

**REZUMATUL TEZEI:**

**EVALUAREA PERFORMANTELOR STÂLPILOR DIN BETON CONSOLIDAȚI  
CU MATRICE PE BAZĂ DE CIMENT ARMATĂ CU FIBRE (FRCM)**



**UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI**

**AUTORI:**

**Student doctorand:**

**Ing. Hasan Hussein Hakim Hasan**



**BUCUREȘTI  
2021**

## Cuprins

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Cuprins .....                                                                                                      | 1  |
| Listă de figuri .....                                                                                              | 2  |
| Listă de tabele.....                                                                                               | 2  |
| Rezumat.....                                                                                                       | 3  |
| Introducere .....                                                                                                  | 5  |
| Capitolul 1: Reabilitarea structurilor din beton armat.....                                                        | 8  |
| 1.1 Structuri din beton armat.....                                                                                 | 8  |
| 1.2 Reabilitarea structurilor din beton armat.....                                                                 | 9  |
| 1.2.1 Conceptul .....                                                                                              | 9  |
| 1.2.2 Tehnici.....                                                                                                 | 9  |
| 1.2.3 Strategia.....                                                                                               | 10 |
| 1.2.4 Materiale.....                                                                                               | 10 |
| 1.2.5 Elemente structurale din beton armat.....                                                                    | 11 |
| Capitolul 2: Matricea pe bază de ciment, armată cu fibre (FRCM): compoziție și proprietăți                         | 12 |
| 2.1 Aspecte generale .....                                                                                         | 12 |
| 2.2 Proprietăți fizice .....                                                                                       | 12 |
| 2.3 Proprietăți mecanice.....                                                                                      | 12 |
| 2.4 Aspecte tehnologice .....                                                                                      | 13 |
| Capitolul 3: Studiu bibliografic asupra cercetarilor efectuate privind consolidarea stălpilor din beton armat..... | 14 |
| Capitolul 4: Cercetari experimentale, rezultate și discuții .....                                                  | 15 |
| 4.1 Teste experimentale.....                                                                                       | 15 |
| 4.2 Rezultatele testelor și discuții.....                                                                          | 17 |
| Capitolul 5: Simulări FEM.....                                                                                     | 18 |
| 5.1 Modele de material.....                                                                                        | 18 |
| 5.2 Modele de stâlpi .....                                                                                         | 19 |
| 5.3 Rezultate.....                                                                                                 | 20 |
| Capitolul 6: Predicții analitice.....                                                                              | 24 |
| Capitolul 7: Concluzii .....                                                                                       | 26 |
| 7.1 Sinteza rezultatelor cercetarilor.....                                                                         | 26 |
| Bibliografie selectiva.....                                                                                        | 28 |

## Listă de figuri

|                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 1: Elemente de pod reparate cu: (a): polimer armat cu fibre, (b): polimer armat cu fibre de sticlă [1].....                                                                                           | 5  |
| Fig.2: Diagrama ideală de efort unitar-deformație specifică pentru beton confinat prin FRCC [14]. ....                                                                                                     | 6  |
| Fig.3: Tipuri de rețele de fibre: (a): rețea PBO, (b): rețea de carbon, (c): rețea de sticlă [15]... 6                                                                                                     |    |
| Fig. 4: Zonele de delimitare eficientă în: (a): stalpi circulari, (b): pătrați, (c): dreptunghiulari [16]. ....                                                                                            | 7  |
| Fig. 1.1: Componente din: (a): material beton [18], (b): material beton armat[19].....                                                                                                                     | 9  |
| Fig. 1.2: Tehnici de reabilitare aplicabile structurilor din BA ca soluție globală: (a): adăugarea peretilor (b): adăugarea unor contravanturiri [2]. ....                                                 | 10 |
| Fig. 1.3: Tehnici de consolidare aplicabile structurilor din BA ca soluție locală: (a): din beton, (b): din oțel, (c): din FRP, (d): consolidare locală a îmbinărilor grindă-stalp din BA cu FRP [2]. .... | 10 |
| Fig. 2.1: Diagrama efort unitar-deformație specifică a sistemului FRCC[23].....                                                                                                                            | 12 |
| Fig. 2.2: Diagrame efort-deformație a FRCC cu sticlă AR, sticlă E și plasă din polietilenă în comparație cu GFRC și ECC [14].....                                                                          | 13 |
| Fig. 2.3: Distribuția fisurilor în AR-FRCC [27].....                                                                                                                                                       | 13 |
| Fig. 2.4: Aplicarea sistemului FRCC. ....                                                                                                                                                                  | 13 |
| Fig. 4.1: Geometria stălpilor: (a): CP-1, CP-2, (b): CP-3, CP-5, (c): CP-4, CP-6 (dimensiuni în cm).....                                                                                                   | 15 |
| Fig. 4.2: Configurarea și instrumentarea testelor experimentale (dimensiuni în cm). ....                                                                                                                   | 17 |
| Fig. 5.1: Modelele FEM: (a): CP-1 și CP-2, (b): de la CP-3 la CP-6.....                                                                                                                                    | 19 |
| Fig. 5.2: FEM vs. sarcină axială experimentală-deformația axială: (a): CP-1, (b): CP-2, (c): CP-3, (d): CP-4, (e): CP-5, (f): CP-6.....                                                                    | 21 |
| Fig. 5.3: experimental vs. FEM - mod de cedare, eforturi de confinare în beton și eforturi de întindere în fibre (FRCC): (a): CP- 1, (b): CP-2, (c): CP-3, (d): CP-4, (e): CP-5, (f): CP-6 ..              | 23 |

## Listă de tabele

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelul 1.1: Tehnici utilizate în reabilitarea structurilor din BA [2]. .... | 9  |
| Tabelul 4.2: Rezultate experimentale pe stalpi de beton.....                 | 17 |
| Tabelul 5.1: Proprietăți mecanice ale betonului. ....                        | 18 |
| Tabelul 5.2: Proprietăți mecanice ale compozitului (FRCC). ....              | 19 |
| Tabelul 5.3: FEM vs. capacitatea portantă axială $N_{max}$ .....             | 20 |
| Tabelul 5.4: Rezultatele FEM: eforturi unitare și deformații specifice.....  | 20 |
| Tabelul 6.1: Rezultatele analitice ale efectului de confinare. ....          | 25 |

## Rezumat

Structurile din beton armat (BA) sunt utilizate pe scară largă peste tot în lume, deoarece materialul din beton armat poate lua aproape orice formă. Cu toate acestea, structurile BA sunt supuse unei degradări mai mari decât cea prevăzută la nivel de proiect, din cauza sarcinilor pe care le susțin, erorilor de proiectare și de construcție, expunerii la condițiile de mediu, la umiditate și altele. Aceste degradări pot face structurile inutilizabile în condiții de siguranță. Pentru a depăși această problemă, cercetătorii au propus mai multe tehnici pentru a consolida sau repara structurile deteriorate. Una dintre aceste tehnici este camasuirea, care constă în mărirea sau restabilirea dimensiunii inițiale a secțiunii transversale a unui element existent prin utilizarea unor materiale adecvate. Consolidarea folosind cămasuieli pe bază de polimeri armați cu fibre (FRP) este des utilizată în structurile RC datorită raportului mare rezistență/greutate, datorită rezistenței la coroziune și aplicării rapide și ușoare. Ținând seamă de limitările sistemului FRP care se referă la matricea organică, a fost propus sistemul cu matrice pe bază de ciment armată cu fibre (FRCM), cu proprietăți îmbunătățite față de sistemul FRP. Prin urmare, sistemul FRCM prezintă un potențial mare pentru aplicații în domeniul structurilor din beton armat, chiar dacă structurile se găsesc în condiții de mediu extreme.

Deoarece sistemul FRCM este relativ nou, cercetările sunt limitate în ceea ce privește testarea experimentală și simularea numerică. Pe de altă parte, lipsesc cercetările referitoare la stalpii de beton cu secțiune transversală pătrată, consolidați folosind matricea FRCM.

Prin urmare, obiectivul acestei teze este de a investiga efectul de confinare generat de aplicarea sistemului FRCM pe stalpi scurți de beton prin efectuarea de teste experimentale, simulări numerice de element finit și studii analitice. Programul experimental a fost conceput pentru a investiga influența utilizării unuia sau a două straturi de FRCM asupra capacității la forță axială a stalpilor.

Simulările cu elemente finite au vizat investigarea parametrilor suplimentari care nu au putut fi monitorizați în timpul testării experimentale. Au fost dezvoltate modele tridimensionale pentru fiecare stalp testat și calibrat pe baza rezultatelor experimentale atât la nivelul materialului (beton), cât și la nivelul elementului (stalp). Există puține informații în literatură cu privire la comportarea stalpilor de beton consolidați cu FRCM solicitați la compresiune. Prin urmare, dezvoltarea și calibrarea modelelor numerice pentru stalpi de beton confinați FRCM reprezintă o realizare importantă a tezei.

În practica de proiectare curentă, testarea experimentală și simulările numerice nu sunt des utilizate. De aceea trebuie furnizate modele analitice simplificate care să asigure o proiectare corespunzătoare. Diferite modele analitice propuse de diverși cercetători au fost folosite pentru a prezice comportarea și apoi au fost comparate cu rezultatele obținute experimental. Majoritatea modelelor analitice au fost dezvoltate pentru consolidarea cu FRP, așadar predicțiile au variat de la un model la altul. Recomandările pentru consolidarea cu FRCM se referă la utilizarea modelului care se potrivește cel mai bine.

Această teză este structurată în șapte capitole și prezintă evaluarea eficienței utilizării sistemului FRCM pentru proiectele de consolidare, prin efectuarea de teste experimentale, simulări de elemente finite și predicții analitice. Descrierea detaliată a fiecărui capitol (unu-șase) este prezentată mai jos. Capitolul șapte conține concluziile.

### Capitolul 1: Reabilitarea structurilor din beton armat

Primul capitol prezintă aspecte generale referitoare la reabilitarea structurilor din beton armat. Accentul este pus pe concept, tehnici, strategii și materiale care ar trebui utilizate pentru o consolidare corespunzătoare.

## **Capitolul 2: Matricea pe bază de ciment armată cu fibre (FRCM): compoziție și proprietăți**

Al doilea capitol prezintă compoziția și proprietățile materialului cu matrice pe bază de ciment armată cu fibre (FRCM). Sunt oferite detalii cu privire la fibrele, mortarele, proprietățile mecanice și fizice ale FRCM și modurile de cedare. Aspecte tehnologice legate de aplicarea sistemului FRCM pe stalpi de beton sunt de asemenea prezentate.

