, fiind distribuită pe o suprafață de 600x1200 mm, printr-un ansamblu metalic spațial. O secțiune verticală transversală prin ansamblul de încercare precum și o vedere de sus a elementului și a poziției piesei de încărcare relativ la geometria plăcilor este prezentată în Fig. 6.5. respectiv Fig. 6.6.

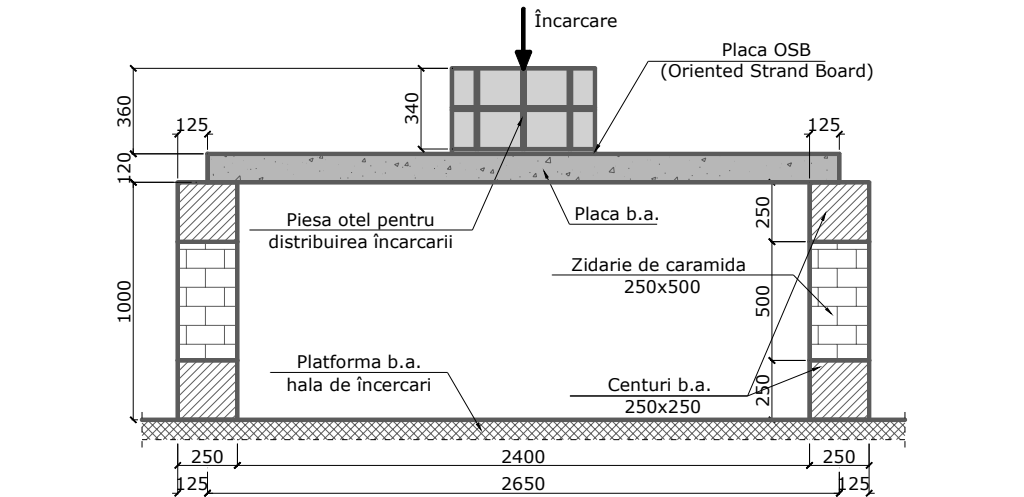


Fig. 6.5. - Secțiune verticală transversală prin ansamblul de încercare

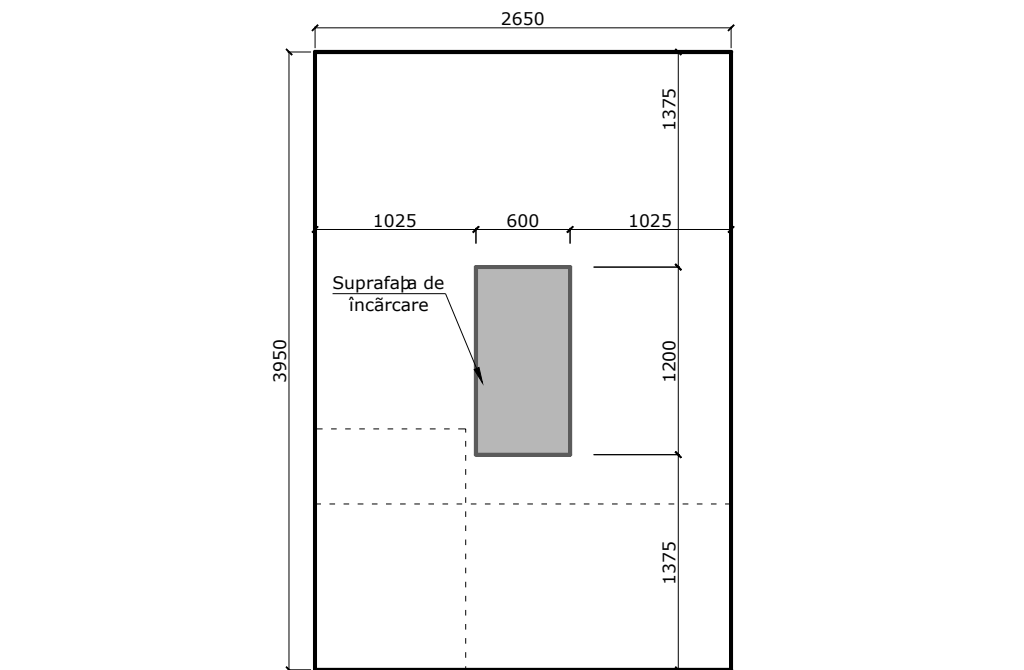


Fig. 6.6. - Poziția piesei de încărcare relativ la suprafața plăcilor

6.3. Caracteristici elemente și detalii de alcătuire

6.3.1. Caracteristici geometrice, alcătuire

Elementele prevăzute în prezentul program experimental sunt prismatice, dreptunghiulare în plan (cu raportul laturilor $L/l \approx 1,55$), având dimensiunile 2650x3950x120 mm. Toate elementele reproduc plăci cu o singură deschidere, bidirecționale, simplu rezemate pe întreg conturul, supuse unor încărcări gravitaționale. În consecință, sunt armate la partea inferioară (cea întinsă) pe întreaga suprafață, în timp ce armătura de la partea superioară a fost prevăzută în special din rațiuni constructive.

Armătura de la partea inferioară este constituită din plase sudate alcătuite din bare profilate cu diametrul de 4 mm dispuse la un pas de 100 mm pe ambele direcții paralele cu laturile elementelor. Armăturile de la partea superioară sunt dispuse doar pe conturul elementelor, fiind constituite din plase legate alcătuite din bare profilate cu diametre de 6 mm și 8 mm. Elementele cu goluri sunt alcătuite în asemenea manieră încât să corespundă unor goluri create ulterior prin tăierea unui element întreg. Aceasta presupune că golurile nu sunt bordate cu nici un fel de armătură suplimentară.

Elementele au fost proiectate și executate astfel încât stratul de acoperire de beton a armăturilor să aibă o grosime de 15 mm. Această acoperire este prevăzută pentru primul rând de bare, adică pentru armăturile amplasate pe direcția paralelă cu latura scurtă a plăcii.

În toate elementele au fost înglobate urechi pentru ridicarea, manipularea și transportul acestora. S-au dispus câte două urechi pentru transport în poziție verticală și câte patru urechi pentru transportul în poziție orizontală.

Caracteristicile geometrice și modalitățile de armare ale celor patru elemente sunt prezentate în Fig. 6.7. - 6.9. În fiecare dintre aceste figuri, imaginea din stânga-sus "a)" prezintă armarea inferioară a elementului, imaginea din dreapta-sus "b)" prezintă armarea superioară a elementului, iar imaginea de jos "c)" reprezintă o fotografie realizată în stația de prefabricate în care au fost confecționate toate elementele experimentale.

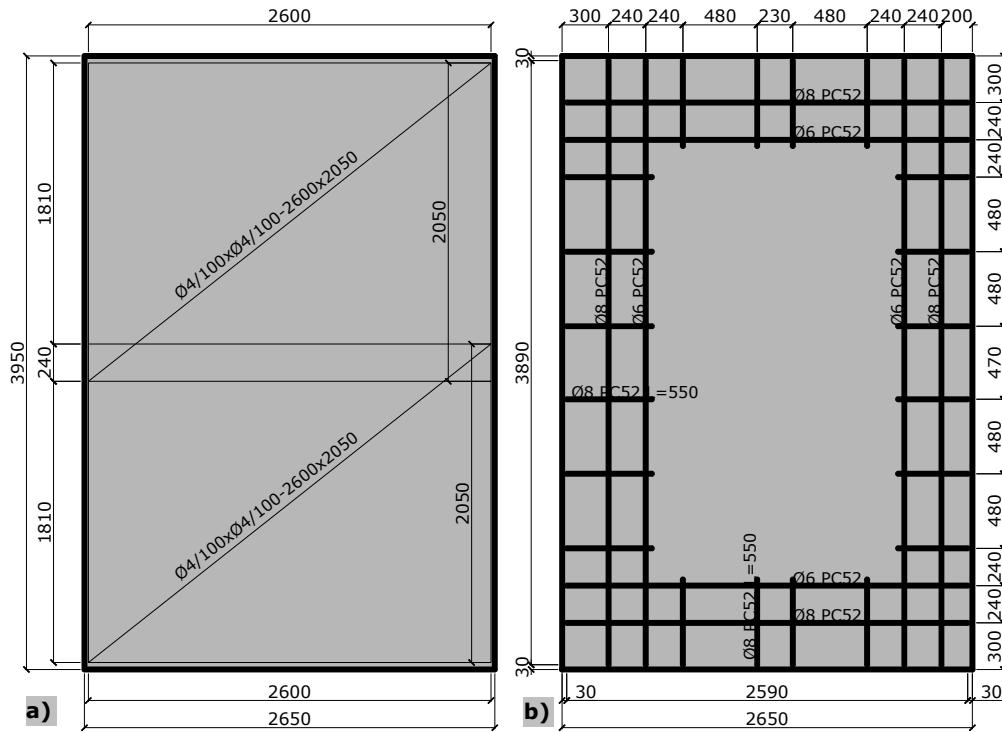


Fig. 6.7. - Caracteristici geometrice și armare inferioară și superioară element RCS-FS-01

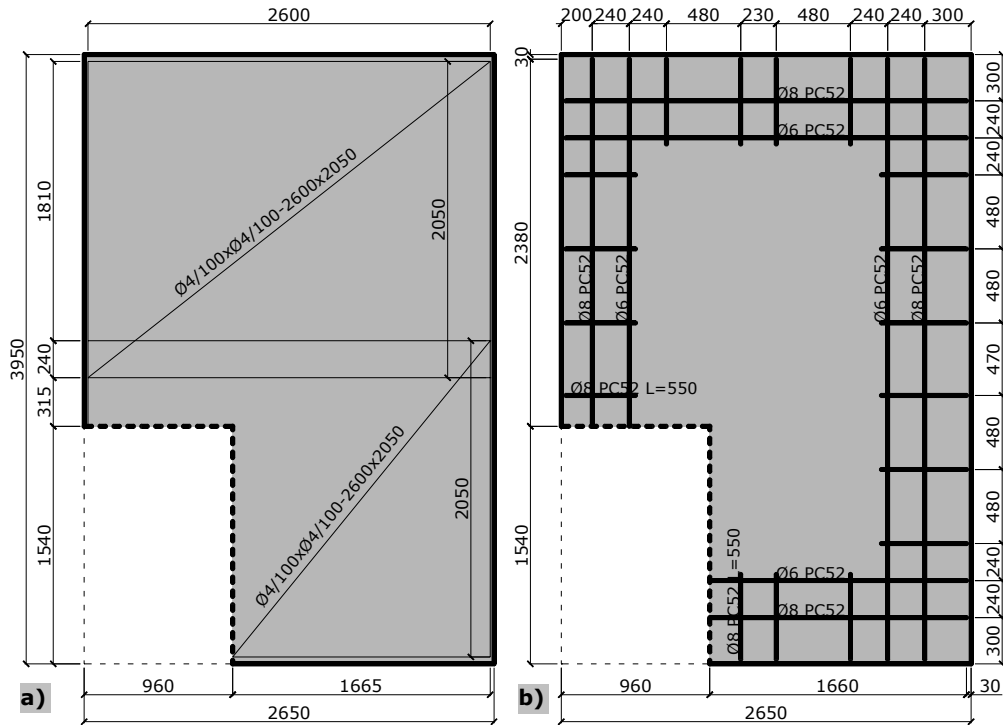


Fig. 6.8. - Caracteristici geometrice și armare inferioară și superioară element RCS-RSC-01

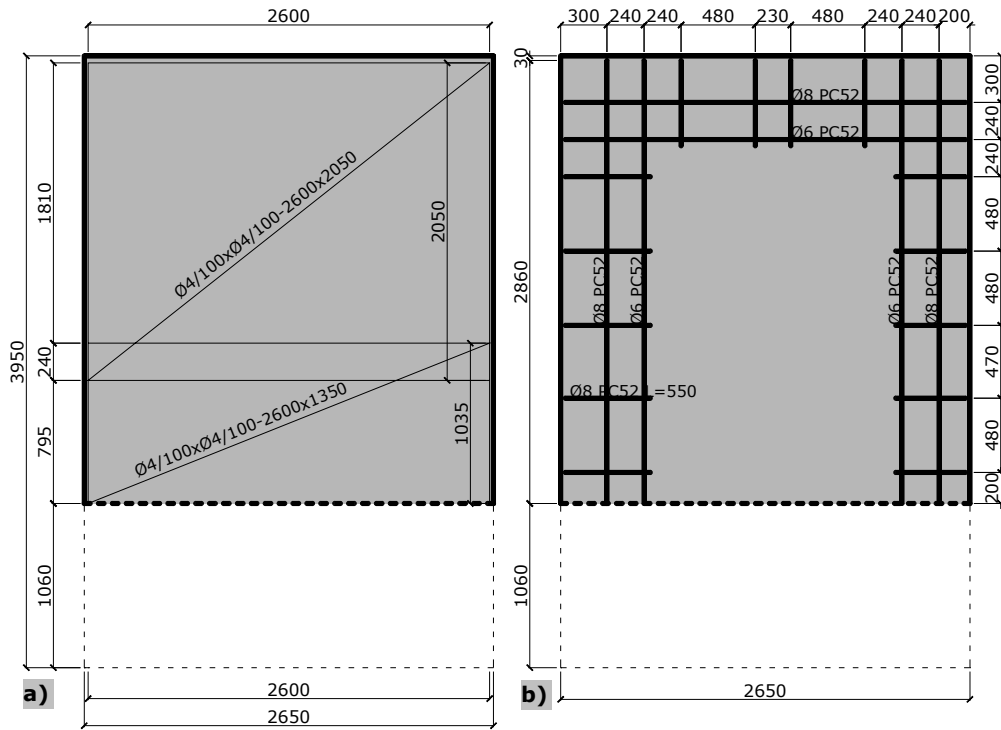


Fig. 6.9. - Caracteristici geometrice și armare inferioară și superioară elemente RCS-RLC-01 și RCS-RLC-02

6.3.2. Proprietăți de materiale

Pentru a se stabili caracteristicile reale ale materialelor utilizate la construirea elementelor, s-au efectuat o serie de încercări distructive.

Rezistența betonului în momentul testării elementelor a fost evaluată prin încercări de compresiune pe 12 cuburi de beton cu latura de 150 mm [039]. Câte 3 cuburi au fost încercate pentru fiecare din cele patru plăci. Rezultatele au evidențiat caracteristici extrem de omogene pentru beton. Toate cele patru plăci au fost realizate din beton cu o rezistență cubică la compresiune de $\approx 62...65$ MPa (N/mm²). În Tabelul 6.1. sunt centralizate rezultatele obținute prin încercarea cuburilor de beton.

Tabel 6.1. - Rezultate încercări la compresiune pe cuburi de beton

| Element | Epruvetă | Forța maximă [kN] | Rez. cubică la compr. [MPa] | $f_{cm,cube}$ [MPa] |
|------------|----------|-------------------|-----------------------------|---------------------|
| RCS-FS-01 | Cub 1 | 1468 | 65,24 | 65,54 |
| | Cub 2 | 1476 | 65,60 | |
| | Cub 3 | 1480 | 65,78 | |
| RCS-RSC-01 | Cub 1 | 1315 | 58,44 | 61,63 |
| | Cub 2 | 1510 | 67,11 | |
| | Cub 3 | 1335 | 59,33 | |
| RCS-RLC-01 | Cub 1 | 1488 | 66,13 | 65,88 |
| | Cub 2 | 1480 | 65,78 | |
| | Cub 3 | 1479 | 65,73 | |
| RCS-RLC-02 | Cub 1 | 1367 | 60,75 | 62,67 |
| | Cub 2 | 1390 | 61,78 | |
| | Cub 3 | 1473 | 65,47 | |

Curba de comportare caracteristică P- Δ a oțelului din care au fost confecționate barele din plasele de armătură, utilizate pentru armarea inferioară a plăcilor, a fost stabilită prin încercări de tracțiune efectuate pe 20 epruvete. Câte 5 epruvete au fost încercate pentru fiecare din cele patru plăci. Încercările au evidențiat variații importante ale proprietăților barelor de armătură atât în cadrul plaselor utilizate pentru același element, precum și de la un element la altul. Împrăștierea rezultatelor este importantă mai ales din punct de vedere al alungirii la rupere a epruvetelor. Spre exemplu, în cazul elementului RCS-FS-01, alungirea la rupere a variat între 1,61 % și 4,49 %, reprezentând practic o variație de 279%. Toate celelalte epruvete au avut alungiri ce se încadrează ca valoare între limitele enunțate anterior pentru elementul RCS-FS-01. Rezultatele obținute prin încercarea la tracțiune a barelor a evidențiat și un neajuns al acestora cu privire la valoarea alungirii la rupere. Astfel, la niciuna din cele 20 epruvete încercate nu s-a înregistrat valoarea minimă admisă de normativ pentru această mărime, 6% [040]. În Tabel 6.2. sunt centralizate rezultatele înregistrate în urma încercării epruvetelor metalice iar în Fig. 6.10. - 6.13. sunt prezentate curbele caracteristice de comportare σ - ϵ obținute pentru aceleași epruvete, grupate pe fiecare element experimental în parte.

Tabel 6.2. - Rezultate încercări la tracțiune pe epruvete din bare de armătură

| Element | Epruvetă | R _{p,02} [MPa] | R _m [MPa] | A _t [%] |
|------------|--------------|-------------------------|----------------------|--------------------|
| RCS-FS-01 | Eprv 1 | 591,8074 | 648,4719 | 2,149078 |
| | Eprv 2 | 589,4707 | 650,1934 | 1,609385 |
| | Eprv 3 | 623,0935 | 702,3675 | 2,332861 |
| | Eprv 4 | 590,7917 | 656,9203 | 3,079489 |
| | Eprv 5 | 588,4055 | 670,5509 | 4,486684 |
| | Medie | 596,7138 | 665,7008 | 2,731499 |
| RCS-RSC-01 | Eprv 1 | 506,2411 | 581,6523 | 1,838811 |
| | Eprv 2 | 583,9069 | 648,1146 | 3,10608 |
| | Eprv 3 | 522,3579 | 581,9727 | 2,363272 |
| | Eprv 4 | 559,0247 | 655,1905 | 2,62299 |
| | Eprv 5 | 514,6401 | 617,1601 | 2,306311 |
| | Medie | 537,2342 | 616,8181 | 2,447493 |
| RCS-RLC-01 | Eprv 1 | 554,4627 | 639,7054 | 4,089177 |
| | Eprv 2 | 571,2043 | 615,0051 | 2,827622 |
| | Eprv 3 | 525,0557 | 624,9487 | 3,671124 |
| | Eprv 4 | 542,9115 | 621,9329 | 3,342251 |
| | Eprv 5 | 537,2403 | 622,5757 | 3,315122 |
| | Medie | 546,1749 | 624,8336 | 3,449059 |
| RCS-RLC-02 | Eprv 1 | 553,2682 | 623,7211 | 4,166441 |
| | Eprv 2 | 541,8914 | 604,8339 | 2,269781 |
| | Eprv 3 | 556,6401 | 619,5189 | 2,880759 |
| | Eprv 4 | 557,3313 | 629,3495 | 4,168763 |
| | Eprv 5 | 532,384 | 606,6926 | 2,373602 |
| | Medie | 548,3030 | 616,8232 | 3,171869 |

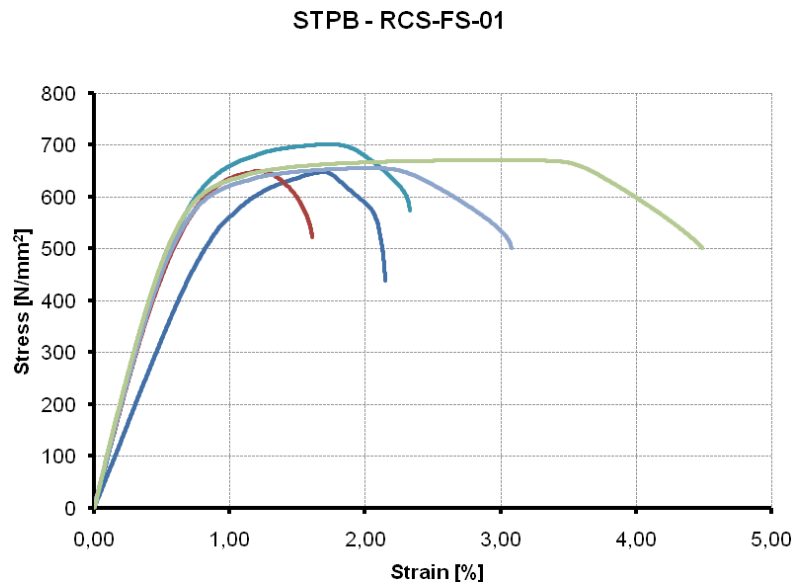


Fig. 6.10. - Curbe de comportare σ - ϵ pentru barele de armatura prelevate din plasele utilizate la armarea inferioara a elementului RCS-FS-01

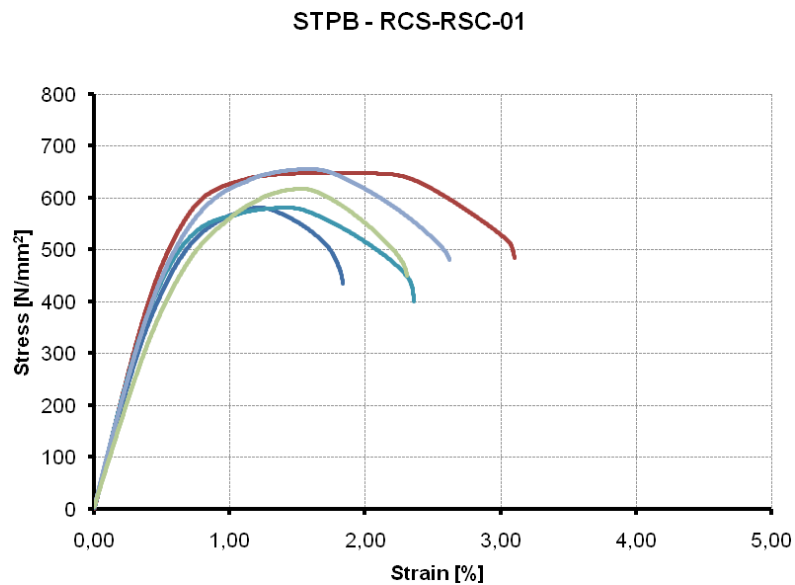


Fig. 6.11. - Curbe de comportare σ - ϵ pentru barele de armatura prelevate din plasele utilizate la armarea inferioara a elementului RCS-RSC-01

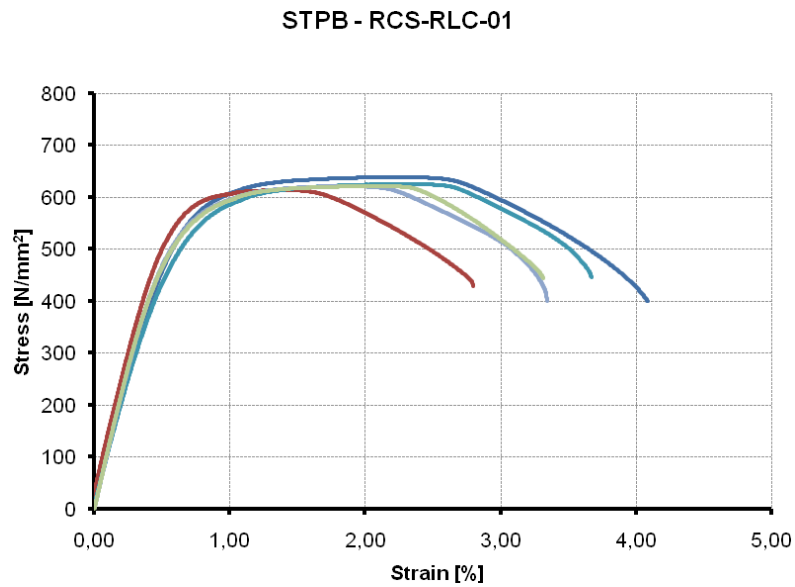


Fig. 6.12. - Curbe de comportare σ - ε pentru barele de armatura prelevate din plasele utilizate la armarea inferioara a elementului RCS-RLC-01

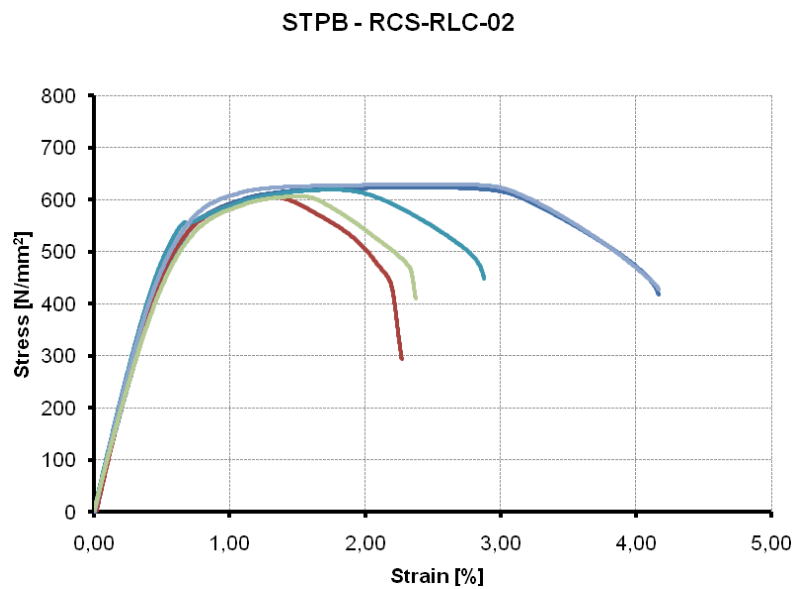


Fig. 6.13. - Curbe de comportare σ - ε pentru barele de armatura prelevate din plasele utilizate la armarea inferioara a elementului RCS-RLC-02

6.4. Încercări efectuate pe elementul întreg (fără gol) - (RCS-FS-01)

6.4.1. Încercarea elementului în starea inițială (fără consolidare) - Test RCS-FS-UU-01

Pe parcursul încercării, s-au monitorizat o serie de parametri: valoarea încărcării aplicate, deplasarea verticală în 10 puncte diferite, deformația specifică în 6 puncte pe 6 armături inferioare diferite și deformația specifică în beton într-o secțiune. Pozițiile tuturor senzorilor de monitorizare sunt prezentate în Fig. 6.14. Direcția de măsurare a timbrelor este dată de orientarea scrisului care definește fiecare timbru în parte. Această regulă se va păstra în toate reprezentările care prezintă dispunerea timbrelor tensometrice.

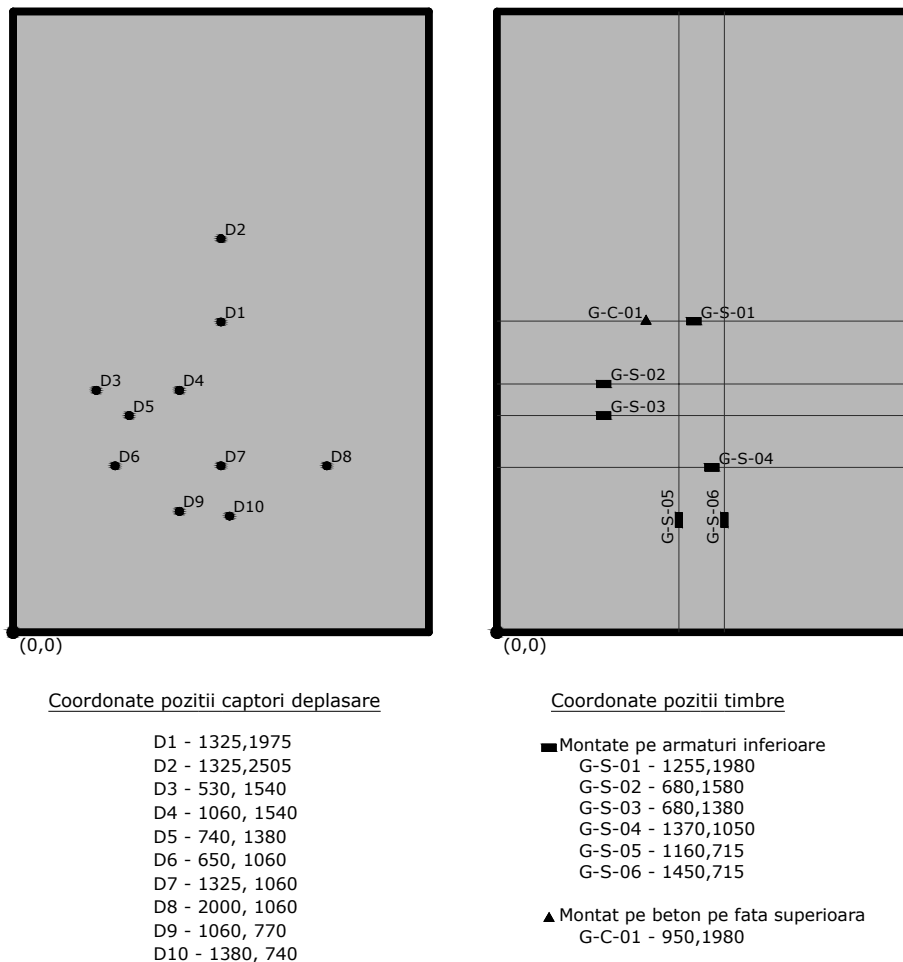


Fig. 6.14. - Pozițiile senzorilor

Încărcarea a fost aplicată monoton crescător, până la atingerea unei valori de 113,5 kN. Suplimentul de încărcare adus de greutatea proprie a anumitor subansambluri s-a evaluat la 4,75 kN, astfel încât încărcarea maximă atinsă în timpul testului este de 118,25 kN.

La momentul opririi încercării experimentale, deformația specifică în mai multe armături depășise valoarea limitei de curgere iar deformația verticală depășise valoarea admisă a săgeții ($L_{adm} = L/250 = 2400/250 = 9,60$ mm) (citație EC2). Pe parcursul testului, deformația specifică maximă măsurată în armături a fost de 7,52‰ iar deplasarea verticală maximă a avut valoarea de 10,28 mm. Comportarea elementului pe parcursul testului a fost conformă cu așteptările, patru fisuri apărând pe fața inferioară a plăcii, pe direcția liniilor de rupere, înclinația acestora fiind de aproximativ 36°, 44°, 52° și 56°. Deschiderea fisurilor și lungimea acestora a crescut odată cu creșterea încărcării exterioare. Zona de inițiere a fisurilor a fost reprezentată de colțurile suprafeței de încărcare, distribuția fisurilor evidențind foarte clar și geometria suprafeței de încărcare. În Fig. 6.15. este schițată configurația fisurilor la finalul testului, fiind evidențiat și conturul suprafeței de încărcare.

Diagramele de comportare forță-deplasare sunt prezentate în Fig. 6.16. pentru toți cei zece captori de deplasare. Se observă că deplasarea maximă se înregistrează în centrul plăcii, în poziția captorului D1. Valorile deplasărilor din dreptul captorilor D2 și D4 sunt apropiate de valorile maxime. Evoluția deformației specifice în barele de armătură poate fi urmărită în Fig. 6.17. prin intermediul diagramei Forță-Deformație specifică.

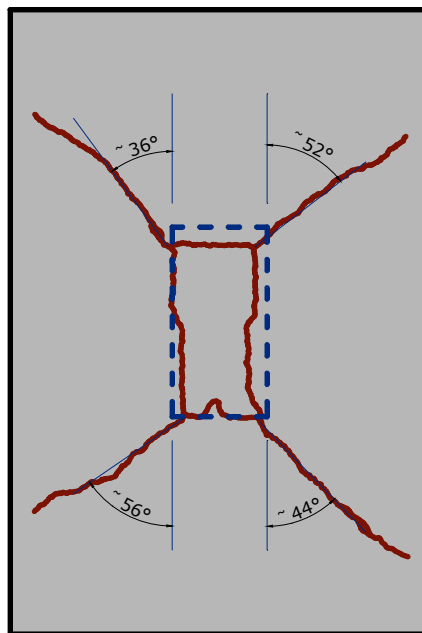


Fig. 6.15. - Configurația fisurilor și conturul suprafeței de încărcare

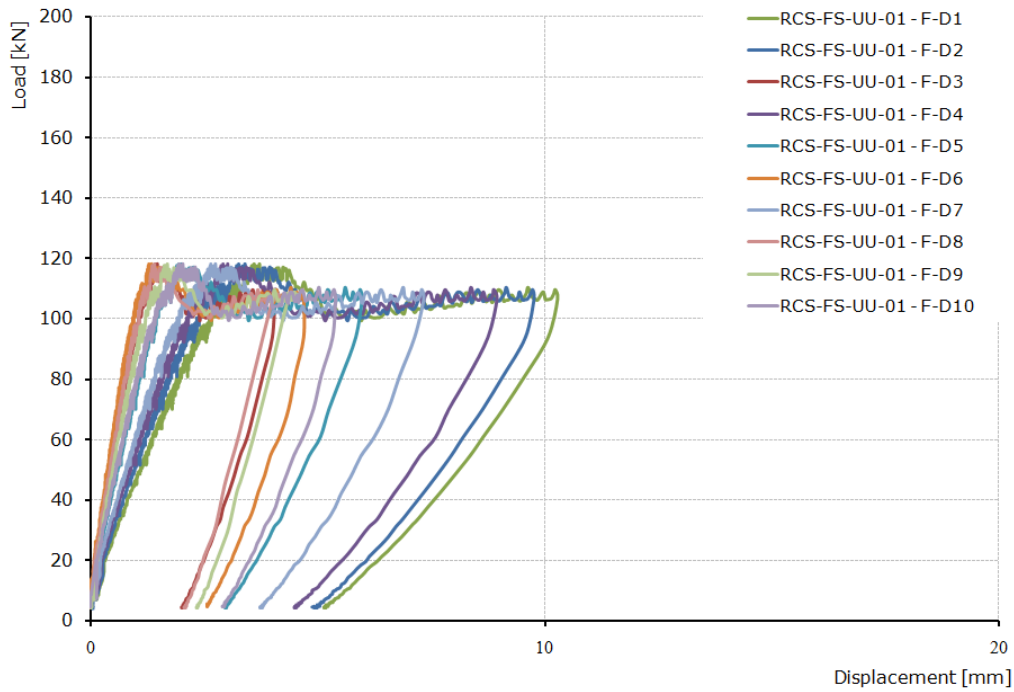


Fig. 6.16. - Diagramele F-D pentru cele 10 poziții ale captorilor de deplasare

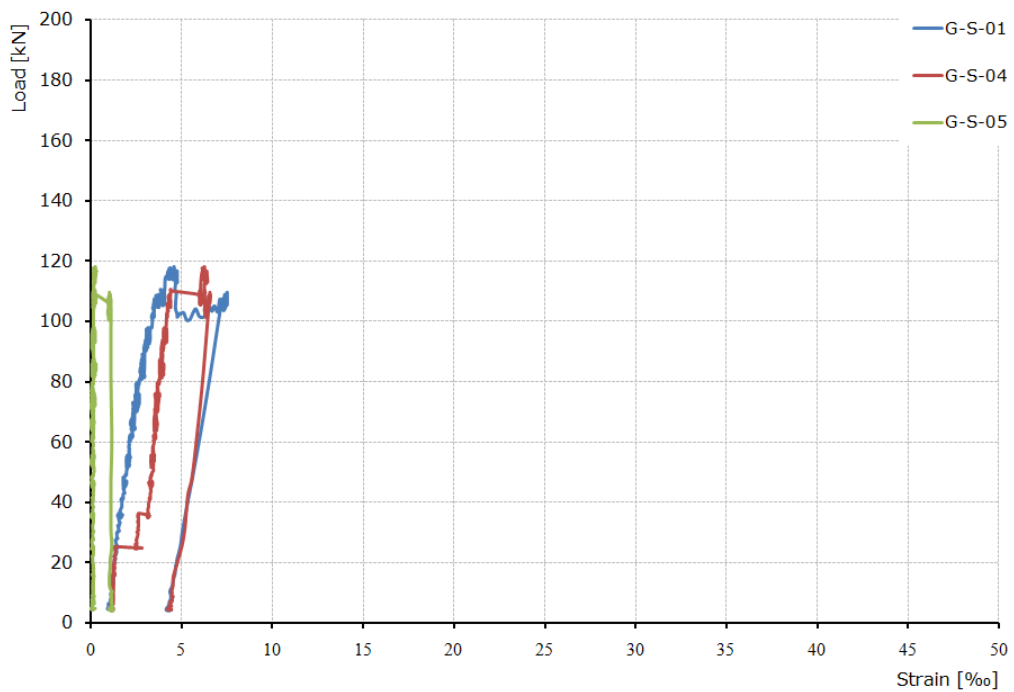


Fig. 6.17. - Diagramele F-ε

6.4.2. Consolidarea elementului

Consolidarea plăcii s-a realizat prin dispunerea unor materiale compozite polimerice pe fața inferioară a acesteia, fața întinsă. Astfel, s-au lipit o serie de țesături și benzi din CFRP pe ambele direcții paralele cu laturile elementului. Elementele de consolidare de pe direcția paralelă cu latura scurtă a plăcii s-au montat prin tehnica NSMR-FRP, iar cele de pe direcția paralelă cu direcția lungă a plăcii s-au montat prin tehnica EB-FRP. Principalele proprietăți ale sistemului de consolidare sunt centralizate în Tabel 6.3.

Tabel 6.3. - Proprietăți ale sistemului de consolidare

| Tehnică aplicare | NSMR-FRP | | EB-FRP | |
|--|------------------|---------|----------|--------|
| | Benzi pultrudate | Rășină | Țesătură | Rășină |
| Componente | | | | |
| Modul de elasticitate [N/mm ²] | 165000 | 12800 | 231000 | 3800 |
| Deformația specifică ultimă | 0,017 | --- | 0,017 | --- |
| Rezistența la compresiune [N/mm ²] | --- | 85 | --- | 30 |
| Rezistența la întindere [N/mm ²] | --- | 24...27 | --- | --- |

Cantitatea necesară de elemente CFRP ce trebuie montată pentru a consolida eficient placa a fost determinată analitic, pe baza unei ipoteze simple: se egalează forța de întindere pe care ar fi putut-o prelua armătura de oțel (armătură ajunsă la limita de curgere după încercarea pe elementul neconsolidat) cu forța de întindere pe care o pot prelua elementele CFRP de consolidare. Abordarea este prezentată sub forma Rel 6.1. Valorile termenilor din Rel 6.1. precum și calculul detaliat al soluțiilor de consolidare sunt prezentate în Anexa I.

$$F_S = F_f \Rightarrow A_f = \frac{f_{yd}}{E_f \cdot \varepsilon_f} A_S \quad (6.1.)$$

unde:

- F_S - forța de întindere din armătură
- F_f - forța de întindere din fibra compozitului
- A_f - aria de fibre din compozitul CFRP
- f_{yd} - rezistența de calcul a oțelului din care este confecționată armătura
- E_f - modulul de elasticitate al fibrei din compozitul CFRP
- ε_f - deformația specifică din fibra compozitului CFRP
- A_S - aria de armătură

Pe baza calculelor prezentate în anexă, a rezultat necesitatea utilizării a 14 benzi montate în „șlițuri” (NSMR-CFRP) și 6 fâșii de țesătură montate prin tehnica EB-FRP. Configurația și caracteristicile geometrice ale sistemului de consolidare sunt prezentate în Fig. 6.18. printr-o vedere a suprafeței inferioare a plăcii.

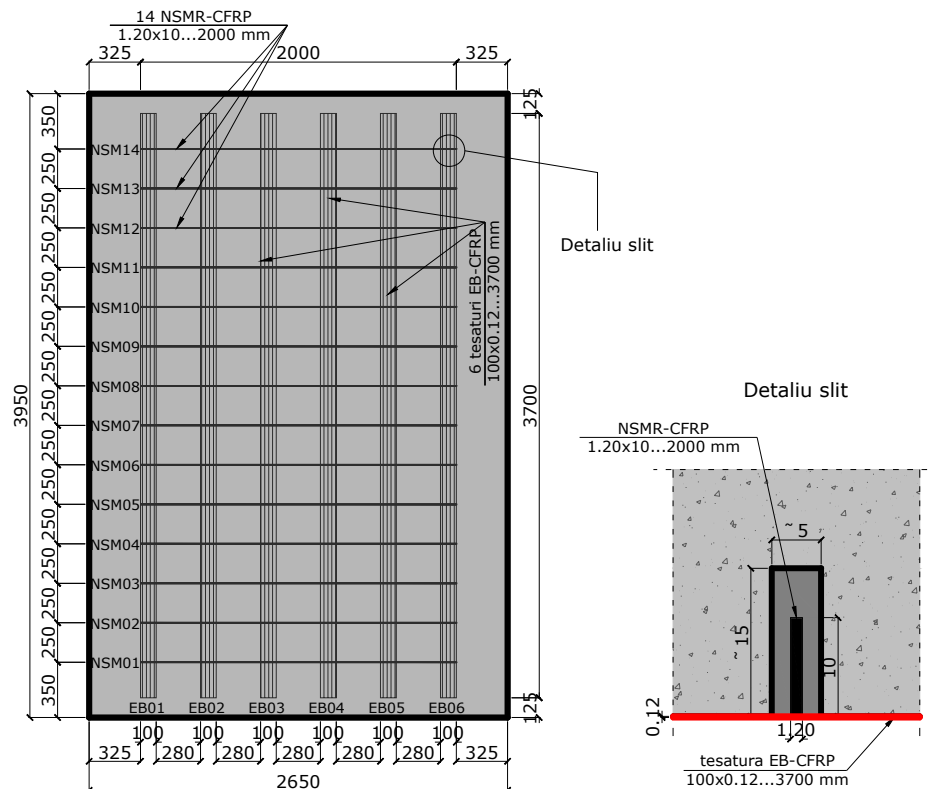


Fig. 6.18. - Configurația și caracteristicile geometrice ale sistemului de consolidare

Fața inferioară a elementului consolidat este prezentată în Fig. 6.30. iar etapele parcurse pentru a realiza consolidarea sunt ilustrate în Fig. 6.19....Fig. 6.29. și sunt inventariate mai jos:

- marcarea pozițiilor șlițurilor și tăierea acestora (Fig. 6.19.)
- marcarea și șlefuirea suprafețelor pentru aplicarea fâșiilor de țesătură (Fig. 6.20.)
- curățarea șlițurilor și a suprafețelor șlefuite prin aspirare și suflare cu aer (Fig. 6.21.)
- curățarea benzilor de CFRP și montarea acestora în șlițuri prin tehnica NSMR-FRP (Fig. 6.22. - Fig. 6.26.)
- curățarea fâșiilor de țesătură și aplicarea acestora prin tehnica EB-FRP (Fig. 6.27. - Fig. 6.29.).

Un neajuns tehnologic major al montării elementelor de CFRP prin tehnica NSMR-FRP, este reprezentat de dificultatea centrării acestora în șlițuri, dimensiunile și toleranțele fiind extrem de reduse. O eventuală montare excentrică poate cauza cedarea prematură a sistemului de consolidare, pricinuită de aderența scăzută. Pentru a îmbunătăți această tehnologia de montare, echipa care a realizat aplicațiile practice în prezentul program experimental a utilizat o abordare nouă, proprie. Astfel, centrarea corectă a benzilor în șlițuri a fost asigurată prin utilizarea unor pene de plastic, distribuite pe lungimea benzilor. Inserând banda simultan cu mai

multe seturi de câte două pene identice (câte una de fiecare parte a benzii) aceasta se centrează corespunzător, asigurând aderența optimă. În cazul prezentelor aplicații, s-au utilizat câte șase pene (trei seturi a câte două pene) pentru fiecare bandă montată. În Fig. 6.24. este ilustrată această soluție, considerându-se că ea aduce reale beneficii sistemului de consolidare cu NSMR-FRP.



Fig. 6.19. - Tăierea șlițurilor și aspectul feței inferioare după tăiere



Fig. 6.20. - Șlefuirea suprafețelor pentru aplicarea fâșiiilor de țesătură



Fig. 6.21. - Curățarea șlițurilor și a suprafețelor șlefuite prin aspirare și suflare cu aer

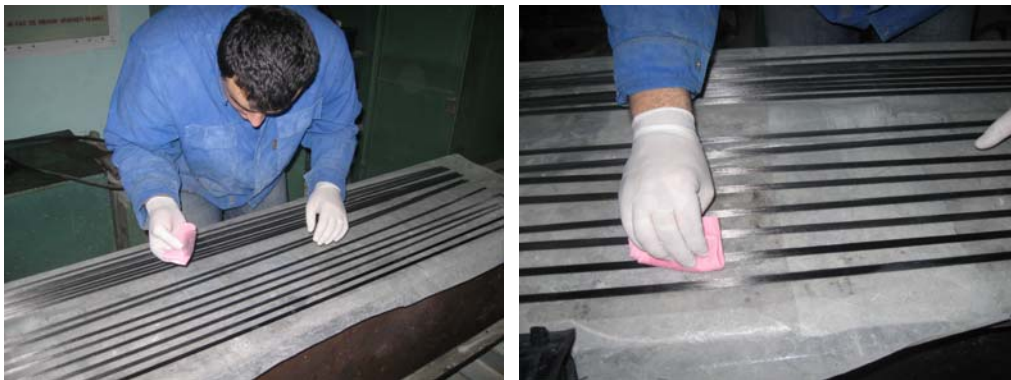


Fig. 6.22. - Curățarea benzilor de CFRP



Fig. 6.23. - Umplerea șlițurilor cu rășină epoxidică



Fig. 6.24. - Corectarea șlițului umplut cu rășină



Fig. 6.25. - Inserarea benzilor de CFRP direcționate cu ajutorul penelor



Fig. 6.26. - Finisarea suprafeței în zona șlițurilor



Fig. 6.27. - Marcarea poziției fâșiilor de CFRP și pregătirea acestora pentru aplicare



Fig. 6.28. - Întinderea și pregătirea primului strat de rășină



Fig. 6.29. - Aplicarea fâșiilor de țesătură și o vedere a feței inferioare în timpul procesului de consolidare (cele trei fâșii din dreapta sunt aplicate iar în stânga este aplicată doar rășina)



Fig. 6.30. - Vedere a feței inferioare a plăcii după finalizarea consolidării

Cu excepția lucrărilor de pregătire a șlițurilor, în toate fazele de lucru pentru finalizarea consolidării, echipa a fost constituită dintr-un singur om. Pentru realizarea șlițurilor au lucrat simultan doi oameni. Consumurile și volumele de muncă specifice consolidării țin cont de această situație și sunt evidențiate în Tabelul 6.4. și Fig. 6.31. Aceste mărimi nu țin însă cont de anumite variabile, precum: costul și uzura aparaturii utilizate, timpul necesar curățării sculelor folosite la aplicarea rășinii, timpi morți, pauze, etc.

Tabelul 6.4. evidențiază și încărcarea suplimentară generată de aplicarea sistemului de consolidare, valoarea acesteia fiind de 8200 g. Ținând cont de faptul că prin tăierea șlițurilor se elimină o cantitate de beton ce are greutatea de 5250 g, încărcarea suplimentară adusă de elementele de consolidare este de doar 2950 g. Este lesne de înțeles că surplusul de greutate este total nesemnificativ, aceasta reprezentând o proprietate esențială a sistemului de consolidare în anumite aplicații, comparativ cu tehnici tradiționale.

Tabel 6.4. - Consum de materiale și manoperă

| Tehnică aplicare | NSMR-FRP | | | EB-FRP | | |
|-----------------------------------|--------------|------------------|-------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| | Șlițuri | Benzi pultrudate | Rășină | Suprafață pregătită | Țesătură | Rășină |
| Componente | Șlițuri | Benzi pultrudate | Rășină | Suprafață pregătită | Țesătură | Rășină |
| Număr | 14 | 14 | --- | 6 | 6 | --- |
| Dimensiuni - bxhxl [mm] | 5x15x2000 | 1,20x10x2000 | --- | 150x3700 | 100x0,12x3700 | --- |
| Consum specific | --- | 19,20 g/m | ≈165 g/m | --- | 230 g/m ² | ≈1150 g/m ² |
| Consum [/subelement] | --- | 38,40 g/bandă | 330 g/șliț | --- | 85,10 g/fâșie | 425 g/fâșie |
| Consum total | --- | 537,60 g | 4620 g | --- | 510,60 g | 2550 g |
| Volum de muncă pentru pregătire * | 120 min/șliț | 2 min/bandă | 7 min/șliț | 15 min/supraf | 15 min/supraf | 7 min/supraf |
| | 60 min/m | 1 min/m | 7 min/m | 27 min/m ² | 40,5 min/m ² | 7 min/m ² |
| | 68 min/m | | | 74,5 min/m ² | | |
| Volum de muncă pentru aplicare** | 6 min/șliț | 9 min/bandă | 15 min/șliț | 15 min/supraf | 5 min/supraf | 13 min/supraf |
| | 3 min/m | 4,5 min/m | 7,5 min/m | 27 min/m ² | 13,5 min/m ² | 35 min/m ² |
| | 15 min/m | | | 75,5 min/m ² | | |

*Volumul de muncă pentru pregătire conține următoarele operațiuni:

- NSMR-FRP
- șlițuri - marcare și tăiere
 - benzi pultrudate - curățare
 - rășină - cântărire și amestecare
- EB-FRP
- suprafață pregătită - șlefuire
 - țesătură - tăiere la dimensiuni, curățare
 - rășină - cântărire și amestecare

**Volumul de muncă pentru aplicare conține următoarele operațiuni:

- NSMR-FRP
- șlițuri - curățare prin aspirare și suflare cu aer
 - benzi pultrudate - montare (introducerea în șlițuri)
 - rășină - aplicare (umplerea șlițurilor)
- EB-FRP
- suprafață pregătită - curățare (aspirare și suflare cu aer)
 - țesătură - aplicare (întinderea pe suprafața impregnată cu rășină)
 - rășină - aplicare (întindere pe suprafața curățată)

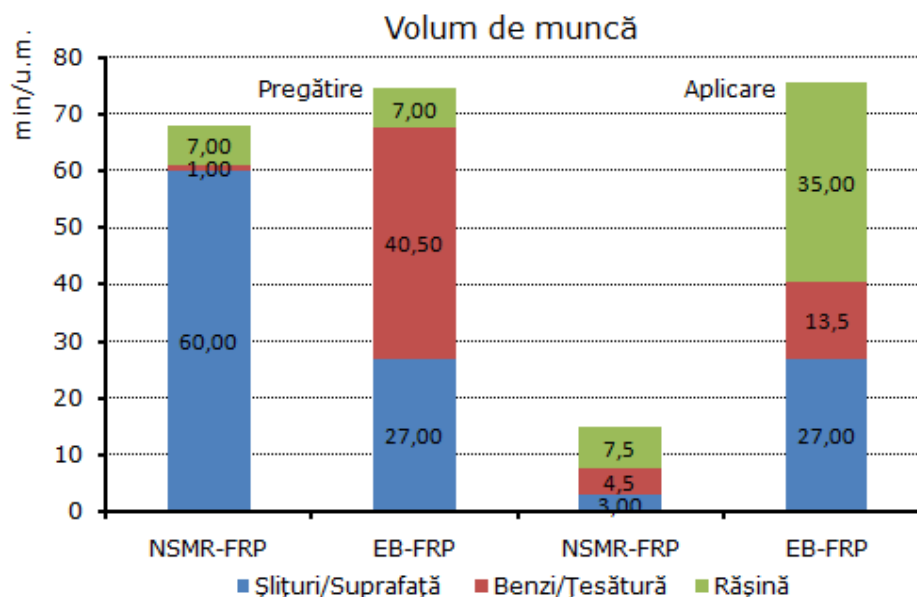
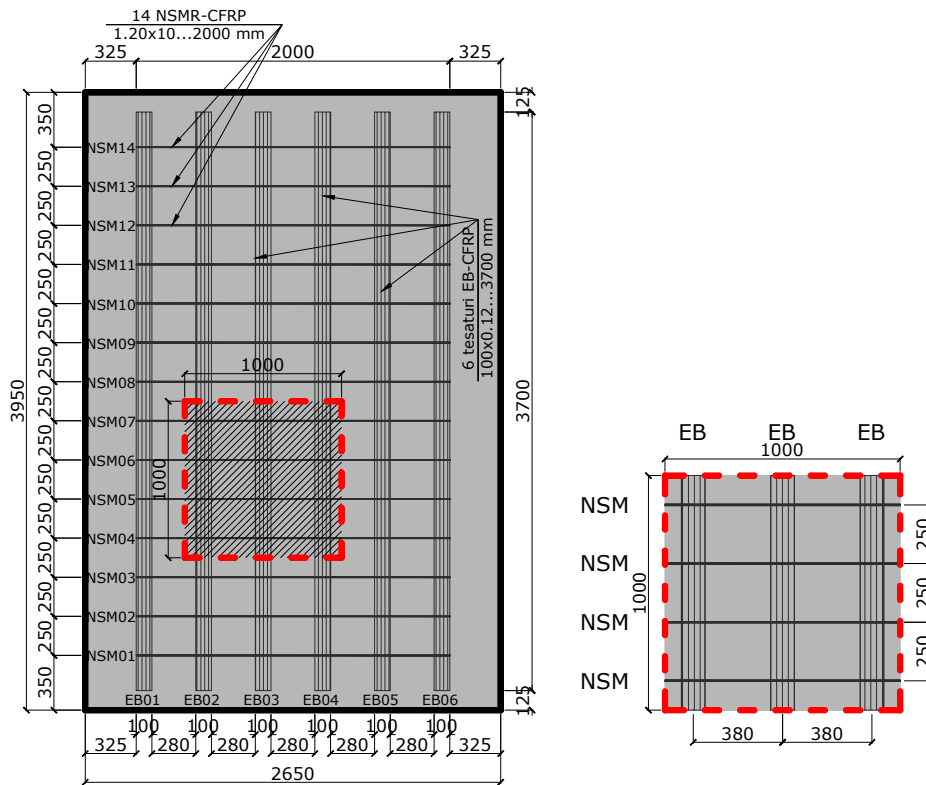


Fig. 6.31. - Volume de muncă pentru pregătire și aplicare

Tabel 6.5. - Prețuri de materiale ale sistemului de consolidare

| Tehnică aplicare | NSMR-FRP | | | EB-FRP | | |
|-------------------------|-----------|------------------|-----------|---------------------|------------------------|-----------|
| | Șlițuri | Benzi pultrudate | Rășină | Suprafață pregătită | Țesătură | Rășină |
| Componente | 14 | 14 | --- | 6 | 6 | --- |
| Număr | 14 | 14 | --- | 6 | 6 | --- |
| Dimensiuni - bxhxL [mm] | 5x15x2000 | 1,20x10x2000 | --- | 150x3700 | 100x0,12x3700 | --- |
| Preț specific | --- | 4,59 €/ml | 8,53 €/kg | --- | 34,67 €/m ² | 15,6 €/kg |
| Preț [/subelement] | --- | 9,18 € | 2,815 € | --- | 12,828 € | 6,63 € |
| Preț total | --- | 128,52 € | 39,41 € | --- | 76,97 € | 39,78 € |
| | | 167,93 € | | | 116,75 € | |

Conform calculelor din Anexa I, se observă că sistemul de consolidare a fost dimensionat în așa fel încât să genereze același nivel de suprarezistență pe ambele direcții. Izolând o suprafață unitară conform Fig. 6.32. elementele de consolidare din interiorul acesteia de pe cele două direcții sunt echivalente ca nivel de suprarezistență generat (exceptând surplusurile de material rezultate din rotunjiri ce țin de tehnologia de aplicare și de dimensiunile furnizate de producător). Astfel, o comparație între cele două tehnici de consolidare din punct de vedere al costurilor poate fi concludentă doar pentru o astfel de suprafață unitară.

Fig. 6.32. - Izolarea unei suprafețe de 1 m²

Tabel 6.6. - Comparație economică a tehnicilor pentru o suprafață unitară

| Tehnică aplicare | NSMR-FRP | | | EB-FRP | | |
|--|-----------|------------------|--------|---------------------|---------------------|-----------|
| | Șlițuri | Benzi pultrudate | Rășină | Suprafață pregătită | Țesătură | Rășină |
| Cantitate pe 1 m ² suprafață de placă | 4 m | 4 m | 660 g | 0,45 m ² | 0,30 m ² | 345 g |
| Dimensiuni - bxhxL [mm] | 5x15x2000 | 1,20x10x2000 | --- | 150x3700 | 100x0,12x3700 | --- |
| Consum total | --- | 76,80 g | 660 g | --- | 69 g | 345 g |
| Preț total | ≈24 € | | | ≈15,8 € | | |
| Volum de muncă pentru pregătire * | 240 min | 4 min | 7 min | 12,20 min | 12,20 min | 7 min |
| | 251 min | | | 31,40 min | | |
| Volum de muncă pentru aplicare** | 12 min | 18 min | 30 min | 12,20 min | 4,05 min | 10,50 min |
| | 60 min | | | 26,75 min | | |
| Volum total | 351 min | | | ≈58 min | | |

6.4.3. Încercarea elementului consolidat - Test RCS-FS-DS-01

Suplimentar față de încercarea elementului neconsolidat, s-au mai monitorizat deformațiile specifice din mai multe benzi și fâșii de CFRP. Cinci timbre au fost dispuse pe trei benzi montate în șlițuri și patru timbre au fost montate pe două fâșii de țesătură. Pozițiile timbrilor montate pe elemente de consolidare CFRP sunt prezentate în Fig. 6.33.

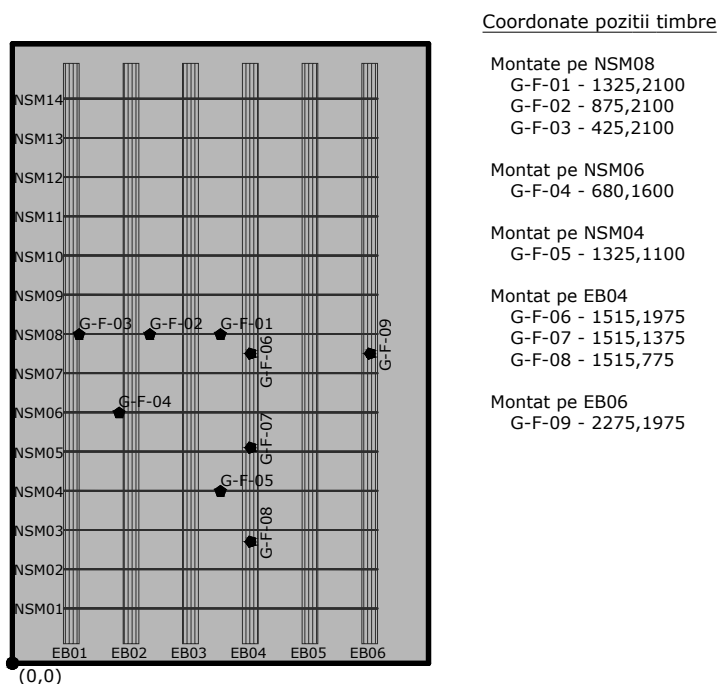


Fig. 6.33. - Pozițiile timbrilor tensometrice pe elemente CFRP

Elementul consolidat a fost încercat până la cedarea completă, în timpul testului înregistrându-se o forță maximă de 185,50 kN. Acestei valori a încărcării îi corespunde o deplasare centrală de 50 mm. Peste acest nivel, deplasările au crescut în timp ce forța verticală s-a diminuat. Specimenul a fost capabil să se deformeze extrem de mult înainte de rupere (110 mm), această proprietate fiind extrem de importantă, deoarece oferă o amplă avertizare vizuală. Considerând criteriul de cedare al elementului ca fiind definit de o scădere a încărcării maxime cu 15%, se poate admite că cedarea plăcii consolidate s-a produs la un nivel al forței exterioare de 157,70 kN și o valoare corespunzătoare a deplasării centrale de 64,50 mm. Diagramele de comportare Forță-Deplasare sunt prezentate în Fig. 6.34.

Sistemul de consolidare a funcționat corespunzător, întreaga sa capacitate fiind antrenată în zona centrală, practic toate elementele CFRP care au fost intersectate de fisurile principale cedând prin ruperea fibrelor. O indicație suplimentară a eficacității sistemului de consolidare este reprezentată de faptul că nu s-au înregistrat fenomene de cedare prematură (lunecări, dezlipiri, descojiri). Pozițiile în care s-au rupt elementele CFRP sunt prezente în Fig. 6.35.

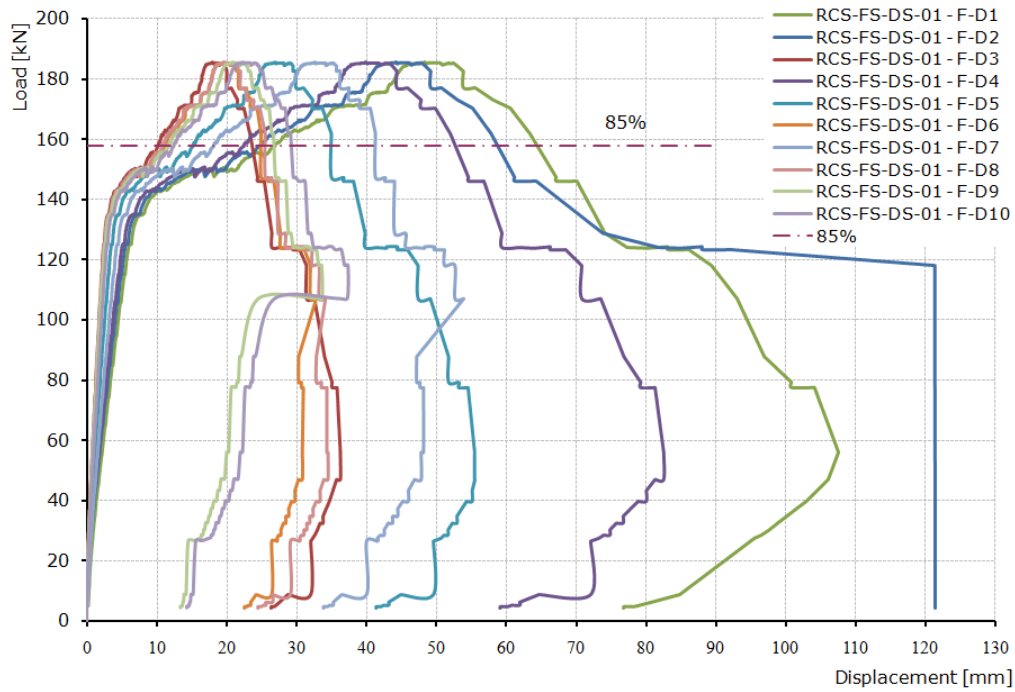


Fig. 6.34. - Diagramele F-D pentru cele 10 poziții ale captorilor de deplasare

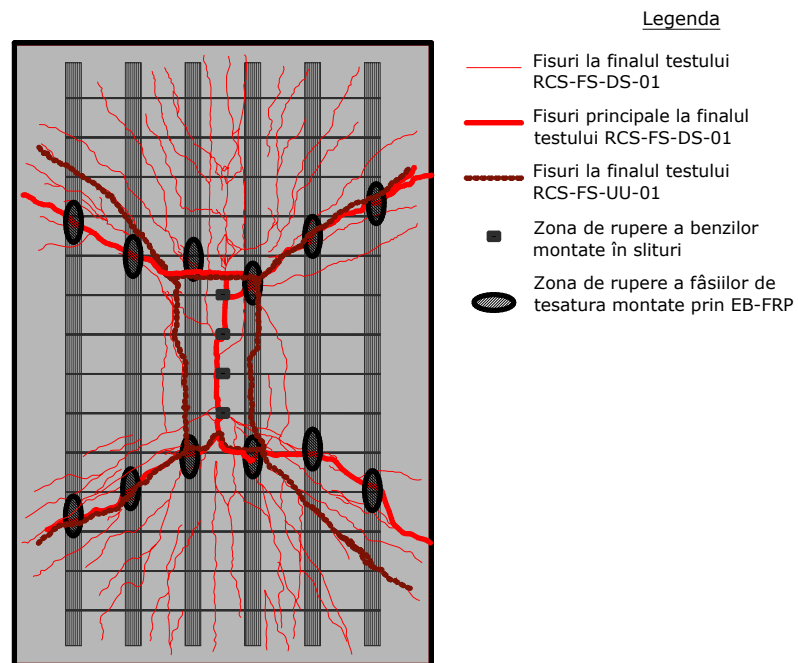


Fig. 6.35. - Caracteristicile cedării elementului consolidat

Starea de fisurare a elementului evidențiază efectul pozitiv al sistemului de consolidare, numărul fisurilor apărute fiind mult mai mare decât în cazul elementului neconsolidat, în special în treimile marginale. Fisurile mai numeroase, și implicit cu deschideri mai mici, generează bineînțeles o comportare mai bună, starea limită de fisurare fiind atinsă la trepte superioare, comparativ cu o situație în care fisurile sunt mai rare și cu deschideri mai mari. Distribuția fisurilor la finalul testului este prezentată în Fig. 6.35., cele principale fiind evidențiate cu linie îngroșată. Este interesant de remarcat faptul că, după consolidare, fisurile principale ce se deschid nu coincid în mod obligatoriu cu fisurile deschise în timpul testului pe elementul neconsolidat. În Fig. 6.35. fisurile din testul inițial sunt suprapuse peste starea de fisurare a elementului consolidat, fiind reprezentate cu linii punctate.

Valorile măsurate ale deformațiilor specifice din fibrele elementelor de consolidare oferă o serie de informații despre solicitarea materialelor de consolidare precum și despre modul de lucru al acestora. Poziția timbrelor relativ la distribuția finală a fisurilor este ilustrată în Fig. 6.36. Se poate observa că unele dintre timbre au fost montate în zone în care nu s-au deschis fisuri importante (ex. G-F-04, G-F-09) iar altele au fost chiar intersectate de fisurile apărute (ex. G-F-01, G-F-07).

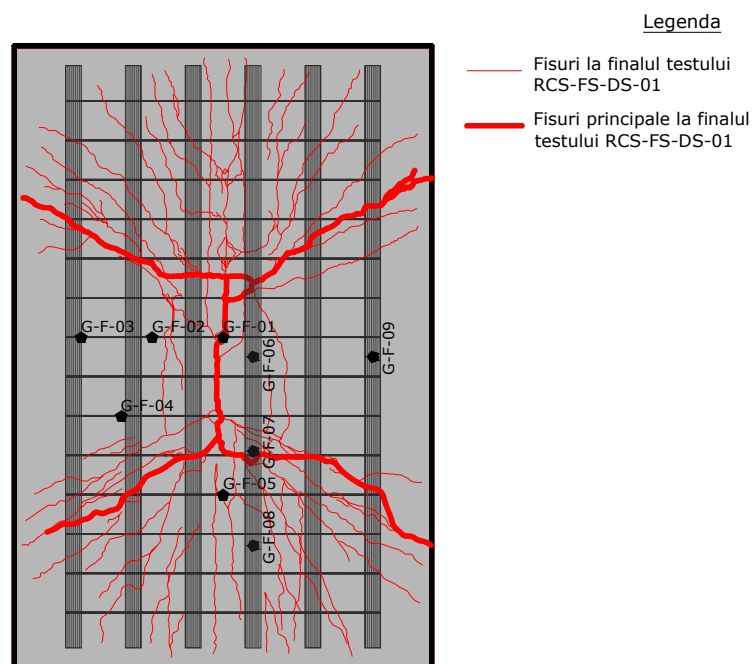


Fig. 6.36. - Poziția timbrelor relativ la distribuția finală a fisurilor

Diagramele Forță-Deformație specifică pentru cele nouă timbre sunt prezentate în Fig. 6.37. Timbrele G-F-03, G-F-04, G-F-08 și G-F-09 au înregistrat pe parcursul testului valori maxime ce nu depășesc 0,30‰, denotând faptul că în zonele în care au fost montate, eforturile în elementele de consolidare sunt foarte mici (lucru evidențiat și de distribuția fisurilor). Pe de altă parte, timbrele G-F-01 și G-F-05 au înregistrat valori maxime ale deformațiilor specifice substanțiale, de 19,46‰ și respectiv 16,67‰. Astfel, deformația specifică în banda pe care a fost

montat timbrul G-F-01 a depășit chiar valoarea deformației specifice ultime dată de producător (17‰).

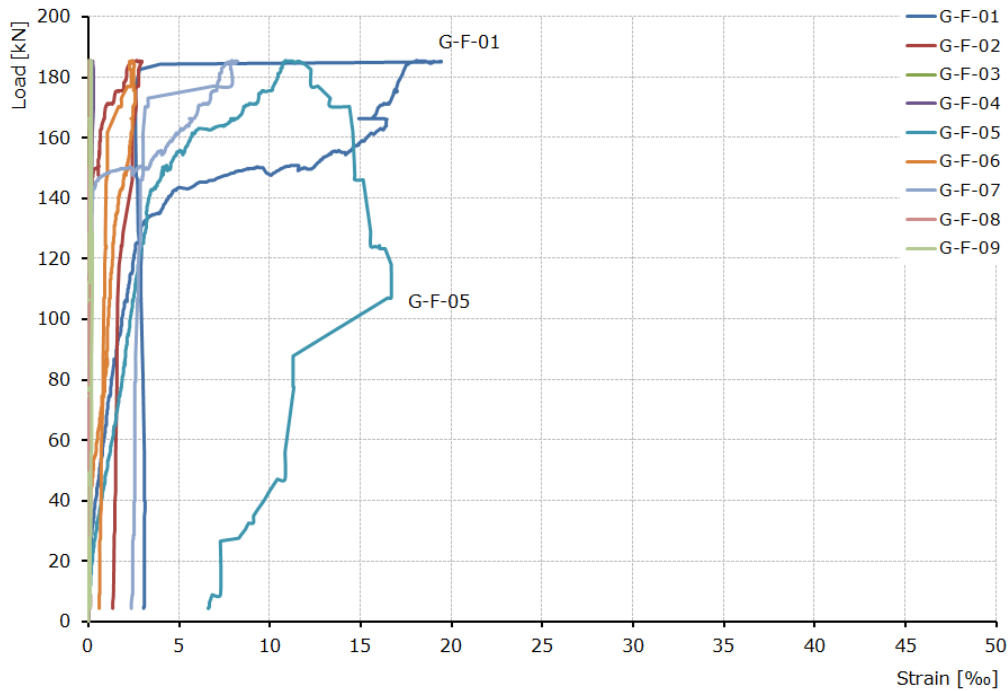


Fig. 6.37. - Diagramele F-ε pentru cele nouă timbre montate pe elemente CFRP

Comparând valorile maxime înregistrate de timbrele montate pe același element de consolidare se obțin graficele din Fig. 6.38. Distanța reprezentată pe axa absciselor este măsurată din punctul în care a fost montat primul timbru pentru fiecare element în parte (G-F-01 și respectiv G-F-06), pe direcția elementului de consolidare.

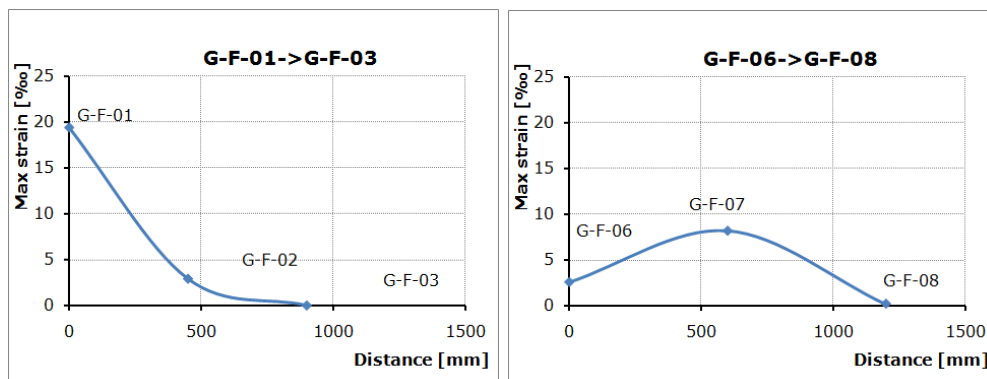


Fig. 6.38. - Comparație privind valorile maxime înregistrate de timbrele montate pe același element de consolidare

În continuare, în Fig. 6.39. - Fig. 6.40. sunt prezentate o serie de detalii ale cedării elementului consolidat.



Fig. 6.39. - Vedere de ansamblu a feței inferioare a elementului după cedare



Fig. 6.40. - Vedere de ansamblu a feței inferioare a elementului după cedare



Fig. 6.41. - Detalii de cedare ale benzilor (NSMR)



Fig. 6.42. - Detalii de cedare în zone de intersecție bandă (NSMR) - fâșie (EB)

6.5. Încercări efectuate pe elementul cu gol dreptunghiular mic - (RCS-RSC-01)

6.5.1. Încercarea elementului în starea inițială (fără consolidare) - Test RCS-RSC-UU-01

Pe parcursul încercării, s-au monitorizat o serie de parametri: valoarea încărcării aplicate, deplasarea verticală în 8 puncte diferite, deformația specifică în 4 puncte pe 3 armături inferioare diferite și deformația specifică în beton într-o secțiune. Pozițiile tuturor senzorilor de monitorizare sunt prezentate în Fig. 6.43.

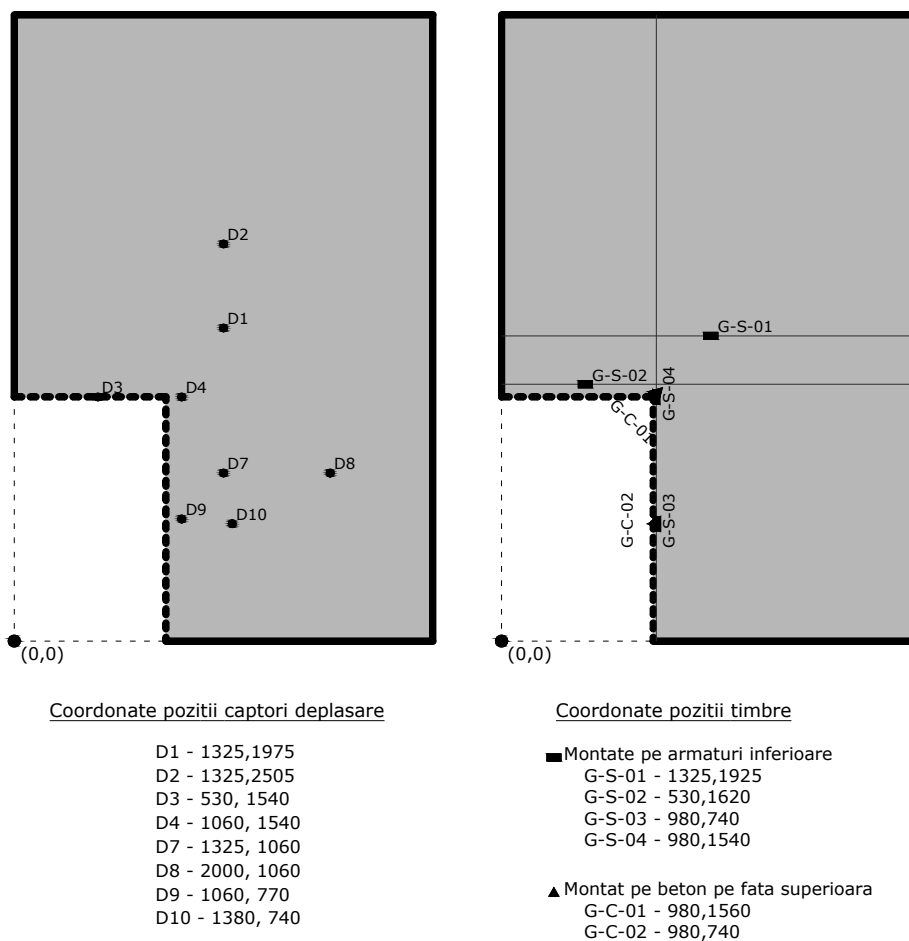


Fig. 6.43. - Pozițiile senzorilor

Încărcarea a fost aplicată monoton crescător, până la atingerea unei valori de 82 kN. La fel ca în cazul tuturor încercărilor din prezentul program experimental, suplimentul de încărcare adus de greutatea proprie a anumitor subansambluri s-a

evaluat la 4,75 kN, astfel încât încărcarea maximă atinsă în timpul testului este de 86,75 kN.