## **Capitolul 3: Studiu bibliografic asupra cercetarilor efectuate privind consolidarea stalpilor din beton armat**

Capitolul trei prezintă date din literatura de specialitate disponibilă aferentă consolidării stalpilor din beton prin material compozit cu matrice pe bază de ciment armată cu fibre (FRCM). Prima parte a capitolului prezintă studiile experimentale reprezentative, în timp ce a doua parte se concentrează pe studiile numerice. S-a observat că există o lipsă de studii experimentale și numerice pe stalpi de beton fabricați din beton simplu cu secțiune transversală pătrată. De aceea această teză pune accentul pe efectuarea de teste de laborator, simulări numerice și studii analitice pe stalpi scurți cu secțiune pătrată realizate din beton simplu, pentru a diminua/anula deficiența în domeniul consolidării stalpilor din beton prin materiale compozite FRCM.

## **Capitolul 4: Cercetari experimentale, rezultate și discuții**

Capitolul patru prezintă rezultatele unui program experimental pe stalpi de beton simplu consolidați cu FRCM sub sarcină de compresiune axială. Au fost testați șase stalpi cu secțiune transversală pătrată de 30x30 cm, cu o rază de colț de 3 cm și o înălțime de 100 cm din beton cu rezistență redusă. Doi stalpi fără confinare sunt utilizați ca referință, în timp ce doi stalpi cu un strat de FRCM și doi stalpi cu două straturi de FRCM sunt utilizați pentru a investiga influența nivelului de confinare al FRCM. Sistemul FRCM constă dintr-o plasă din fibră de carbon de înaltă rezistență și mortar de ciment. Performanța stalpilor consolidați cu FRCM este evaluată în termeni de capacitate de încărcare axială, deformare axială absolută, efort unitar și deformarea specifică. De asemenea, au fost prelevate cuburi (15x15x15 cm) din fiecare turnare și testate la compresiune la 7 și 28 de zile după întărire pentru a se determina rezistența la compresiune a betonului utilizat pentru fiecare stalp.

## **Capitolul 5: Simulări FEM**

Capitolul cinci prezintă dezvoltarea unui model tridimensional neliniar complex în mediul de element finit Abaqus pentru fiecare stalp de beton și calibrat în funcție de rezultatele experimentale. S-a efectuat calibrarea pentru beton, cu ajutorul modelului din Eurocode 2 pentru obținerea curbelor de efort unitar-deformație specifică folosite pentru a caracteriza comportamentul betonului sub compresiune axială. Rezultatele FEM au ajutat la determinarea rezistenței și ductilității stalpilor de beton, variația principalelor eforturi în planul secțiunii (modul contur) stalpilor din beton, variația eforturilor de întindere în FRCM și capacitatea de deformare plastică a stalpilor testați.

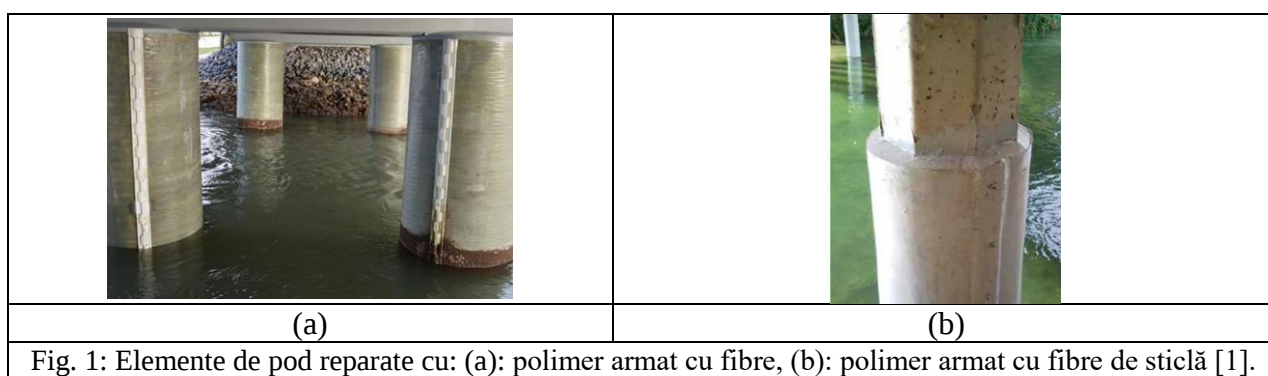
## **Capitolul 6: Predicții analitice**

Capitolul șase prezintă previziunile analitice privind nivelul de consolidare utilizând modele simplificate disponibile în literatură în vederea comparării cu rezultatele experimentale. Deoarece majoritatea modelelor analitice au fost dezvoltate din FRP, se fac recomandări pentru utilizarea acestor modele pentru FRCM pe baza preciziei predicțiilor.

## Introducere

Facilitățile de infrastructură civilă se deteriorează din cauza îmbătrânirii, excesului de utilizare, utilizării necorespunzătoare, expunerii la medii agresive și lipsei de întreținere. În întreaga lume, conservarea, întreținerea și modernizarea performanțelor structurale ale construcțiilor existente au o importanță fundamentală, culturală, economică și pentru siguranța umană.

În multe țări din întreaga lume, structurile suferă din cauza suprautilizării și a expunerii la medii agresive, fără o întreținere sau reabilitare adecvate. De exemplu, în Canada, peste 40% din poduri au fost construite în urmă cu 50 de ani și necesită o reabilitare structurală semnificativă. În SUA se estimează că aproximativ 200.000 de poduri sunt deficitare din punct de vedere structural și necesită reabilitare (vezi Fig. 1) [1]. Nu numai că unele structuri au nevoie de reabilitare, dar pot fi modificate sau reproiectate în funcție de nevoile actuale. De exemplu, unele structuri au fost construite pentru a susține sarcini semnificativ mai mici decât cerințele actuale ale normelor. Așadar, inginerii trebuie să proiecteze și să evalueze metode de consolidare care să răspundă acestor nevoi.



Astfel, conceptul de reabilitare a fost în permanență dezvoltat de cercetători și ingineri, deoarece trebuie să furnizeze diferite tehnici și materiale de reabilitare în conformitate cu tipul defecțiunii, cu elementele deteriorate, cu mediul înconjurător, cu sarcinile aplicate etc.

În ultimele decenii, cercetătorii au propus diferite tehnici de reabilitare pentru a crește capacitatea portantă și ductilitatea structurilor de beton. Unele dintre ele folosesc materiale tradiționale, cum ar fi cămasuieli din beton armat și din oțel, în timp ce tehnicile mai recente utilizează cămasuieli din polimer armat cu fibre (FRP) [2]. Cămasuiala pe bază de FRP a fost dezvoltată pentru a depăși problemele legate de utilizarea materialelor tradiționale: dimensiuni și greutate crescute (Cămasuiala din beton), coroziunea oțelului (Cămasuiala din oțel). Cămasuiala FRP are mai multe avantaje: raport mare rezistență/greutate, rezistență la coroziune și aplicare rapidă și ușoară [3]. Cu toate acestea, Cămasuiala FRP prezintă dezavantaje în ceea ce privește matricile organice, care sunt inflamabile și care necesită un tratament special al suprafeței elementului înainte de aplicare. De aceea a fost propus materialul cu matrice pe bază de ciment, armat cu fibre (FRCM), ca sistem de reabilitare pentru a depăși limitările legate de utilizarea adezivilor organici.

Sistemul FRCM constă din plasă din fibră de înaltă rezistență și mortar de ciment. FRCM are mai multe avantaje față de căptușeala tradițională pe bază de FRP:

- Este mai puțin afectat de fluctuațiile de temperatură.
- Este incombustibil.
- Este poros;
- Poate fi aplicat pe elemente structurale din beton în condiții de temperatură scăzută și pe suprafețe umede.
- Oferă un câștig substanțial în rezistență și capacitate de deformare pentru elementul de beton.

- Este un sistem eficient de reabilitare pentru elementele de beton încărcate prin încovoiere [4-6], prin torsiune [7] și prin compresiune [8-13].
- Se aplică pe suprafețele exterioare ale elementelor comprimate pentru a spori capacitatea de încărcare axială; efortul unitar-deformație specifică pentru betonul confinat cu FRCM se arată în Fig.2 [14].

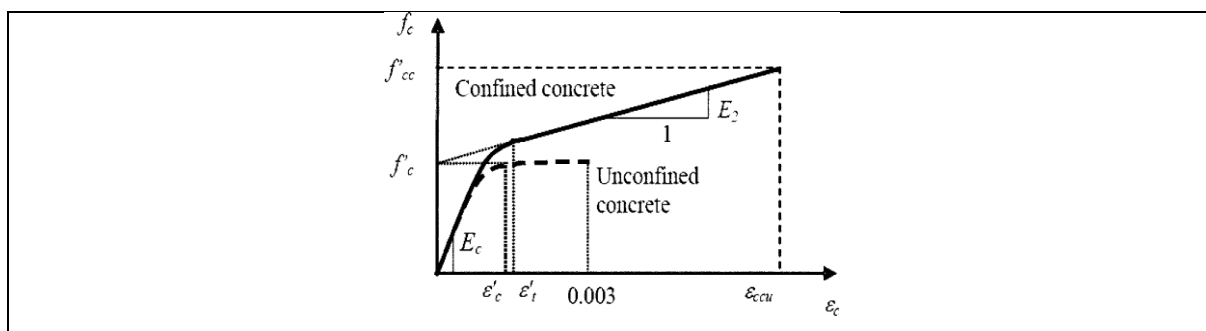


Fig.2: Diagrama ideală de efort unitar-deformație specifică pentru beton confinat prin FRCM [14].

În materialul cu matrice pe bază de ciment, armată cu fibre (FRCM), se folosește o plasă de armare structurală cu o structură deschisă, așa cum se arată în Fig. 3. Plasa de ranforsare FRCM este de obicei realizată din fibre acoperite individual sau legate între ele cu o rășină polimerică ce nu impregnează complet fibrele. Prin urmare, termenul de „fibre uscate” se folosește pentru a defini o plasă FRCM conform cu „Ghidul Institutului American privind Betonul pentru proiectarea și construirea sistemelor FRCM legate în exterior pentru reparații și consolidare beton și zidărie” [15].

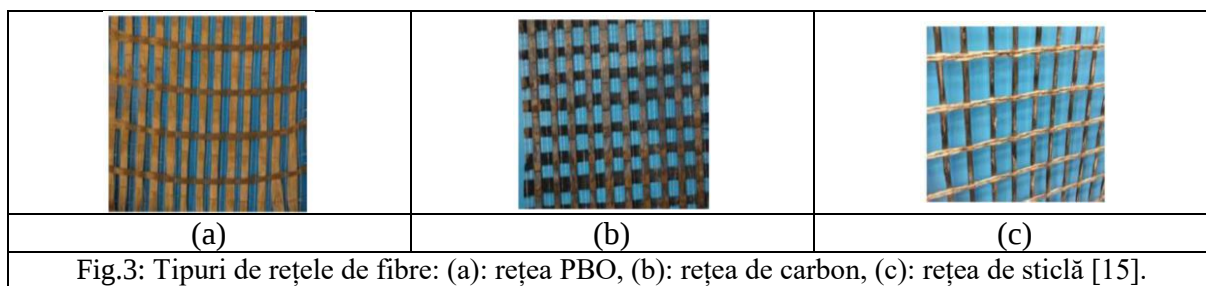


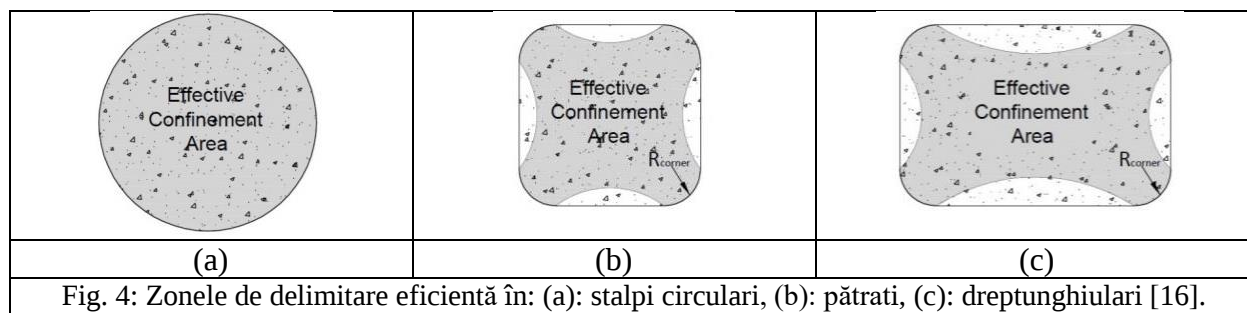
Fig.3: Tipuri de rețele de fibre: (a): rețea PBO, (b): rețea de carbon, (c): rețea de sticlă [15].

Multe tipuri de FRCM sunt disponibile în prezent pe piață în funcție de tipul de fibre utilizate, care includ sticlă, carbon și poliparafenilen benzobisoxazol (PBO). Cu fiecare tip de fibră, ar trebui utilizate anumite mortare de ciment modificate cu polimeri sau ranforsate cu fibre. În acest studiu, fibra de carbon este adoptată în combinație cu mortar cu fibre.

Deoarece FRCM este un sistem de consolidare relativ recent, numărul cercetărilor experimentale pe stalpi scurți din beton simplu este limitat [8-10]. Studiile bibliografice, din Capitolul Trei, arată că nu există multe studii experimentale și numerice pe stalpi realizate din beton simplu cu secțiune pătrată. Majoritatea studiilor au fost realizate pe stalpi din beton armat cu secțiune circulară. Prin urmare, această teză se referă la efectuarea de teste de laborator, studii numerice și analitice pe stalpi scurți scurți cu secțiune transversală pătrată, realizate din beton simplu, pentru a umple deficiența în domeniul stălpilor din beton consolidați cu materiale compozite cu FRCM.

În ceea ce privește alegerea secțiunii transversale a stalpului scurt din beton simplu, s-a arătat la punctul [16] că zona delimitată efectivă depinde de forma secțiunii transversale a stalpului, după cum se poate observa în Fig. 4. Întreaga suprafață a secțiunii transversale este confinată în cazul stălpilor circulari, iar secțiunile transversale pătrate și dreptunghiulare sunt confinate numai parțial. În practică, stălpii pătrați sunt mai frecvent utilizați din motive tehnologice și

arhitecturale. Astfel, în acest studiu, s-a folosit o secțiune transversală pătrată cu o rază de colț de 3 cm (vezi Fig. 4.1) pentru a îmbunătăți eficacitatea confinării.



Prezentul studiu este structurat în trei secțiuni principale, pentru a înțelege comportamentul și beneficiile utilizării acestui material compozit „matricea pe bază de ciment, armată cu fibre FRCM” ca material de ranfrosare pentru stalpii pătrati scurți din beton simplu:

- Studiu experimental.
- Studiu de simulări numerice neliniare, realizat în metoda elementelor finite, modelarea FEM, prin programul Abaqus,
- Studiu de predicție analitică.

Toate aceste studii au fost efectuate pe șase specimene de stalpi (CP-1 până la CP-6). Doi stalpi fără confinare (CP-1, CP-2) sunt utilizate ca referință, în timp ce patru stalpi cu un singur strat (CP-3, CP-5) și cu două straturi (CP-4, CP-6) de FRCM sunt folosite pentru a investiga influența nivelului de confinare al FRCM.

Toti stalpii pătrati scurți din beton simplu au fost turnați, consolidați și testați sub sarcină de compresiune axială monotonă până la cedare, în cadrul Laboratorului Universității Tehnice de Construcții Civile din București.

### Obiectivele prezentei teze

Obiectivele acestei teze sunt:

- De a clarifica posibilitățile de utilizare a materialului compozit cu matrice pe bază de ciment, armată cu fibre „FRCM” pentru a consolida stalpii pătrati scurți din beton simplu și pentru a evalua capacitatea portantă axială  $N_{max}$ , deformarea axială  $D$ , efortul unitar și deformația relativă folosind analiza elementelor finite (AEF) experimentală, numerică și metodele analitice.
- De a evalua modul de cedare al stalpilor pătrati scurți din beton simplu și eficiența FRCM externe și efectul numărului de straturi de FRCM asupra rezistenței și ductilității betonului confinat.
- De a evalua, folosind simulări numerice neliniare și modele FEM, alți parametri care nu au putut fi monitorizați în timpul testelor experimentale: rezistența și ductilitatea stalpilor de beton, variația principalelor eforturi de confinare în planul secțiunii (modul contur) al stalpului din beton, variația eforturilor de tracțiune pe FRCM și capacitatea de deformare a stalpilor testați.
- De a realiza modele analitice utilizând modele analitice propuse de cercetători și de a compara rezultatele cu cele experimentale pentru a identifica modelul cu cea mai precisă predicție.

## Capitolul 1: Reabilitarea structurilor din beton armat

### 1.1 Structuri din beton armat

Structurile care folosesc beton armat ca material structural se numesc structuri din beton armat (BA). Comparativ cu istoria foarte lungă a betonului simplu, istoria betonului armat este relativ scurtă. Materialul din beton armat are două componente principale: beton și bare din oțel. Betonul armat de diferite forme și dimensiuni poate fi obținut pentru a realiza o gamă variată de forme utilizate în construcții (fundații, stâlpi, grinzi, pereți/ziduri și plansee). Din punct de vedere chimic, betonul armat este mai stabil decât alte materiale și este ușor de întreținut. Rezistența sa bună îi permite să fie utilizat în orice condiții de solicitare. De exemplu, poate rezista la eforturi de tracțiune sau de compresiune și are rezultate bune la încovoiere, forfecare, torsiune și alte eforturi (inclusiv combinații ale acestora). Astfel, la scurt timp după descoperirea sa, betonul armat a devenit materialul cu cea mai frecventă utilizare pentru construirea clădirilor și a multor altor structuri [17]. Prin urmare, există o mare varietate de utilizări ale structurilor din beton armat.

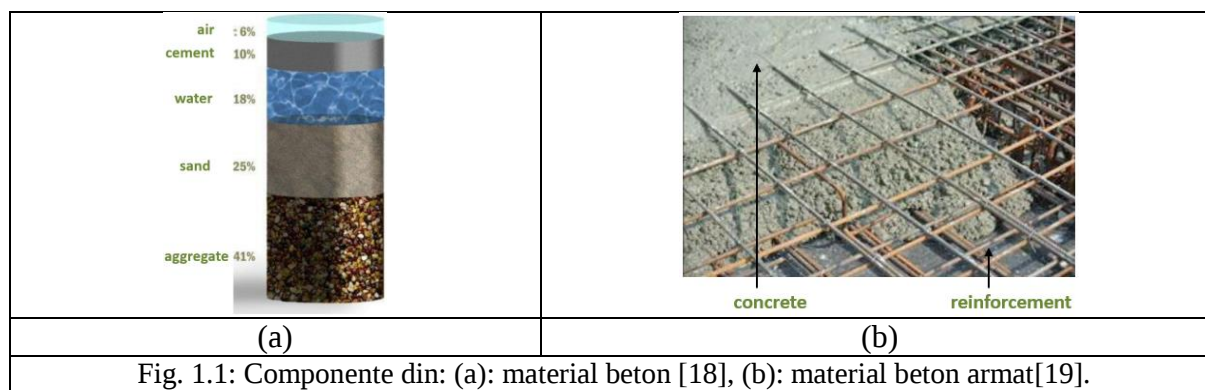
Betonul armat este un material versatil și utilizat pe scară largă datorită costului său redus în comparație cu rezistența la compresiune și la tracțiune. Acest lucru se întâmplă deoarece betonul armat este un material compozit format din material beton și armătură. Betonul în sine este un material compozit format dintr-un amestec de agregate fine și grosiere legate împreună cu o pastă de ciment și apă (vezi Fig. 1.1. (a)) [18]. În prezent, în structurile de beton armat se folosește ciment Portland sau cu adaosuri. Materialul de beton are proprietăți mecanice bune la compresiune, dar rezistență redusă la tracțiune și ductilitate redusă. Pentru aceasta, se folosește armătură pentru a compensa lipsa rezistenței la tracțiune și a ductilității. De obicei, se folosesc bare din oțel datorită compatibilității dintre beton și oțel (vezi Fig. 1.1. (b)) [19]. De asemenea, betonul armat este mai durabil în comparație cu alte materiale, cum ar fi oțelul. Un alt mare avantaj este că betonul armat poate fi folosit pentru construcții în orice mediu sever (apă de mare, mediu abraziv), implicând costuri reduse pentru întreținere. Alte avantaje ale utilizării betonului armat se referă la proprietățile sale mecanice: poate suporta sarcini de impact, prezintă deformări reduse ale elementelor, are o bună rezistență la foc. Din punct de vedere tehnologic, necesită forță de muncă mai puțin calificată, în comparație cu structurile din oțel. Însă, pe lângă rezistența redusă la tracțiune (care poate fi soluționată prin adăugarea de armături), există și câteva dezavantaje care trebuie menționate: timpul și costul amestecării, turnării și întăririi; costul cofrajelor; secțiuni transversale mari, în special pentru clădiri cu mai multe etaje; contracții, care determină dezvoltarea fisurilor și pierderea rezistenței; BA nu este un material ecologic.