Pe parcursul testului, deplasarea verticală maximă a avut valoarea de 11,36 mm, fiind înregistrată în dreptul captorului de deplasare D4. Deplasarea verticală maximă înregistrată în centrul plăcii (captor D1) a atins valoarea de 9,77 mm. Prima fisură vizibilă apare pe fața inferioară a plăcii la un pas de încărcare ce corespunde unei valori de 64,75 kN. Punctul de inițiere al fisurii este reprezentat de colțul golului. Fisura se deschide pe o direcție cvasi paralelă cu latura lungă a elementului. La niveluri superioare de încărcare, se deschid încă două fisuri, având direcțiile indicate în Fig. 6.44. Deschiderea fisurilor și lungimea acestora a crescut odată cu creșterea încărcării exterioare, la finalul testului înregistrându-se o deschidere maximă a fisurilor de 2,40 mm.

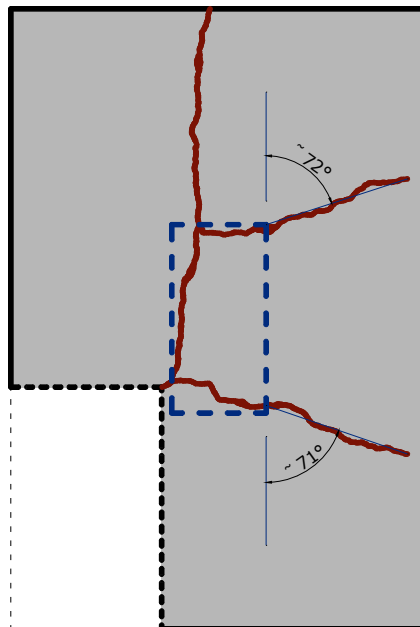


Fig. 6.44. - Configurația fisurilor și conturul suprafeței de încărcare

Diagramele de comportare Forță-Deplasare sunt prezentate în Fig. 6.45. pentru toți cei opt captori de deplasare. Se observă că deplasarea maximă se înregistrează în colțul golului, în poziția captorului D4. Valorile deplasărilor din dreptul captorilor D1 și D2 sunt apropiate de valorile maxime.

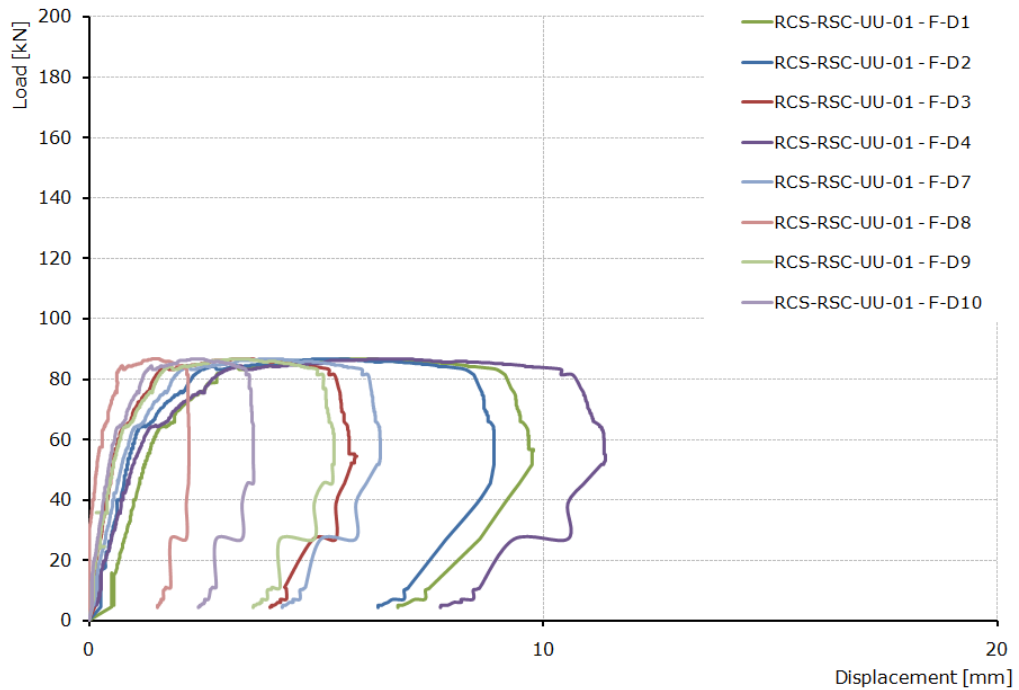


Fig. 6.45. - Diagrame Forță-Deplasare

6.5.2. Consolidarea elementului

Consolidarea plăcii s-a realizat prin dispunerea unor materiale compozite polimerice pe fața inferioară a acesteia, fața întinsă. Astfel, s-au lipit o serie de benzi din CFRP lângă marginile golului, pe ambele direcții paralele cu laturile acestuia. Elementele de consolidare de pe direcția paralelă cu latura scurtă a golului s-au montat prin tehnica NSMR-FRP, iar cele de pe direcția paralelă cu direcția lungă a acestuia s-au montat prin tehnica EB-FRP. Principalele proprietăți ale sistemului de consolidare sunt centralizate în Tabel 6.7.

Tabel 6.7. - Proprietăți ale sistemului de consolidare

| Tehnică aplicare | NSMR-FRP | | EB-FRP | |
|--|------------------|---------|-------------------|---------|
| | Benzi pultrudate | Rășină | Lamele pultrudate | Rășină |
| Modul de elasticitate [N/mm ²] | 165000 | 12800 | 165000 | 12800 |
| Deformația specifică ultimă | 0,017 | --- | 0,017 | --- |
| Rezistența la compresiune [N/mm ²] | --- | 85 | --- | 85 |
| Rezistența la întindere [N/mm ²] | --- | 24...27 | --- | 24...27 |

Cantitatea necesară de elemente CFRP ce trebuie montată pentru a reface capacitatea plăcii a fost determinată analitic, pe baza unei ipoteze simple: se egalează forța de întindere pe care ar fi putut-o prelua armătura de oțel (armătură

eliminată prin tăierea golului) cu forța de întindere pe care o pot prelua elementele CFRP de consolidare. Abordarea este prezentată sub forma Rel 6.1. Valorile termenilor din Rel 6.1. precum și calculul detaliat al soluțiilor de consolidare sunt prezentate în Anexa I.

Pe baza calculelor prezentate în anexă, a rezultat necesitatea utilizării a 5 benzi montate în „șlițuri” (NSMR-CFRP) și 1 lamelă pultrudată montată prin tehnica EB-FRP. Configurația și caracteristicile geometrice ale sistemului de consolidare sunt prezentate în Fig. 6.46. printr-o vedere a suprafeței inferioare a plăcii.

Etapile parcurse pentru a realiza consolidarea sunt:

- marcarea pozițiilor șlițurilor și tăierea acestora
- marcarea și șlefuirea suprafeței pentru aplicarea lamelei pultrudate
- curățarea șlițurilor și a suprafeței șlefuite prin aspirare și suflare cu aer
- curățarea benzilor de CFRP și montarea acestora în șlițuri prin tehnica NSMR-FRP
- curățarea lamelei pultrudate și aplicarea acesteia prin tehnica EB-FRP.

Etapile sunt identice ca și în cazul consolidării elementului întreg, apărând doar o serie de diferențe de natură tehnologică rezultate din aplicarea prin tehnica EB-FRP a unei lamele pultrudate în loc de fâșii de țesătură. Astfel, diferența majoră constă în pre-impregnarea lamelei cu un strat de rășină.

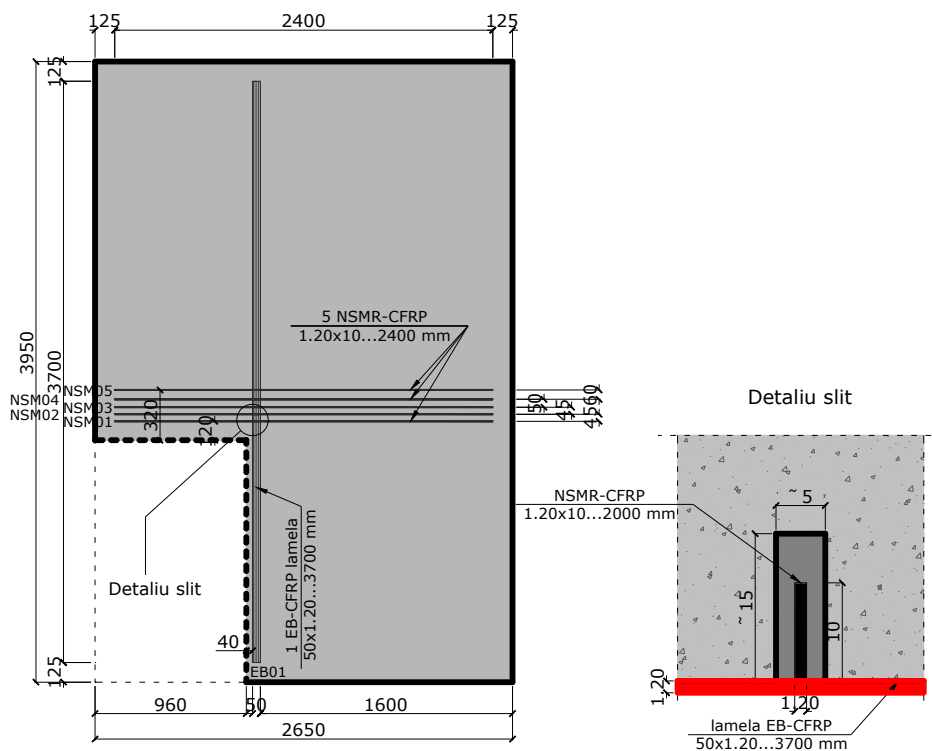


Fig. 6.46. - Configurația și caracteristicile geometrice ale sistemului de consolidare

6.5.3. Încercarea elementului consolidat - Test RCS-RSC-DS-01

Suplimentar față de încercarea elementului neconsolidat, patru timbre au fost dispuse pe două benzi montate în șlițuri și patru timbre au fost montate pe lamela pultrudată montată prin tehnica EB-FRP. Pozițiile timbrelor montate pe elemente de consolidare CFRP sunt prezentate în Fig. 6.47.

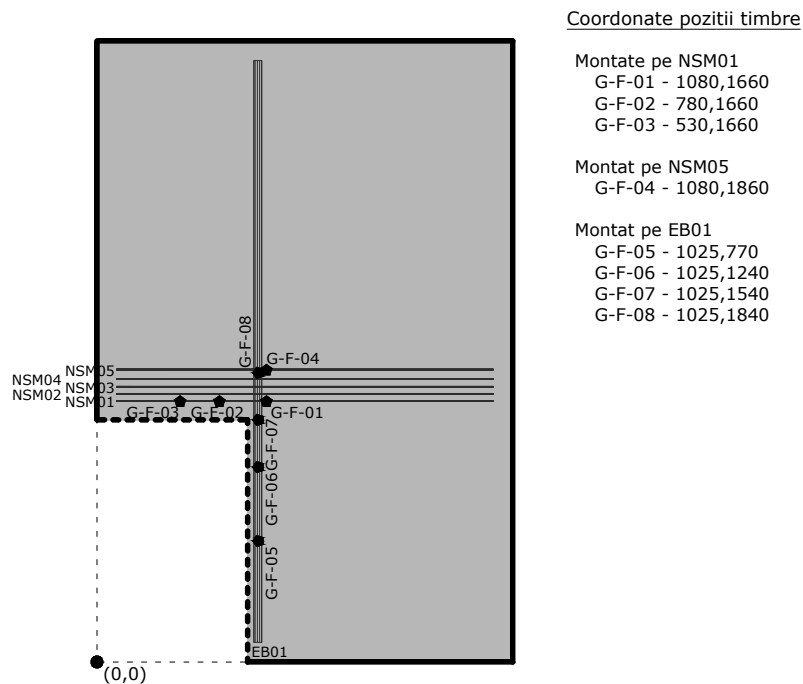


Fig. 6.47. - Pozițiile timbrelor tensometrice pe elemente CFRP

Elementul consolidat a fost încercat până la cedarea completă, în timpul testului înregistrându-se o forță maximă de 85,75 kN. Acestei valori a încărcării îi corespunde o deplasare centrală de 27,76 mm și o deplasare maximă înregistrată la colțul golului de 27,99 mm. Peste acest nivel, deplasările au crescut până la o valoare maximă de 32,47 mm atât în D1 cât și în D4 și de 32,97 mm în D2. Considerând criteriul de cedare al elementului ca fiind definit de o scădere a încărcării maxime cu 15%, se poate admite că cedarea plăcii consolidate s-a produs la un nivel al forței exterioare de 72,90 kN și o valoare corespunzătoare a deplasării centrale de 32,47 mm. Diagramele de comportare Forță-Deplasare sunt prezentate în Fig. 6.48.

Comportarea sistemului de consolidare este diferită pentru fiecare element de consolidare în parte. Astfel, consolidarea cu lamela pultrudată lipită prin EB-FRP a cedat prematur, printr-un fenomen de cedare prin pierderea aderenței, dezlipirea producându-se preponderent în stratul superficial de beton. Pe de altă parte, toate benzile CFRP montate în șlițuri s-au rupt, demonstrând aderența corespunzătoare a elementelor. Benzile s-au rupt în zone din imediata vecinătate a colțului golului.

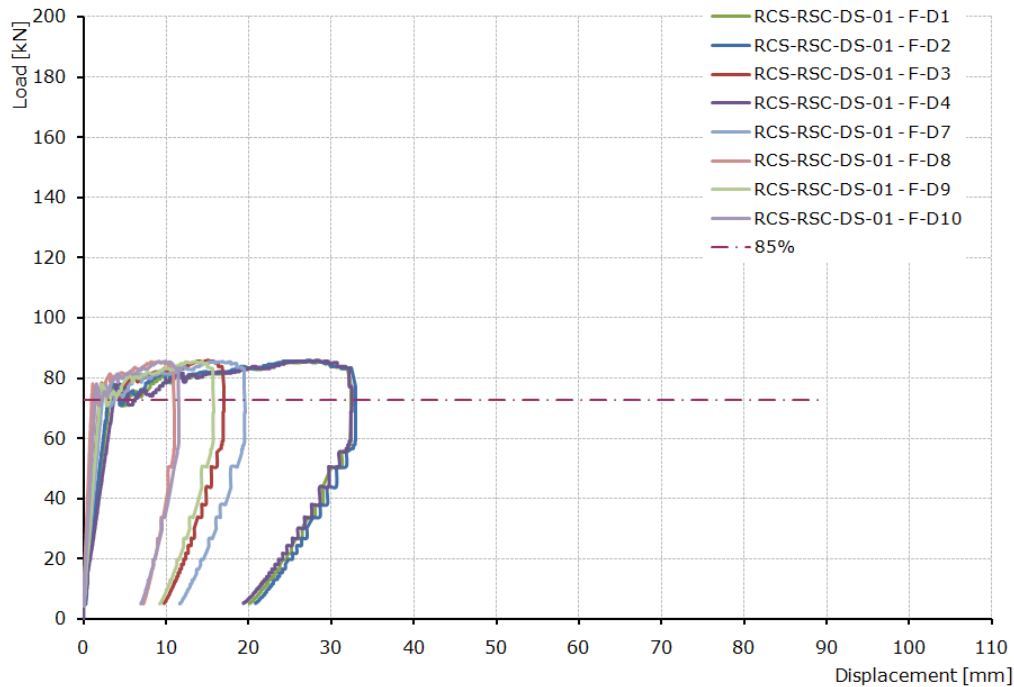


Fig. 6.48. - Diagramele Forță-Deplasare pentru cei 8 captori

La fel ca și în cazul elementului întreg, starea de fisurare a elementului consolidat evidențiază efectul pozitiv al sistemului de consolidare. Astfel, în zona benzilor de CFRP montate în șlițuri, concentrația fisurilor este extrem de mare, comparativ cu elementul neconsolidat. Distribuția fisurilor la finalul testului este prezentată în Fig. 6.49., cele principale fiind evidențiate cu linie îngroșată. Fisurile principale, care determină cedarea elementului sunt identice cu cele deschise în urma testului pe elementul neconsolidat.

Poziția timbrei relativ la distribuția finală a fisurilor este ilustrată în Fig. 6.50. Se poate observa că unele dintre timbre au fost montate în zone în care nu s-au deschis fisuri importante (ex. G-F-03, G-F-05) iar altele au fost chiar intersectate de fisurile apărute (ex. G-F-01, G-F-04, G-F-07).

Diagramele Forță-Deformație specifică pentru cele nouă timbre sunt prezentate în Fig. 6.51. Timbrele G-F-03 și G-F-05 au înregistrat pe parcursul testului valori maxime ce nu depășesc $0,30\text{‰}$, denotând faptul că în zonele în care au fost montate, eforturile în elementele de consolidare sunt foarte mici (lucru evidențiat și de distribuția fisurilor). Pe de altă parte, timbrele G-F-01 și G-F-04 au înregistrat valori maxime ale deformațiilor specifice substanțiale, de $11,56\text{‰}$ și respectiv $17,78\text{‰}$. Astfel, ca și în cazul testului RCS-FS-DS-01, s-au înregistrat valori ale deformației specifice maxime ce au depășit valoarea deformației specifice ultime dată de producător (17‰). Timbrele fixate pe lamela pultrudată montată prin EB-FRP nu au înregistrat valori mai mari de $3,30\text{‰}$, lucru datorat cel mai probabil cedării premature a lamelei și desprinderii acesteia de suprafața de beton.

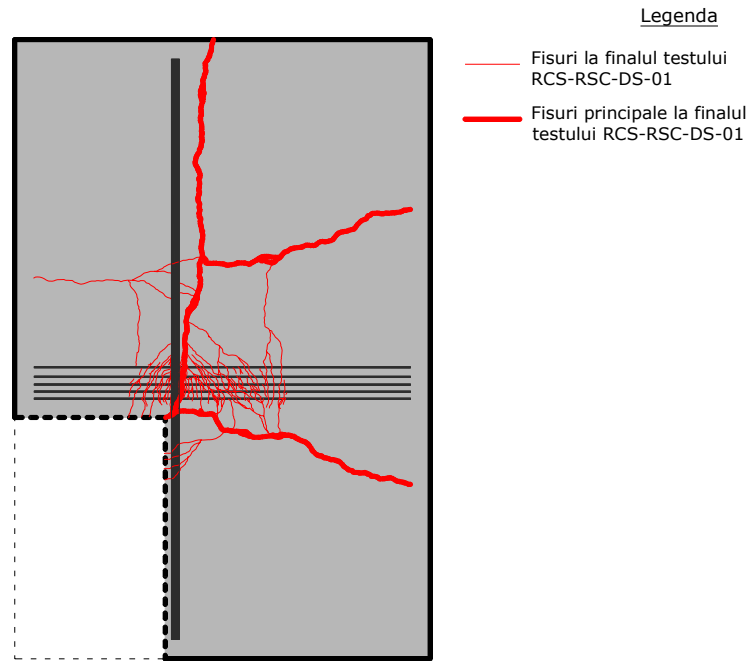


Fig. 6.49. - Distribuția fisurilor la finalul testului RCS-RSC-DS-01

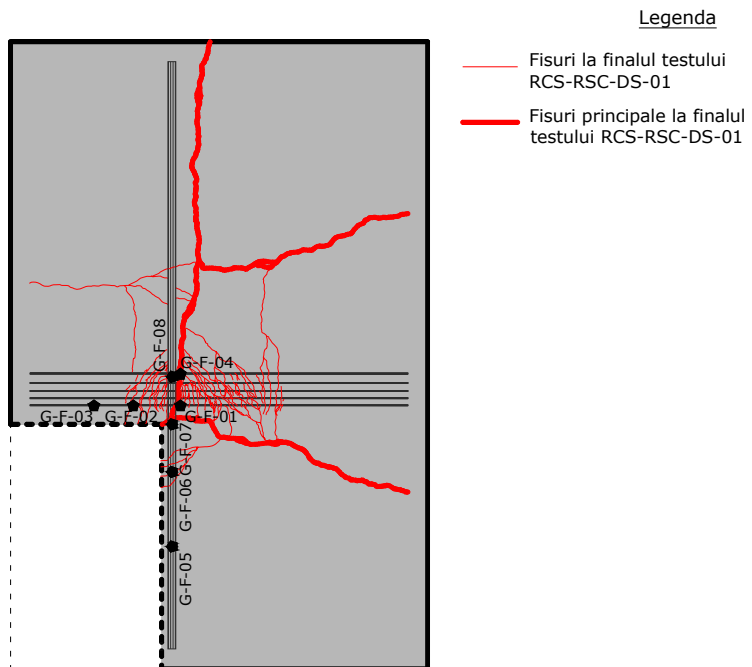
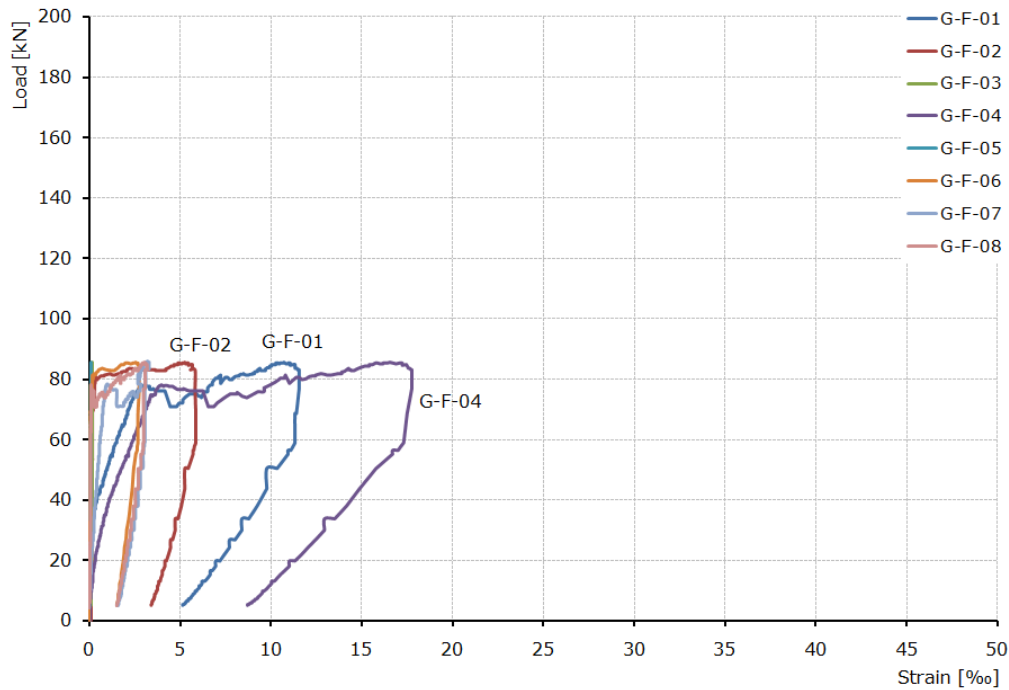


Fig. 6.50. - Poziția timbrelor relativ la distribuția finală a fisurilor

Fig. 6.51. - Diagramele F- ϵ în elemente CFRP de consolidare

Comparând valorile maxime înregistrate de timbrele montate banda NSM 01 se obține graficul din Fig. 6.52. Distanța reprezentată pe axa absciselor este măsurată din punctul în care a fost montat timbrul G-F-01, pe direcția elementului de consolidare.

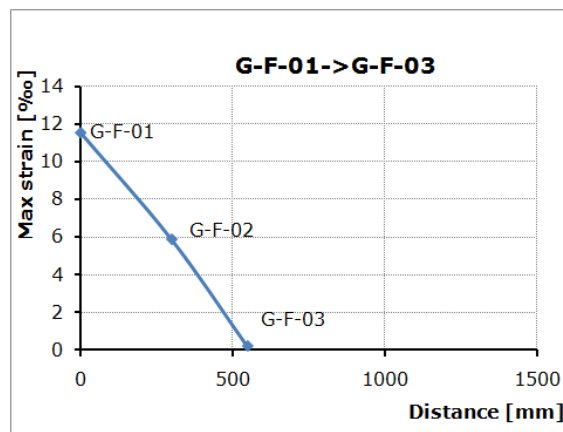


Fig. 6.52. - Variația deformației specifice maxime în timbrele montate pe banda NSM01

În continuare, în Fig. 6.53. - Fig. 6.56. sunt prezentate o serie de detalii ale cedării elementului consolidat.



Fig. 6.53. - Vedere generală a suprafeței inferioare a plăcii



Fig. 6.54. - Detaliu de cedare a unei benzi montate în șliț



Fig. 6.55. - Cedarea prin pierderea aderenței a lamelei montate prin EB-FRP



Fig. 6.56. - Inițierea cedării prin pierderea aderenței lamelei

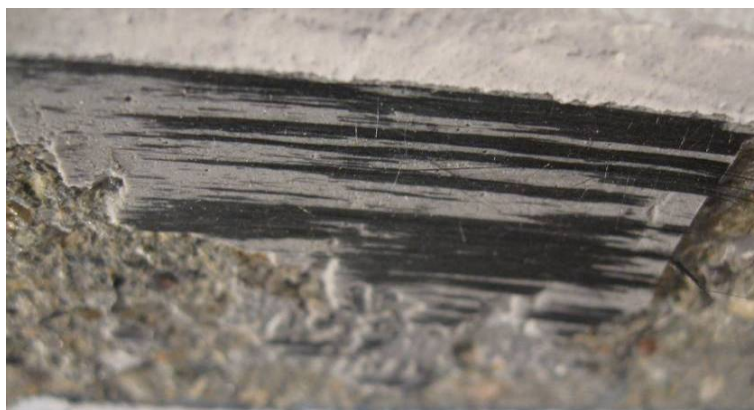


Fig. 6.57. - Detaliu de zonă în care cedarea s-a produs în interiorul compozitului



Fig. 6.58. - Ruperea unei bare de armătură într-o zonă de nod a plasei inferioare



Fig. 6.59. - Ridicarea colțurilor plăcii sub efectul încărcărilor aplicate

6.6. Încercări efectuate pe primul element cu gol dreptunghiular mare - (RCS-RLC-01)

6.6.1. Încercarea elementului în starea inițială (fără consolidare) - Test RCS-RLC-UU-01

Pe parcursul încercării, s-au monitorizat o serie de parametri: valoarea încărcării aplicate, deplasarea verticală în 8 puncte diferite, deformația specifică în 4 puncte pe 3 armături inferioare diferite și deformația specifică în beton într-o secțiune. Pozițiile tuturor senzorilor de monitorizare sunt prezentate în Fig. 6.60.

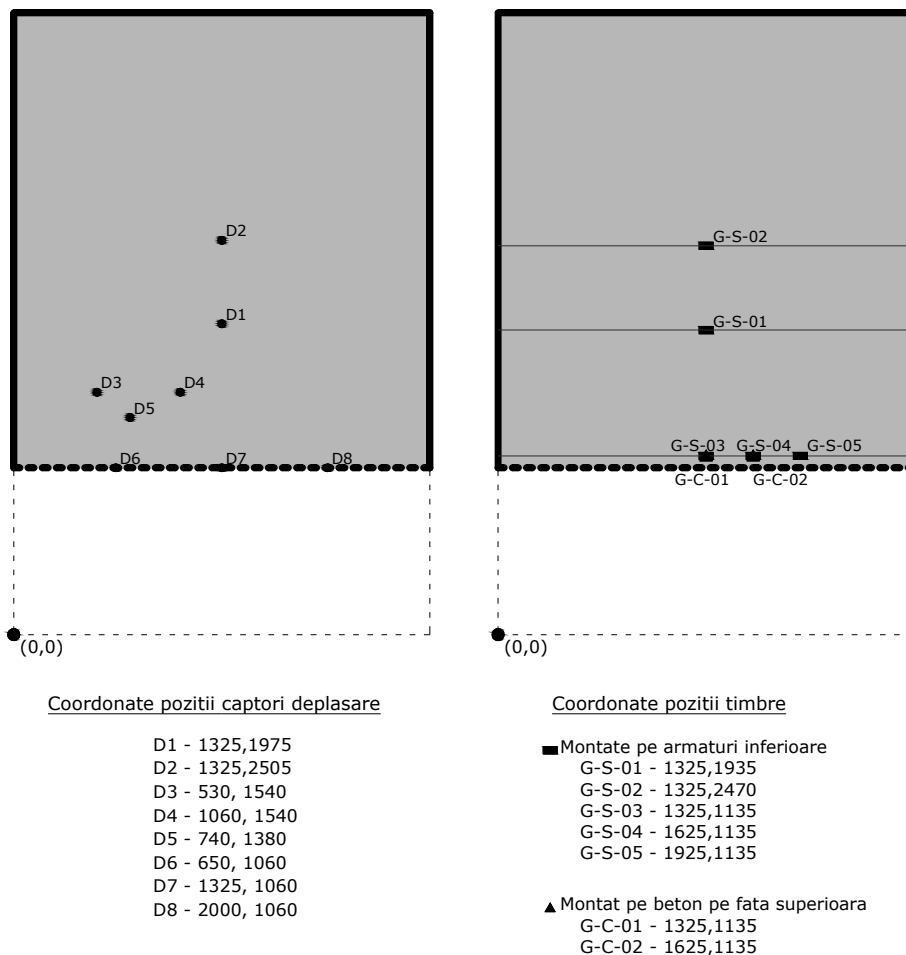


Fig. 6.60. - Pozițiile senzorilor

Încărcarea a fost aplicată monoton crescător, până la atingerea unei valori de 74,50 kN (incluzând suplimentul adus de greutatea proprie a anumitor subansambluri).

Pe parcursul testului, deplasarea verticală maximă a avut valoarea de 9,59 mm, fiind înregistrată în dreptul captorului de deplasare D7. Deplasarea verticală maximă înregistrată în centrul plăcii (captor D1) a atins valoarea de 8,04 mm. Prima fisură vizibilă apare pe fața inferioară a plăcii la un pas de încărcare ce corespunde unei valori de 59,75 kN. Punctul de inițiere al fisurii este reprezentat de centrul marginii golului (în zona captorului D7 și a timbrului G-S-03). Fisura se deschide pe o direcție cvasi paralelă cu latura lungă a elementului. La niveluri superioare de încărcare, se deschid încă două fisuri, având direcțiile indicate în Fig. 6.61. Deschiderea fisurilor și lungimea acestora a crescut odată cu creșterea încărcării exterioare, la finalul testului înregistrându-se o deschidere maximă a fisurilor de 1,00 mm.

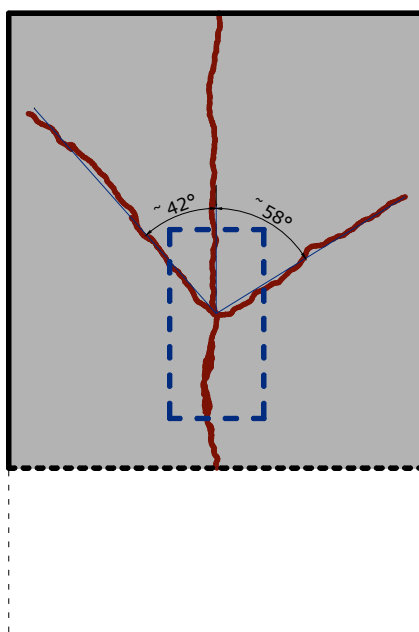
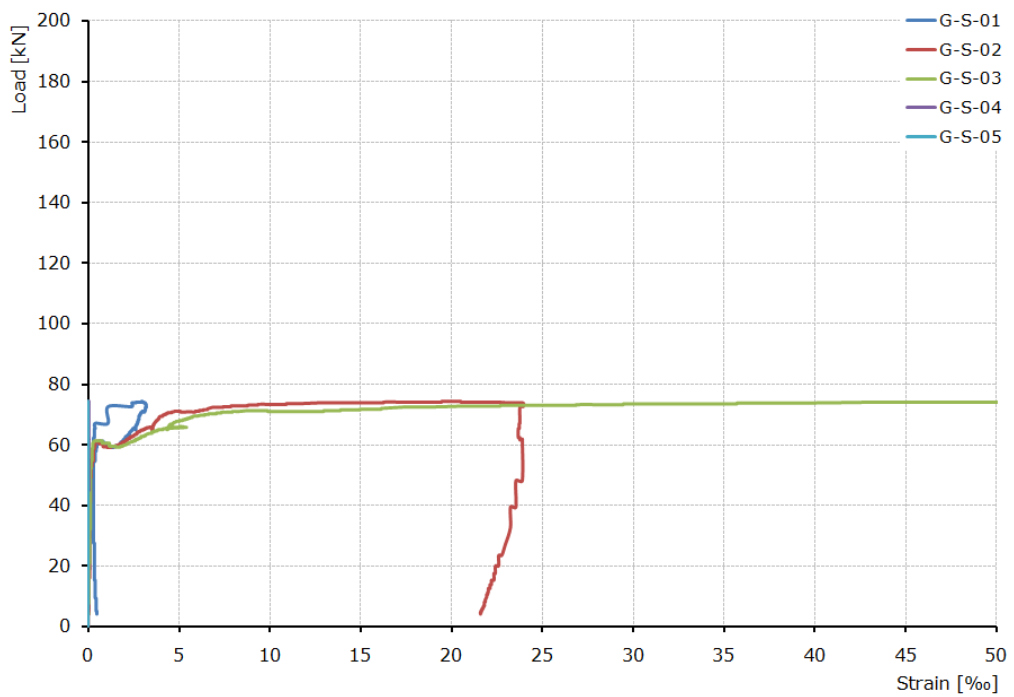
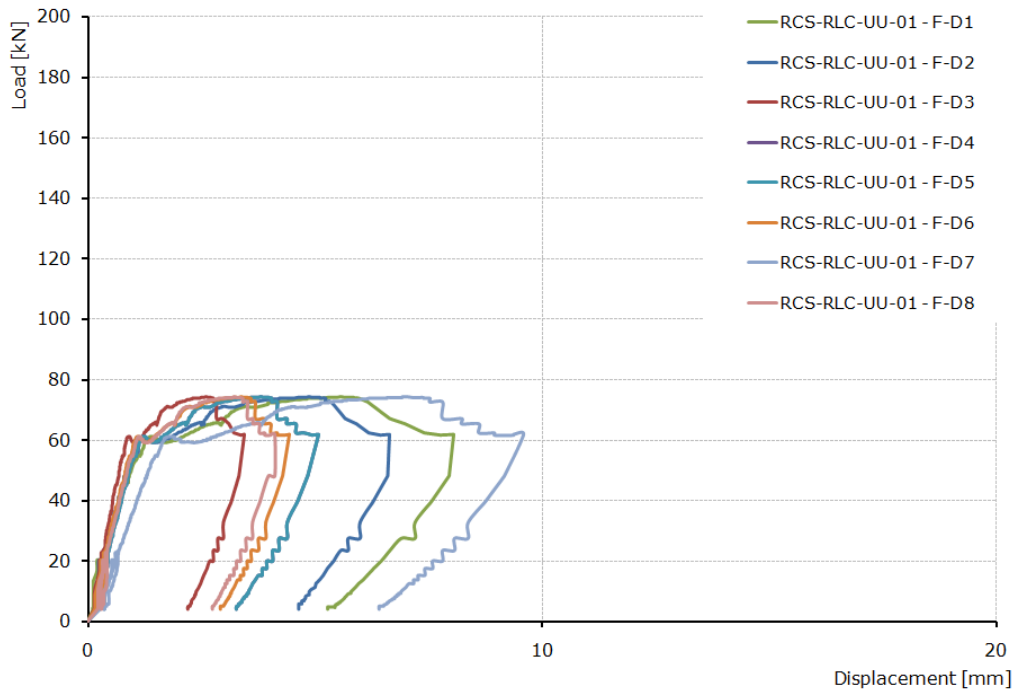


Fig. 6.61. - Configurația fisurilor și conturul suprafeței de încărcare

Diagramele de comportare Forță-Deplasare sunt prezentate în Fig. 6.62. pentru toți cei opt captori de deplasare.

În timpul încercării s-au măsurat valori maxime ale deformațiilor specifice din armături de 55‰. Aceste valori sunt mai mari decât deformațiile specifice înregistrate în urma încercărilor la tracțiune pe epruvete confecționate din plasele de armătură utilizate pentru armarea elementelor. Ținând cont de starea de fisurare a elementului, este limpede că valorile maxime ale deformațiilor specifice au fost înregistrate în cele trei timbre amplasate în proximitatea fisurii (G-S-01, G-S-02 și G-S-03), valoarea maximă de 55‰ fiind înregistrată de timbrul G-S-03. Deformațiile specifice din armăturile pe care au fost montate aceste trei timbre au depășit valoarea limitei de curgere. Diagramele de Forță-Deformație specifică sunt prezentate în Fig. 6.63.



6.6.2. Consolidarea elementului

Consolidarea plăcii s-a realizat prin dispunerea unor materiale compozite polimerice pe fața inferioară a acesteia. S-au lipit o serie de benzi din CFRP lângă marginea lungă a golului, pe direcția paralelă cu aceasta. Elementele de consolidare s-au montat prin tehnica NSMR-FRP. Proprietățile sistemului de consolidare sunt identice cu cele utilizate la elementele anterioare pentru tehnica NSMR-FRP și sunt prezentate în Tabel 6.3.

Cantitatea necesară de elemente CFRP ce trebuie montată pentru a reface capacitatea plăcii a fost determinată analitic, pe baza aceleași ipoteze ca și în cazul elementului cu gol dreptunghiular mic. Abordarea este prezentată sub forma Rel 6.1. Valorile termenilor din Rel 6.1. precum și calculul detaliat al soluțiilor de consolidare sunt prezentate în Anexa I.

Pe baza calculelor prezentate în anexă, a rezultat necesitatea utilizării a 4 benzi montate în „șlițuri” (NSMR-CFRP). Configurația și caracteristicile geometrice ale sistemului de consolidare sunt prezentate în Fig. 6.64. printr-o vedere a suprafeței inferioare a plăcii.

Etapele parcurse pentru a realiza consolidarea sunt identice cu cele necesare pentru consolidarea elementelor precedente, cu mențiunea că din moment ce nu există elemente compozite montate prin tehnica EB-FRP, etapele aferente acestei tehnici se elimină.