Deși betonul armat este un material durabil și, dacă este proiectat corespunzător, structurile de BA pot rezista timp de decenii fără degradări (majore), totuși, structurile din BA existente care au fost proiectate conform codurilor anterioare anilor 1970 au adesea detalii de armare necorespunzătoare. Acest lucru generează o rezistență deficitară la acțiunea sarcinilor laterale și disiparea insuficientă a energiei, duce la deteriorarea rapidă a rezistenței și produce mecanisme necorespunzătoare în timpul cutremurelor. În consecință, pot apărea deplasări excesive și se poate prăbuși întreaga structură. Structurile din BA existente pot fi reparate sau consolidate, în cazurile în care daunele generale sunt limitate, sau pot fi demolate, când siguranța structurală este foarte afectată, iar costul reabilitării este mult prea mare.

Structurile din beton armat care necesită reabilitare ar putea avea una dintre următoarele cauze:

- Deteriorarea cauzată de acțiunea agresivă a mediului.
- Lipsa de întreținere.
- Schimbarea funcțională a clădirii.
- Cerințe noi de încărcare.
- Daune cauzate de acțiuni accidentale: explozii, incendiu, cutremur.

- Actualizarea normelor de proiectare.
- Erori de proiectare.
- Erori de construcție.



## 1.2 Reabilitarea structurilor din beton armat

### 1.2.1 Conceptul

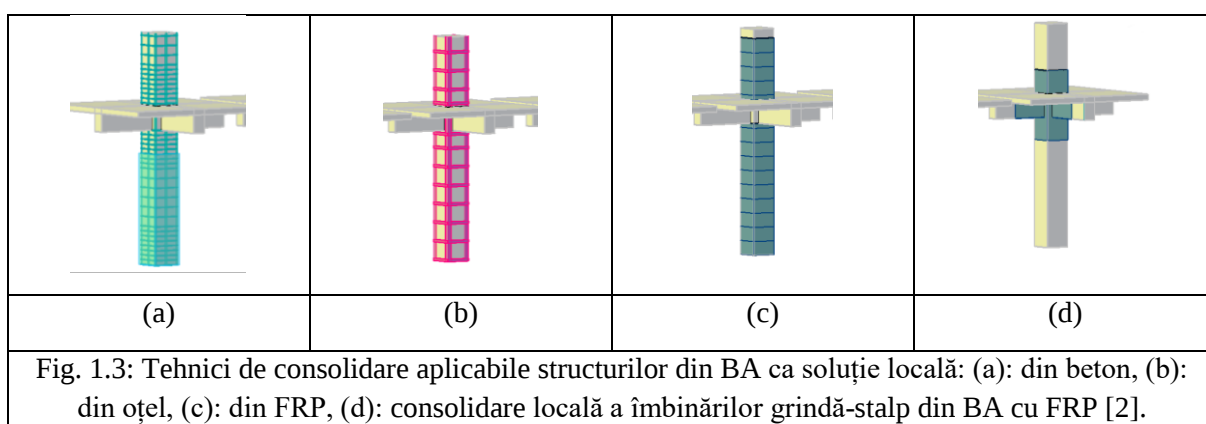
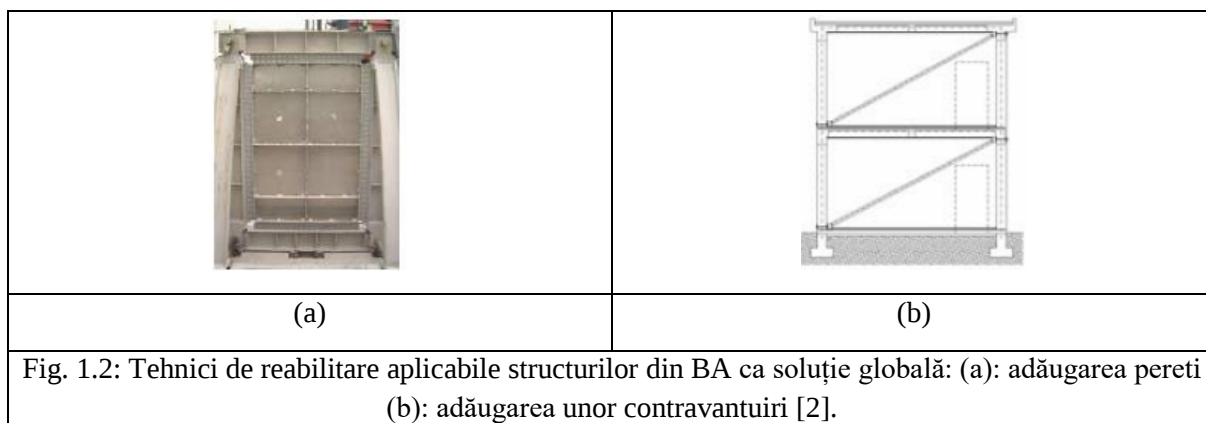
Conceptul de bază al reabilitării se referă la readucerea unei structuri la starea sa inițială. Dacă avariile sunt mai degrabă superficiale (nestructurale), cum ar fi deteriorarea suprafeței, fisuri, deteriorări rezultate din defecte de turnare, coroziunea armăturii, atunci se fac reparații. Pentru reparații, există mai multe metode care se pot folosi: cămasuirea suprafețelor deteriorate, utilizarea de rășină epoxidică sau alți polimeri, umplerea fisurilor cu mortar obișnuit, înlocuirea sau consolidarea armăturilor deteriorate. Dacă daunele sunt structurale, atunci se folosește consolidarea structurilor din beton armat, care ia în considerare creșterea rezistenței, rigidității și ductilității elementelor structurale. În cazul structurilor din BA, creșterea rigidității și ductilității poate fi realizată prin cămasuirea grinzilor, a stâlpilor și a îmbinărilor. Pentru tehnica aceasta de cămasuire a betonului armat, se pot folosi profile din oțel sau polimeri armați cu fibre (FRP, FRCM etc.) pentru a crește ductilitatea și pentru a mări ușor rigiditatea. Există cazuri în care reabilitarea unei clădiri necesită transformarea completă a structurii existente, mai ales în cazul structurilor în cadre din BA. În această situație, tehnicile utilizate sunt: prevederea suplimentară de armături din oțel, umplerea ochiurilor cadrului cu zidărie armată sau cu beton armat, panouri prefabricate, etc.

### 1.2.2 Tehnici

Potrivit [2], reabilitarea structurală trebuie să asigure clădirilor un echilibru corespunzător între rezistență, rigiditate și ductilitate ale vechilor și noilor elemente, sistemelor de îmbinare și fundații. De aceea este nevoie să se asigure un transfer compatibil de eforturi și deformări între sistemul vechi și cel nou. Pe baza acestei observații, reabilitarea structurilor din BA se poate face folosind diferite tehnici, care pot fi grupate în tehnici de rezistență, ductilitate sau rezistență și ductilitate. Acestea sunt aplicabile ca soluție globală sau locală. În Tabelul 1.1 sunt prezentate aceste tehnici de reabilitare.

| Tabelul 1.1: Tehnici utilizate în reabilitarea structurilor din BA [2]. |                                   |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Globale                                                                 | Locale                            |
| Adding shear wall                                                       | Jacketing of beams                |
| Adding infill wall                                                      | Jacketing of columns              |
| Adding bracing                                                          | Jacketing of beam-columns joints  |
| Adding wing wall/butters                                                | Strengthening individual footings |
| Mass reduction                                                          | FRP wrapping                      |
| Supplemental damping and base isolation                                 |                                   |

În Fig. 1.2. (a) și (b) sunt prezentate grafic două tehnici de reabilitare aplicabile structurilor din BA ca soluție globală, în timp ce în Fig. 1.3., de la (a) la (d), sunt prezentate câteva tehnici locale, care pun accentul pe cămasuire - care este principalul obiectiv al acestei teze.



### 1.2.3 Strategia

Reabilitarea se bazează de obicei pe o strategie care urmărește îmbunătățirea uneia sau mai multora dintre următoarele performanțe globale ale construcției din BA existente: rezistență, ductilitate și rigiditate.

### 1.2.4 Materiale

În secțiunea de mai sus au fost prezentate diverse tehnici disponibile pentru reabilitarea structurilor din beton. Aceste tehnici utilizează fie materiale clasice, cum ar fi betonul armat, oțelul structural (profile), fie materiale moderne, cum ar fi mortarul cu proprietăți îmbunătățite, rășini, fibre polimerice de diferite tipuri, etc.

Tehnicile de reparații și de reabilitare a structurii din BA pot fi clasificate în trei grupe majore [20]:

- Injectari în fisuri, goluri sau zone de degradate;
- Tratamente aplicate la suprafață;
- Îndepărtarea și înlocuirea materialului/zonelor avariate sau deteriorate.

S-a dezvoltat o varietate de materiale pentru reabilitarea structurilor deteriorate, urmând oricare dintre metodele de mai sus. Pentru structurile din BA, materialul de reparație poate fi pe bază de ciment, deoarece cimentul este singurul ingredient activ din beton. Procesul de pulverizare a betonului sau a mortarului pe bază de ciment și nisip prin intermediul duzelor de înaltă presiune, denumit în general torcretare, se poate dovedi eficient în multe cazuri în care trebuie reparată o suprafață mare. Torcretarea se poate realiza cu sau fără a utiliza plase de armare din oțel sau fibre de oțel. Materialele clasice, precum betonul armat și oțelul structural (profile), ar

putea fi utilizate împreună sau separat pentru proiectele de reabilitare care implică o căptușire, și astfel putem folosi cămasuirea cu beton și cu oțel, respectiv. Pentru cămasuirea cu beton, se poate folosi orice clasă de rezistență a betonului, în funcție de elementul structural consolidat, așa că pentru fundație se poate folosi o rezistență mai mică, în timp ce pentru stalpi și pereți, se poate folosi beton normal sau cu rezistență ridicată. Cămasuiala din beton ar crește masa clădirii, dar și capacitatea sa de rezistență la sarcini verticale și laterale.