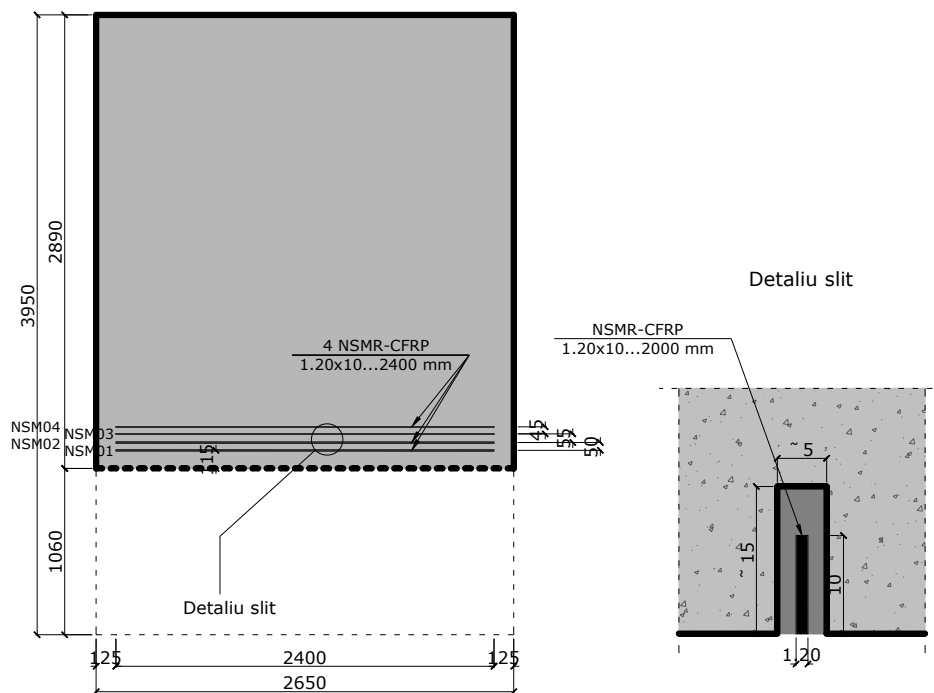


Fig. 6.64. - Configurația și caracteristicile geometrice ale sistemului de consolidare

6.6.3. Încercarea elementului consolidat - Test RCS-RLC-DS-01

Suplimentar față de încercarea elementului neconsolidat, trei timbre au fost dispuse pe banda din proximitatea marginii golului. Pozițiile timbrelor montate pe elemente de consolidare CFRP sunt prezentate în Fig. 6.65.

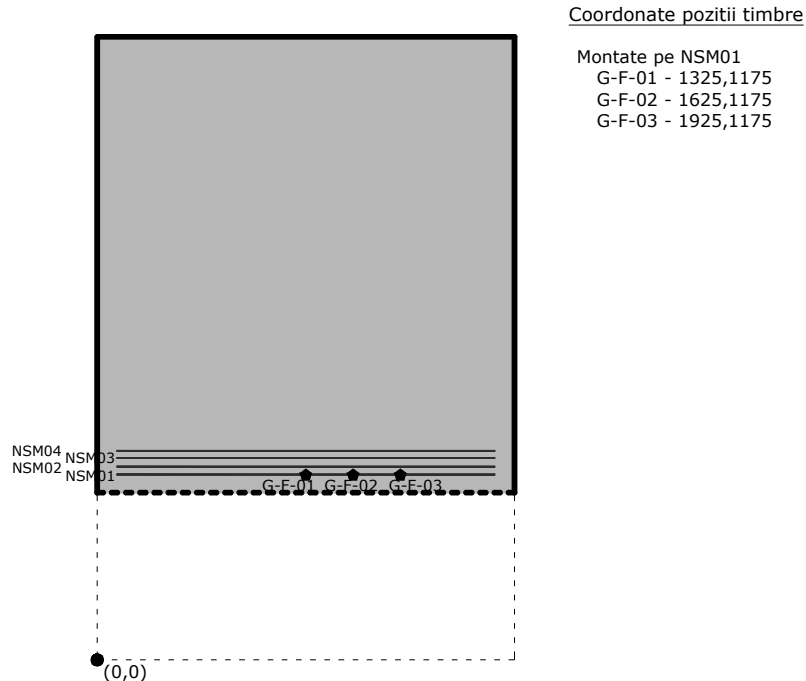


Fig. 6.65. - Pozițiile timbrelor tensometrice pe elemente CFRP

Elementul consolidat a fost încercat până la cedarea completă, în timpul testului înregistrându-se o forță maximă de 74,75 kN. Acestei valori a încărcării îi corespunde o deplasare centrală de 8,04 mm și o deplasare maximă înregistrată de captorul D7 de 8,44 mm. Considerând criteriul de cedare al elementului ca fiind definit de o scădere a încărcării maxime cu 15%, se poate admite că cedarea plăcii consolidate s-a produs la un nivel al forței exterioare de 63,54 kN și o valoare corespunzătoare a deplasării centrale de 12,40 mm. Deplasare centrală maximă înregistrată a atins valoarea de 87,70 mm, corespunzând ruperii totale a elementului. Diagramele de comportare Forță-Deplasare sunt prezentate în Fig. 6.66.

Toate benzile CFRP montate în șlițuri s-au rupt în zona centrală a acestora, în dreptul fisurii principale.

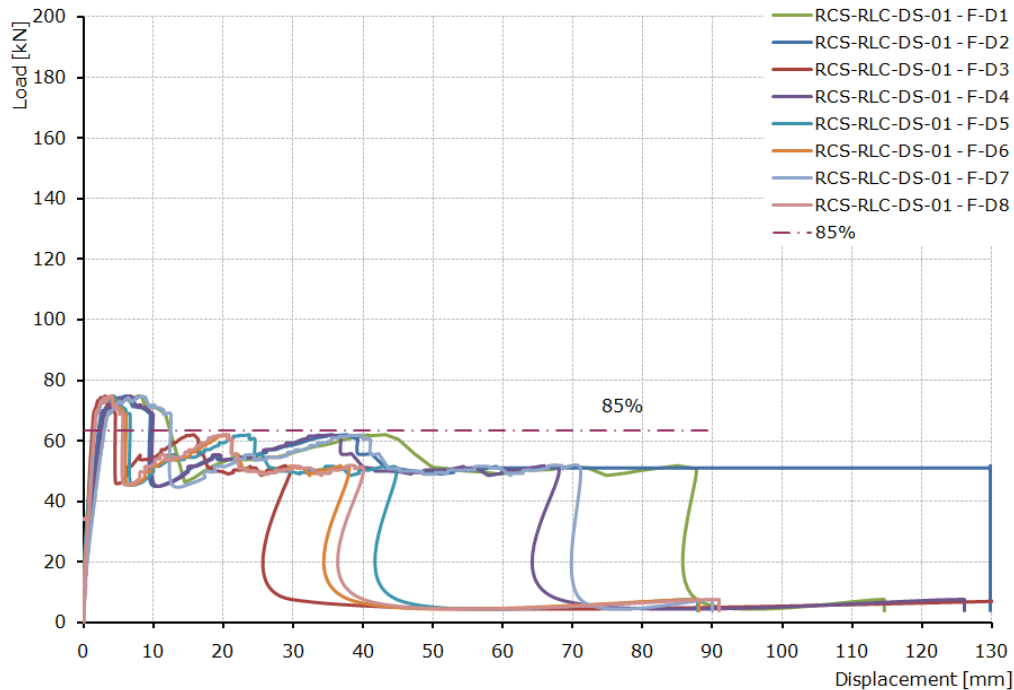


Fig. 6.66. - Diagramele Forță-Deplasare pentru cei 8 captori

La fel ca și în cazul elementului întreg, starea de fisurare a elementului consolidat evidențiază efectul pozitiv al sistemului de consolidare. Astfel, în zona benzilor de CFRP montate în șlițuri, concentrația fisurilor este extrem de mare, comparativ cu elementul neconsolidat. Distribuția fisurilor la finalul testului este prezentată în Fig. 6.67., cele principale fiind evidențiate cu linie îngroșată. Fisurile principale, care determină cedarea elementului, nu sunt în mod obligatoriu identice cu cele deschise în urma testului pe elementul neconsolidat.

Poziția timbrelelor relativ la distribuția finală a fisurilor este ilustrată în Fig. 6.68. Diagramele Forță-Deformație specifică pentru cele trei timbre sunt prezentate în Fig. 6.69. Toate timbrele montate pe benzi CFRP au înregistrat valori maxime ale deformațiilor specifice substanțiale, variind între de 9,24‰ și 18,59‰. Din nou, ca și în testele precedente (RCS-FS-DS-01 și RCS-RSC-DS-01), s-au înregistrat valori ale deformației specifice maxime ce au depășit valoarea deformației specifice ultime dată de producător (17‰). Comparând valorile maxime înregistrate de timbrele montate banda NSM 01 se obține graficul din Fig. 6.70. Distanța reprezentată pe axa absciselor este măsurată din punctul în care a fost montat timbrul G-F-01, pe direcția elementului de consolidare.

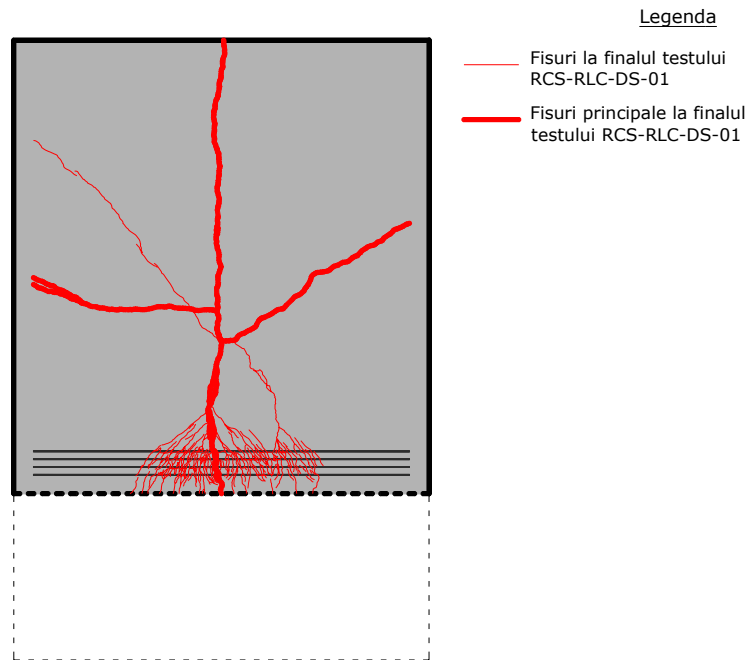


Fig. 6.67. - Distribuția fisurilor la finalul testului RCS-RLC-DS-01

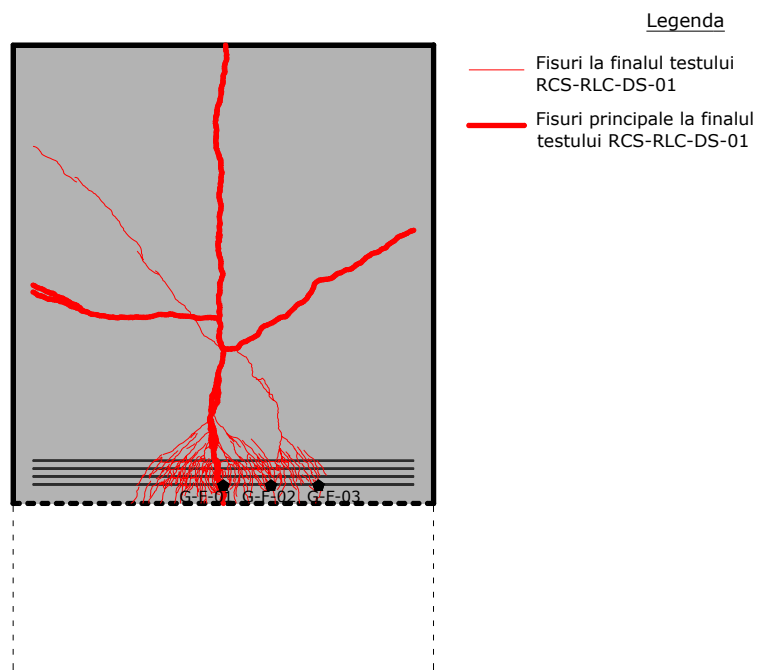


Fig. 6.68. - Poziția timbrelor relativ la distribuția finală a fisurilor

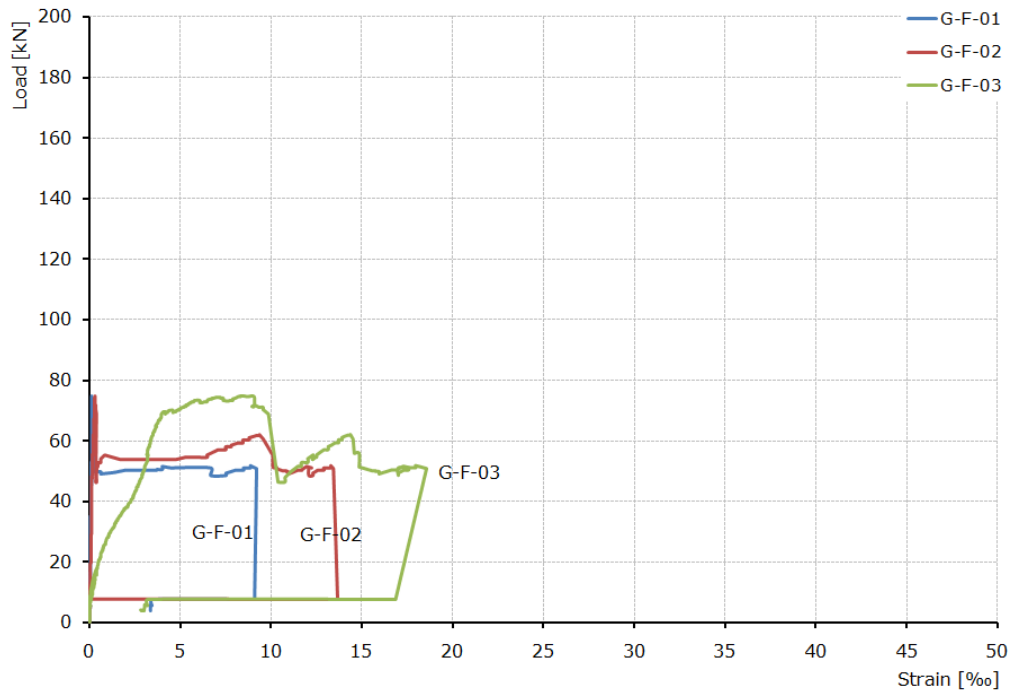
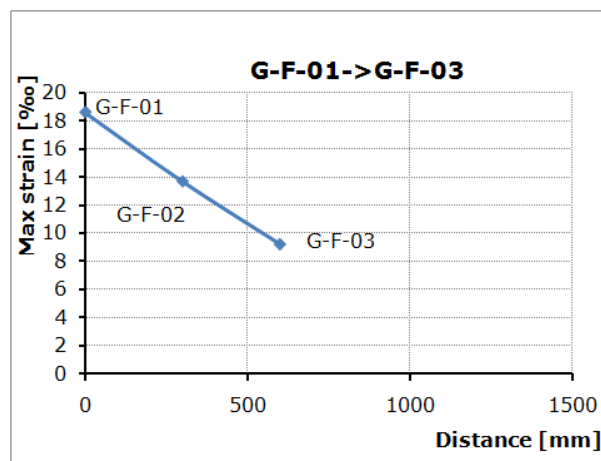
Fig. 6.69. - Diagramele F- ϵ în elemente CFRP de consolidare

Fig. 6.70. - Variația deformației specifice maxime în timbrele montate pe banda NSM01

În continuare, în Fig. 6.71. - Fig. 6.75. sunt prezentate o serie de detalii ale cedării elementului consolidat.



Fig. 6.71. - Starea plăcii la finalul încercării



Fig. 6.72. - Vedere a fisurii principale în zona captorului D7 (armătură și elemente CFRP rupte)



Fig. 6.73. - Detalii cedare - vecinătatea captorului D7

6.7. Încercări efectuate pe al doilea element cu gol dreptunghiular mare - (RCS-RLC-02)

6.7.1. Încercarea elementului în starea inițială (fără consolidare) - Test RCS-RLC-UU-02

Monitorizarea încercării a fost identică cu testul RCS-RLC-UU-01, pozițiile tuturor senzorilor fiind prezentate în Fig. 6.60.

Încărcarea a fost aplicată monoton crescător, până la atingerea unei valori de 66,75 kN (incluzând suplimentul adus de greutatea proprie a anumitor subansambluri). Pe parcursul testului, deplasarea verticală maximă a avut valoarea de 8,88 mm, fiind înregistrată în dreptul captorului de deplasare D7. Deplasarea verticală maximă înregistrată în centrul plăcii (captor D1) a atins valoarea de 8,51 mm. Prima fisură vizibilă apare pe fața inferioară a plăcii la un pas de încărcare ce corespunde unei valori de 55 kN. Punctul de inițiere al fisurii este reprezentat de centrul marginii golului (în zona captorului D7 și a timbrului G-S-03). Ca și în cazul testului RCS-RLC-UU-01, fisura se deschide pe o direcție cvasi paralelă cu latura lungă a elementului. La niveluri superioare de încărcare, se deschid încă două fisuri, având direcțiile indicate în Fig. 6.74. Diagramele de comportare Forță-Deplasare sunt prezentate în Fig. 6.75. În timpul încercării s-au măsurat valori maxime ale deformațiilor specifice din armături de 12,87‰, în timbrul G-S-02. Diagramele de Forță-Deformație specifică sunt prezentate în Fig. 6.76.

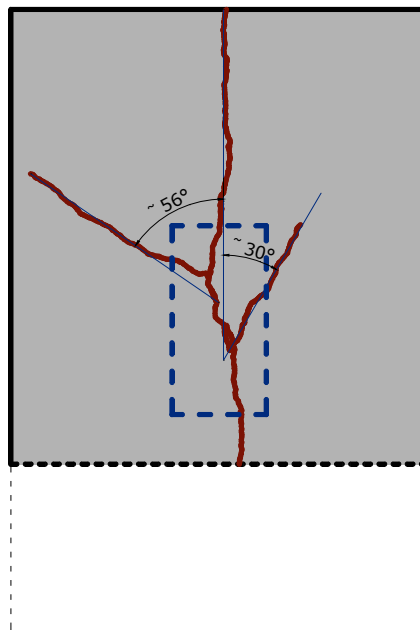
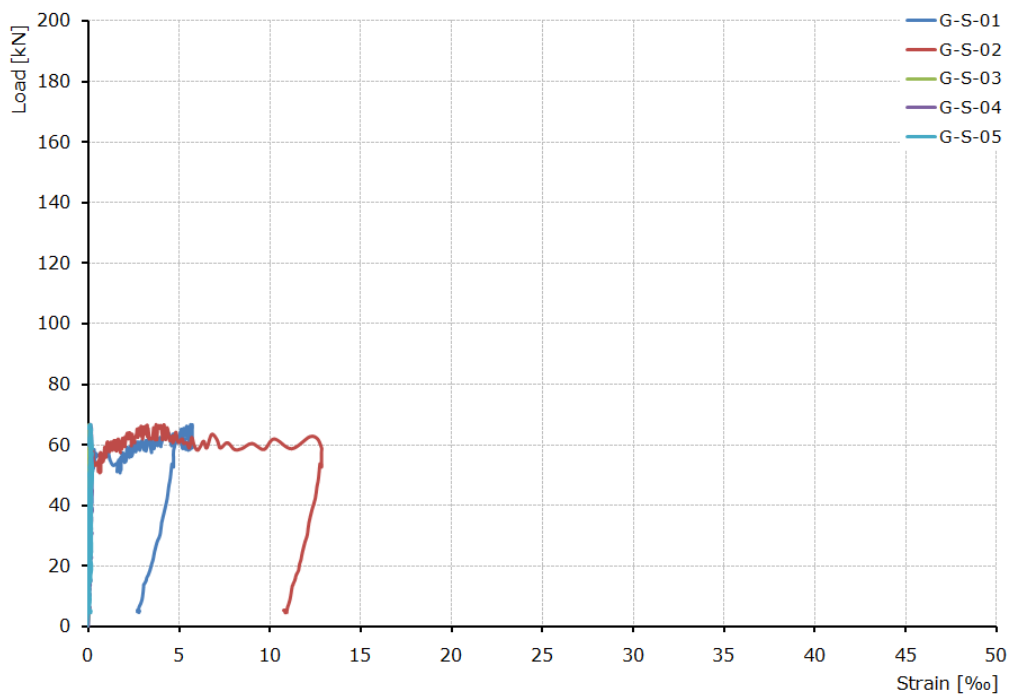
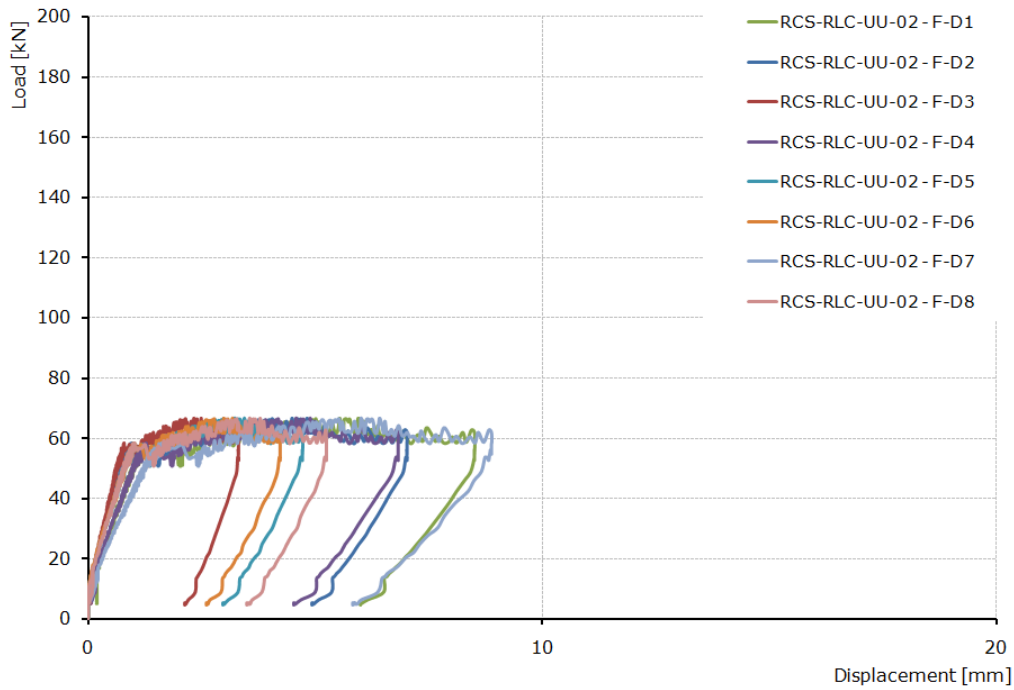


Fig. 6.74. - Configurația fisurilor și conturul suprafeței de încărcare



6.7.2. Consolidarea elementului

Consolidarea plăcii s-a realizat prin dispunerea unor materiale compozite polimerice pe fața inferioară a acesteia. Pentru consolidarea acestui element se adoptă o abordare combinată a celor prezentate pentru elementele anterioare. În încercarea de a spori capacitatea elementului prin consolidare, față de elementul RCS-RLC-01, întreaga suprafață inferioară va fi consolidată (și nu doar marginile golului bordate). Astfel, pentru refacerea capacității, marginea golului se bordează similar cu cazul elementului RCS-RLC-01, iar pentru sporirea capacității, se consolidează întreaga suprafață inferioară similar cu elementul RCS-FS-01. Proprietățile sistemului de consolidare sunt identice cu cele utilizate la elementul RCS-FS-01, fiind prezentate în Tabel 6.3.

Abordarea analitică prin care s-a calculat cantitatea necesară de elemente CFRP este prezentată sub forma Rel 6.1. Valorile termenilor din Rel 6.1. precum și calculul detaliat al soluțiilor de consolidare sunt prezentate în Anexa I.

Pe baza calculelor prezentate în anexă, a rezultat necesitatea utilizării a 13 benzi montate în „șlițuri” (NSMR-CFRP) și a 6 fâșii de țesătură montate prin tehnica EB-FRP. Configurația și caracteristicile geometrice ale sistemului de consolidare sunt prezentate în Fig. 6.77. printr-o vedere a suprafeței inferioare a plăcii.

Etapile parcurse pentru a realiza consolidarea sunt identice cu cele necesare pentru consolidarea elementului RCS-FS-01.

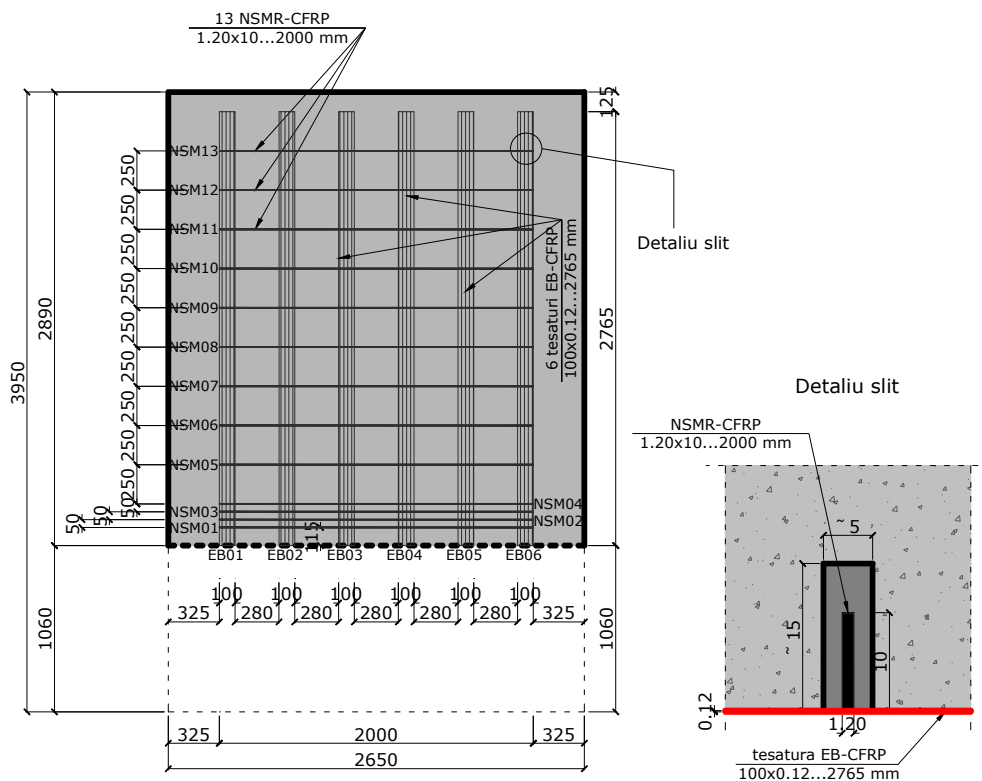


Fig. 6.77. - Configurația și caracteristicile geometrice ale sistemului de consolidare

6.7.3. Încercarea elementului consolidat - Test RCS-RLC-DS-02

Suplimentar față de încercarea elementului neconsolidat, trei timbre au fost dispuse pe banda din proximitatea marginii golului. Pozițiile timbrilor montate pe elemente de consolidare CFRP sunt prezentate în Fig. 6.78.

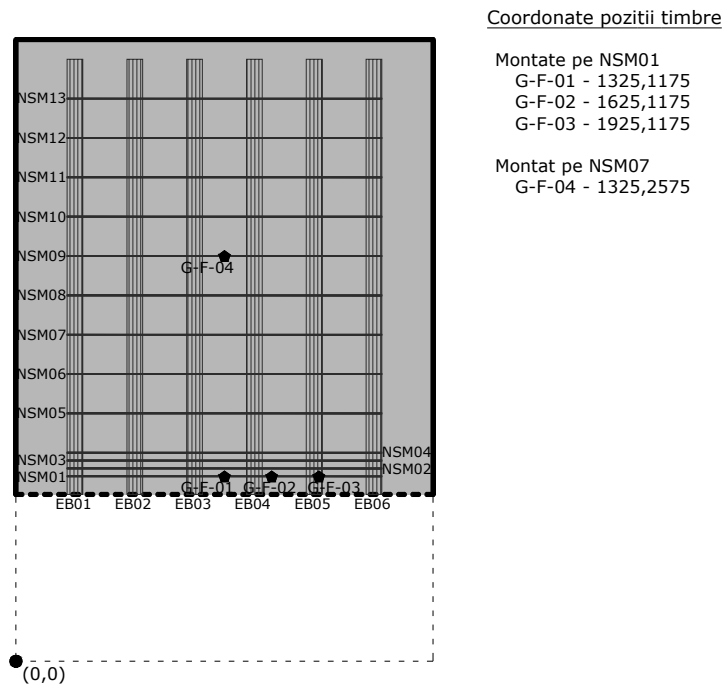


Fig. 6.78. - Pozițiile timbrilor tensometrice pe elemente CFRP

Elementul consolidat a fost încercat până la cedarea completă, în timpul testului înregistrându-se o forță maximă de 147,25 kN. Acestei valori a încărcării îi corespunde o deplasare centrală de 63,15 mm. Cedarea plăcii consolidate s-a produs la un nivel al forței exterioare de 125,16 kN și o valoare corespunzătoare a deplasării centrale de 76 mm. Deplasare centrală maximă înregistrată a atins valoarea de 84,13 mm, corespunzând ruperii totale a elementului. Diagrama de comportare Forță-Deplasare este prezentată în Fig. 6.79.

Toate elementele de consolidare intersectate de fisurile principale au cedat prin ruperea fibrelor.

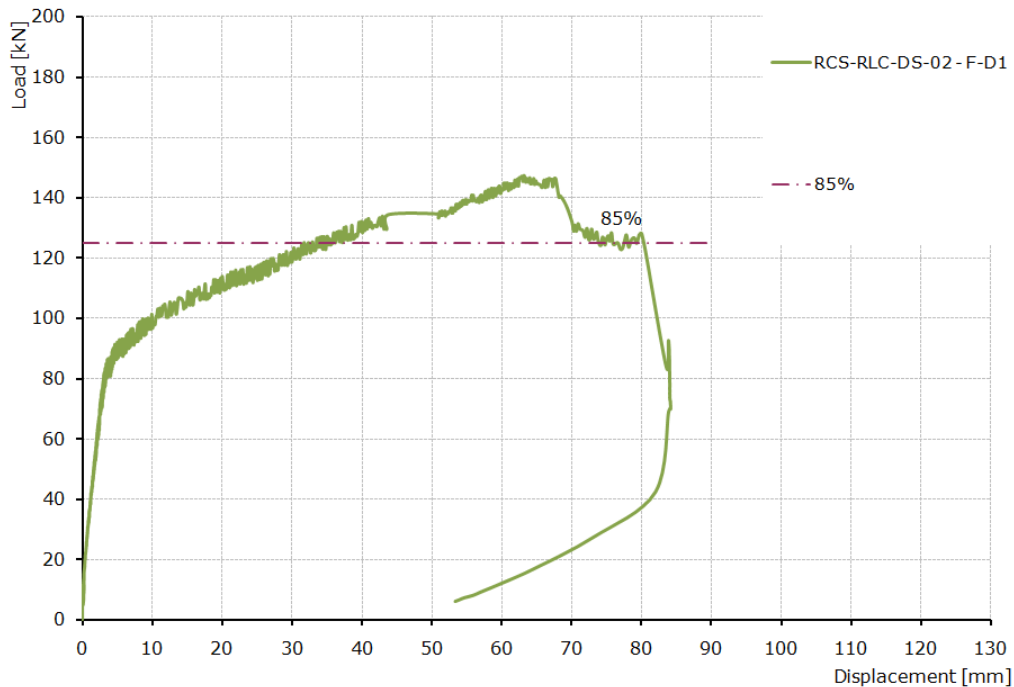


Fig. 6.79. - Diagrama Forță-Deplasare centrală (D1)

Similar cu situația plăcilor anterioare, starea de fisurare a elementului consolidat evidențiază efectul pozitiv al sistemului de consolidare. Astfel, pe întreaga suprafață inferioară a plăcii, concentrația fisurilor este extrem de mare, comparativ cu elementul neconsolidat. Distribuția fisurilor la finalul testului este prezentată în Fig. 6.80., cele principale fiind evidențiate cu linie îngroșată.

Poziția timbrei relativ la distribuția finală a fisurilor este ilustrată în Fig. 6.81. Diagramele Forță-Deformație specifică pentru cele patru timbre montate pe elemente CFRP de consolidare sunt prezentate în Fig. 6.82. Timbrele G-F-01, G-F-02 și G-F-03 au înregistrat valori maxime ale deformațiilor specifice substanțiale, variind între de 9,17‰ și 19,96‰. Din nou, ca și în toate testele precedente, s-au înregistrat valori ale deformației specifice maxime ce au depășit valoarea deformației specifice ultime dată de producător (17‰).

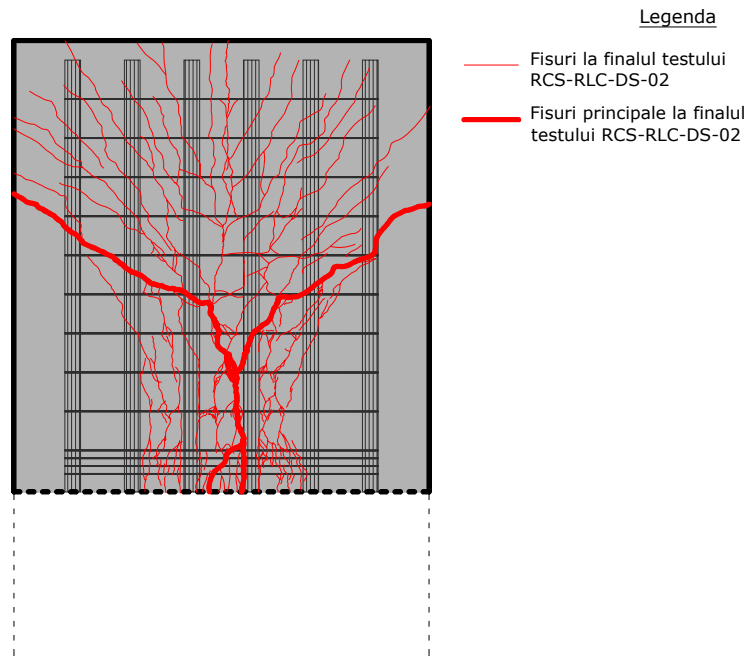


Fig. 6.80. - Distribuția fisurilor la finalul testului RCS-RLC-DS-02

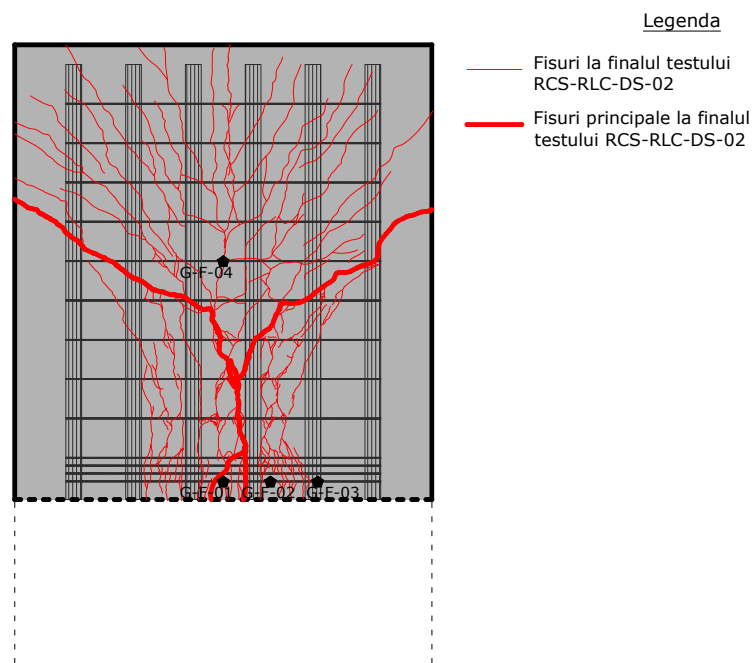


Fig. 6.81. - Poziția timbrelor relativ la distribuția finală a fisurilor

În continuare, în Fig. 6.82. - Fig. 6.87. sunt prezentate o serie de detalii ale cedării elementului consolidat.



Fig. 6.82. - Starea plăcii la finalul încercării



Fig. 6.83. - Vedere a suprafeței superioare a plăcii la finalul încercării



Fig. 6.84. - Detaliu de cedare țesătură intersectată de fisură principală



Fig. 6.85. - Detaliu de cedare bandă și țesătură intersectate de fisură principală



Fig. 6.86. - Detaliu de cedare armătură intersectate de fisură principală



Fig. 6.87. - Detaliu de cedare armătură și bandă intersectate de fisură principală

6.8. Concluzii ale programului experimental

6.8.1. Rezistențe; Capacități

Probabil cel mai important parametru al comportării plăcilor este reprezentat de capacitatea portantă sau rezistența acestora. Pentru a defini capacitatea elementelor în diverse stadii, în prezentul paragraf se vor utiliza trei termeni: capacitatea ultimă sau rezistența, capacitatea la limita elastică și capacitatea la S.L.S. (Starea Limită de Serviciu). Termenul de capacitate ultimă se va referi la încărcarea centrală maximă aplicată în timpul testelor pe elementele experimentale. Termenul de capacitate la limita elastică va defini încărcarea centrală aplicată în momentul atingerii limitei elastice, iar termenul de capacitate la S.L.S. va defini încărcarea centrală aplicată în momentul atingerii S.L.S. (prin prisma parametrului deplasare verticală). Modul de stabilire a limitei elastice este detaliat în secțiunea 6.8.2. Curbele de comportare Forță-Deplasare centrală sunt prezentate pentru toate elementele în Fig. 6.88. și pentru fiecare element în variantă neconsolidată și consolidată în Fig. 6.89. - Fig. 6.92. În fiecare din aceste ultime patru diagrame ce prezintă comportarea fiecărui element în parte, înainte și după consolidare, dreptele reprezentate cu nuanță mai deschisă și cu linie punctată definesc comportarea elementului înainte de consolidare, cele cu nuanță mai închisă și cu linie întregă definind comportarea elementului consolidat. Limitele elastice sunt punctate pe diagrame utilizând cerculețe în culoarea curbei de comportare aferente. Dreptele care definesc rigiditatea la limita elastică sunt reprezentate cu linii punctate, având culoarea roșie pentru elementul neconsolidat și o nuanță de bej pentru elementele consolidate.

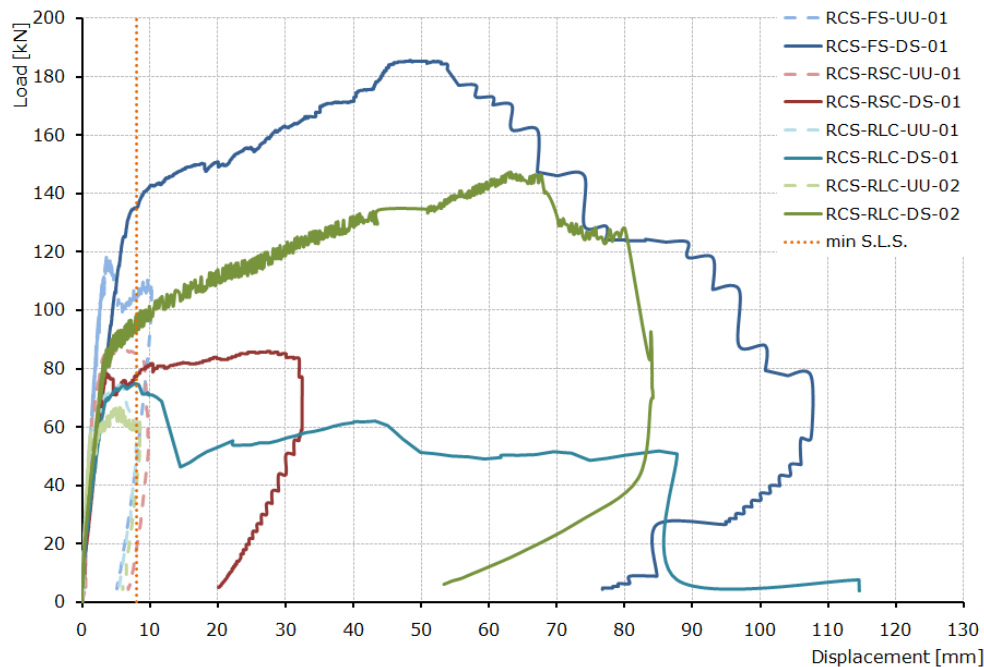


Fig. 6.88. - Diagrame de comportare Forță-Deplasare pentru toate testele

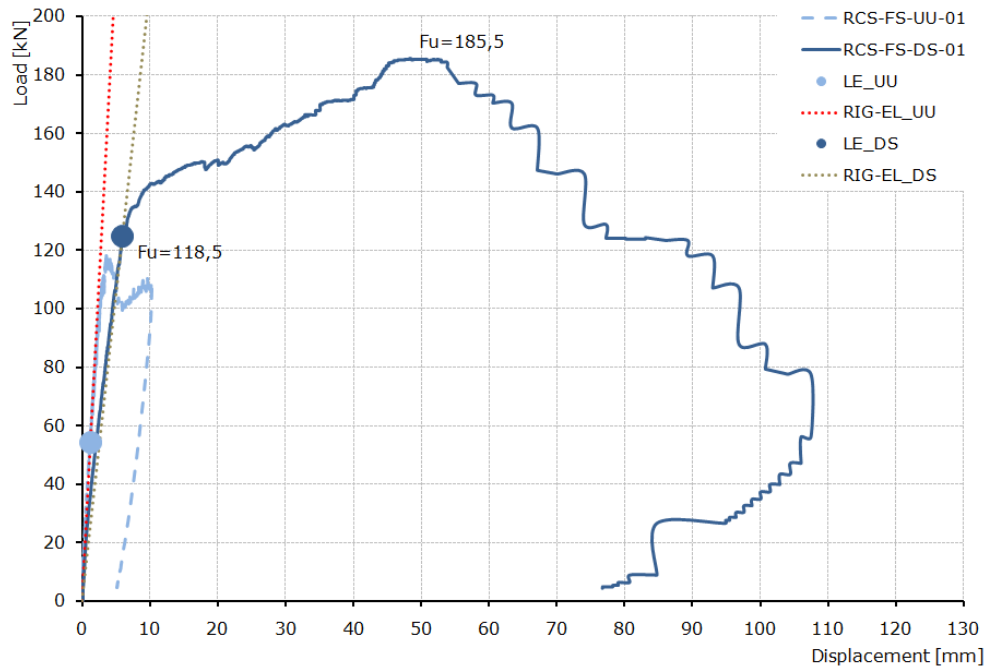


Fig. 6.89. - Diagrame de comportare Forță-Deplasare pentru elementul RCS-FS-01

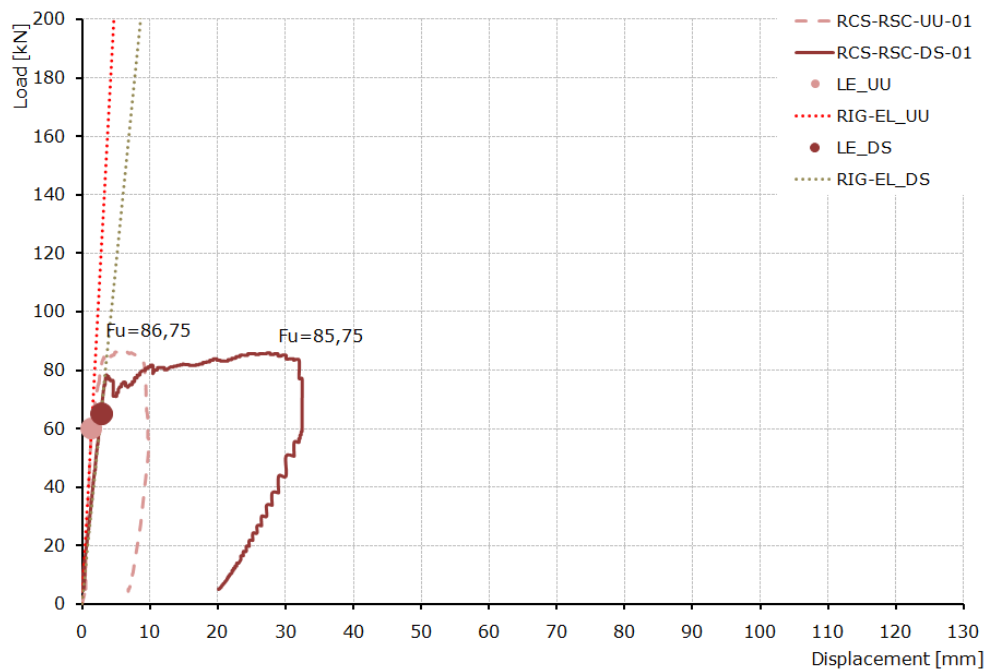


Fig. 6.90. - Diagrame de comportare Forță-Deplasare pentru elementul RCS-RSC-01

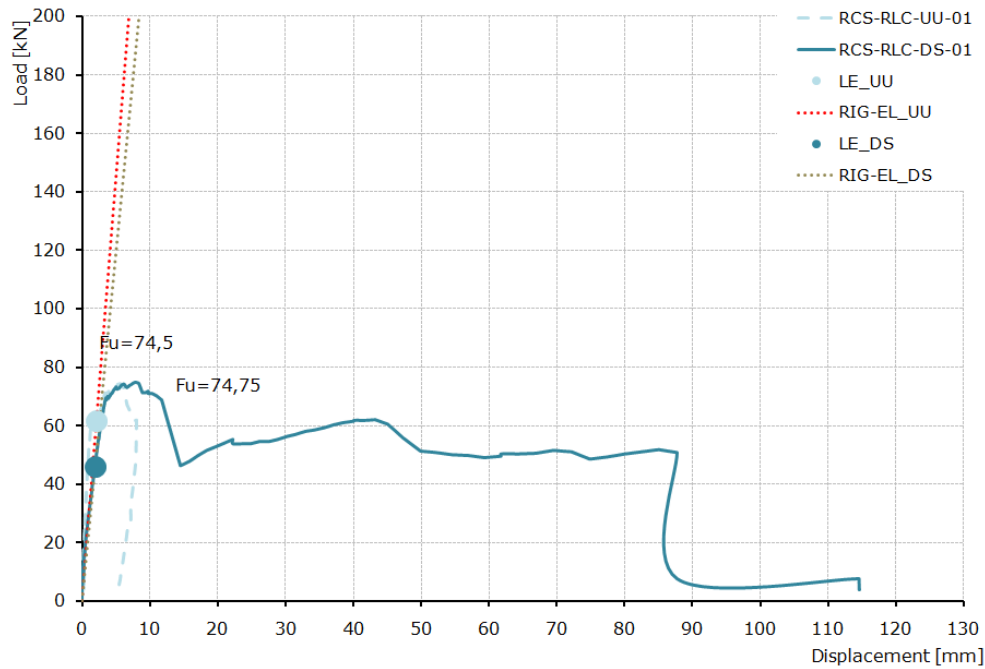


Fig. 6.91. - Diagrame de comportare Forță-Deplasare pentru elementul RCS-RLC-01

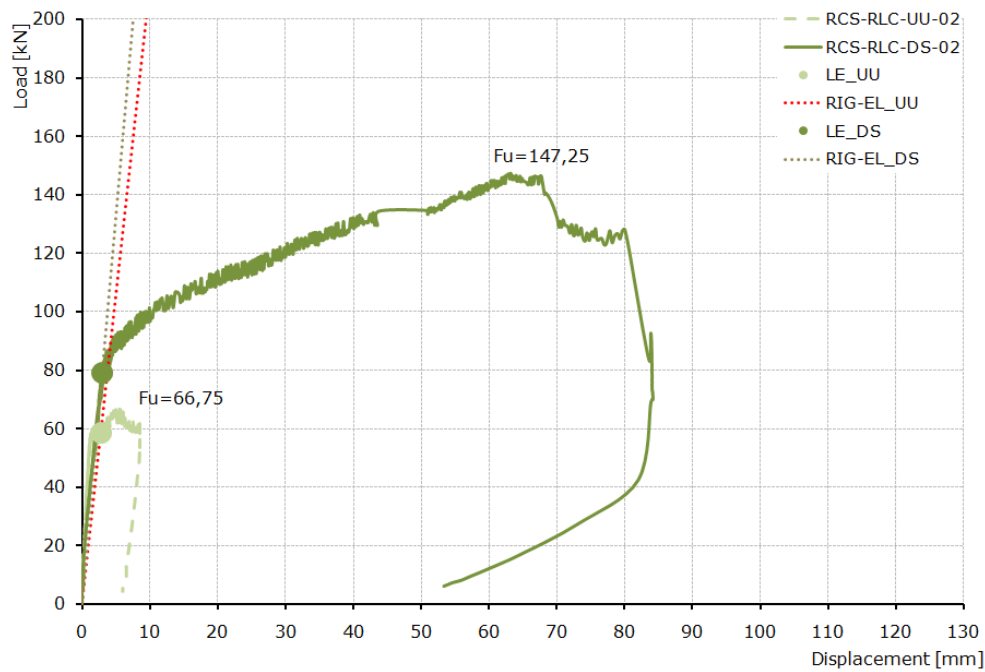


Fig. 6.92. - Diagrame de comportare Forță-Deplasare pentru elementul RCS-RLC-02

Valorile capacităților ultime (F_u), ale capacităților la limita elastică (F_y), și ale deformațiilor centrale corespunzătoare (D_u și D_y) sunt prezentate în Tabel. 6.8. În ultima coloană a tabelului sunt inventariate și suprafețele în plan ale celor patru plăci. Valorile prezentate în tabel sunt valori de arie efectivă, rezultate pe baza distanțelor libere de pe cele două direcții.

Tabel 6.8. - Caracteristici de rezistență și deformații

| Test | F_y [kN] | D_y [mm] | F_u [kN] | D_u [mm] | S [m ²] |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------------|
| RCS-FS-UU-01 | 54,25 | 1,23 | 118,50 | 3,72 | 8,880 |
| RCS-FS-DS-01 | 124,75 | 5,95 | 185,50 | 48,21 | 8,880 |
| RCS-RSC-UU-01 | 60,00* | 1,41* | 86,75 | 5,52 | 7,700 |
| RCS-RSC-DS-01 | 65,25 | 2,80 | 85,75 | 27,22 | 7,700 |
| RCS-RLC-UU-01 | 61,75 | 2,14 | 74,50 | 5,56 | 6,636 |
| RCS-RLC-DS-01 | 46,00 | 1,92 | 74,75 | 7,76 | 6,636 |
| RCS-RLC-UU-02 | 58,75 | 2,75 | 66,75 | 5,53 | 6,636 |
| RCS-RLC-DS-02 | 79,00 | 2,98 | 147,25 | 63,15 | 6,636 |

*Măsurătorile deformațiilor specifice din armături nu sunt relevante în cadrul testului RCS-RSC-UU-01. Astfel, doar pentru acest element, limita elastică s-a stabilit pe baza diagramei de Forță-Deplasare. Abordarea conține o doză de aproximare, însă alura curbelor este suficient de elocventă pentru ca aproximarea să nu fie grosolană.

În Fig. 6.93. sunt inventariate toate capacitățile ultime ale plăcilor înainte și după consolidare, atât în termeni absoluți cât și ca valori relative la suprafețele plăcilor. Aceste grafice nu au menirea de a stabili criteriile de performanță pentru soluțiile de consolidare, ci doar inventariază capacitățile ultime ale elementelor înainte și după consolidare. Comparații se pot genera de la caz la caz doar pentru situații compatibile.

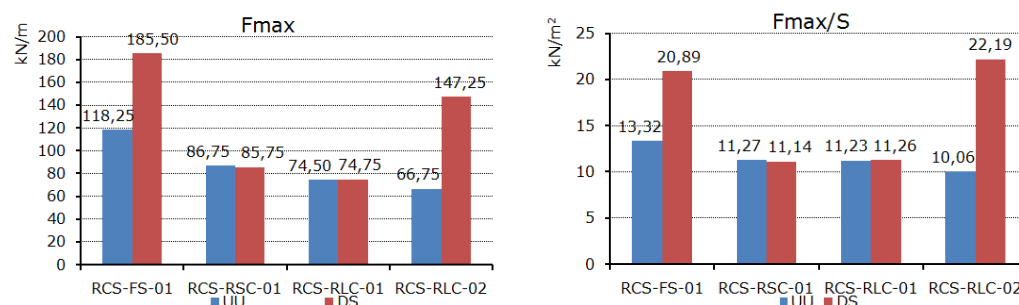


Fig. 6.93. - Capacități ultime ale elementelor înainte și după consolidare

Grație procesului de consolidare, testele RCS-FS-DS-01 și RCS-RLC-DS-02 au înregistrat o creștere a capacităților ultime de 56,54% și respectiv 120,60%, față de valorile înregistrate în timpul testelor de referință RCS-FS-UU-01 și respectiv RCS-RLC-UU-02. În cadrul testelor RCS-RSC-DS-01 și RCS-RLC-DS-01 nu s-au înregistrat creșteri ale capacităților ultime, față de elementele de referință RCS-RSC-

UU-01 și respectiv RCS-RLC-UU-01, capacitatea fiind doar refăcută prin aplicarea sistemului de consolidare. Se observă că, după consolidare, elementul RCS-RLC-02 dispune de cea mai mare capacitate ultimă raportată la arie, mai mare chiar și decât cea a elementului întreg. Mai mult, pentru același element RCS-RLC-02 se observă că sistemul de consolidare sporește capacitatea în valoare absolută chiar, până la valori mai mari decât ale elementului întreg neconsolidat. Astfel, un deziderat ce presupune refacerea prin consolidare a capacității absolute a unui element în care se taie un gol, la nivelul deținut de același element anterior tăierii golului, poate fi îndeplinit prin aplicarea sistemului de consolidare.

Trebuie însă ținut cont de faptul că scopul aplicării sistemului de consolidare, și în consecință natura intervențiilor, au fost total diferite de la un grup de elemente la altul. Astfel, pentru elementele RCS-FS-UU-01 și RCS-RLC-UU-02 scopul sistemului de consolidare a fost de a le crește capacitatea inițială, pe când pentru elementele RCS-RSC-UU-01 și RCS-RLC-UU-01 scopul a fost doar refacerea acesteia. Așadar, se poate afirma că scopul consolidării a fost îndeplinit de fiecare din sistemele de consolidare în parte.

Un set de informații interesante pentru evaluarea comportării elementelor, este reprezentat de efectul tăierii golurilor asupra capacității ultime a plăcilor. Comparații se pot face atât la nivel de valoare absolută a încărcării aplicate (Fig. 6.94. a), dar mai realistă este o comparație între nivelurile capacităților ultime raportate la suprafața acestora (Fig. 6.94. b).

În același timp, influența scăderii suprafeței efective a plăcii în urma tăierii golurilor asupra capacității ultime este ilustrată grafic în (Fig. 6.95.) atât în termeni de capacitate ultimă absolută cât și raportată la suprafețele plăcilor. Astfel, pentru fiecare element în parte, pe prima coloană este reprezentată suprafața plăcii raportată procentual la suprafața plăcii întregi. Similar, pentru fiecare element în parte, pe a doua coloană este prezentată capacitatea ultimă ca procent din capacitatea elementului întreg. Se poate observa că prin crearea celor două tipuri de goluri în cele trei elemente, suprafața plăcii scade la 86,71% (prin crearea golului mic) și respectiv 74,74% (prin crearea golului mare) din suprafața plăcii fără gol. Graficele vin în sprijinul afirmațiilor din Cap. 2, putându-se observa că un alt parametru important pentru capacitatea plăcilor este poziția golului și nu doar mărimea acestuia. Astfel, comparând capacitățile ultime raportate la suprafața plăcilor pentru elementele RCS-RSC-UU-01 și RCS-RLC-UU-01, se poate observa că deși suprafața scade cu peste 10% mai mult în cazul elementului RCS-RLC-UU-01, capacitatea ultimă raportată la suprafață este practic egală pentru cele două elemente.

Atât în Fig. 6.92. cât și în Fig. 6.94. și Fig. 6.95. se poate observa că elementul RCS-RLC-UU-02 înregistrează o comportare diferită de cea a elementului RCS-RLC-UU-01, cu toate că, teoretic, geometria, rezemările și modul de aplicare a încărcărilor sunt identice. Comportarea diferită se transpune într-o capacitate ultimă absolută mai mică cu 7,75 kN și o capacitate ultimă raportată la suprafață mai mică cu 1,17 kN/m². Practic, elementul RCS-RLC-UU-02 prezintă capacități cu 10% mai scăzute decât elementul RCS-RLC-UU-01. Comportarea diferită poate fi explicată printr-o eroare de execuție, ordinea barelor de pe cele două rânduri de armătură fiind inversată. Astfel, pentru elementul RCS-RLC-UU-02, armăturile din proximitatea fibrei extreme inferioare sunt cele de pe direcția lungă, în timp ce pentru toate celelalte elemente, armăturile din proximitatea fibrei extreme inferioare sunt cele de pe direcția scurtă.

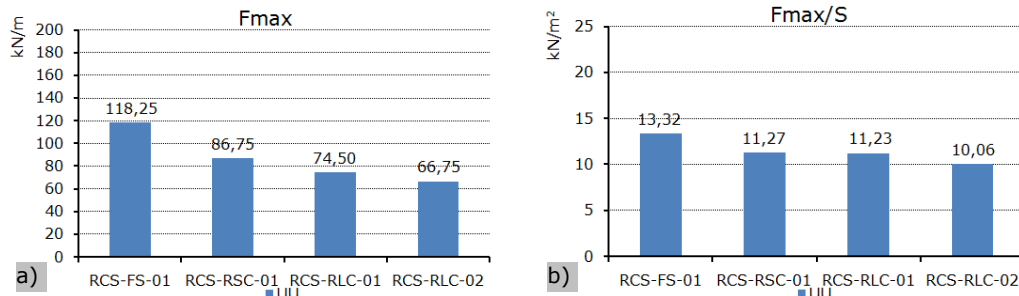


Fig. 6.94. - Valorile capacităților ultime în valoare absolută și relativ la suprafața plăcii înainte de consolidare

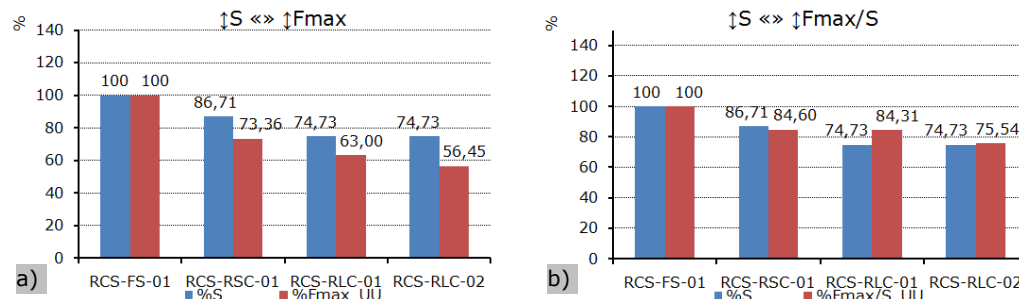


Fig. 6.95. - Influența scăderii suprafeței efective a plăcii în urma tăierii golurilor asupra capacităților ultime

Așa cum s-a menționat anterior, capacitatea la S.L.S. este un alt indicator important al comportării elementelor. Limita la S.L.S. (din perspectiva deformațiilor) s-a stabilit pe baza săgeții admise, evaluată ca $L/250$, unde L reprezintă deschiderea laturii scurte a plăcii. La o deschidere de 2400 mm, $L/250$ rezultă 9,60 mm. Aceasta reprezintă valoarea de control la care s-au oprit testele pe elementele neconsolidate. Deplasarea maximă nu s-a înregistrat întotdeauna în centrul plăcii (D1), astfel încât, în anumite teste, deplasarea centrală nu atinge valorile stabilite la S.L.S., acestea fiind atinse în alte puncte de măsurare (ex: a se vedea Fig. 6.45. unde se poate observa clar că deplasarea maximă este înregistrată în D4). Pentru a avea însă o imagine mai reală a capacităților la S.L.S. și pentru a putea compara capacități corespunzătoare aceleiași valori a deplasării centrale, s-a decis să se compare valorile forței exterioare corespunzătoare unei deplasări centrale de 8,04 mm (aceasta fiind valoarea minimă dintre toate valorile deplasărilor centrale corespunzătoare atingerii S.L.S.). În Fig. 6.96. sunt inventariate aceste capacități. Din nou, compararea capacităților se poate face doar ținând cont de scopul consolidărilor. Astfel, se poate observa că pentru elementele RCS-FS-01 și RCS-RLC-02 capacitățile la S.L.S. cresc substanțial (cu 28,6% și respectiv 67,5%) prin consolidare, în timp ce pentru elementele RCS-RSC-01 și RCS-RLC-01 capacitățile la S.L.S. ante și post consolidare nu diferă semnificativ.

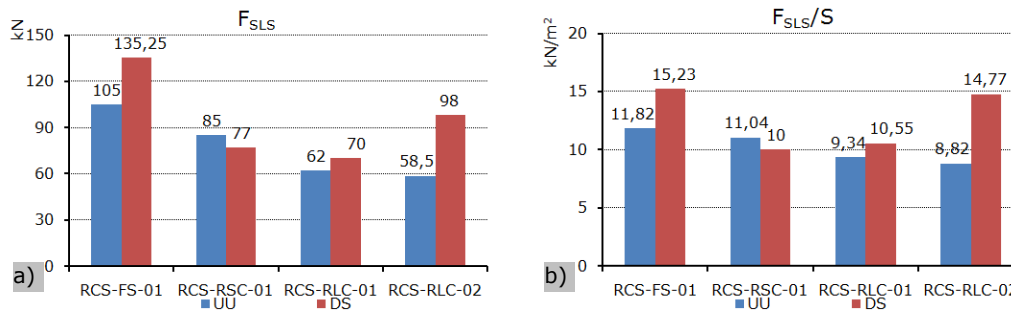


Fig. 6.96. - Capacitățile la S.L.S. în valoare absolută și relativ la suprafața plăcii înainte și după consolidare

6.8.2. Limite elastice

Limita elastică s-a stabilit pe baza înregistrărilor din timpul testelor, precum și pe baza rezultatelor obținute în urma încercărilor pe materiale (pe epruvetele confecționate din plasele de armătură dispuse la partea inferioară). Astfel, pentru fiecare din cele patru elemente s-a calculat deformația specifică la limita elastică pe baza Rel. 6.2., valorile obținute fiind centralizate în Tabel 6.9. Limita elastică se consideră a se fi atins în momentul în care cel puțin un timbru tensometric indică în timpul testului o valoare a deformației specifice egală cu cea calculată pe baza Rel. 6.2. Valoarea deformației specifice la limita elastică s-a utilizat pentru a evalua capacitățile elementelor la limita elastică și ulterior pentru a calcula ductilitatea acestora.

$$\varepsilon_y = \frac{R_{p,02}}{E_s} \quad (6.2.)$$

unde:

$R_{p,02}$ - limita de curgere convențională la 0,2%

E_s - modulul de elasticitate al oțelului din care sunt confecționate armăturile ($E_s = 200000 \text{ MPa}$)

Tabel 6.9. - Deformații specifice pentru stabilirea limitei elastice

| Element | $R_{p,02}$ [MPa] | ε_y |
|------------|------------------|-----------------|
| RCS-FS-01 | 596 | 0,00298 |
| RCS-RSC-01 | 537 | 0,00269 |
| RCS-RLC-01 | 546 | 0,00273 |
| RCS-RLC-02 | 548 | 0,00274 |

6.8.3. Rigiditate; Ductilitate

Rigiditatea (K) unei plăci la un nivel de încărcare oarecare este definită ca și panta diagramei Forță-Deplasare în acel punct. În orice punct sau zonă se pot defini rigidități secante sau tangente, uzual definindu-se totuși doar două tipuri de rigidități caracteristice: cea inițială și cea elastică. În cadrul prezentului paragraf, se vor defini doar acestea din urmă. Mai mult, încercările experimentale au relevat faptul că diferența dintre rigiditatea inițială și rigiditatea elastică este total nesemnificativă. Astfel, în continuare se va discuta doar de rigiditatea elastică, asimilând-o practic și cu rigiditatea inițială.

Metoda de stabilire a rigidității elastice are la bază determinarea limitei elastice, prezentată în secțiunea 6.8.1. Dreptele care definesc rigiditatea elastică sunt prezentate pe diagramele Forță-Deplasare din Fig. 6.89 - Fig. 6.92. În Tabel 6.10. și în Fig. 6.97. sunt inventariate valorile acestor rigidități elastice, pentru toate testele.

Tabel 6.10. - Rigidități la limita elastică și ductilități

| Test | K_y [kN/mm] | D_u/D_y |
|---------------|------------------|-----------|
| RCS-FS-UU-01 | 44,11 | --- |
| RCS-FS-DS-01 | 20,97 | 8,10 |
| RCS-RSC-UU-01 | 42,55 | --- |
| RCS-RSC-DS-01 | 23,30 | 9,72 |
| RCS-RLC-UU-01 | 28,86 | --- |
| RCS-RLC-DS-01 | 23,96 | 4,04 |
| RCS-RLC-UU-02 | 21,36 | --- |
| RCS-RLC-DS-02 | 26,51 | 21,19 |

Dacă anterior s-a enunțat faptul că împreună cu dimensiunile golului, poziția acestuia reprezintă un parametru extrem de important pentru evoluția capacităților, din perspectiva rigidității elastice, programul experimental pare să releve faptul că dimensiunea golului este hotărâtoare. Astfel, se poate observa în graficul din Fig. 6.97.b că se păstrează o anumită proporționalitate între scăderea suprafeței plăcii prin tăierea golului și rigiditatea elastică a acesteia. Din nou este sesizabilă diferența de comportare dintre cele două elemente cu gol dreptunghiular mare, în stadiu neconsolidat.

Aplicarea soluțiilor de consolidare nu are o influență pozitivă semnificativă asupra rigidităților la limita elastică. Deloc surprinzător, singurul element pentru care se înregistrează o sporire a rigidității elastice prin consolidare este elementul RCS-RLC-02, în acest caz îmbunătățirea fiind substanțială ($\approx 20\%$). Se poate totuși afirma că aplicarea sistemelor de consolidare ce au scopul doar de a reface capacitatea elementelor cu gol nu conduce la o refacere a rigidităților la nivelul corespunzător momentului pre-încercare a acestora.

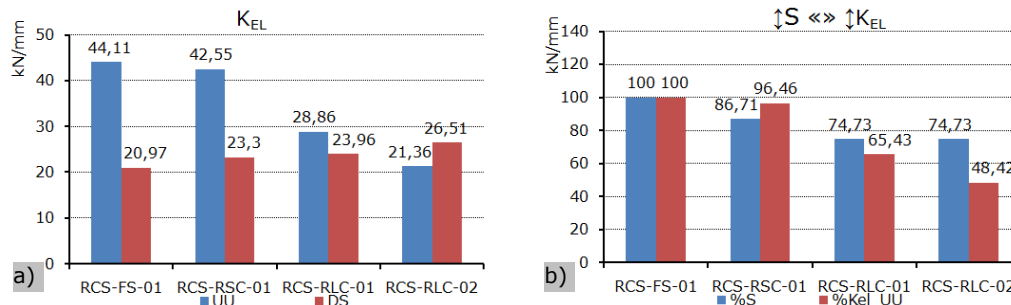


Fig. 6.97. - Valorile rigidității la limita elastică și influența tăierii golurilor asupra rigidității elastice a elementelor neconsolidate

Ductilitatea, evaluată pe bază de deplasări, se definește ca fiind raportul dintre deplasarea corespunzătoare capacității ultime și deplasarea corespunzătoare limitei elastice. Cu toate că în secțiunea 6.8.1. în Tabel 6.8. s-au stabilit deplasări corespunzătoare capacității ultime și pentru elementele neconsolidate, acestea nu sunt neapărat relevante pentru stabilirea ductilității elementelor respective. Din moment ce testele au fost oprite la atingerea S.L.S. (deci prematur din perspectiva deformației ultime), o evaluare a ductilității pe baza acestor valori nu ar reflecta întocmai realitatea. Astfel, în Tabel 6.10. sunt prezentate valorile ductilității doar pentru elementelor consolidate. La fel ca și în cazul rigidității elastice, elementul RCS-RLC-02 prezintă o comportare discordantă, ductilitatea acestuia fiind disproporțional mai mare decât a tuturor celorlalte elemente.

6.8.4. Energia disipată

Energie Disipata (ED) de un element este definită ca și aria de sub diagrama de Forță-Deplasare centrală. Explicația anterioară privind ductilitatea și neînsemnătatea evaluării acesteia pentru elementele neconsolidate, din pricina opririi premature a testelor, are acoperire și pentru energia disipată. Astfel, această mărime se va evalua în două modalități diferite: pentru testele pe elementele neconsolidate doar la S.L.S. iar pentru testele pe elementele consolidate și la S.L.S. și la S.L.U. Evaluarea energiei disipate s-a realizat pentru fiecare element în parte pe o curbă simplificată, diferența esențială între acestea și cele reale fiind că cele simplificate nu mai au definite zonele de descărcare, fiind în același timp limitate la anumite valori. Diagramele simplificate pentru testele pe elementele neconsolidate sunt limitate la valoarea deplasării ce stabilește S.L.S. ($D1=8,04$ mm) iar cele trasate pentru testele pe elementele consolidate sunt limitate la valorile corespunzătoare S.L.D. ($85\% \cdot F_u$). Aceste diagrame sunt prezentate în Fig. 6.98., valorile energiei disipate obținute prin prelucrarea diagramelor fiind centralizate în Tabel 6.11. și Fig. 6.99.a. La S.L.S. efectul golurilor se transpune într-o scădere a cantității energiei disipate a elementelor RCS-RSC-UU-01, RCS-RLC-UU-01 și RCS-RLC-UU-02 până la valori de 79%, 69,5% și 63,5% din cea corespunzătoare elementului întreg. Sistemul de consolidare nu conferă elementelor refacerea capacității de disipare a energiei la S.L.S.; cu excepția RCS-RLC-DS-02, toate elementele dispun de capacități de disipare mai reduse în comparație cu cele ante-consolidare. Astfel, valoarea energiei disipate este mai redusă cu 5%, 14,46% și respectiv 5,56% pentru elementele RCS-FS-DS-01, RCS-RSC-DS-01 și respectiv RCS-RLC-DS-01, față de testele pe aceleași elemente neconsolidate

corespunzătoare. La S.L.U. se observă o diferență extrem de importantă între grupul de teste RCS-FS-DS-01 cu RCS-RLC-DS-02 și grupul RCS-RSC-DS-01 cu RCS-RLC-DS-01.

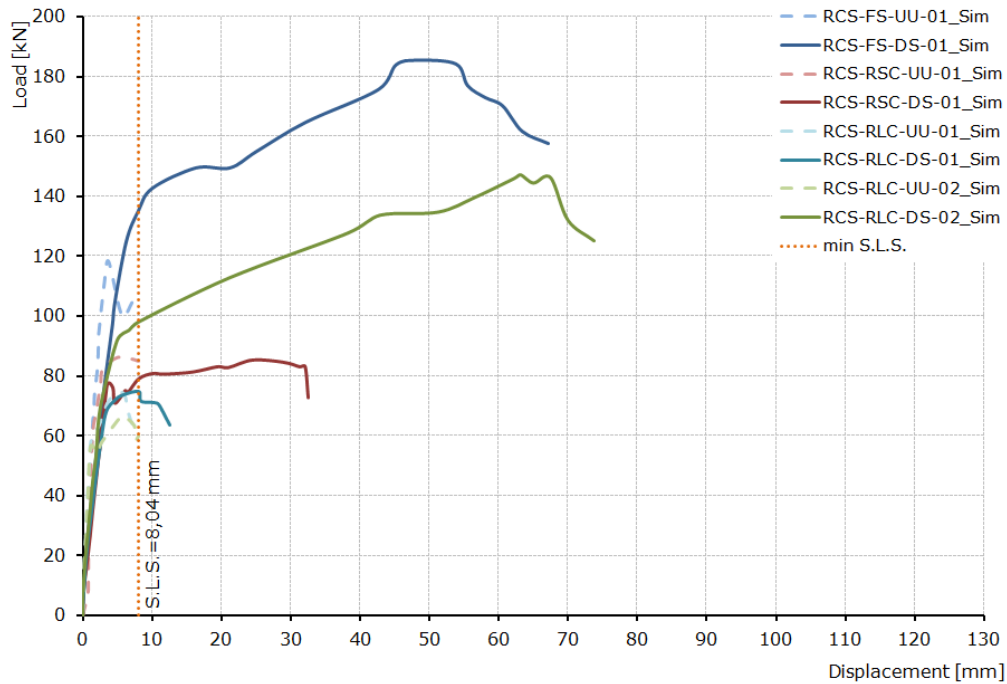


Fig. 6.98. - Diagramele simplificate Forță-Deplasare

Tabel 6.11. - Energia disipată la S.L.S. și la S.L.U.

| Test | ED_{SLS} [kN*mm] | ED_{SLU} [kN*mm] |
|---------------|-----------------------|-----------------------|
| RCS-FS-UU-01 | 726 | --- |
| RCS-FS-DS-01 | 689 | 10416 |
| RCS-RSC-UU-01 | 574 | --- |
| RCS-RSC-DS-01 | 491 | 2514 |
| RCS-RLC-UU-01 | 504 | --- |
| RCS-RLC-DS-01 | 476 | 787 |
| RCS-RLC-UU-02 | 461 | --- |
| RCS-RLC-DS-02 | 589 | 8893 |

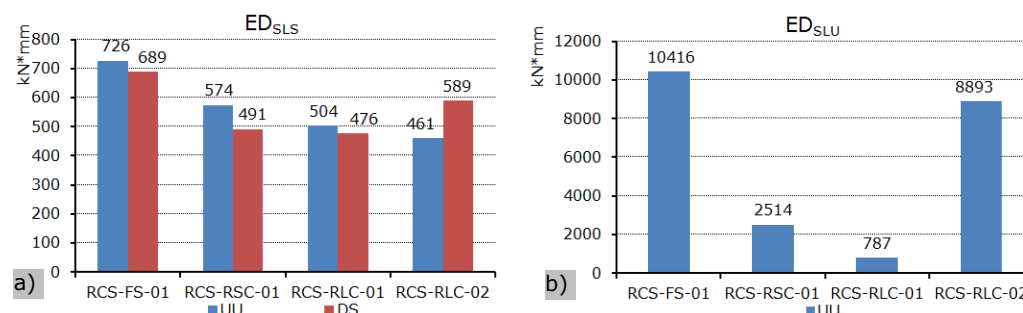


Fig. 6.99. - Valorile energiei disipate la S.L.S. și la S.L.U.

6.8.5. Moduri de cedare

Plăcile de beton armat încărcate perpendicular pe planului lor sunt supuse bineînțeles unei solicitări de încovoiere cu tăiere. În cazul plăcilor rezemate pe contur, efectul de tăiere nu este de regulă semnificativ, putând însă deveni important în cazul existenței unor încărcări concentrate mari, prin efectul de străpungere, efect guvernant și în cazul plăcilor rezemate concentrat (cazul planșeelor dală). Ținând cont de rezemarea elementelor experimentale și de modalitatea de aplicare a încărcărilor (pe o zonă suficient de mare pentru a evita străpungerea), comportarea plăcilor este caracteristică unor elemente solicitate la încovoiere. Trebuie însă menționat faptul că solicitarea nu este de încovoiere pură.