Căptușelile mai recente folosesc polimeri ranforșați cu fibre FRP (înfășurare) [2]. Retehnologizarea cu cămasuieli pe bază de polimeri ranforșați cu fibre (FRP) este des folosită în structurile din BA datorită avantajelor sale. Însă, din cauza limitărilor sistemului FRP, care are legătură cu matricea organică, a fost propus sistemul cu matrice pe bază de ciment, armată cu fibre (FRCM), cu proprietăți îmbunătățite față de sistemul FRP. De aceea sistemul FRCM prezintă un potențial mare pentru utilizările în vederea consolidării în domeniul structurilor din beton armat, chiar dacă structurile sunt situate în condiții de mediu extreme. Sistemul FRCM constă din plasă din fibră de înaltă rezistență și mortar de ciment. FRCM are mai multe avantaje față de tradiționala metodă de căptușire FRP (după cum se precizează în partea introductivă a acestei teze).

### **1.2.5 Elemente structurale din beton armat**

Consolidarea elementelor structurale din beton armat (stalpi din beton armat, grinzi, îmbinări grinzi-stalpi, pereți din BA și temelii/rezemări din BA) a fost prezentată în această parte a tezei cu toate detaliile. Scopul acestei părți este de a prezenta tehnicile și materialele adecvate utilizate pentru ca aceste tipuri de elemente din BA să fie compatibile cu tipul de cedare/defecțiune care a generat nevoia de a se folosi o procedură de consolidare pentru a îmbunătăți rezistența structurii respective.

Punând accentul pe consolidarea stălpilor din beton armat ca obiectiv al acestui studiu al tezei, se impune reabilitarea stălpilor din BA în mai multe situații: sarcina susținută de stalpi este mărită ca urmare a creșterii numărului de etaje sau din cauza greșelilor de proiectare; rezistența la compresiune a betonului nu este conformă cu cea specificată în proiectul tehnic/planșe (specifice clădirilor vechi); procentul și tipul de armare nu respectă cerințele codurilor de proiectare (specifice clădirilor vechi).

Stalpiile din BA trebuie să poată preia atât sarcinile verticale, cât și pe cele orizontale și trebuie să le poată transmite la fundații. Prin urmare, stalpiile din BA trebuie să aibă o suficientă rezistență la forta axială, la forfecare și la încovoiere. În cazul în care cresc doar sarcinile verticale, stalpii nu au suficientă rezistență la forta axială, prin urmare trebuie utilizată o tehnică de consolidare care crește confinarea (cămasuiala din BA, FRP sau FRCM). În cazul clădirilor proiectate după coduri vechi, armătura, în special cea transversală este insuficientă. În acest caz, rezistența la forfecare a stalpului trebuie mărită, asigurând și capacitatea la forta tăietoare. Pentru rezistența la moment încovoietor pot fi utilizate armături verticale suplimentare sau plăci din oțel.

În acest studiu al tezei, s-a folosit căptușeală FRCM pentru a consolida stalpii din beton, pentru a crește capacitatea la forta axială a acestora.

## Capitolul 2: Matricea pe bază de ciment, armată cu fibre (FRCM): compoziție și proprietăți

### 2.1 Aspecte generale

FRCM este un material compozit bicomponent, format dintr-o matrice pe bază de ciment (de ex. mortar) armată cu fibre uscate care formează o plasă sau o țesătură deschisă. Acest material se aplică manual peste elemente de beton care pot avea o formă neregulată, deoarece mortarul, în fază inițială, este umed și fibrele sunt flexibile; astfel FRCM poate fi aplicat pe aproape orice formă. Fibrele plasei sunt orientate în direcții ortogonale primare, dar și în direcții secundare, la nevoie, ceea ce permite ajustarea plasei în raport cu starea de solicitări din elementul confinat. Matricea pe bază de ciment este un sistem de mortar bazat pe ciment Portland și, prin adăugarea de aditivi, se poate ajusta lucrabilitatea, timpul de întărire și proprietățile mecanice.

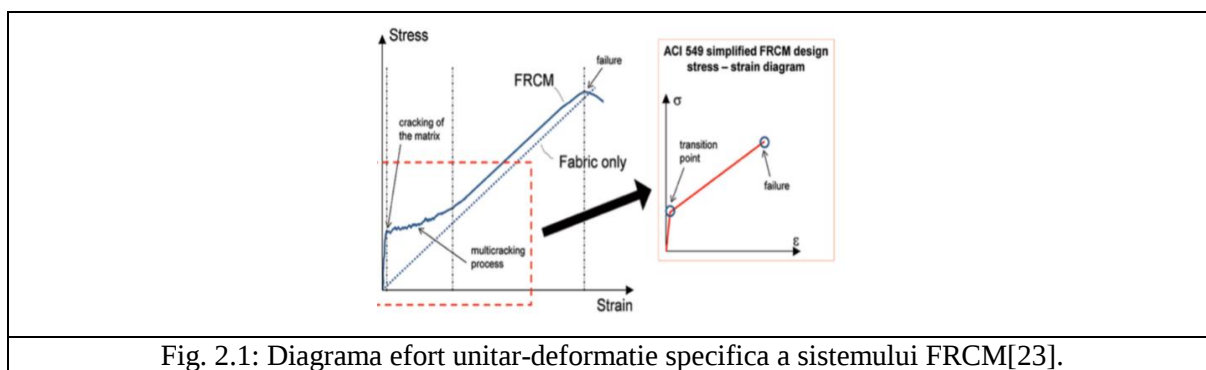
### 2.2 Proprietăți fizice

Proprietățile fizice ale sistemului FRCM sunt selectate astfel încât să ofere o performanță mai bună în anumite condiții de mediu, ceea ce face imposibilă aplicarea altor sisteme (cum ar fi FRP). În [14, 21] a fost prezentat sistemul FRCM care permite permeabilitatea la vapori și aplicarea pe suprafețe umede; de asemenea, performanța la temperaturi ridicate, umiditate și radiații ultraviolete este mai bună decât sistemele FRP. O proprietate fizică importantă este că sistemul FRCM este incombustibil și poate fi utilizat neprotejat. De asemenea, FRCM este netoxic, ceea ce, împreună cu incombustibilitatea, face ca sistemele FRCM să fie o soluție bună pentru consolidare atunci când este necesară rezistența la temperaturi ridicate.

### 2.3 Proprietăți mecanice

Proprietățile mecanice ale sistemului FRCM pot fi determinate prin efectuarea unui test de tracțiune axial pe fârșia FRCM unde sarcina este aplicată monoton până la cedare. Fig. 2.1 prezintă o diagrama tipică pentru materialul compozit FRCM. Se pot identifica trei faze principale: prima fază reprezintă starea liniar-elastică fără fisuri, unde mortarul de ciment preia sarcina, a doua fază începe atunci când eforturile se transferă de la mortar la fibre (procesul de fisurare a matricei; punctul în care apare prima fisură se numește punct de tranziție), a treia fază este atunci când proba este complet fisurată și doar fibrele preiau sarcina până când cedează fie prin rupere, fie prin alunecare [22-24].

În prevederile ACI 549.4R-13 [14] sunt prezentate diferite curbe (Fig. 2.2) pentru FRCM cu plase din sticlă AR, din sticlă E și din polietilenă, comparativ cu GFRC și ECC. Se poate observa că eforturile mai mari pot fi atinse folosind FRCM cu material pe bază de sticlă AR. În evaluarea ductilității eșantioanelor de FRCM, micro-fisurarea și distribuția fisuri reprezintă doi parametri principali luați în considerare. De asemenea, distanța între fisuri, degradarea rigidității ajută la definirea nivelului de deteriorare a probelor sub sarcină de tracțiune [25, 26]. În Fig. 2.3 este prezentată distribuția fisurilor într-un eșantion cu sticlă AR-FRCM [27].



Proprietățile mecanice ale FRCM pot fi, de asemenea, îmbunătățite prin optimizarea vâscozității amestecului pastei de ciment (matrice), ceea ce duce la o penetrare mai bună în ochiurile plasei.

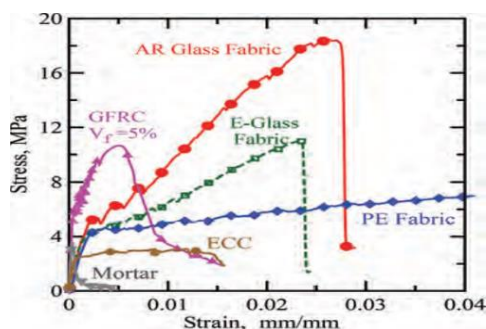


Fig. 2.2: Diagrame efort-deformație a FRCM cu sticlă AR, sticlă E și plasă din polietilenă în comparație cu GFRC și ECC [14].



Fig. 2.3: Distribuția fisurilor în AR-FRCM [27].

## 2.4 Aspecte tehnologice

Există mai multe aspecte tehnologice specifice legate de utilizarea sistemului FRCM pe elementul din beton pentru a asigura un control bun al calității. Înainte de aplicare, se pregătesc elementele, prin îndepărtarea stratului de beton deteriorat anterior, iar suprafața perimetrală este curățată pentru a fi eliminate reziduurile. Apoi, un strat subțire de mortar (matrice de ciment) este aplicat pe suprafața elementului structural pentru a fi întărit consolidat manual cu o mistrie, după cum se arată în Fig. 2.4. (A). După aceea, plasa de fibre este înfășurată cu atenție în jurul elementului din beton, cu fibrele orientate în direcția buclei și se acordă o atenție importantă pentru a se asigura că nu există niciun gol între plăcile de fibră și suprafața din beton, vezi Fig. 2.4. (b). În ultima fază se aplică un strat de finisare din mortar peste ultimul strat de fibre, completând compozitul, după cum se arată în Fig. 2.4. (c). Compozitul FRCM se întărește în câteva ore și atinge rezistența maximă după 28 de zile.