În cazul prezentelor încercări pe elementele neconsolidate, datorită clasei ridicate a betonului, apariția fisurilor este întârziată, acestea apărând brusc, cu lungimi mari și la niveluri superioare de încărcare. În același timp, numărul fisurilor este mic, apărând 3, 4 fisuri ale căror deschideri se lărgesc odată cu creșterea nivelului de încărcare. Direcția fisurilor este pentru toate testele conformă cu comportarea teoretică a unor plăci încovoiate, fisurile apărând pe direcția unor linii de rupere ce definesc o capacitate la încovoiere minimă. În cazul elementului RCS-RSC-UU-01, colțul golului reprezintă punctul de inițiere a fisurilor.

Efectul propice al sistemului de consolidare pentru fiecare element în parte este relevat și de starea de fisurare, materialele FRP asigurând o mai bună redistribuire a eforturilor precum și o uniformizare a acestora. Acest beneficiu se transpune într-o stare de fisurare a elementului consolidat caracterizată de fisuri mai multe, mai dese și evident cu deschideri mai mici comparativ cu fisurarea plăcilor neconsolidate. Aceste observații sunt evidențiate grafic prin prezentare stărilor finale de fisurare a tuturor elementelor la subcapitolele anterioare (a se vedea Fig. 6.15., Fig. 6.35., Fig. 6.44., Fig. 6.49., Fig. 6.61., Fig. 6.67., Fig. 6.74. și Fig. 6.80.).

Pentru elementele consolidate cu materiale FRP, distribuția eforturilor în elementele FRP precum și modul de cedare a sistemului de consolidare sunt indicatori extrem de importanți pentru definirea eficienței soluției de consolidare. Comportarea unor elemente de beton armat consolidate cu materiale compozite polimerice poate evidenția două tipuri de cedări ale sistemului de consolidare: cedare prin pierderea aderenței (care poate fi definită și ca o ruinare a conlucrării dintre elementul de beton armat și sistemul FRP) și cedare prin ruperea fibrelor. Așa cum este arătat în cadrul Cap. 3, cedarea prin pierderea aderenței poate surveni în diverse locații, atât la interfața adeziv-beton cât și în interiorul stratului de adeziv

sau a celui de beton. Este limpede că un sistem de consolidare este eficient în totalitate dacă modul de cedare ce îl caracterizează este acela prin ruperea fibrelor.

În cadrul încercărilor experimentale din prezentul program, modul uzual de cedare este cel prin ruperea fibrelor. Singura excepție este întâlnită în cazul lamelei pultrudate montate prin tehnica EB-FRP și care bordează latura lungă a golului creat în elementul RCS-RSC-01. Această cedare prematură prin pierderea aderenței este însă de așteptat, în marea majoritate a situațiilor, lamelele pultrudate montate prin tehnica EB-FRP, fără ancoraje, cedând în această manieră. Dacă ruperea fibrelor în cazul benzilor montate în șlițuri reprezintă o consecință firească a utilizării acestei tehnici (practic aderența net superioară a acestor tipuri de elemente este principalul atu), surprinzător este faptul că toate țesăturile montate prin tehnica EB-FRP au cedat tot prin ruperea fibrelor. Caracterul neașteptat al comportării fâșiilor de țesătură rezultă în urma inventarierii încercărilor experimentale prezentate în studiul bibliografic din Cap. 4. Concluzia îndosarierii modurilor de cedare este prezentată în cadrul subcapitolului 3.2.2. - ultimul paragraf, menționându-se că 80% din modurile de cedare ale elementelor consolidate utilizând tehnica EB-FRP sunt caracterizate de pierderea aderenței. Comportare optimă a fâșiilor de țesătură este o consecință a unui proces de aplicare corespunzător și a unor lungimi de ancoraj suficiente.

O particularitate interesantă a ruperii benzilor pultrudate montate în șlițuri este reprezentată de faptul că nu există o secțiune transversală clară de rupere, identificabilă cu ruperea tuturor fibrelor (a se vedea spre ex. Fig.6,41., Fig.6,42., Fig.6,54., Fig.6,72., Fig.6,73., Fig.6,87.). Asumând o distribuție liniară a deformațiilor specifice pe înălțimea unei secțiuni transversale, ruperea se inițiază bineînțeles în fibrele extreme exterioare, propagându-se sub efectul creșterii eforturilor spre interiorul benzilor. În consecință, ruperea fibrelor se produce etapizat, consecutiv și nu simultan, poziția exactă în care apare ruperea variind în anumite limite pe înălțimea benzii.

7. STUDIU COMPARATIV PRIVIND CONCORDANȚA REZULTATELOR TEORETICE CU CELE EXPERIMENTALE

Pentru fiecare element experimental s-au creat câte două modele numerice diferite. Primul, pentru evaluarea comportării elementului în stare neconsolidată a presupus încărcarea monotonă până la atingerea criteriului de oprire a analizei sau până la pierderea convergenței modelului. Astfel, pe baza acestui model se evaluează comportarea elementului neconsolidat, prin prisma diagramei caracteristice de comportare Forță-Deplasare centrală. Al doilea model încearcă să simuleze comportarea elementului consolidat, în aceleași condiții cu testul experimental. Astfel, modelul este construit pe baza celui anterior, impunând o descărcare a elementului experimental, într-o fază de pre-colaps, în așa fel încât să nu se distrugă convergența modelului (practic, se descarcă elementul cu 1 sau cu 2 pași înainte de pasul de încărcare ce definește cedarea elementului neconsolidat). După descărcare, se aplică sistemele de consolidare și se reîncarcă în sens gravitațional până la atingerea criteriilor de oprire a analizei.

7.1. Modelarea comportării elementului RCS-FS-01

În Fig. 7.1. este prezentată comportarea elementului înainte de consolidare prin intermediul diagramei caracteristice Forță-Deplasare centrală, prin comparație cu diagrama rezultată în urma testelor experimentale. Curba de culoare mov reprezintă comportarea teoretică (RCS-FS-UU-01_FEM) în timp ce pentru elementul experimental (RCS-FS-UU-01) s-a păstrat culoarea caracteristică de la Cap. 6. Fig. 7.2. prezintă aceeași diagramă teoretică, incluzând însă toate fazele din procesul de încercare a elementului: încercare element neconsolidat, aplicarea sistemului de consolidare și reîncercarea elementului consolidat. În figură sunt trei curbe distincte care definesc comportarea experimentală a elementului (neconsolidat și consolidat) precum comportarea teoretică în ansamblu. Pentru o corectă vizualizare a rezultatelor, diagrama de comportare a elementului în stare consolidată obținută experimental s-a translatat, în așa fel încât prima valoare a deplasării centrale să fie egală cu valoarea deplasării centrale remanente în urma încercării elementului în stare neconsolidată. Această diagramă translatată (RCS-FS-DS-01_REM) este reprezentată cu linie punctată, diagrama de culoare roșie (RCS-FS-DS-01_FEM) fiind obținută în urma modelării numerice. Se poate observa că în ambele situații de modelare, diferența de forță maximă înregistrată nu este semnificativă între experiment și model, însă comportările nu sunt deosebit de concordante prin prisma deformațiilor. În același timp se observă că din punct de vedere al forței maxime raportate, modelul prezintă o anumită dualitate, raportul dintre valorile experimentale și cele teoretice fiind subunitar pentru elementul neconsolidat și supraunitar pentru cel consolidat.

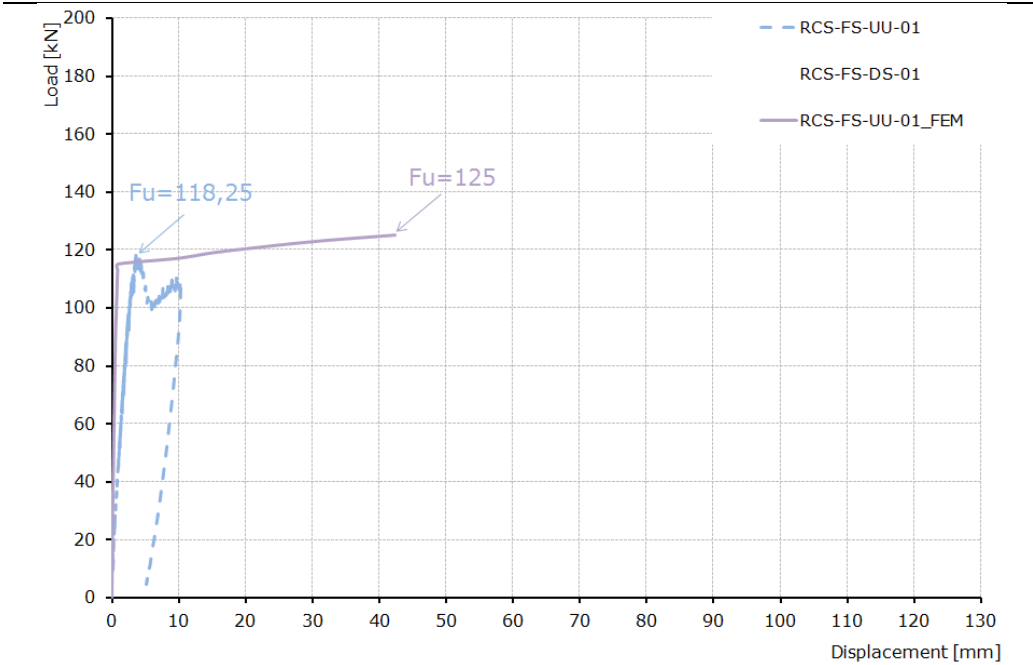


Fig. 7.1. - Comparație privind diagramele Forță-Deplasare centrală obținute teoretic și experimental pentru elementul RCS-FS-UU-01

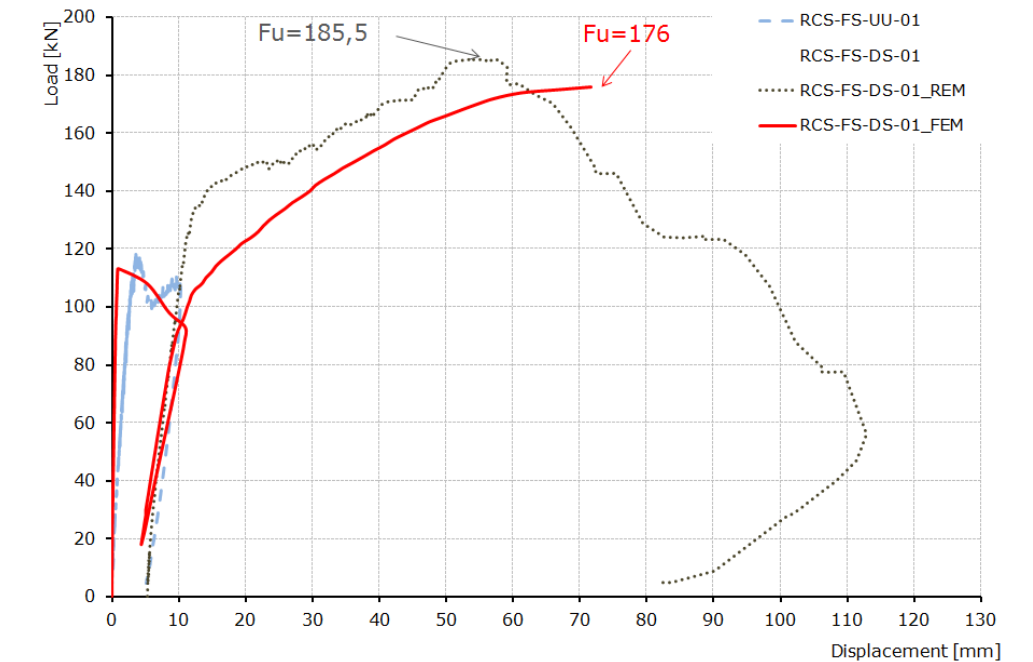


Fig. 7.2. - Comparație privind diagramele Forță-Deplasare centrală obținute teoretic și experimental pentru elementul RCS-FS-01

Diferențele de forță maximă sunt de 6,75 kN și 9,25 kN, ceea ce procentual înseamnă o variație de $\approx 5\%$. În Tabel 7.1. sunt centralizate valorile capacităților maxime înregistrate numeric și teoretic, precum și raportul dintre acestea. În modelul elementului în stare neconsolidată rigiditatea este mai mare decât cea rezultată experimental. Pentru modelul elementului consolidat, degradarea de rigiditate este mai mare, și în consecință, rigiditatea teoretică este mai mică decât cea înregistrată experimental.

Starea de fisurare obținută numeric la finalul încercării elementului neconsolidat este prezentată în Fig. 7.3. a în timp ce în Fig. 7.3. b sunt izolate doar fisurile cu deschideri mai mari de 0,20 mm. Starea de fisurare la finalul încercării elementului consolidat este prezentată în Fig. 7.4. a, fiind prezentate doar fisurile principale, cu deschideri mai mari de 2 mm. Ca și o comparație, în Fig. 7.4. b este prezentată o vedere a suprafeței superioare a plăcii la finalul încercării experimentale.

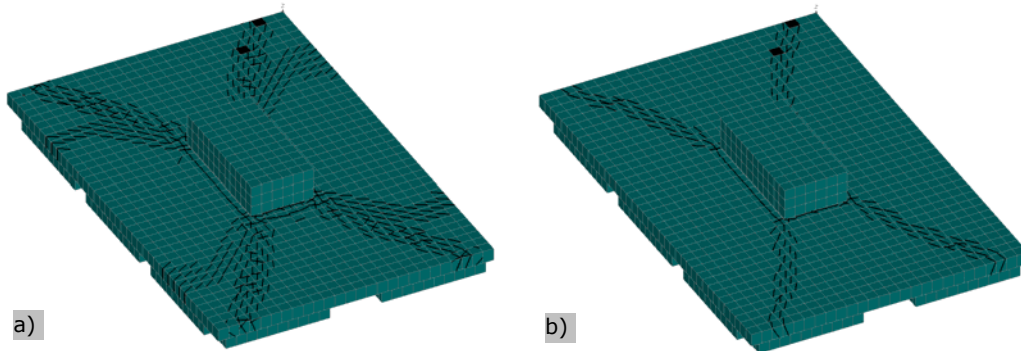


Fig. 7.3. - Starea de fisurare obținută numeric la finalul încercării elementului neconsolidat

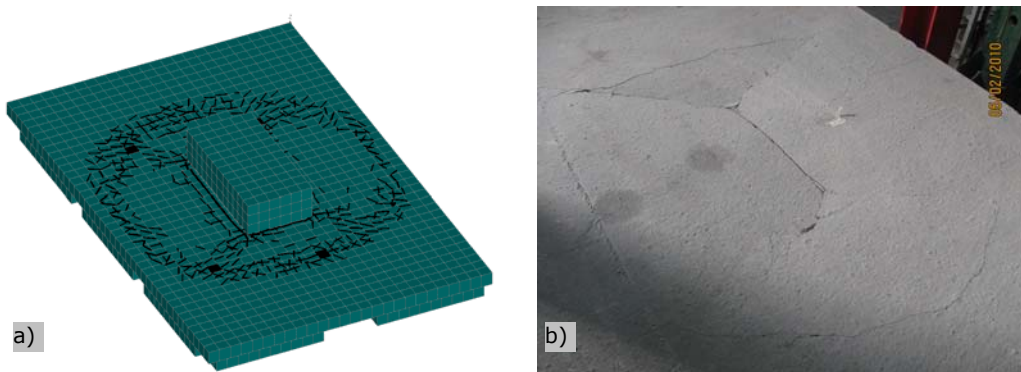


Fig. 7.4. - Starea de fisurare obținută numeric și experimental la finalul încercării elementului consolidat

7.2. Modelarea comportării elementului RCS-RSC-01

În Fig. 7.5. este prezentată comportarea elementului înainte de consolidare prin intermediul diagramei caracteristice Forță-Deplasare centrală, prin comparație cu diagrama rezultată în urma testelor experimentale. Ca și în cazul elementului precedent, Fig. 7.6. prezintă aceeași diagramă teoretică, incluzând însă toate fazele din procesul de încercare a elementului. Pentru identificarea curbelor și semnificația acestora, se va vedea observația de la secțiunea 7.1. Toate curbele și graficele au aceeași însemnătate ca și cele ce caracterizează elementul anterior. Din nou, se poate observa că în ambele situații de modelare, diferența de forță maximă înregistrată nu este semnificativă între experiment și model, însă comportările nu sunt deosebit de concordante prin prisma deformațiilor. Pentru acest element se poate observa că modelul conduce la forțe capabile ultime mai mari decât cele obținute experimental, atât în stare neconsolidată cât și post-consolidare. Diferențele de forță maximă sunt de 1,25 kN și respectiv 10,25 kN, ceea ce procentual înseamnă o variație de 1,50% și respectiv 12%. În Tabel 7.1. sunt centralizate valorile capacităților maxime înregistrate numeric și teoretic, precum și raportul dintre acestea.

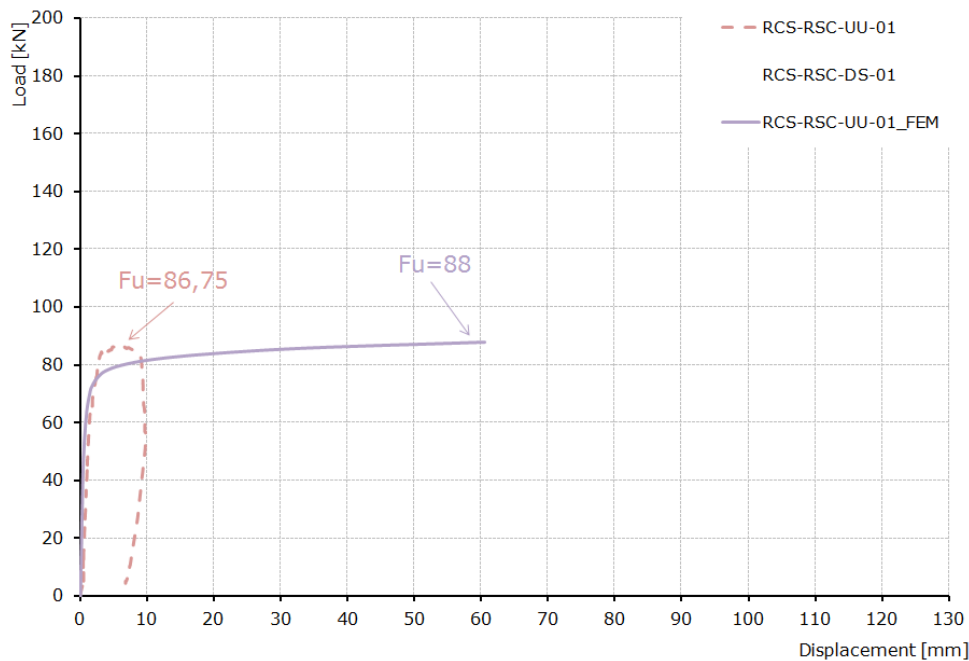


Fig. 7.5. - Comparație privind diagramele Forță-Deplasare centrală obținute teoretic și experimental pentru elementul RCS-RSC-UU-01

Starea de fisurare obținută numeric la finalul încărcării elementului neconsolidat este prezentată în Fig. 7.7.a în timp ce starea de fisurare la finalul încercării elementului consolidat este prezentată în Fig. 7.7.b. În Fig. 7.7.b se pot observa și elementele CFRP de consolidare, fiind reprezentate cu linie albastră.

Modelul nu reproduce întocmai starea de fisurare a elementului experimental, fisura de pe direcția lungă a plăcii, nefiind surprinsă de acesta. Totuși, înclinația în zona de capăt nu este extrem de importantă. Satisfăcător este și faptul că fisura având deschiderea maximă este cea paralelă cu latura lungă a plăcii, în zona adiacentă porțiunii consolidate prin dispunerea benzilor înglobate în șlițuri, concordanța fiind evidentă cu comportarea experimentală.

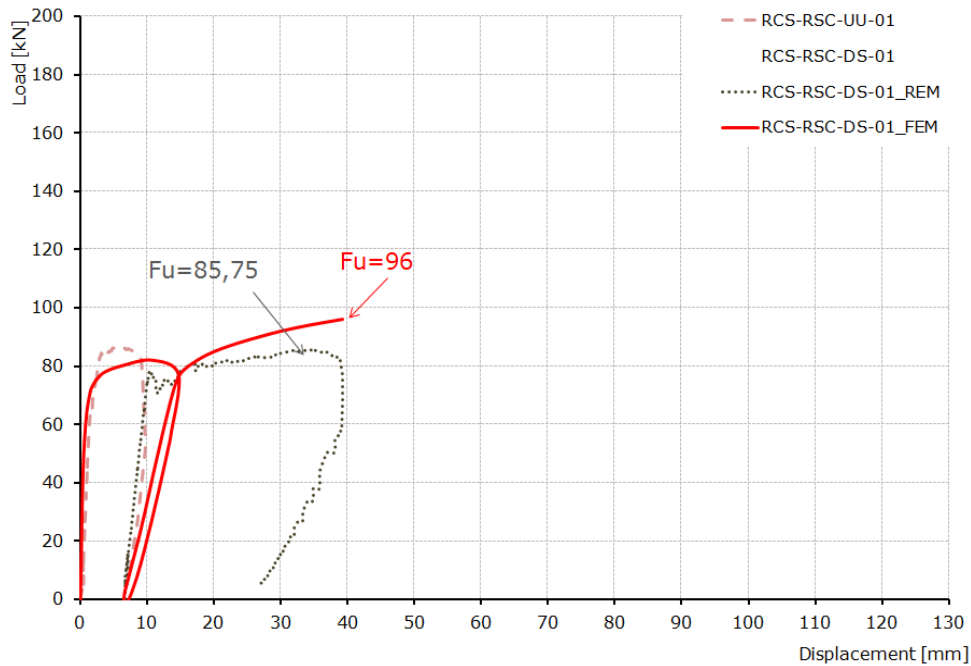


Fig. 7.6. - Comparație privind diagramele Forță-Deplasare centrală obținute teoretic și experimental pentru elementul RCS-RSC-01

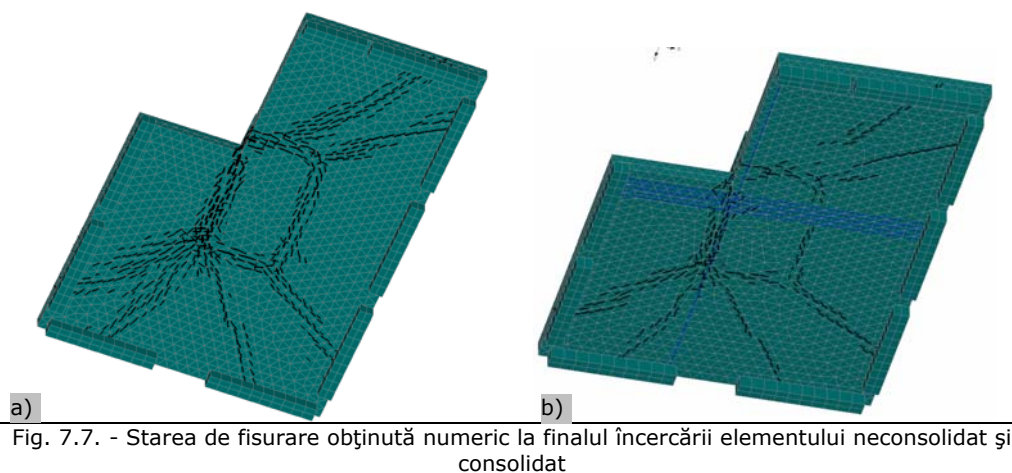


Fig. 7.7. - Starea de fisurare obținută numeric la finalul încercării elementului neconsolidat și consolidat

7.3. Modelarea comportării elementului RCS-RLC-01

În Fig. 7.8. este prezentată comportarea elementului înainte de consolidare prin intermediul diagramei caracteristice Forță-Deplasare centrală, prin comparație cu diagrama rezultată în urma testelor experimentale. Ca și în cazul elementelor precedente, Fig. 7.9. prezintă aceeași diagramă teoretică, incluzând însă toate fazele din procesul de încercare a elementului. Toate curbele și graficele au aceeași însemnătate ca și cele ce caracterizează elementele anterior. Din nou, se poate observa că în ambele situații de modelare, diferența de forță maximă înregistrată nu este semnificativă între experiment și model, însă comportările nu sunt deosebit de concordante prin prisma deformațiilor. Pentru acest element se observă că modelul conduce la forțe capabile ultime mai mari decât cele obținute experimental, atât în stare neconsolidată cât și post-consolidare. Diferențele de forță maximă sunt de 5,5 kN și respectiv 4,25 kN, ceea ce procentual înseamnă o variație de 7,40% și respectiv 5,70%. În Tabel 7.1. sunt centralizate valorile capacităților maxime înregistrate numeric și teoretic, precum și raportul dintre acestea.

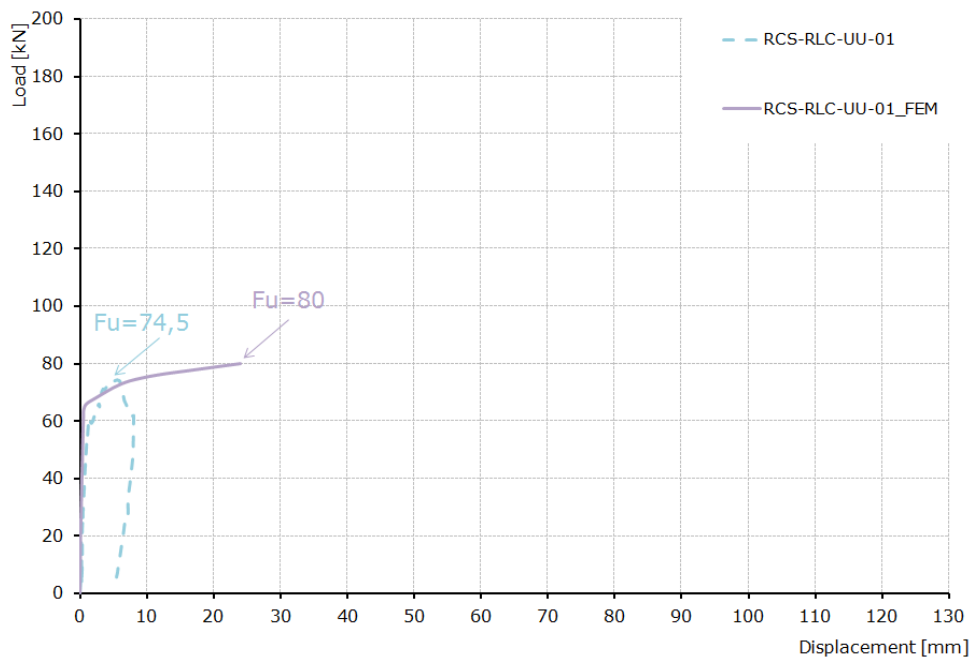


Fig. 7.8. - Comparație privind diagramele Forță-Deplasare centrală obținute teoretic și experimental pentru elementul RCS-RLC-UU-01

Starea de fisurare obținută numeric la finalul încărcării elementului neconsolidat este prezentată în Fig. 7.10.a în timp ce starea de fisurare la finalul încărcării elementului consolidat este prezentată în Fig. 7.10.b. Din nou, modelul nu reproduce întocmai starea de fisurare a elementului experimental, fisura de pe direcția lungă a plăcii, nefiind surprinsă de acesta. În același timp, pe direcție longitudinală apar două fisuri (la extremitățile piesei de încărcare) comparativ cu

testul, în care apare doar una singură. Este însă interesant faptul că starea de fisurare relevă o concentrație sporită de fisuri în zona consolidată cu elemente CFRP, întocmai ca și în cazul testelor experimentale.

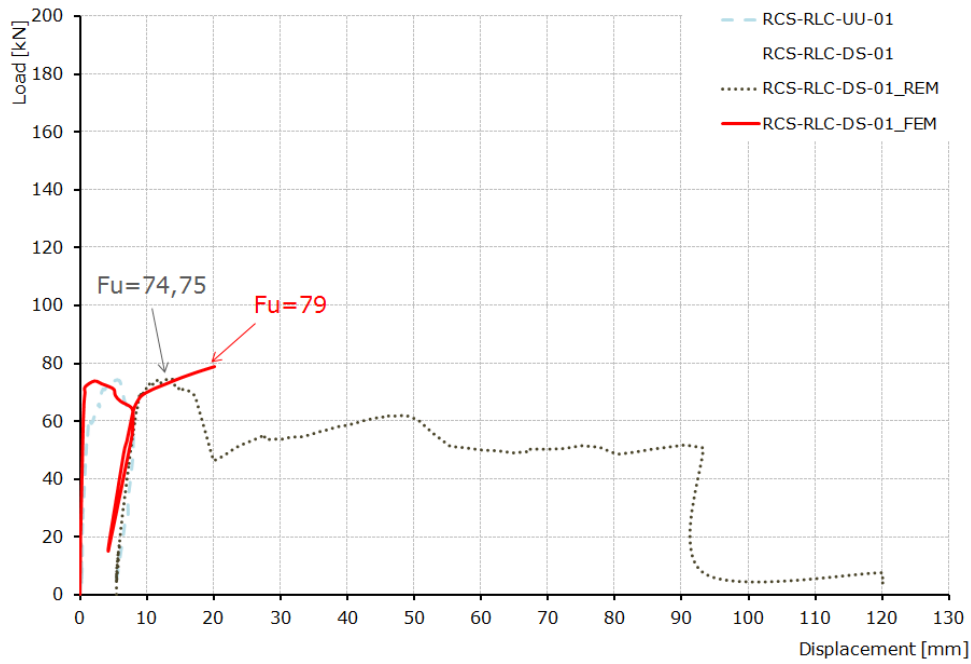


Fig. 7.9. - Comparație privind diagramele Forță-Deplasare centrală obținute teoretic și experimental pentru elementul RCS-RLC-01

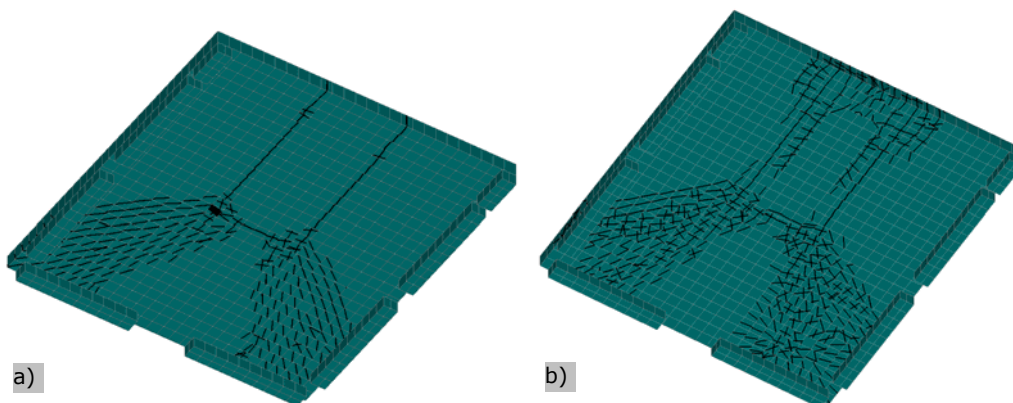


Fig. 7.10. - Starea de fisurare obținută numeric la finalul încercării elementului neconsolidat și consolidat

7.4. Modelarea comportării elementului RCS-RLC-02

În Fig. 7.11. este prezentată comportarea elementului înainte de consolidare prin intermediul diagramei caracteristice Forță-Deplasare centrală, prin comparație cu diagrama rezultată în urma testelor experimentale. Ca și în cazul elementelor precedente, Fig. 7.12. prezintă aceeași diagramă teoretică, incluzând însă toate fazele din procesul de încercare a elementului. Modelele caracteristice acestui element prezintă diferențele cele mai importante față de comportarea experimentală. Astfel, modelul conduce la forțe capabile ultime mai mari decât cele obținute experimental pentru elementul neconsolidat, și la valori semnificativ mai mici pentru faza post-consolidare. Diferențele de forță maximă sunt de 13,25 kN și respectiv 22,25 kN. În Tabel 7.1. sunt centralizate valorile capacităților maxime înregistrate numeric și teoretic, precum și raportul dintre acestea.

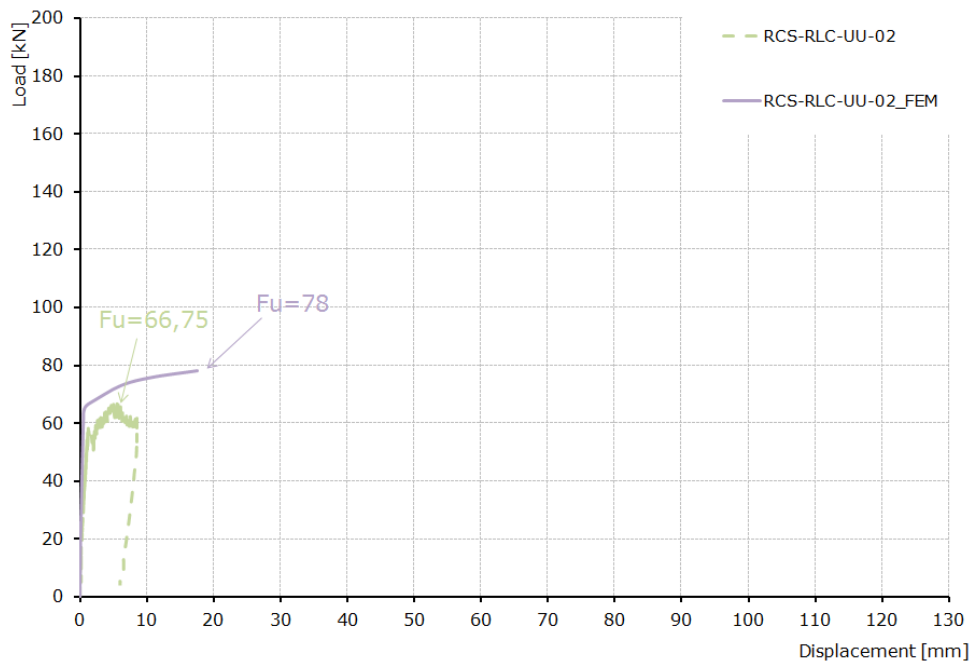


Fig. 7.11. - Comparație privind diagramele Forță-Deplasare centrală obținute teoretic și experimental pentru elementul RCS-RLC-UU-02

Starea de fisurare obținută numeric la finalul încărcării elementului neconsolidat este prezentată în Fig. 7.13.a în timp ce starea de fisurare la finalul încărcării elementului consolidat este prezentată în Fig. 7.13.b. Pentru acest model, starea de fisurare în varianta post-consolidare este mai apropiată de rezultatele experimentale, însă din nou pe direcția longitudinală apar două fisuri principale, și nu doar una centrală.

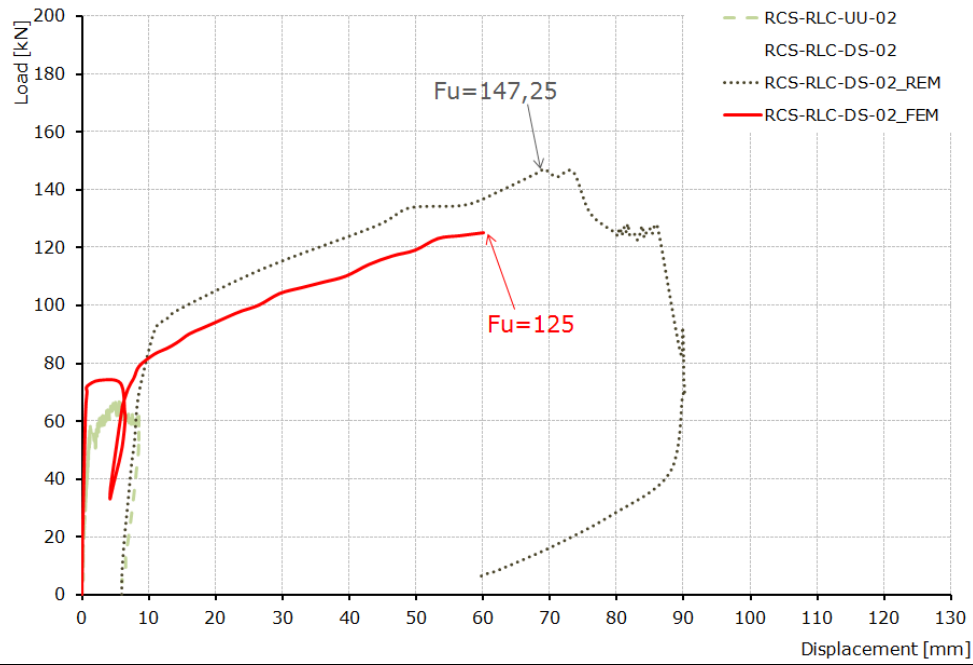


Fig. 7.12. - Comparație privind diagramele Forță-Deplasare centrală obținute teoretic și experimental pentru elementul RCS-RLC-02

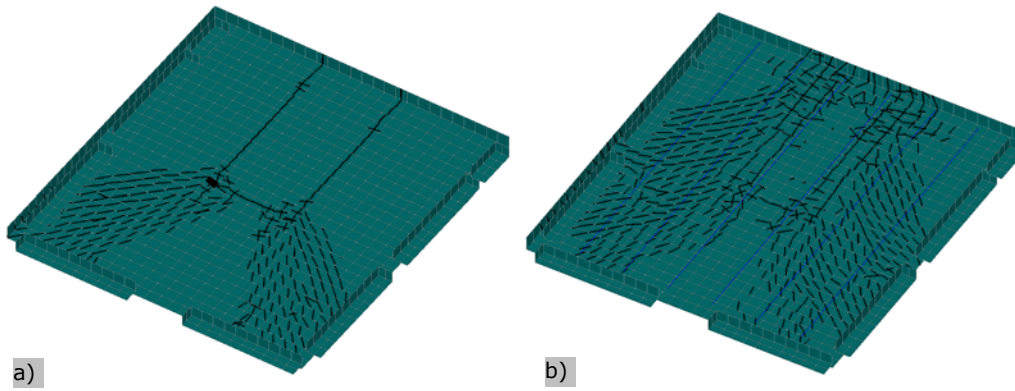


Fig. 7.13. - Starea de fisurare obținută numeric la finalul încercării elementului neconsolidat și consolidat

7.5. Concluzii

În Tabel 7.1. sunt centralizate valorile capacităților maxime înregistrate numeric și teoretic, precum și raportul dintre acestea. Variabilitatea rezultatelor este destul de mare, modelul ce prezintă cea mai mare abatere față de testele experimentale fiind cel pentru elementul RCS-RLC-02.