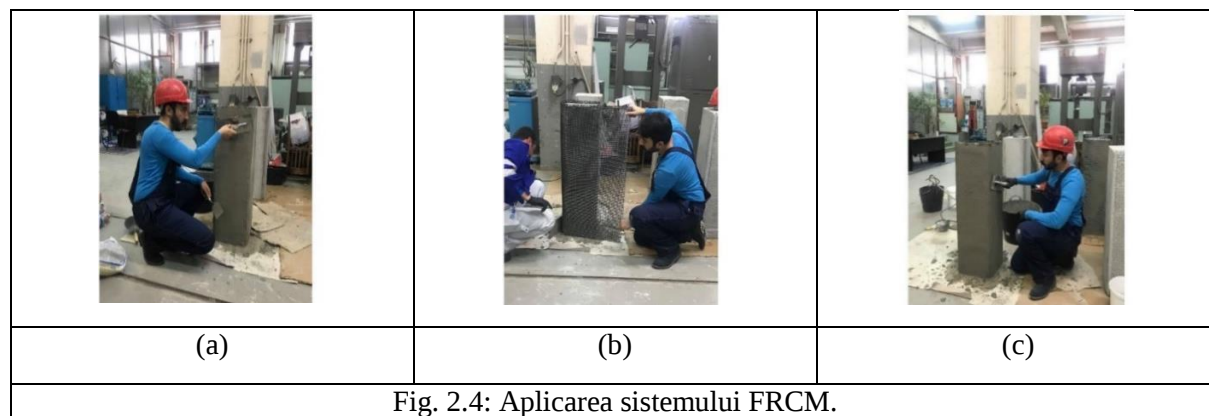


Fig. 2.4: Aplicarea sistemului FRCM.

### **Capitolul 3: Studiu bibliografic asupra cercetarilor efectuate privind consolidarea stalpilor din beton armat**

Interesul lumii ingineriei civile în consolidarea elementelor din beton prin material compozit a dus la numeroase studii experimentale și numerice în acest domeniu. Acestea s-au concentrat pe modul în care se pot extinde aplicatiile asupra îmbunătățirii rezistenței și ductilității elementelor din beton, beneficiind de proprietățile superioare „mecanice și fizice” ale acestor materiale compozite, după cum se precizează în capitolul doi.

Scopul acestui capitol este de a face o trecere în revistă a literaturii tehnice disponibile referitoare la consolidarea stalpilor din beton cu material compozit cu matrice pe bază de ciment, armată cu fibre (FRCM). Acest capitol este împărțit în două secțiuni principale: studii experimentale și studii numerice.

Parcurgerea literaturii a arătat că există o lipsă de studii experimentale și numerice pe stalpi realizate din beton simplu cu secțiune pătrată, deoarece majoritatea studiilor au fost pe stalpi din beton armat cu secțiune circulară. Prin urmare, această teză se concentrează pe efectuarea de teste de laborator, studii numerice și analitice pe stalpi scurți cu secțiune pătrată realizați din beton simplu, pentru a completa deficiențele în domeniul consolidării stalpilor din beton cu material compozit FRCM.

## Capitolul 4: Cercetari experimentale, rezultate și discuții

Capitolul patru prezintă probele, configurarea experimentală, rezultatele și evaluarea performanței sistemului de rețehnologizare FRCM.

### 4.1 Teste experimentale

Programul experimental a inclus teste pe stalpi de beton și teste pe beton.

#### 4.1.1 Tipologii de stalpi

Un set de șase stalpi de beton simplu, cu secțiune transversală pătrată de 30x30 cm, cu o rază de 3 cm și 100 cm înălțime au fost turnați pe loc dintr-un beton cu rezistență redusă. După cum se specifică în [29], utilizarea unei raze de colț crește efectul de confinare și, astfel, ductilitatea eșantionului de coloană. Trei tipologii de stalpi au fost examinați în această fază: CP-1, CP-2 au fost utilizați ca referință și, prin urmare, nu s-a aplicat nicio consolidare (vezi Fig. 4.1. (a)); CP-3, CP-5 au fost confinați cu un singur strat de FRCM (vezi Fig. 4.1. (b)); CP-4, CP-6 au fost confinați cu două straturi de FRCM (vezi Fig. 4.1. (c)). Sistemul FRCM este alcătuit dintr-o plasă din fibră de carbon de înaltă rezistență și mortar. Deoarece este nevoie de un strat de mortar de 5 mm înainte și după aplicarea unui strat de plasă, grosimea învelișului FRCM pentru eșantioane a variat în funcție de numărul de straturi de plasă de fibre. Detaliile privind stalpii sunt prezentate pe scurt în Tabelul 4.1.

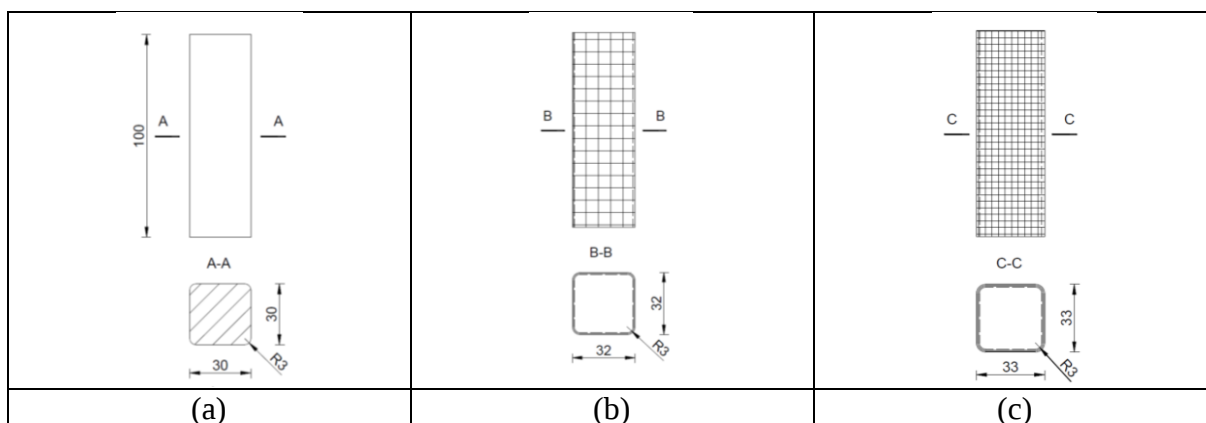


Fig. 4.1: Geometria stalpilor: (a): CP-1, CP-2, (b): CP-3, CP-5, (c): CP-4, CP-6 (dimensiuni în cm).

| Tabelul 4.1: Detaliile stalpilor și rezistența medie la compresiune a betonului. |                             |                      |                                                                                          |                                                                                           |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Stalp                                                                            | Secțiunea transversală (cm) | Nr. de FRCM straturi | Rezistența medie la compresiune a betonului la 7 zile, $f_{c,cube}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | Rezistența medie la compresiune a betonului la 28 zile, $f_{c,cube}$ (N/mm <sup>2</sup> ) |
| CP-1 (Control)                                                                   | 30x30                       | -                    | 14.63                                                                                    | 22.50                                                                                     |
| CP-2 (Control)                                                                   | 30x30                       | -                    | 14.72                                                                                    | 24.54                                                                                     |
| CP-3                                                                             | 32x32                       | 1                    | 17.52                                                                                    | 21.00                                                                                     |
| CP-4                                                                             | 33x33                       | 2                    | 17.52                                                                                    | 21.00                                                                                     |
| CP-5                                                                             | 32x32                       | 1                    | 16.39                                                                                    | 20.00                                                                                     |
| CP-6                                                                             | 33x33                       | 2                    | 16.39                                                                                    | 20.00                                                                                     |

## **4.1.2 Materiale**

### **4.1.2.1 Proiectarea și turnarea amestecului de beton**

Stalpii au fost realizați dintr-un beton cu rezistență redusă. Prin urmare, amestecul de beton a fost proiectat pentru a obține o clasă de beton C16/20. Pentru a obține această clasă, a fost utilizat un raport de 0,67 apă/ciment, rezultând o dozare de ciment de  $280 \text{ kg/m}^3$ , împreună cu nisip de râu, agregate fine și pietriș de dimensiuni maxime de 16 mm ca agregat grosier. Agregatele au fost bine spălate și uscate înainte de amestecare. Din fiecare turnare au fost prelevate cuburi de  $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$  și testate sub compresiune la 7 și 28 de zile după turnare. Rezistențele medii sunt prezentate în Tabelul 4.1.

Stalpii au fost turnați în două tipare din fibră de sticlă fabricate special. Tiparul a fost umplut la aproximativ jumătate din înălțime și apoi a fost folosit un vibrator pentru compactarea betonului. La patru zile după turnare, probele au fost scoase din tipar și pregătite pentru înfășurarea FRM.

### **4.1.2.2 Materiale de consolidare (plasa și mortar FRM)**

O fibră de carbon de înaltă rezistență cu plasa de  $1 \times 1 \text{ cm}$ , Mapegrid C170, a fost folosită pentru a confina stalpii. Pentru o densitate a fibrelor de  $1,83 \text{ g/cm}^3$ , are o rezistență la tracțiune de  $5000 \text{ N/mm}^2$ . Modulul de elasticitate este de  $252000 \text{ N/mm}^2$ , în timp ce alungirea la cedare este de 2%. Grosimea echivalentă a materialului uscat este de 0,048 mm.

Mortarul Planitop HDM a fost folosit ca matrice pentru sistemul FRM. Este un mortar cu două componente (componentă pulbere A și componentă lichidă B), cu rezistență ridicată, pe bază de ciment, armat cu fibre, cu agregate selectate cu granulație fină, amestecuri speciale și polimeri sintetici în dispersie de apă. Conform fișei tehnice, rezistența la compresiune după 28 de zile atinge cel puțin  $28 \text{ N/mm}^2$ , în timp ce modulul de elasticitate la compresiune este de  $11000 \text{ N/mm}^2$ .

## **4.1.3 Program experimental**

Testele stalpilor de beton sunt prezentate pe scurt în Tabelul 4.1. Stalpii scurți din beton au fost încărcati monoton și solicitați la compresiune axială până la cedare. CP-1 și CP-2 nu au fost confinați pentru a putea fi luate drept referință. Pentru ceilalți stalpi, numărul de straturi de FRM, aria secțiunii transversale și rezistența la compresiune a materialului din beton au variat.

### **4.1.4 Configurația experimentală**

Figura 4.2 prezintă configurația experimentală. Aceasta constă în o presă hidrolică și eșantionul stalpului scurt încărcate sub compresiune centrică. Stalpul a fost plasat în poziție verticală și centrat în raport cu cele două plăci din oțel. Sarcina de compresiune a fost aplicată monoton de către o mașină universală electro-hidrolică de testare cu o capacitate de încărcare verticală de 3000 KN. Testele au fost efectuate la Laboratorul Universității Tehnice de Construcții Civile din București.

Au fost măsurați doi parametri în timpul testării: forța înregistrată de presă și deformarea axială (măsurată utilizând un comparator mecanic cu cadran). Efortul unitar axial a fost determinat prin împărțirea forței la aria secțiunii transversale inițiale a stalpului. Deformația specifică a fost determinată prin împărțirea deformației monitorizate la lungimea inițială de 50 (cm) a etalonului. Pentru a evita încărcarea excentrică înainte de test, a fost necesară centrarea eșantionului. Acest lucru a fost realizat prin compararea citirilor de deformare axială pe două fete opuse ale stalpului.

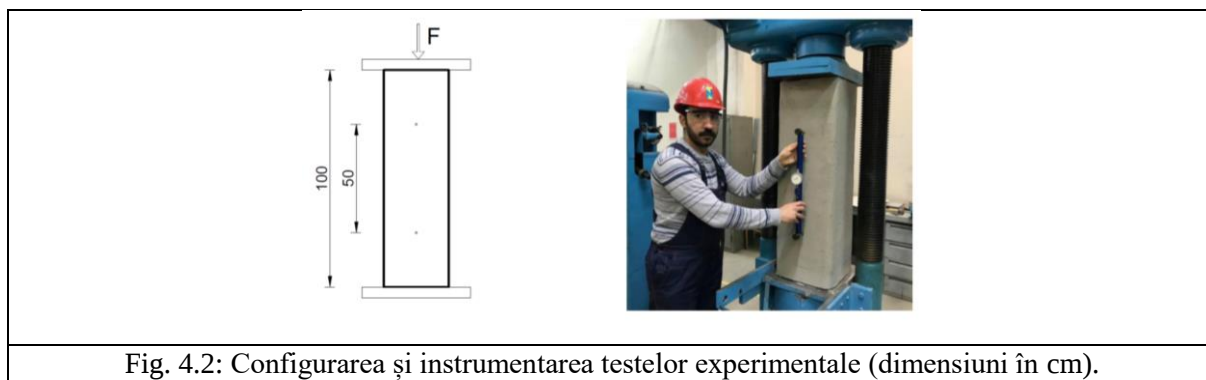


Fig. 4.2: Configurarea și instrumentarea testelor experimentale (dimensiuni în cm).

## 4.2 Rezultatele testelor și discuții

Mai mulți parametri au fost investigați pe baza rezultatelor obținute în urma testelor experimentale.

### 4.2.1 Rezistența la compresiune axială

Creșterea rezistenței la compresiune a fost de 28% pentru eșantioanele cu un singur strat de FRCM și de 29% pentru eșantioanele cu două straturi de FRCM, în comparație cu rezistența medie la compresiune axială a eșantioanelor de referință (vezi Tabelul 4.2).

### 4.2.2 Deformația axială

Sistemul FRCM a redus deformația axială  $D$  a eșantioanelor confinate, în comparație cu stalpi de referință. Două straturi de FRCM au redus ușor deformația față de eșantioanele cu un singur strat (vezi Tabelul 4.2). Curbele efort axial-deformare axială pentru toate eșantioanele sunt prezentate în Fig. 5.2. Rezultatele sunt prezentate în Tabelul 4.2.

| Tabelul 4.2: Rezultate experimentale pe stalpi de beton. |               |                |                    |                        |                                                |                                   |                                            |                                     |                                                      |                    |                             |
|----------------------------------------------------------|---------------|----------------|--------------------|------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------|
| Specimen                                                 | FRCM straturi | $N_{max}$ (KN) | $N_{max,ave}$ (KN) | $N_{max}$ increase (%) | $f_{c,exp} = N_{max}/A_c$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $f_{c,cube}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $^{***}f_{c,initial}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | $f_{c,exp}/^{***}f_{c,initial}$ (-) | $f_{c,exp}/^{***}f_{c,initial}$ average increase (%) | $D$ (mm)           | $\varepsilon_{max}$ (mm/mm) |
| CP-1                                                     | -             | 1830           | 1875               | -                      | 20.33                                          | 22.50                             | 20.25                                      | 1.00                                | -                                                    | 0.505*             | 0.001009*                   |
| CP-2                                                     | -             | 1920           |                    |                        | 21.33                                          | 24.54                             | 22.1                                       | 0.965                               |                                                      | 0.445*             | 0.000889*                   |
| CP-3                                                     | 1             | 2130           | 2122               | 13.17                  | 23.67                                          | 21.00                             | 19.00                                      | 1.246                               | 28                                                   | 0.424*;<br>0.615** | 0.000848*;<br>0.001230**    |
| CP-5                                                     | 1             | 2114           |                    |                        | 23.49                                          | 20.00                             | 18.00                                      | 1.305                               |                                                      | 0.472*;<br>0.645** | 0.000944*;<br>0.001289**    |
| CP-4                                                     | 2             | 2160           | 2147.5             | 14.53                  | 24.00                                          | 21.00                             | 19.00                                      | 1.263                               | 29                                                   | 0.416*;<br>0.567** | 0.000831*;<br>0.001133**    |
| CP-6                                                     | 2             | 2135           |                    |                        | 23.72                                          | 20.00                             | 18.00                                      | 1.318                               |                                                      | 0.431*;<br>0.533** | 0.000862*;<br>0.001066**    |

\* measured at 1500 KN. \*\* measured at 1700 KN.  $^{***}f_{c,initial} = (f_{c,ave,exp} \text{ CP-1;2} / f_{c,ave,cube} \text{ CP-1;2}) \times f_{c,cube} \text{ CP-3;4;5;6}$ .  
 $A_c$  cross-sectional area of concrete only.

### 4.2.3 Modul de cedare

S-a observat cedare la/aproape de înălțimea stalpilor și se prezintă sub forma unei fisuri care crește apoi pe verticală până la extremitățile eșantionului, până la cedare. Cedarea se produce brusc. Modul de cedare al eșantioanelor confinate a fost mai puțin fragil decât cel observat pentru eșantioanele neconfinat (vezi Fig. 5.3).

## Capitolul 5: Simulări FEM

Acest capitol prezintă validarea experimentală a șase modele de stalpi de beton încărcati axial, modele care au fost dezvoltate în software-ul Abaqus utilizând Metoda Elementelor Finite (FEM). Este prezentat inițial un rezumat al rezultatelor experimentale reprezentative utilizate ca referință pentru modelarea numerică. Apoi, calibrarea atât la nivelul componentelor, cât și la nivelul structurii este prezentată în detaliu. Scopul investigației numerice este de a reproduce capacitatea de deformare plastică a stalpilor testati.

### 5.1 Modele de material

Stalpii testati au fost realizati din trei materiale principale: beton cu greutate normală, FRMC și mortar. Diferite modele de materiale disponibile în codul Abaqus din metoda elementelor finite (FEM) au fost utilizate pentru a simula materialele:

**BETON:** proprietățile mecanice au fost determinate folosind testele experimentale pe cuburi și prevederile din Eurocodul 2-1-1/2004 [30]. Modelul Abaqus utilizat este Modelul de beton cu plasticitate deteriorată (CDPM) [31]. Proprietățile mecanice ale materialului din beton au fost determinate și sintetizate în Tabelul 5.1.

**MORTAR:** a fost modelat în mod similar ca betonul folosind elasticitatea izotropă și modelele de beton cu plasticitate deteriorată.

**FRMC:** a fost modelat folosind opțiunea "lamina" din Abaqus, folosită pentru a specifica proprietățile elastice ortotrope în efortul din plan. Proprietățile mecanice ale laminei sunt prezentate în Tabelul 5.2.

Calibrările se efectuează sub sarcină de compresiune monotonă axială. S-au obținut predicții exacte pentru toate modelele de stalpi FEM.

Tabelul 5.1: Proprietăți mecanice ale betonului.

| ID                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | $f_{cm,cube}$<br>[MPa] | $f_{cm}$<br>[MPa] | $0.4 f_{cm}$<br>[MPa] | $f_{ck}$<br>[MPa] | $f_{ctm}$<br>[MPa] | $E_{cm}$<br>[MPa] | $\varepsilon_{c1}$<br>[mm/mm] | $k$<br>[-] |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------------------|------------|
| CP-1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 22.50                  | 21.56             | 8.70                  | 13.56             | 1.71               | 27701             | 0.00181                       | 2.45       |
| CP-2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 24.54                  | 22.76             | 9.11                  | 14.76             | 1.81               | 28157             | 0.00184                       | 2.40       |
| CP-3<br>CP-4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 21.88*                 | 21.18             | 8.50                  | 13.18             | 1.67               | 27556             | 0.00180                       | 2.46       |
| CP-5<br>CP-6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 21.35**                | 20.87             | 8.40                  | 12.87             | 1.65               | 27431             | 0.00179                       | 2.48       |
| <ul style="list-style-type: none"> <li><math>f_{cm,cube}</math>, mean value of concrete cube compressive strength, experimentally determined at 28 days.</li> <li><math>f_{ck,cube} = (1 - 1.64 \cdot c_v) \cdot f_{cm,cube}</math>, characteristic compressive cube strength of concrete.</li> <li><math>c_v = \sigma / f_{cm,cube}</math>, coefficient of variation of the standard deviation (<math>c_v = 0.15</math>, according to [32]).</li> <li><math>\sigma</math>, standard deviation.</li> <li><math>f_{ck} = 0.8 \cdot f_{ck,cube}</math>, characteristic compressive cylinder strength of concrete.</li> <li><math>f_{cm} = f_{ck} + 8</math> MPa, mean value of concrete cylinder compressive strength.</li> <li><math>0.4 \cdot f_{cm}</math>, linear elastic compressive limit.</li> <li><math>f_{ctm} = 0.3 f_{ck}^{2/3}</math>, mean value of axial tensile strength of concrete.</li> </ul> |                        |                   |                       |                   |                    |                   |                               |            |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>E_{cm} = 22 \cdot [(f_{cm})/10]^{0.3}</math>, (<math>f_{cm}</math> in MPa) secant modulus of elasticity of concrete.</li> <li>• <math>E_c = (0.4 \cdot f_{cm}) / \varepsilon_{c0.4f_{cm}}</math>, (<math>f_{cm}</math> in MPa) reduced modulus of elasticity of concrete.</li> <li>• <math>\varepsilon_{c1} = 0.7 \cdot f_{cm}^{0.31}</math>, compressive strain in the concrete at the peak stress <math>f_{cm}</math>.</li> <li>• <math>k = 1.05 \cdot E_{cm} \cdot  \varepsilon_{c1}  / f_{cm}</math>, plasticity number.</li> <li>• Notes:<br/>* 0.88 MPa was added to the experimental value 21 MPa as to obtain closer fitting on tested column's <i>F-D</i> response.<br/>** 1.35 MPa was added to the experimental value 20 MPa as to obtain closer fitting on tested column's <i>F-D</i> response.</li> </ul> | <p>Compressive/Tensile behavior</p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|