Tabel 7.1. - Date caracteristice privind comportarea experimentală și teoretică a plăcilor

| Test | $F_{u,exp}$ [kN] | $F_{u,theo}$ [kN] | $F_{u,exp}/F_{u,theo}$ |
|---------------|---------------------|----------------------|------------------------|
| RCS-FS-UU-01 | 118,50 | 125 | 0,948 |
| RCS-FS-DS-01 | 185,50 | 176 | 1,054 |
| RCS-RSC-UU-01 | 86,75 | 88 | 0,986 |
| RCS-RSC-DS-01 | 85,75 | 96 | 0,893 |
| RCS-RLC-UU-01 | 74,50 | 80 | 0,931 |
| RCS-RLC-DS-01 | 74,75 | 79 | 0,946 |
| RCS-RLC-UU-02 | 66,75 | 78 | 0,856 |
| RCS-RLC-DS-02 | 147,25 | 125 | 1,178 |

Modelul numeric utilizat reproduce cu o acuratețe suficientă capacitatea ultimă a elementelor experimentale (cu excepția modelului RCS-RLC-02), însă din punct de vedere al altor parametri, rezultatele nu sunt similare cu cele experimentale. Astfel, rigiditățile elementelor sunt mai mari în modelele numerice pentru elementele în fază pre-consolidare și mai reduse pentru faza post-consolidare. Această diferență de comportare conduce bineînțeles la o divergență a punctelor caracteristice de pe curbele Forță-Deplasare, de regulă, valorile maxime ale forței înregistrându-se la valori de deplasare mai mari în modelul teoretic comparativ cu cele determinate experimental. O problemă suplimentară a modelului este reprezentată de timpul de rulare relativ mare, o reducere a acestuia fiind evident necesară pentru ca modelul să poată fi aplicat în mod curent.

Dacă în această fază s-a urmărit doar validarea modelului implicit propus de producătorul programului ATENA, pentru marea majoritate a parametrilor utilizându-se valorile implicite sugerate de dezvoltator, este limpede că una dintre direcțiile viitoare de cercetare va trebui să includă în mod obligatoriu o rafinare a modelului.

Concluzionând, se poate afirma că dacă la nivel de utilizare în aplicații curente de proiectare, modelul poate reprezenta o alternativă, acesta trebuie însă îmbunătățit pentru a putea fi exploatat în cadrul unor cercetări mai complexe.

8. STUDII DE CAZ

Capitolul prezintă în mod concis două studii de caz ce implică aplicații reale, practice, privind consolidarea plăcilor de beton armat cu și fără goluri utilizând materiale compozite polimerice. Cele două studii de caz, bazate pe lucrări efectuate de autorul tezei, au menirea de a evidenția aplicabilitatea practică a temei de cercetare. Primul studiu de caz se referă la consolidarea unei plăci întregi din cadrul unei construcții unifamiliale P+M. Al doilea studiu se referă la consolidarea plăcilor de la mai multe niveluri ale unei clădiri industriale, consolidare a cărei necesitate rezultă în urma creării unui număr important de goluri.

8.1. Studiu de caz nr. I

Studiul de caz se referă la consolidarea unei plăci de beton armat într-o construcție unifamilială P+M.

8.1.1. Formularea problemei

În urma unei expertize tehnice efectuate de Expert MLPTL, Prof. dr. ing. Valeriu STOIAN, la o construcție unifamilială din Timișoara s-au descoperit o serie de nereguli. Clădirea are un regim de înălțime P+M, printre elementele ce prezintă probleme fiind și placa de beton armat de peste parter. Astfel, o serie de pereți fuseseră construiți la etajul clădirii, acești descărcând direct pe placa de peste parter. Mai mult, pereții au fost realizați într-o soluție constructivă ce a condus la încărcări permanente din greutate proprie a pereților exagerate. Suplimentar, alcătuirea constructivă a plăcii a fost deficitară, armăturile superioare fiind insuficiente în zonele de reazem (atât ca arie de armătură cât și ca lungimi). Conturul plăcii este prezentat în Fig. 8.1.

În urma încercărilor nedistructive s-a concluzionat că placa are o grosime de 120 mm și este realizată din beton de clasă C16/20, fiind armată la partea inferioară cu bare de armătură din PC52 $\Phi 8/100$, pe ambele direcții. Pentru această alcătuire, momentul încovoietor capabil al plăcii pe cele două direcții a rezultat: $M_{cap,x}=13,5$ kNm și $M_{cap,y}=12,20$ kNm.

În calcule, din cauza conformării nepotrivite a armăturilor superioare, continuitatea plăcii s-a neglijat, fiecare ochi fiind calculat ca simplu rezemat pe contur. Distribuția eforturilor a fost evaluată pentru toate ochiurile plăcii, cele notate cu A, B, C și D în Fig. 8.1. fiind cele care au prezentat eforturi superioare capacității la încovoiere evaluată anterior. Acest lucru se datorează prezenței la etaj a pereților grei ce descarcă direct pe placă, pozițiile acestora fiind evidențiate pentru ochiurile A și B în Fig. 8.2.

În zona ochiului A, momentele încovoietoare maxime pe cele două direcții au rezultat: $M_{Ed,x}=12,9$ kNm și $M_{Ed,y}=16,1$ kNm. În zona ochiului B, momentele încovoietoare maxime pe cele două direcții au rezultat: $M_{Ed,x}=10,8$ kNm și $M_{Ed,y}=18,5$ kNm. Astfel, s-a determinat că pe direcție longitudinală (x) placa deține suficientă capacitate, intervențiile de consolidare urmând a fi aplicate doar pe direcție transversală (y), prin consolidarea suprafeței inferioare a plăcii, în zona ochiurilor A, B, C și D.

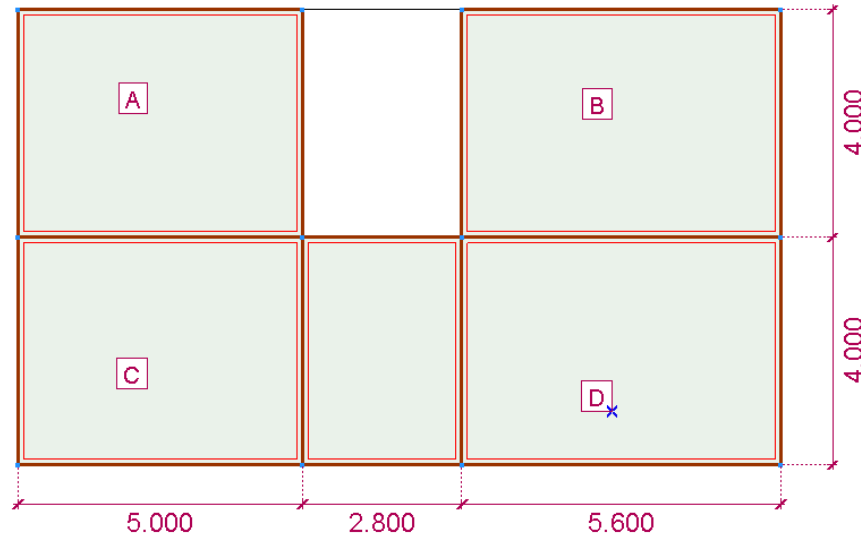


Fig. 8.1. - Conturul plăcii

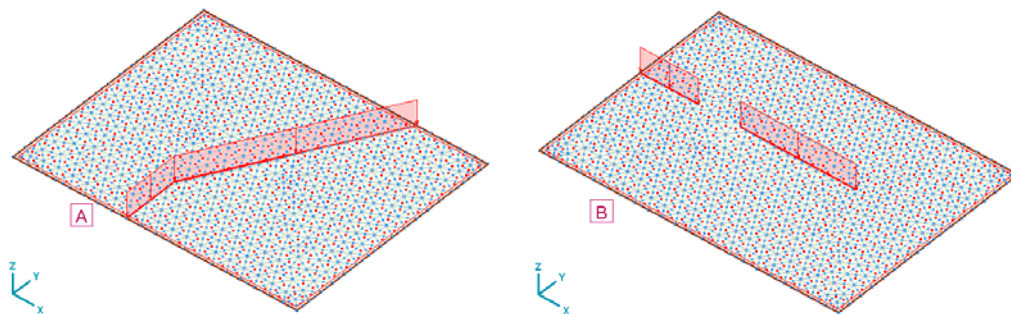


Fig. 8.2. - Poziția pereților pe placă în zona ochiurilor A și B

8.1.2. Stabilirea soluției de consolidare

Cantitatea necesară de țesătură CFRP ce trebuie montată în cele patru ochiuri (A, B, C, D) a fost evaluată pe baza procedurii prezentat în Anexa I, armătura echivalată fiind cea necesară pentru a spori capacitatea la încovoiere cu diferența între momentul efectiv și momentul capabil. Spre exemplificare, pentru ochiul B, pe direcția y, diferența între momentul efectiv și cel capabil este de 6,30 kNm. Pentru a spori capacitatea portantă la nivelul momentului efectiv, e nevoie de o cantitate de armătură de 300 mm²/m. Această cantitate se echivalează cu cea de fibră ce trebuie montată, utilizând Rel. 8.1.

$$A_{f,y} = \frac{f_{yd}}{E_f \cdot \varepsilon_f} A_{s,y} = \frac{300 \text{ MPa}}{231000 \text{ MPa} \cdot 0,008} \cdot 300 \text{ mm}^2 = 49 \text{ mm}^2 \quad (8.1.)$$

Alegându-se fâșii cu o grosime de 0,12 mm, lățimea totală necesară a acestora pe un metru de placă, rezultă, conform Rel. 8.2. de 410 mm. S-a ales o variantă de consolidare cu fâșii de 100 mm lățime dispuse la câte 200 mm interax.

$$b_{f,y} = \frac{A_{f,y}}{t_f} = \frac{49 \text{ mm}^2}{0,12} = 410 \text{ mm}^2 \quad (8.2.)$$

8.1.3. Aplicarea consolidării

În Fig. 8.3. se poate observa o fâșie orientată perpendicular pe direcția de aplicare a țesăturilor, confirmând suplimentar necesitatea intervențiilor de consolidare propuse.

În Fig. 8.4. este prezentată o vedere a plăcii într-un stadiu intermediar. Se pot observa trei fâșii, fiecare dintre ele fiind într-o etapă diferită a procesului de consolidare. Astfel, în extrema dreaptă suprafața este pregătită pentru aplicare, în mijloc țesătura este aplicată, iar în extrema stângă este aplicată și protecția țesăturii. Aceasta este alcătuită dintr-un strat de nisip, asigurând o suprafață pe care se poate aplica stratul de tencuială. Fig. 8.5. prezintă suprafața inferioară a plăcii după finalizarea întregului proces de consolidare. Toate fâșiile de țesătură sunt protejate prin aplicarea stratului de nisip.



Fig. 8.3. - Vedere a plăcii într-o etapă intermediară a procesului de consolidare



Fig. 8.4. - Vedere a plăcii într-o etapă intermediară a procesului de consolidare



Fig. 8.5. - Suprafața inferioară a plăcii la finalul procesului de consolidare

8.1.4. Rezultate și concluzii

În urma aplicării sistemului de consolidare se poate afirma că acesta își dovedește eficiența. Capacitatea la încovoiere a plăcii a fost sporită suficient pentru ca placa să preia în siguranță încărcările la care va fi supusă în condițiile utilizării prevăzute de codurile de proiectare. Placa reabilitată a fost dată în exploatare normală în urma cu aproximativ 2 ani, fără a fi raportată, până în prezent, niciun fel de degradare.

8.2. Studiu de caz nr. II

Studiul de caz se referă la consolidarea mai multor plăci ale unei clădiri industriale, în urma creării unui număr important de goluri.

8.2.1. Formularea problemei

Al doilea studiu de caz a apărut ca o consecință a comunicării defectuoase între proiectanții unei clădiri, în speță între proiectantul structurist și cel al sistemelor de instalații. Clădirea are un regim de înălțime P+M, având destinație industrială. Astfel, deși funcțiunea impunea existența unui număr important de goluri pentru diverse instalații HVAC, acestea nu au fost prevăzute pe planurile cofraj și armare ale plăcilor de peste parter și etaj. În consecință, plăcile s-au executat fără golurile necesare, soluția de remediere a problemei fiind tăierea ulterioară a acestora. În total s-au tăiat 40 goluri, cu dimensiunea laturilor variind între 200 mm și 1400 mm.

8.2.2. Stabilirea soluției de consolidare

În încercarea beneficiarului de a remedia problema într-un timp cât mai scurt, s-a adoptat o soluție de consolidare utilizând materiale compozite polimerice. Pentru evitarea slăbirii plăcii în vecinătatea golurilor, s-a decis ca acestea să se bordeze, pe ambele direcții, de o parte și de alta a acestora, aplicând o abordare similară cu cea aplicată pentru elementele experimentale din prezenta teză. S-au propus trei soluții:

- aplicarea tehnicii EB-FRP utilizând fâșii de țesătură
- aplicarea tehnicii EB-FRP utilizând lamele pultrudate pe o direcție și fâșii de țesătură pe cealaltă
- aplicarea tehnicii NSMR-FRP pe o direcție și fâșii de țesătură pe cealaltă.

Beneficiarul a optat pentru prima dintre aceste soluții, cantitatea necesară de țesătură CFRP ce trebuie montată fiind evaluată pe baza procedurii prezentat în Anexa I. În continuare este prezentată detaliat modalitatea de determinare a acestei cantități pentru golul având dimensiunile maxime, de 760x1000 mm.

$$F_S = F_f \Rightarrow A_f = \frac{f_{yd}}{E_f \cdot \varepsilon_f} A_S = \frac{f_{yk}}{\gamma_S \cdot E_f \cdot \varepsilon_f} A_S \quad (8.3.)$$

Placa este armată cu plase legate din bare de armătură de tip PC52, având diametrul $\Phi 8$ și pasul de 130 mm. Astfel aria de armătură eliminată prin introducerea golului, pe cele două direcții, se obține:

$$A_{S,t} = \frac{n \cdot (8 \text{ mm})^2}{4} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{130 \text{ mm}} \approx 386 \text{ mm}^2 / m \quad (8.4.)$$

$$A_{S,l} = \frac{n \cdot (8 \text{ mm})^2}{4} \cdot \frac{760 \text{ mm}}{130 \text{ mm}} \approx 294 \text{ mm}^2 / m \quad (8.5.)$$

Cantitatea necesară de țesătură CFRP ce trebuie montată pe cele două direcții, pe fiecare margine a golului, se obține prin echivalarea pe baza Rel 8.3. cu jumătate din cantitatea de armătură eliminată prin tăierea golului. Astfel, pe cele două direcții, pe fiecare latură se va monta o cantitate de armătură de:

$$A_{f,t} = \frac{f_{yd}}{E_f \cdot \varepsilon_f} \frac{A_{s,t}}{2} = \frac{300 \text{ MPa}}{231000 \text{ MPa} \cdot 0,008} \cdot \frac{386 \text{ mm}^2}{2} = 31,33 \text{ mm}^2 \quad (8.6.)$$

$$A_{f,l} = \frac{f_{yd}}{E_f \cdot \varepsilon_f} \frac{A_{s,l}}{2} = \frac{300 \text{ MPa}}{231000 \text{ MPa} \cdot 0,008} \cdot \frac{294 \text{ mm}^2}{2} = 23,86 \text{ mm}^2 \quad (8.7.)$$

Alegându-se fâșii cu o grosime de 0,12 mm, lățimea necesară a acestora de fiecare parte a golului, rezultă:

$$b_{f,t} = \frac{A_{f,t}}{t_f} = \frac{31,33 \text{ mm}^2}{0,12} = 261 \text{ mm}^2 \quad (8.8.)$$

$$b_{f,l} = \frac{A_{f,l}}{t_f} = \frac{23,86 \text{ mm}^2}{0,12} = 199 \text{ mm}^2 \quad (8.9.)$$

Din rațiuni tehnologice (țesătura fiind livrată de producător la role cu lățimea de 300 mm) și de execuție facilă, beneficiarul a decis ca pe ambele direcții să utilizeze fâșii identice, cu lățimi de 300 mm, suplimentând astfel semnificativ cantitatea totală. Propunerea de consolidare este prezentată în Fig. 8.6.

Pe baza acestei abordări s-au stabilit soluțiile de consolidare pentru toate golurile, excepție făcând laturile golurilor ce au dimensiuni mai mici de 400 mm. Conform recomandărilor constructive prezentate în Cap. 2, plăcile în care se creează goluri cu astfel de dimensiuni nu necesită niciun fel de intervenții, neafectând capacitatea portantă a plăcii.

Ca și cronologie, se recomandă ca elementele de consolidare să fie aplicate înaintea tăierii golului. Tăierea golurilor s-a efectuat cu un ferăstrău cu lanț, răcit cu apă. O problemă tehnologică destul de importantă este reprezentată de eliminarea blocului de beton tăiat, greutatea acestuia fiind, în cazul golurilor mari, substanțială. În cazul utilizării unor ferăstraie circulare, se recomandă executarea unor găuri (de regulă cu freza) la colțurile golului, pentru a evita tăierea prea lungă a marginilor. O provocare suplimentară la această lucrare a fost reprezentată de faptul că toate intervențiile s-au efectuat sub exploatare, trebuind executate o serie de lucrări suplimentare pentru protecția finisajelor aplicate în prealabil.

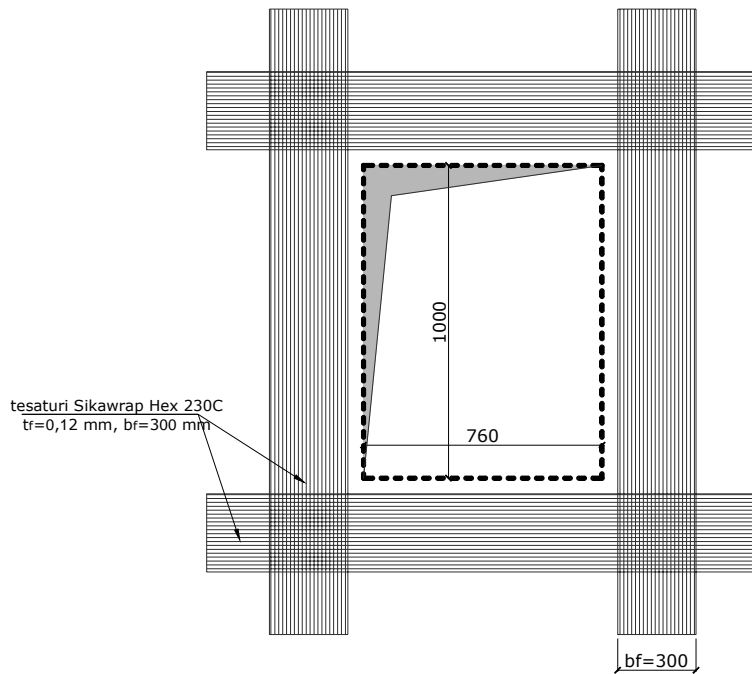


Fig. 8.6. - Propunerea de consolidare pentru golurile de 760x1000 mm

8.2.3. Aplicarea consolidării

În Fig. 8.7. - Fig. 8.9. sunt prezentate doar câteva etape din procesul de consolidare.

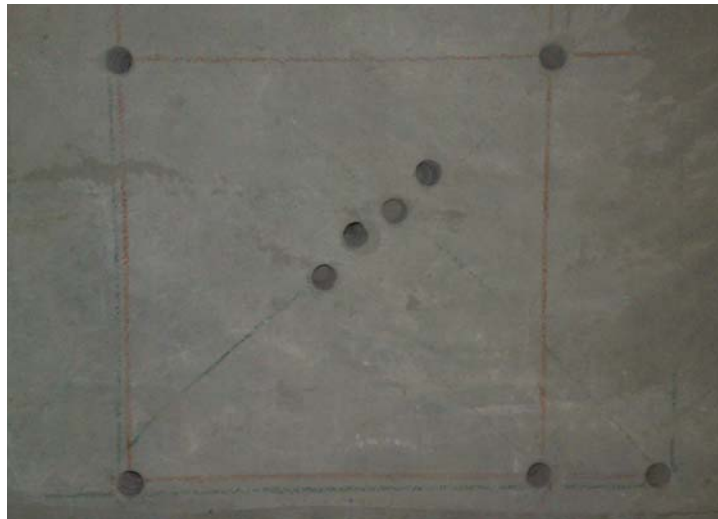


Fig. 8.7. - Realizarea găurilor de ghidaj la colțurile viitoarelor goluri



Fig. 8.8. - Marcarea și ghidarea tăierii; bucăți de placă eliminate prin tăierea golului



Fig. 8.9. - Vedere a unei zone consolidate, înainte de tăierea golului

8.2.4. Rezultate și concluzii

Efectele nefaste generate de tăierea golurilor în placă au fost înlăturate prin aplicarea sistemului de consolidare. Placa reabilitată a fost dată în exploatare normală în urma cu aproximativ 1 an, fără a fi raportată, până în prezent, niciun fel de degradare.

9. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

9.1. Concluzii

Crearea unui gol într-o placă de beton armat încovoiată are ca efect o comportare ce se caracterizează de regulă prin scăderi ale capacităților și a rigidității. Parametrul cel mai important este bineînțeles dimensiunea golului, însă și poziția acestuia are o influență majoră asupra comportării elementului. Dacă în termeni absoluți scăderea de capacitate poate fi semnificativă, ca și valori relative la suprafața plăcilor rămasă după tăierea golurilor, pentru goluri create în colțurile și pe laturile elementelor, scăderea nu mai este la fel de importantă.

Sistemul de consolidare propus și-a îndeplinit scopul, de la caz la caz refăcând sau sporind capacitățile ultime ale elementelor experimentale. În același timp, materialele de consolidare produc o redistribuire și o uniformizare a eforturilor, această însușire reflectându-se în modurile de cedare, caracterizate de fisuri mai numeroase, având deschideri mai mici. Capacitățile ultime ale elementelor cu goluri, chiar și în valori absolute, pot fi ușor refăcute și chiar sporite prin aplicarea consolidării, până la valori superioare chiar capacității elementului întreg, neconsolidat. Un sistem de consolidare corespunzător are capacitatea de a reface chiar și rigiditatea la limita elastică a elementului.

Așa cum se desprinde și din Cap. 6., în cadrul prezentului program de cercetare s-a observat că tehnica NSMR-FRP prezintă durate de execuție și costuri mai ridicate comparativ cu EB-FRP. Comportarea elementelor de consolidare montate în șlițuri este însă superioară față de elementele montate prin lipire la exterior. Totuși pentru elemente similare celor din prezentul program, aplicarea fâșiilor de țesătură prin tehnica EB-FRP reprezintă o soluție demnă de luat în considerare, modul de solicitare și geometria elementului permițând asigurarea unor lungimi de ancoraj suficiente și în consecință, a cedărilor prin ruperea fibrelor.

Sistemul de consolidare își dovedește eficiența și în cadrul aplicațiilor reale. Au fost prezentate două studii de caz, pentru plăci cu și fără goluri. Concluzia studiilor de caz este că soluția de consolidare restabilește capacitatea plăcilor asigurând comportări corespunzătoare.

Abordarea simplificată de calcul a soluțiilor de consolidare (prezentată detaliat în Anexa I) își dovedește utilitatea, sistemele de reabilitare/consolidare dimensionate pe baza acestei abordări prezentând comportări conforme cu așteptările.

9.2. Contribuții personale

Principalele contribuții personale pot fi condensate astfel:

- întocmirea unui mini-compendiu al recomandărilor privind problematica golurilor în plăci de beton armat (atât considerate în proiectarea inițială cât și create ulterior)
- întocmirea unui studiu bibliografic sistematizat al cercetărilor curente din domeniul consolidării plăcilor de beton armat cu materiale FRP
- conceperea și construirea unui stand experimental pentru încercarea elementelor în Laboratorul Departamentului C.C.I.A.
- conceperea și desfășurarea unui program experimental ce prezintă o serie de particularități cu caracter inovator
 - elementele experimentale încercate prezintă goluri de dimensiuni mari, atipice pentru restul cercetărilor efectuate pe această temă
 - sistemele de consolidare propuse sunt mixte, utilizând două tehnici diferite, dar compatibile și complementare în cazul elementelor plane
- întocmirea unui studiu comparativ privind comportarea plăcilor de beton armat cu goluri tăiate ulterior și a soluțiilor de consolidare aplicabile acestui tip de elemente
 - detalierea unei abordări simplificate de calcul a soluțiilor de consolidare, destinată în principal proiectanților
 - calibrarea unor modele numerice cu rezultate promițătoare.

9.3. Activitate; diseminare rezultate

Pe perioada de desfășurare a activității în cadrul departamentului C.C.I.A., am fost membru în echipa a 3 granturi de cercetare: CNCSIS Cod 355, CEEEX 1436/2006 și PN II IDEI 1004/2008 oferite de CNCSIS (Consiliul Național al Cercetării Științifice din Învățământul Superior). În același timp, am fost beneficiarul unei burse de tip BD (Bursă Doctoranzi) desfășurată pe o perioadă de 3 ani. Bursa a fost oferită tot de CNCSIS. Am participat la elaborarea a 32 de articole științifice din postura de autor principal și coautor. Principalele 10 articole privind tema de cercetare (elaborate ca prim autor) sunt indexate în lista de Referințe Bibliografice ([66] - [75]). Restul articolelor, la care nu am fost prim autor sau care nu au ca obiect exact tema de cercetare, sunt inventariate mai jos în ordine cronologică a publicării.

1. *Dogariu A., Daescu C., Diaconu D., Bordea S., Demeter I., Muntean N., Floruț S. C.* - Studii experimentale al unei soluții de consolidare a panourilor de zidărie, Sesiunea națională de comunicări științifice studentești, 11 Mai 2007, Cluj-Napoca, România.

2. *Nagy-Gyorgy T., Dan D., Stoian V., Daescu C., Diaconu D., Floruț S. C.* - RC Beams and Columns retrofitted with FRP composites - Experimental Investigations, Proceedings of the 3rd WSEAS International Conference on APPLIED and THEORETICAL MECHANICS, 14-16 Dec 2007, Tenerife, Spania, pp. 112-118, ISSN: 1790-2769, ISBN: 978-960-6766-19-0. **(ISI)**

3. *Diaconu D., Nagy-György T., Stoian V., Floruț S. C.* - RC slabs strengthened with FRP composites - Case studies, Proceedings of the International Conference

CONSTRUCTIONS 2008, 9-10 Mai 2008, Cluj-Napoca, România, Vol. II, pp. 57-62, ISSN: 1221-5848.

4. **Floruț S. C.**, Nagy-György T., Stoian V., Diaconu D. - Strengthening of a hollow core precast slab using FRP composite materials - testing and rating, Proceedings of the International Conference CONSTRUCTIONS 2008, 9-10 Mai 2008, Cluj-Napoca, România, vol. II, pp. 69-74, ISSN: 1221-5848.

5. Dan D., Stoian V., Nagy-György T., Dăescu C., **Floruț S. C.** - Theoretical and experimental studies on welded composite joints for buildings placed in seismic areas, Proceedings of the International Conference CONSTRUCTIONS 2008, 9-10 Mai 2008, Cluj-Napoca, România, vol. I, pp. 345-352, ISSN: 1221-5848.

6. Dan D., Stoian V., Nagy T., Dăescu C., **Floruț S. C.** - Improvement of energetic performances of the student's hostels belonging to the Politehnica University of Timișoara, Proceedings of the International Conference CONSTRUCTIONS 2008, 9-10 Mai 2008, Cluj-Napoca, România, vol. III, pp. 85- 92, ISSN: 1221-5848.

7. Dan D., Stoian V., Nagy-György T., **Floruț S. C.**, Demeter I., Pavlou D. - Experimental Studies on Steel and Steel Concrete Composite Joints for Buildings, WSEAS International Conference on Engineering Mechanics, Structures and Engineering Geology, 22-24 Iul 2008, Heraklion, Grecia, pp. 90-95, ISSN: 1790-2769, ISBN: 978-960-6766-88-6. **(ISI)**

8. **Floruț S. C.**, Nagy-György T., Stoian V., Diaconu D. - Strengthening of hollow core precast slabs using FRP composite materials – procedure, testing and rating, Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on Sustainability in Science Engineering (SSE '09), 27-29 Mai 2009, Timișoara, România, vol. 2, pp. 502-507, ISSN: 1790-2769, ISBN: 978-960-474-080-2. **(ISI)**

9. Stoian V., Dan D., Nagy-György T., **Floruț S. C.**, Prună L. - Structural rehabilitation and health monitoring of reinforced concrete chimneys, Proceedings of the 4th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, 22-24 Iulie 2009, Zurich, Elvetia, pp. 184, ISBN: 978-3-905594-52-2.

10. Diaconu D., Nagy-György T., Stoian V., Dan D., Dăescu C.A., Demeter I., **Floruț S. C.** - Economic Assessment of Different Shear Strengthening Methods for Clay Brick Masonry Walls, Proceedings of the International Conference on Protection of Historical Buildings - Prohitech 09, 21-24 Iunie 2009, Roma, Italia, pp. 1275-1280, ISBN: 978-0-415-55803-7-set ISBN: 978-0-415-55805-1-vol II. **(ISI)**

11. Stoian V., **Floruț S. C.**, El Hammoumi A., Iben Brahim A. - Structural rehabilitation of the Foundouq Boualam masonry building, by strengthening the infrastructure, Proceedings of the International Conference on Protection of Historical Buildings - Prohitech 09, 21-24 Iunie 2009, Roma, Italia, pp. 799-803, ISBN: 978-0-415-55803-7-set, ISBN: 978-0-415-55804-4-vol I. **(ISI)**

12. Diaconu D., Nagy-György T., Dăescu C. A., Stoian V., **Floruț S. C.** - RC elements strengthened with FRP composite - economical study, Proceedings of the 9th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, 13-15 Iulie 2009, Sydney, Australia, pp. 63, ISBN: 978-0 98067-5-0-4.

13. Diaconu D., Stoian V., **Floruț S. C.** - Anchoring solutions for CFRP lamellas used in flexural strengthening of RC beams, Annals of University of Oradea -

Constructions and hydro-utility installations fascicle, Nov 2009 Oradea, România, vol. XII, pp. 89-96, ISSN: 1454 - 4067.

14. *Diaconu D., Stoian V., Floruț S. C.* - Flexural strengthening of RC beams using CFRP lamellas - anchoring solutions, iNDiS 2009 PLANNING, DESIGN, CONSTRUCT AND RENEWAL IN THE CIVIL ENGINEERING, 11th National and 5th International scientific meeting, 25-27 Nov 2009, Novi Sad, Serbia, pp. 165-172, ISBN 978-86-7892-221-3.

15. *Dan D., Stoian V., Nagy-Gyorgy T., Fabian A., Dăescu C., Floruț S. C.* - Experimental studies on steel and steel concrete composite joints under asymmetrical loads, iNDiS 2009 PLANNING, DESIGN, CONSTRUCT AND RENEWAL IN THE CIVIL ENGINEERING, 11th National and 5th International scientific meeting, 25-27 Nov 2009, Novi Sad, Serbia, pp. 151-156, ISBN 978-86-7892-221-3.

16. *Dan D., Stoian V., Nagy-György T., Fabian A., Daescu C., Floruț S. C., Demeter I.* - The behaviour of steel and steel concrete composite joints, PROCEEDINGS OF THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURES AND ARCHITECTURE, ICOSA 2010, 21-23 Iul 2010, Guimaraes, Portugalia, pp. 383-384, ISBN 978-0-415-49249-2.

17. *Diaconu D., Stoian V., Floruț S. C.* - Anchoring influence in RC beams flexural strengthening using CFRP lamellas, 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, 22-24 Iul 2010, Corfu, Grecia, pp. 261-265, ISSN: 1792-4294, ISBN: 978-960-474-203-5. **(ISI)**

18. *Dan D., Stoian V., Floruț S. C., Nagy-Gyorgy T., Pruna L.* - Structural analysis, rehabilitation and further development of health monitoring program concerning two reinforced concrete chimneys, 34th International Symposium on Bridge and Structural Engineering, 22-24 Sept 2010, Veneția, Italia, pp. 656/6e.

19. *Stoian V., Dan D., Nagy-György T., Floruț S. C., Prună L.* - Analiza structurală, reabilitarea și urmărirea comportării structurilor a două coșuri de fum din beton armat, Comportarea IN SITU a Construcțiilor - Conferință Națională cu participare internațională, 23-24 Sept 2010, București, România.

20. *Stoian D.V., Pescari I.S., Floruț S. C., Stoian V.A.* - Behaviour and structural evaluation procedure of a precast R.C. multi-storey building subjected to blast loading, COST ACTION 26 - Urban Habitat Constructions under Catastrophic Events, Proceedings of the Final Conference, 16-17 Sept 2010, Napoli, Italia, pp. 499-503, ISBN: 978-0-415-60685-1 (Hbk+CD-Rom), ISBN: 978-203-83363-6 (eBook).

21. *Popescu C., Stoian V., Floruț S. C.* - New tool for seismic design of masonry building, Analele Universității din Oradea - Fascicula "Construcții și Instalații Hidroedilitare, 5-6 Nov 2010, Oradea, România, vol. XIII-2 Supl 1, pp. 351-358, ISSN: 1454 - 4067.

22. *Fabian A., Dan D., Stoian V., Demeter I., Nagy-Gyorgy T., Floruț S.C.* - Comparative study concerning the seismic behaviour of composite steel-concrete structural shear walls with steel encased profiles, fib Prague 2011, Concrete engineering for excellence and efficiency, 8-10 Iun 2011, Praga, Rep Cehă, pp. 1217-1220.

I. ANEXĂ - DIMENSIONAREA SOLUȚIILOR DE CONSOLIDARE

I.1. Calculul soluției de consolidare pentru elementul întreg RCS-FS-01

Așa cum este prezentat și în Cap. 6, cantitatea necesară de elemente CFRP ce trebuie montată pentru a consolida eficient placa a fost determinată analitic, pe baza unei ipoteze simple: se egalează forța de întindere pe care ar fi putut-o prelua armătura de oțel (armătură ajunsă la limita de curgere după încercarea pe elementul neconsolidat) cu forța de întindere pe care o pot prelua elementele CFRP de consolidare. Abordarea este prezentată sub forma Rel. I.1.

$$F_S = F_f \Rightarrow A_f = \frac{f_{yd}}{E_f \cdot \varepsilon_f} A_S = \frac{f_{yk}}{\gamma_S \cdot E_f \cdot \varepsilon_f} A_S \quad (\text{I.1.})$$

unde:

- F_S - forța de întindere din armătură
- F_f - forța de întindere din fibra compozitului
- A_f - aria de fibre din compozitul CFRP
- f_{yd} - rezistența de calcul a oțelului din care este confecționată armătura
- f_{yk} - rezistența caracteristică a oțelului din care este confecționată armătura
- γ_S - coeficient parțial de siguranță pentru calitatea oțelului
- E_f - modulul de elasticitate al fibrei din compozitul CFRP
- ε_f - deformația specifică din fibra compozitului CFRP
- A_S - aria de armătură echivalată

Aria de armătură totală dintr-o fâșie de lățime oarecare se obține pe baza Rel. I.2.

$$A_S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{b}{s} \quad (\text{I.2.})$$

unde:

- A_S - aria de armătură
- d - diametrul barelor de armătură
- s - pasul armării
- b - lățimea fâșiei de calcul

Placa este armată la partea inferioară cu plase de armătură având diametrul $\Phi 4$ și pasul de 100 mm. Astfel pentru o fâșie unitară, cantitatea totală de armătură se obține:

$$A_{s,1} = \frac{n \cdot (4 \text{ mm})^2}{4} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{100 \text{ mm}} \approx 126 \text{ mm}^2 / m \quad (\text{I.3.})$$

unde:

$A_{s,1}$ - aria totală de armătură dintr-o fâșie unitară

Considerând că toate armăturile au atins limita de curgere, cantitatea totală de armătură al cărei rol trebuie preluat de materialul compozit de consolidare este:

$$A_{s,t} = L_p \cdot A_{s,1} = 3,70 \text{ m} \cdot 126 \text{ mm}^2 / m = 466,2 \text{ mm}^2 \quad (\text{I.4.})$$

$$A_{s,l} = l_p \cdot A_{s,1} = 2,40 \text{ m} \cdot 126 \text{ mm}^2 / m = 302,4 \text{ mm}^2 \quad (\text{I.5.})$$

unde:

$A_{s,t}$ - aria totală de armătură de pe direcția transversală

L_p - lungimea liberă a plăcii

$A_{s,l}$ - aria totală de armătură de pe direcția longitudinală

l_p - lățimea liberă a plăcii

În această anexă, direcțiile transversale și longitudinale se referă la placă și nu la gol. Astfel, de fapt direcția transversală este direcția paralelă cu latura scurtă a plăcii în timp ce direcția longitudinală reprezintă direcția paralelă cu latura lungă a plăcii.

S-a adoptat varianta de consolidare în care pe direcția transversală să se aplice tehnica de montare în șlițuri a armăturilor compozite (NSMR-FRP) iar pe direcția longitudinală tehnica lipirii la exterior (EB-FRP). Caracteristicile benzilor respectiv a fâșiilor de țesătură utilizate pentru fiecare tehnică în parte sunt prezentate în Tabel I.1.

Tabel I.1. - Proprietățile sistemelor de consolidare

| Direcție | | Transversală | Longitudinală |
|--|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Tehnică | | NSMR-FRP | EB-FRP |
| Componentă | | Benzi pultrudate | Fâșii țesătură |
| Dimensiuni | Lățime [mm] | $t_f = 1,20 \text{ mm}$ | $b_f = 100 \text{ mm}$ |
| | Înălțime [mm] | $h_f = 10 \text{ mm}$ | --- |
| | Grosime [mm] | --- | $t_f = 0,12 \text{ mm}$ |
| | Arie S.T. [mm ²] | $A_{f,NSMR} = 12 \text{ mm}^2$ | $A_{f,EB} = 12 \text{ mm}^2$ |
| Modul de elasticitate [N/mm ²] | | $E_f = 165000 \text{ MPa}$ | $E_f = 231000 \text{ MPa}$ |
| Deformația specifică ultimă [N/mm ²] | | 0,017 | 0,017 |

Pe baza Rel. I.1., aria secțiunii transversale a materialului compozit ce trebuie dispus pe cele două direcții ale plăcii este:

$$A_{f,t} = \frac{f_{yk}}{\gamma_S \cdot E_f \cdot \varepsilon_f} A_{s,t} = \frac{490 \text{ MPa}}{1,15 \cdot 165000 \text{ MPa} \cdot 0,008^*} \cdot 466,2 \text{ mm}^2 = 150,49 \text{ mm}^2 \quad (\text{I.6.})$$

$$A_{f,l} = \frac{f_{yk}}{\gamma_S \cdot E_f \cdot \varepsilon_f} A_{s,l} = \frac{490 \text{ MPa}}{1,15 \cdot 231000 \text{ MPa} \cdot 0,008^*} \cdot 302,4 \text{ mm}^2 = 69,72 \text{ mm}^2 \quad (\text{I.7.})$$

* în toate calculele efectuate, deformația specifică ultimă din compozit se limitează la 0,008 (8‰), valoare mult mai mică decât deformația specifică recomandată de producător, 0,017 (17‰). Această abordare corespunde procedurii de limitare a deformațiilor specifice, recomandat de FIB bulletin 14 citație, fiind valoarea la care se inițiază fenomene de cedare prin pierderea aderenței, de tip "debonding".

Utilizând pentru consolidare elementele descrise în Tabel I.1., numărul necesar de elemente de consolidare rezultă:

$$n_{NSMR} = \frac{A_{f,t}}{A_{f,NSMR}} = \frac{150,49 \text{ mm}^2}{12 \text{ mm}^2} = 12,54 \text{ benzi} \quad (\text{I.8.})$$

$$n_{EB} = \frac{A_{f,l}}{A_{f,EB}} = \frac{69,72 \text{ mm}^2}{12 \text{ mm}^2} = 5,81 \text{ fasii de țesatură} \quad (\text{I.9.})$$

Pentru a efectua o consolidare simetrică și ținând cont de pozițiile senzorilor, s-a decis să se utilizeze 14 benzi NSMR-FRP și 6 fâșii de țesătură montate prin EB-FRP. Configurația sistemului de consolidare este prezentată la paragraful 6.4.2., Fig. 6.18.

I.2. Calculul soluției de consolidare pentru elementul RCS-RSC-01

Cantitatea necesară de elemente CFRP ce trebuie montată pentru a reface capacitatea portantă la încovoiere plăcii se determină pe baza următoarei ipoteze: se egalează forța de întindere pe care ar fi putut-o prelua armătura de oțel (armătură eliminată prin crearea golului) cu forța de întindere pe care o pot prelua elementele CFRP de consolidare. Elementele de consolidare se dispun astfel încât să bordeze marginile golului. În situația particulară golurilor din prezentul program (dispuse în colțul elementelor sau pe o margine a acestora) bineînțeles că se bordează doar câte o latură a golului. Abordarea este prezentată sub forma Rel. I.1.

Aria de armătură eliminată prin crearea golului și al cărei rol trebuie preluat de materialul compozit se evaluează astfel:

$$A_{s,t} = L_g \cdot A_{s,1} = 1,54m \cdot 126 \text{ mm}^2 / m = 194,04 \text{ mm}^2 \quad (\text{I.10.})$$

$$A_{s,l} = l_g \cdot A_{s,1} = 0,96m \cdot 126 \text{ mm}^2 / m = 120,96 \text{ mm}^2 \quad (\text{I.11.})$$

unde:

$A_{s,t}$ - aria de armătură de pe direcția transversală eliminată prin crearea golului

L_g - lumina golului pe direcție longitudinală

$A_{s,l}$ - aria de armătură de pe direcția transversală eliminată prin crearea golului

l_g - lumina golului pe direcție transversală

S-a adoptat soluția ca pe direcția transversală să se aplice tehnica de montare în șlițuri a armăturilor compozite (NSMR-FRP) iar pe direcția longitudinală tehnica lipirii la exterior (EB-FRP). Caracteristicile benzilor și lamelelor pultrudate utilizate pentru fiecare tehnică în parte sunt prezentate în Tabel I.2.

Tabel I.2. - Proprietăți ale sistemului de consolidare

| Direcție | | Transversală | Longitudinală |
|--|------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Tehnică | | NSMR-FRP | EB-FRP |
| Componentă | | Benzi pultrudate | Lamele pultrudate |
| Dimensiuni | Lățime [mm] | $t_f=1,20 \text{ mm}$ | $b_f=50 \text{ mm}$ |
| | Înălțime [mm] | $h_f=10 \text{ mm}$ | --- |
| | Grosime [mm] | --- | $t_f=1,20 \text{ mm}$ |
| | Arie S.T. [mm ²] | $A_{f,NSMR}=12 \text{ mm}^2$ | $A_{f,EB}=60 \text{ mm}^2$ |
| Modul de elasticitate [N/mm ²] | | $E_f=165000 \text{ MPa}$ | $E_f=165000 \text{ MPa}$ |
| Deformația specifică ultimă [N/mm ²] | | 0,017 | 0,017 |

Pe baza Rel. I.1., cantitatea de material compozit ce trebuie dispus pe cele două direcții ale plăcii este:

$$A_{f,t} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s \cdot E_f \cdot \varepsilon_f} A_{s,t} = \frac{490 \text{ MPa}}{1,15 \cdot 165000 \text{ MPa} \cdot 0,008^*} \cdot 190,04 \text{ mm}^2 = 61,34 \text{ mm}^2 \quad (\text{I.12.})$$

$$A_{f,l} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s \cdot E_f \cdot \varepsilon_f} A_{s,l} = \frac{490 \text{ MPa}}{1,15 \cdot 165000 \text{ MPa} \cdot 0,008^*} \cdot 120,96 \text{ mm}^2 = 39,04 \text{ mm}^2 \quad (\text{I.13.})$$

* a se vedea nota de la Rel. I.6. și Rel I.7.

Utilizând pentru consolidare elementele din Tabel I.2., numărul acestora rezultă:

$$n_{NSMR} = \frac{A_{f,t}}{A_{f,NSMR}} = \frac{61,34 \text{ mm}^2}{12 \text{ mm}^2} = 5,11 \text{ benzi} \quad (\text{I.14.})$$

$$n_{EB} = \frac{A_{f,l}}{A_{f,EB}} = \frac{39,04 \text{ mm}^2}{60 \text{ mm}^2} = 0,65 \text{ lamele pultrudate} \quad (\text{I.15.})$$

În conformitate cu calculul de mai sus și ținând cont de o serie de rațiuni tehnologice, s-a adoptat o soluție de consolidare ce constă în aplicarea a 5 benzi NSMR-FRP și 1 lamelă pultrudată montată prin EB-FRP. Configurația sistemului de consolidare este prezentată la paragraful 6.5.2., Fig. 6.46.

I.3. Calculul soluției de consolidare pentru elementul RCS-RLC-01

Pe baza aceleași abordări ca în cazul elementului RCS-RSC-01, se determină cantitatea necesară de elemente CFRP pentru a reface capacitatea portantă plăcii. În cazul prezentei plăci însă, elementele de consolidare vor borda doar o latură a golului, pe cea lungă (bordarea laturii scurte fiind imposibilă, ținând cont de configurația plăcii și a golului).

Aria de armătură eliminată prin crearea golului și care trebuie substituită de materialul compozit se evaluează astfel:

$$A_{s,t} = L_g \cdot A_{s,1} = 1,06m \cdot 126 \text{ mm}^2 / m = 133,56 \text{ mm}^2 \quad (\text{I.16.})$$

unde:

$A_{s,t}$ - aria de armătură de pe direcția transversală eliminată prin crearea golului

L_g - lumina golului pe direcție longitudinală

S-a adoptat tehnica de montare în șlițuri a armăturilor compozite (NSMR-FRP). Caracteristicile benzilor montate în șlițuri sunt identice cu cele utilizate pentru aceeași tehnică (NSMR-FRP) la consolidarea celor două elemente anterioare.

Pe baza Rel. I.1., cantitatea de material compozit ce trebuie dispus pe direcția transversală a plăcii este:

$$A_{f,t} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s \cdot E_f \cdot \varepsilon_f} A_{s,t} = \frac{490 \text{ MPa}}{1,15 \cdot 165000 \text{ MPa} \cdot 0,008^*} \cdot 133,56 \text{ mm}^2 = 43,11 \text{ mm}^2 \quad (\text{I.17.})$$

* a se vedea nota de la Rel. I.6. și Rel I.7.

Numărul benzilor pultrudate montate în șlițuri rezultă:

$$n_{NSMR} = \frac{A_{f,t}}{A_{f,NSMR}} = \frac{43,11 \text{ mm}^2}{12 \text{ mm}^2} = 3,59 \text{ benzi} \quad (\text{I.18.})$$

În conformitate cu calculul de mai sus, s-a adoptat o soluție de consolidare ce constă în aplicarea a 4 benzi NSMR-FRP. Configurația sistemului de consolidare este prezentată la paragraful 6.6.2., Fig. 6.64.

I.4. Calculul soluției de consolidare pentru elementul RCS-RLC-02

Pentru consolidarea acestui element se adoptă o abordare combinată a celor prezentate pentru elementele anterioare. În încercarea de a spori capacitatea elementului prin consolidare (nu doar de a o reface) întreaga suprafață inferioară va fi consolidată (și nu doar marginile golului bordate).

Astfel, pentru refacerea capacității, marginea golului se bordează similar cu cazul elementului RCS-RLC-01, iar pentru sporirea capacității, se consolidează întreaga suprafață inferioară similar cu elementul RCS-FS-01.

Aria de armătură eliminată prin crearea golului și care trebuie substituită de materialul compozit se evaluează astfel:

$$A_{s,t,e} = L_g \cdot A_{s,1} = 1,06m \cdot 126 \text{ mm}^2 / m = 133,56 \text{ mm}^2 \quad (\text{I.16.})$$

unde:

$A_{s,t,e}$ - aria de armătură de pe direcția transversală eliminată prin crearea golului

L_g - lumina golului pe direcție longitudinală

Considerând și că restul armăturilor au ajuns la limita de curgere, cantitatea totală de armătură al cărei rol trebuie preluat de materialul compozit de consolidare este:

$$A_{s,t,c} = L_p \cdot A_{s,1} = 2,765m \cdot 126 \text{ mm}^2 / m = 348,39 \text{ mm}^2 \quad (\text{I.17.})$$

$$A_{s,l,c} = l_p \cdot A_{s,1} = 2,40m \cdot 126 \text{ mm}^2 / m = 302,4 \text{ mm}^2 \quad (\text{I.18.})$$

unde:

$A_{s,t,c}$ - aria totală de armătură de pe direcția transversală

L_p - lungimea liberă a plăcii

$A_{s,l,c}$ - aria totală de armătură de pe direcția longitudinală

l_p - lățimea liberă a plăcii

S-a adoptat o soluție ce implică aplicarea pe direcția transversală a tehnicii de montare în șlițuri a armăturilor compozite (NSMR-FRP) iar pe direcția longitudinală tehnica lipirii la exterior (EB-FRP). Caracteristicile benzilor și fâșiilor de țesătură utilizate pentru fiecare tehnică în parte sunt identice cu cele utilizate pentru elementul RCS-FS-01 și sunt prezentate în Tabel I.1.

Pe baza Rel. I.1., cantitatea de material compozit ce trebuie dispus pentru bordarea golului (refacerea capacității) devine:

$$\begin{aligned} A_{f,t,e} &= \frac{f_{yk}}{\gamma_s \cdot E_f \cdot \varepsilon_f} A_{s,t,e} = \\ &= \frac{490 \text{ MPa}}{1,15 \cdot 165000 \text{ MPa} \cdot 0,008^*} \cdot 133,56 \text{ mm}^2 = 43,11 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (\text{I.19.})$$

* a se vedea nota de la Rel. I.6. și Rel I.7.

Cantitatea de material compozit ce trebuie dispus pe cele două direcții ale plăcii pentru sporirea capacității rezultă:

$$\begin{aligned} A_{f,t,c} &= \frac{f_{yk}}{\gamma_s \cdot E_f \cdot \varepsilon_f} A_{s,t,c} = \\ &= \frac{490 \text{ MPa}}{1,15 \cdot 165000 \text{ MPa} \cdot 0,008^*} \cdot 348,39 \text{ mm}^2 = 112,46 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (\text{I.20.})$$

$$\begin{aligned} A_{f,l,c} &= \frac{f_{yk}}{\gamma_s \cdot E_f \cdot \varepsilon_f} A_{s,l,c} = \\ &= \frac{490 \text{ MPa}}{1,15 \cdot 231000 \text{ MPa} \cdot 0,008^*} \cdot 302,4 \text{ mm}^2 = 69,72 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (\text{I.21.})$$

* a se vedea nota de la Rel. I.6. și Rel I.7.

Numărul benzilor pultrudate montate în șlițuri pentru refacerea capacității rezultă:

$$n_{NSMR,e} = \frac{A_{f,t}}{A_{f,NSMR}} = \frac{43,11 \text{ mm}^2}{12 \text{ mm}^2} = 3,59 \text{ benzi} \quad (\text{I.22.})$$

Numărul benzilor pultrudate montate în șlițuri și a fâșiilor de țesătură dispuse pentru sporirea capacității rezultă:

$$n_{NSMR,c} = \frac{A_{f,t}}{A_{f,NSMR}} = \frac{112,46 \text{ mm}^2}{12 \text{ mm}^2} = 9,37 \text{ benzi} \quad (\text{I.23.})$$

$$n_{EB,c} = \frac{A_{f,l}}{A_{f,EB}} = \frac{69,72 \text{ mm}^2}{12 \text{ mm}^2} = 5,81 \text{ fasii de tesatura} \quad (\text{I.24.})$$

În conformitate cu calculele de mai sus, s-a adoptat o soluție de consolidare ce constă în aplicarea a 13 benzi NSMR-FRP (NSM01...NSM04 pentru refacerea capacității și NSM05...NSM13 pentru sporirea sa) și 6 fâșii de țesătură montate prin EB-FRP. Configurația sistemului de consolidare este prezentată la paragraful 6.7.2., Fig. 6.64.

ABREVIERI ȘI ACRONIME**A**

ACI - American Concrete Institute

AFRP - Aramid Fiber Reinforced Polymer - Polimer armat cu fibră de aramidă

ATENA - Advanced Tool for Engineering Nonlinear Analysis

B

BBK - Boverkets handbok om betongkonstruktioner

The Swedish building administrations handbook of concrete structures

Codul suedez de practică pentru structuri de beton

C

CFRP - Carbon Fiber Reinforced Polymer - Polimer armat cu fibră de carbon

E

EB - Externally Bonded - Lipite la exterior (Lipire la exterior)

EB-FRP - Externally Bonded-Fiber Reinforced Polymer - Polimer armat cu fibră lipit la exterior

ED - Energia Disipată

F

FRP - Fiber Reinforced Polymer - Polimer armat cu fibră

fib - Fédération Internationale du Béton - Federația Internațională de Beton

G

GFRP - Glass Fiber Reinforced Polymer - Polimer armat cu fibră de sticlă

G-S - Gauge-Steel - Timbru-Oțel

G-F - Gauge-Fiber - Timbru-Fibră

G-C - Gauge-Concrete - Timbru-Beton

M

MEF - Metoda Elementelor Finite

MF-FRP - Mechanically Fastened Fiber Reinforced Polymer - Polimeri Armați cu Fibre Ancorați Mecanic

N

NSM - Near Surface Mounted - Montate în șlițuri

NSMR - Near Surface Mounted Reinforcement - Armături Montate în șlițuri

NSMR-FRP - Near Surface Mounted Reinforcement Fiber Reinforced Polymer - Armături din Polimeri Armați cu Fibre Montate în șlițuri

P

PN - Polska Norma - Normă Poloneză

R

RCS-FS - Reinforced Concrete Slab-Full Slab (Trad. Placă de Beton Armat-Placă Întreagă)

RCS-FS-UU - Reinforced Concrete Slab-Full Slab-Undamaged Unstrengthened (Trad. Placă de Beton Armat-Placă Întreagă-Nedegradată Neconsolidată)

RCS-FS-DS - Reinforced Concrete Slab-Full Slab-Damaged Strengthened (Trad. Placă de Beton Armat-Placă Întreagă-Degradată Consolidată)

RCS-RSC - Reinforced Concrete Slab-Rectangular Small Cut-out (Trad. Placă de Beton Armat-Gol Dreptunghiular Mic)

RCS-RSC-UU - Reinforced Concrete Slab-Rectangular Small Cut-out-Undamaged Unstrengthened (Trad. Placă de Beton Armat-Gol Dreptunghiular Mic-Nedegradată Neconsolidată)

RCS-RSC-DS - Reinforced Concrete Slab-Rectangular Small Cut-out-Damaged Strengthened (Trad. Placă de Beton Armat-Gol Dreptunghiular Mic-Degradată Consolidată)

RCS-RLC - Reinforced Concrete Slab-Rectangular Large Cut-out (Trad. Placă de Beton Armat-Gol Dreptunghiular Mare)

RCS-RLC-UU - Reinforced Concrete Slab-Rectangular Large Cut-out-Undamaged Unstrengthened (Trad. Placă de Beton Armat-Gol Dreptunghiular Mare-Nedegradată Neconsolidată)

RCS-RLC-DS - Reinforced Concrete Slab-Rectangular Large Cut-out-Damaged Strengthened (Trad. Placă de Beton Armat-Gol Dreptunghiular Mare-Degradată Consolidată)

S

SRP - Steel Reinforced Polymer - Polimer armat cu oțel

SLU - Starea Limită Ultimă

SLS - Starea Limită de Serviciu

I

TCS - The Concrete Society - Societatea pentru Beton

REFERINȚE BIBLIOGRAFICE**CĂRȚI, MANUALE**

- [001] *Avram C., Bob C., Friedrich R., Stoian V.* - Structuri din beton armat. Metoda elementelor finite. Teoria echivalențelor, Editura Academiei Republicii Socialiste România, București, 1984.
- [002] *Balaguru P., Nanni A., Giancaspro J.* - FRP Composites for Reinforced and Prestressed Concrete Structures, Taylor & Francis, 2009.
- [003] *BBR Fibre Products* - A Guide to the Design and Application of BBR FRP Strengthening Systems, 2002.
- [004] *Burke P. J.* - Low and High Temperature Performance of Near Surface Mounted FRP Strengthened Concrete Slabs, Master of Science Thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 2008.
- [005] *Bob L.* - Teză Doctorat - Contribuții privind utilizarea elementelor compuse pentru realizarea structurilor de rezistență, Universitatea „Politehnica” din Timișoara, 1999.
- [006] *Cadar I., Clipii T., Tudor A.* - Beton Armat, Ed. II-a, Editura Orizonturi Universitare, 2004.
- [007] *Červenka V., Jendele L., Červenka J.* - ATENA Program Documentation Part 1, Theory - Praga, 2011.
- [008] *Ciornei A.* - Cum concepem construcțiile civile, Editura Junimea, Iași, 2000.
- [009] *Ebead U.* - Strengthening of Reinforced Concrete Two-Way Slabs, PhD. Thesis, Memorial University of Newfoundland, St. John's, NF, Canada, 2002.
- [010] *Enochsson O.* - CFRP strengthening of concrete slabs, with and without openings. Experiment, analysis, design and field application, Licentiate thesis, Luleå University of Technology, 2005.
- [011] *Hollaway L. C., Leeming M. B. (editors)* - Strengthening of reinforced concrete structures. Using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering, Woodhead Publishing, 1999.
- [012] *Kiss Z., Oneț T.* - Proiectarea structurilor de beton după SR EN 1992-1, Editura Abel, 2008.
- [013] *Leonhardt F., Mönning E.* - Vorlesungen über Massivbau. Teil 3: Grundlagen zum Bewehren im Stahlbetonbau, Berlin & New York, Springer Vlg., 1974.
- [014] *Lundqvist J.* - Numerical analysis of concrete elements strengthened with carbon fiber reinforced polymers, Doctoral thesis, Luleå University of Technology, 2007.
- [015] *Mîrșu O., Friedrich R.* - Construcții din beton armat, Editura didactică și pedagogică, București, 1980.

-
- [016] *Nagy-György T.* - Materiale compozite polimerice: pentru consolidarea elementelor din zidărie și beton, Editura Politehnica Timișoara, 2007.
- [017] *Newman A.* - Structural Renovation of Buildings: Methods, Details, and Design Examples, McGraw-Hill, 2001.
- [018] *Nilson A. H., Darwin D., Dolan C. W.* - Design of Concrete Structures, Thirteen Edition, McGraw-Hill, 2003.
- [019] *Park R., Gamble W. L.* - Reinforced Concrete Slabs, Second Edition, John Wiley and Sons, 2000.
- [020] *Pin T. B.* - Strengthening of Concrete Slab with Opening using External FRP Strip, Masteral Thesis
- [021] *Raina V. K.* - Concrete Bridges: Inspection, Repair, Strengthening, Testing, Load Capacity Evaluation, McGraw-Hill, 1994.
- [022] *Rusinowski P.* - Two-way concrete slabs with openings. Experiments, finite element analyses and design, Master's Thesis, Luleå University of Technology, 2005.
- [023] *Stiglat K., Wippel H.* - Beton-Kalender: Taschenbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbeton sowie die verwandten Fächer. Berlin Wilhelm Ernst & Sohn, 1973.
- [024] *Stoian V., Nagy-György T., Dan D., Gergely J., Dăescu C.* - Materiale compozite pentru construcții, Editura Politehnica Timișoara, 2004.
- [025] *Täljsten B.* - FRP strengthening of existing concrete structures. Design guideline. Luleå University of Technology, 2006.
- [026] *Tan K. Y.* - Evaluation Of Externally Bonded CFRP Systems For The Strengthening Of RC Slabs, Masteral Thesis.
- [027] *Teng J. G., Chen J. F., Smith S. T., Lam L.* - FRP-strengthened RC structures, John Wiley & Sons, 2002.
- [028] *Timoshenko S., Goodier J. N.* - Theory of elasticity, Second Edition, Mc Graw-Hill Book Company, 1951.
- [029] *Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S.* - Theory of plates and shells, Second Edition, Mc Graw-Hill Book Company, 1959.
- [030] *Zienkiewicz O. C., Taylor R. L.* - The Finite Element Method. Fifth Edition. Butterworth-Heinemann, 2000.

STANDARDE

- [031] *American Concrete Institute Committee 318* - ACI 318-05 - Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05), American Concrete Institute, Farmington Hills, 2005.
- [032] *American Concrete Institute Committee 318* - ACI 318-08 Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, 2008.
- [033] *American Concrete Institute Committee 440* - ACI 440.2R-02 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. American Concrete Institute, Farmington Hills, 2002.
- [034] *American Concrete Institute Committee 440* - ACI 440.2R-08 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. American Concrete Institute, Farmington Hills, 2008.
- [035] *Canadian Standards Association / National Standard of Canada* - Canadian Highway Bridge Design Code, Nov-2006.
- [036] *Deutsches Institut für Bautechnik* - Richtlinie für das Verstärken von Betonbauteilen durch Ankleben von unidirektionalen kohlenstofffaserverstärkten Kunststofflamellen, Berlin, 1999.
- [037] *fib Bulletin 14* - Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, Technical report on the Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures, July 2001.
- [038] *fib Bulletin 35* - Retrofitting of concrete structures by externally bonded FRPs, with emphasis on seismic applications, 2006.
- [039] *Institutul Român de Standardizare* - Încercare pe beton întărit, SR EN 12390, 2002.
- [040] *Institutul Român de Standardizare* - Produse de oțel pentru armarea betonului_Plase sudate, SR 438-3-98, 1998.
- [041] *Polski Komitet Normalizacyjny* - Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie, PN-B-03264 (Plain, reinforced and prestressed concrete structures - Analysis and structural design), 2002.
- [042] *Swedish Building and Planning Organization* - Boverkets handbok om betongkonstruktioner, BBK 04.
- [043] *Swedish Building and Planning Organization* - Boverkets handbok om betongkonstruktioner, BBK 94.
- [044] *The Concrete Society* - Technical Report no. 55 - Design Guidance For Strengthening Concrete Structures Using Fibre Composite Materials, 2000.

ARTICOLE

- [045] *Alkhrdaji T., Thomas J.* - Design, application techniques key to successful structural repair, strengthening of aging concrete facilities, *Concrete Monthly*, February 2004 issue.
- [046] *Arduini M., Nanni A., Romagnolo M.* - Performance of one-way reinforced concrete slabs with externally bonded fiber-reinforced polymer strengthening, *ACI Structural Journal*, V. 101, No. 2, March-April 2004, pp. 193-201.
- [047] *Baskaran K., Morley C. T.* - A new approach to testing reinforced concrete flat slabs, *Magazine of Concrete Research*, August 2004, No. 6, pp. 367-374.
- [048] *Bonaldo E., Barros J. A. O. and Lourenço P. B.* - Efficient Strengthening Technique to Increase the Flexural Resistance of Existing RC Slabs, *Journal of Composites for Construction ASCE / MARCH/APRIL 2008*, pp. 149-159.
- [049] *Blaschko M.* - Bond behaviour of CFRP strips glued into slits, *Proceedings FRPRCS-6, Singapore: World Scientific, 2003*. pp. 205-14.
- [050] *Casadei P., Nanni A.* - Steel Reinforced Polymer: An innovative and promising material for strengthening the infrastructures.
- [051] *Casadei P., Parretti R., Nanni A., Heinze T.* - In Situ Load Testing of Parking Garage Reinforced Concrete Slabs - Comparison between 24 h and Cyclic Load Testing, *Practice periodical on structural design and construction, ASCE / February 2005*, pp. 40-48.
- [052] *Cervenka J., Papanikolaou V. K.* - Three dimensional combined fracture-plastic material model for concrete, *International Journal of Plasticity* 24 (2008), pp. 2192-2220.
- [053] *Chen C. C., Li C. Y.* - Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs Strengthened with Glass Fiber-Reinforced Polymer Laminates, *ACI Structural Journal/July-August 2005*, pp. 535-542.
- [054] *De Lorenzis L., Teng J. G.* - Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures, *Composites: Part B* 38, 2007, pp. 119-143.
- [055] *De Luca A., Galati N., Nanni A., Alkhrdaji T.* - In-Situ Load Testing: A Theoretical Procedure to Design a Diagnostic Cyclic Load Test on a Reinforced Concrete Two-Way Slab Floor System
- [056] *Ebead U. A., Marzouk H.* - Tension-stiffening model for FRP-strengthened RC concrete two-way slabs, *Materials and Structures* 38, March 2005, pp. 193-200.
- [057] *Ebead U., Marzouk H.* - ACI code verification for FRP externally reinforced slabs, *The Second International Workshop on Structural Composites for Infrastructure Applications, National Science Foundation (NSF-US), Dec. 2003, Cairo, Egypt.*
- [058] *Ebead U., Marzouk H.* - Fiber-Reinforced Polymer Strengthening of Two-Way Slabs, *ACI Structural Journal/September-October 2004*, pp. 650-659.

- [059] *Ebead U., Marzouk H., Lye L. M.* - Strengthening of two-way slabs using FRP materials: a simplified analysis based on response surface methodology, Second World Engineering Congress, Kuching, Malaysia, July 2002, pp. 82-89.
- [060] *El-Gamal S., El-Salakawy E. F., Benmokrane B.* - A New Punching Shear Equation for Two-Way Concrete Slabs Reinforced with FRP Bars, Proceedings of the 7th FRPRCS-7, 2005, pp. 877-894.
- [061] *El-Ghandour A. W., Pilakoutas K., Waldron P.* - Punching Shear Behavior of Fiber Reinforced Polymers Reinforced Concrete Flat Slabs - Experimental Study, Journal Of Composites For Construction, ASCE / August 2003, pp. 258-265.
- [062] *El-Salakawy E., Soudki K., Polak M. A.* - Punching Shear Behavior of Flat Slabs Strengthened with Fiber Reinforced Polymer Laminates, Journal Of Composites For Construction, ASCE, September/October 2004, pp. 384-392.
- [063] *El Maaddawy T., Soudki K.* - Strengthening of reinforced concrete slabs with mechanically-anchored unbonded FRP system, Construction and Building Materials 22 (2008), pp. 444-455.
- [064] *Elsayed W. E., Ebead U. A., Neale K. W.* - Mechanically Fastened FRP-Strengthened Two-Way Concrete Slabs with and without Cutouts, Journal of Composites for Construction, Volume 13, Issue 3, May/June 2009, pp. 198-207.
- [065] *Enochsson O., Lundqvist J., Täljsten B., Rusinowski P., Olofsson T.* - CFRP strengthened openings in two-way concrete slabs - An experimental and numerical study, Construction and Building Materials 21 (2007), pp. 810-826.
- [066] *Floruț S. C., Nagy-György T., Stoian V.* - RC slabs strengthened with externally bonded FRP composite materials - Literature review, Proc. Composite Materials, Elements and Structures for Construction, 24-25 Mai 2007, Timișoara, România, pp. 175-180.
- [067] *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), 27-29 Mai 2009, Timișoara, România, pp. 496-501.
- [068] *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), 22-24 Iul 2010, Corfu, Grecia, pp. 245-250.
- [069] *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", 5-6 Nov 2010, Oradea, România, XIII-2, pp. 43-50.

- [070] *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"*, 5-6 Nov 2010, Oradea, România XIII-2 Supl 1, pp. 113-120.
- [071] *Floruț S. C., Stoian V., Diaconu D.* - Behavior of two-way RC slabs with and without cut-outs retrofitted by FRP system, *PhIDAC 2011 Novi Sad - III INTERNATIONAL SYMPOSIUM for students of doctoral studies in the fields of Civil Engineering, Architecture and Environmental Protection*, 21-23 Sept 2011, Novi Sad, Serbia, pp. 383-389.
- [072] *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*", 8-10 Feb 2011, Dubai, EAU, pp. 167/7e.
- [073] *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*, 15-17 Jun 2010, Edinburgh, Scoția, pp.113/6e.
- [074] *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*, 22-23 Sept 2011, Balatonfured, Hungary, pp. 421-424.
- [075] *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*, Nov 2009, Oradea, România, pp. 111-116.
- [076] *Foret G., Limam O.* - Experimental and numerical analysis of RC two-way slabs strengthened with NSM CFRP rods, *Construction and Building Materials* 22 (2008), pp. 2025-2030.
- [077] *Galati N., Nanni A., Tumialan J. G., Ziehl P. H.* - In-Situ Evaluation of Two Concrete Slab Systems. I Load Determination and Loading Procedure.
- [078] *Gee-Joo H., Yun-Yong K., Chang-Geun C.* - Groove and embedding techniques using CFRP trapezoidal bars for strengthening of concrete structures - *Engineering Structures* 30 (2008), pp. 1067-1078.
- [079] *Karbhari V.M., Seible F.* - Design Considerations for the Use of Fiber Reinforced Polymeric Composites in the Rehabilitation of Concrete Structures. NISTIR 6288: NIST Workshop on Standards Development for the Use of Fiber Reinforced Polymers for the Rehabilitation of Concrete and Masonry Structures, 7-8 January 1998, Tucson, AZ, Vol. 3, pp. 59-72.
- [080] *Kim Y. J., Longworth J. M., Wight R. G., Green M. F.* - Flexure of Two-Way Slabs Strengthened with Prestressed or Nonprestressed CFRP Sheets, *Journal Of Composites For Construction*, ASCE, July/August 2008, 366-374.

-
- [081] *Kim Y. J., Longworth J. M., Wight R. G., Green M. F.* - Punching Shear of Two-way Slabs Retrofitted with Prestressed or Non-prestressed CFRP Sheets, *Journal of Reinforced Plastics And Composites*, Vol. 00, No. 00/2009, pp. 1-18.
- [082] *Limam O., Foret G., Ehrlacher A.* - RC two-way slabs strengthened with CFRP strips: experimental study and a limit analysis approach, *Composite Structures* 60 (2003), pp. 467-471.
- [083] *Limam O., Nguyen V. T., Foret G.* - Numerical and experimental analysis of two-way slabs strengthened with CFRP strips, *Engineering Structures* 27 (2005), pp. 841-845.
- [084] *Matthys S., Taerwe L.* - Concrete Slabs Reinforced with FRP Grids. I - One-Way Bending, *Journal Of Composites For Construction* / August 2000, pp. 145-153.
- [085] *Matthys S., Taerwe L.* - Concrete Slabs Reinforced with FRP Grids. II - Punching Resistance, *Journal Of Composites For Construction* / August 2000, pp. 154-161.
- [086] *Michaluk C. R., Rizkalla S. H., Tadros G., Benmokrane B.* - Flexural Behavior of One-Way Concrete Slabs Reinforced by Fiber Reinforced Plastic Reinforcement, *ACI Structural Journal*/May-June 1998.
- [087] *Michel L., Ferrier E., Agbossou A., Hamelin P.* - Flexural stiffness modelling of RC slab strengthened by externally bonded FRP, *Composites: Part B* 40 (2009), pp. 758-765
- [088] *Mosallam A., Kreiner J., Lancey T., Haroun M., Elsanadedy H.* - Experimental and numerical analysis of two-way concrete slabs repaired with polymer composites, *Center for Advanced Composites & Smart Systems for Repair and Rehabilitation*.
- [089] *Mosallam, A. S., Mosalam, K. M.* - Strengthening of two-way concrete slabs with FRP composite laminates, *Construction and Building Materials* 17 (2003), pp. 43-54.
- [090] *Mota M., Kamara M.* - Floor Openings in Two-Way Slabs, *Portland Cement Association, Skokie, Illinois*.
- [091] *Mufti A. A., Neale K. W.* - State-of-the-Art of FRP and SHM Applications in Bridge Structures in Canada, *Composites Research Journal*, Volume 2, Issue 2, Spring 2008 pp. 60-69.
- [092] *Nanni A.* - North American design guidelines for concrete reinforcement and strengthening using FRP: principles, applications and unresolved issues, *Construction and Building Materials* 17 (2003), pp. 439-446.
- [093] *Piyong Y., Silva P. F., Nanni A.* - Flexural strengthening of concrete slabs by a three-stage prestressing FRP system enhanced with the presence of GFRP anchor spikes, *Proceedings of CCC 2003-Composites in Construction International Conference, Italy:University of Calabria, 2003*, pp. 203-208.
- [094] *Prota A., Tan K.Y., Nanni A., Manfredi G., Pecce M.* - Performance of RC Shallow Beams Externally Bonded with Steel Reinforced Polymer, *ACI Structures Journal*, March-April 2006, pp. 163-170.

- [095] *Rabinovitch O., Frostig Y.* - Strengthening of RC Slabs with Circular Composite patches - a high-order approach, *Composite Structures* 55 (2002), pp. 225-238.
- [096] *Seliem H. M., Sumner E. A., Seracino R., Smith S. T.* - Field testing of RC slabs with openings strengthened with CFRP, *Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008)*, 22-24 July 2008, Zurich, Switzerland.
- [097] *Shahrooz B. M., Boy S.* - Retrofit of a three-span slab bridge with fiber-reinforced polymer systems-testing and rating, *J. Compos. for Constr.*, Volume 8, Issue 3, May/June 2004, pp. 241-247.
- [098] *Smith S.T., Kim S.J.* - Strengthening of one-way spanning RC slabs with cutouts using FRP composites, *Construction and Building Materials* 23 (2009), pp. 1578-1590.
- [099] *Tan K. H., Zhao H.* - Strengthening of openings in one-way reinforced-concrete slabs using carbon fiber-reinforced polymer systems, *J. Compos. for Constr.*, Volume 8, Issue 5, September/October 2004, pp. 393-402.
- [100] *Teng J. G., Lam L., Chan W., Wang J.* - Retrofitting of deficient RC cantilever slabs using GFRP strips, *J. Compos. for Constr.*, Volume 4, Issue 2, May 2000, pp. 75-84.
- [101] *Teng, J. G.; Smith, S. T.; Yao, J.; and Chen, J. F.* - Intermediate Crack Induced Debonding in RC Beams and Slabs, *Construction and Building Materials*, V. 17, No. 6-7, 2001, pp. 447-462.
- [102] *Jăranu N., Opreșan G., Oltean R., Munteanu V., Cozmañciuc C.* - Evaluation of bonding at the interface between CFRP composite strips and concrete for hybrid structures, *3rd WSEAS International Conference on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology/International Conference on Geography and Geology, Greece, Jul 22-24, 2010*, pp. 279-284.
- [103] *Jăranu N., Opreșan G., Oltean R., Munteanu V., Entuc I., Cozmañciuc C.* - The efficiency of fiber reinforced polymer composites strengthening solutions in the construction industry, *6th International Conference on the Management of Technological Changes, Vol 1, 2009*, pp. 733-736.
- [104] *Jăranu N., Opreșan G., Oltean R., Munteanu V., Entuc I., Oltean R., Munteanu V.* - Modern strengthening techniques in civil engineering structures, *6th International Conference on the Management of Technological Changes, Vol 1, 2009*, pp. 737-740.
- [105] *Van Den Einde L., Zhao L., Seible F.* - Use of FRP composites in civil structural applications, *Construction and Building Materials* 17 (2003), pp. 389-403.
- [106] *Vasquez A., Karbhari V. M.* - Fiber-reinforced polymer composite strengthening of concrete slabs with cutouts, *ACI Structural Journal*, V. 100, No. 5, September-October 2003, pp. 665-67.
- [107] *Wager P. C.* - Yield line analysis of slabs with covered openings, *26th DoD Explosives Safety Seminar, August 16-18, 1994 Miami, Florida*.

-
- [108] *Wu C., Oehlers D. J., Rebstrost M., Leach J., Whittaker A. S.* - Blast testing of ultra-high performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs, *Engineering Structures* 2009.

BROŞURI

- [109] *Dictionary of Engineering* 2nd edition, McGraw-Hill.
- [110] *EDGE Structural Composites - FRP 101 A Guide for Composite Strengthening*
- [111] *Structural Group - Strengthening of Concrete, Timber and Masonry Structures.*
- [112] *VSL Construction Systems - Buildings and parking structures brochure.*