| Tabelul 5.2: Proprietăți mecanice ale compozitului (FRCM). |                               |                               |                               |                                  |                                  |                                  |                                         |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|
| Elastic type                                               | Material property             |                               |                               |                                  |                                  |                                  |                                         |
| Lamina                                                     | $E_1$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $E_2$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\nu_1$<br>[-]                | $G_{12}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $G_{13}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $G_{23}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |                                         |
|                                                            | 252000                        | 252000                        | 0.1                           | 0.1                              | 0.1                              | 0.1                              |                                         |
| Sub-option                                                 | Material property             |                               |                               |                                  |                                  |                                  |                                         |
| Fail stress                                                | $X_t$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $X_c$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $Y_t$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $Y_c$<br>[N/mm <sup>2</sup> ]    | $S$<br>[N/mm <sup>2</sup> ]      | $*f$<br>[-]                      | $\sigma_{bias}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|                                                            | 5000                          | 0.1                           | 5000                          | 0.1                              | 0.1                              | 0                                | 5000                                    |

## 5.2 Modele de stalpi

Au fost create modele FEM pentru fiecare eșantion de stalp. Toate modelele de stalpi au mai multe caracteristici comune: tipul de modele de materiale, condițiile de limitare și legile de contact. Diferențele dintre modele au legătură cu geometria și cu aportul de material.

Probele din beton și mortar au fost modelate folosind elemente liniare cu opt noduri (C3D8R), cu o dimensiune globală a rețelei de 10 mm. FRCM a fost modelat folosind elemente finite cu membrană patrulateră cu 4 noduri (M3D4R), cu o dimensiune globală a rețelei de 10 mm. Plăcile din oțel au fost modelate cu elemente finite C3D8R cu o dimensiune globală a rețelei de 20 mm. Două puncte de referință (RP1, RP2) au fost racordate cinematic la plăcile de oțel și au fost utilizate pentru a aplica sarcina.

Diferențele dintre modele au legătură cu geometria și cu aportul de material (vezi Fig. 5.1. (a) și (b)).

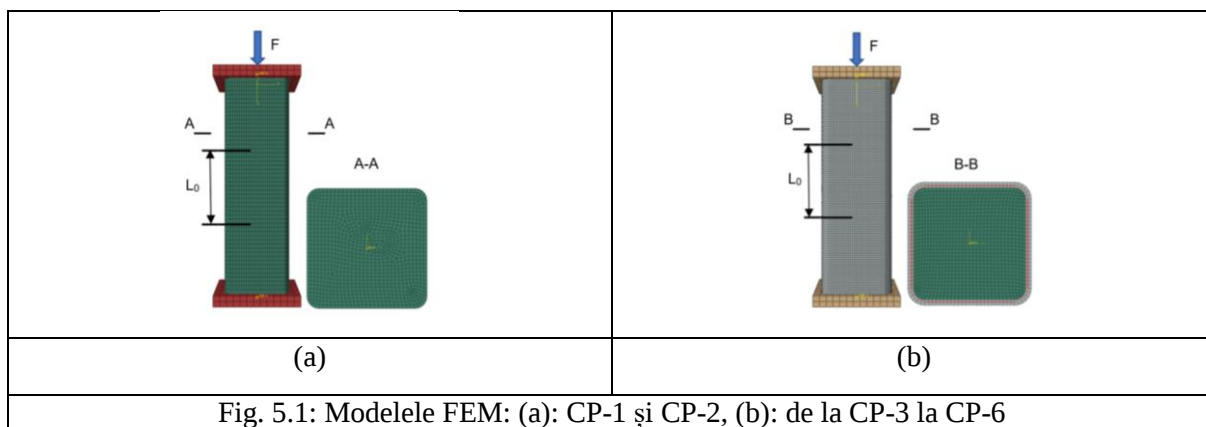


Fig. 5.1: Modelele FEM: (a): CP-1 și CP-2, (b): de la CP-3 la CP-6

### 5.3 Rezultate

Predicțiile în termeni de efort axială - deformatie axială sunt prezentate în Fig. 5.2 în comparație cu rezultatele experimentale. Ca o imagine de ansamblu globală, modelele FEM reproduc răspunsul experimental cu un nivel bun de precizie; atât rigiditatea axială, cât și sarcina axială maximă  $N_{max}$  sunt obținute prin modele FEM. Capacitatea maximă a sarcinii axiale  $N_{max,FEM}$  a fost recodificată și comparată cu rezultatele experimentale  $N_{max,exp}$ . Se obțin predicții exacte. Rezultatele sunt sintetizate în Tabelul 5.3. Eroarea a fost calculată folosind formula: eroare =  $((N_{max,exp} - N_{max,FEM})/N_{max,exp}) \cdot 100$ .

| Tabelul 5.3: FEM vs. capacitatea portanta axiala Nmax |                    |                    |           |
|-------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| Specimen                                              | $N_{max,exp}$ [KN] | $N_{max,FEM}$ [KN] | Error [%] |
| CP-1                                                  | 1830               | 1821               | 0.48%     |
| CP-2                                                  | 1920               | 1934               | -0.71%    |
| CP-3                                                  | 2130               | 2038               | 4.30%     |
| CP-4                                                  | 2160               | 2159               | 0.05%     |
| CP-5                                                  | 2114               | 2006               | 5.10%     |
| CP-6                                                  | 2135               | 2129               | 0.28%     |

Cedarea stalpului este rezultatul inițierii și propagării fisurilor în întregul element. Implementarea modelului de beton cu plasticitate deteriorată în Abaqus nu are noțiunea de fisuri care se dezvoltă la punctul de integrare a materialului [31]. În schimb, conceptul de direcție eficientă a fisurii a fost introdus cu scopul de a obține o vizualizare grafică a modelelor de fisurare în structura de beton.

În conformitate cu Lubliner et. al., după cum se descrie în [31], inițierea fisurilor are loc în punctele în care deformatia plastică echivalentă la tracțiune (PEEQT) este mai mare decât zero,  $PEEQT > 0$ , iar deformatia principală maximă a plasticului este pozitivă,  $PE.MAX.PRINCIPAL > 0$ . Se presupune că direcția normală a vectorului față de planul de fisură este paralelă cu direcția tensiunii plastice maxime principale.

Figura 5.3 prezintă modurile de cedare obținute numeric în comparație cu modurile de cedare înregistrate experimental ale tuturor celor șase stalpi. Valorile deformatiilor plastice principale,  $PE.MAX.PRINCIPAL$ , sunt reprezentate grafic la sfârșitul analizelor, corespunzând punctului de cedare. Se poate observa că distribuția fisurilor este similară cu rezultatele experimentale.

Pentru evaluarea variației eforturilor de confinare a betonului, s-a folosit efortul principal mediu  $S.MID.PRINCIPAL$  ca aport în Abaqus. Figura 5.3 prezintă variația efortului  $S.MID.PRINCIPAL$  de-a lungul stalpului pentru probele de beton și mortar și variația efortului  $S.MID.PRINCIPAL$  în planul secțiunii la cedare. Distribuția eforturilor de confinare și nivelul de confinare în secțiunea transversală variază de la modelele neconfinat la modelele confinate cu FRCM. O confinare mai bună se obține pentru modelele cu două straturi de FRCM, comparativ cu modelele cu un singur strat. Rezultatele sunt rezumate în Tabelul 5.4 și au fost înregistrate doar valorile maxime (pozitive) ale  $S.MID.PRINCIPAL$ , deoarece valorile minime sunt obținute în zona de contact cu plăcile de oțel și, astfel, confinarea secțiunii transversale este influențată de forțele de frecare.

| Tabelul 5.4: Rezultatele FEM: eforturi unitare și deformatii specifice |                                         |                                                       |                                                    |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Specimen                                                               | Beton:<br>$PE.MAX.PRINCIPAL$<br>[mm/mm] | Beton:<br>+ $S.MID.PRINCIPAL$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | FRCM:<br>$S.MAX.PRINCIPAL$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
| CP-1                                                                   | 0.25355                                 | 1.01759                                               | -                                                  |
| CP-2                                                                   | 0.01584                                 | 1.00653                                               | -                                                  |
| CP-3                                                                   | 0.00347                                 | 0.77391                                               | 714                                                |
| CP-4                                                                   | 0.00336                                 | 0.85411                                               | 708                                                |

|      |         |         |     |
|------|---------|---------|-----|
| CP-5 | 0.00354 | 0.76790 | 718 |
| CP-6 | 0.00335 | 0.88333 | 700 |

Efortul de întindere din cămasuiala din fibre a fost evaluat utilizând efortul maxim principal *S.MAX.PRINCIPAL*. Figura 5.3 prezintă variația efortului *S.MAX.PRINCIPAL* de-a lungul stalpului pentru partea de FRCM, la cedare. Eforturile de tracțiune variază de-a lungul secțiunii transversale de la colțuri până la zonele centrale. La colțuri se înregistrează eforturi mai mici. Eforturile puțin mai mici se obțin pentru modelele cu două straturi de FRCM (CP-4 și CP-6). Pentru modelele cu un singur strat FRCM (CP-3 și CP-5), eforturile de tracțiune sunt mai concentrate la jumătatea înălțimii stalpului. Valorile maxime ale *S.MAX.PRINCIPAL* înregistrate pentru fiecare model confinat sunt sintetizate în Tabelul 5.4.

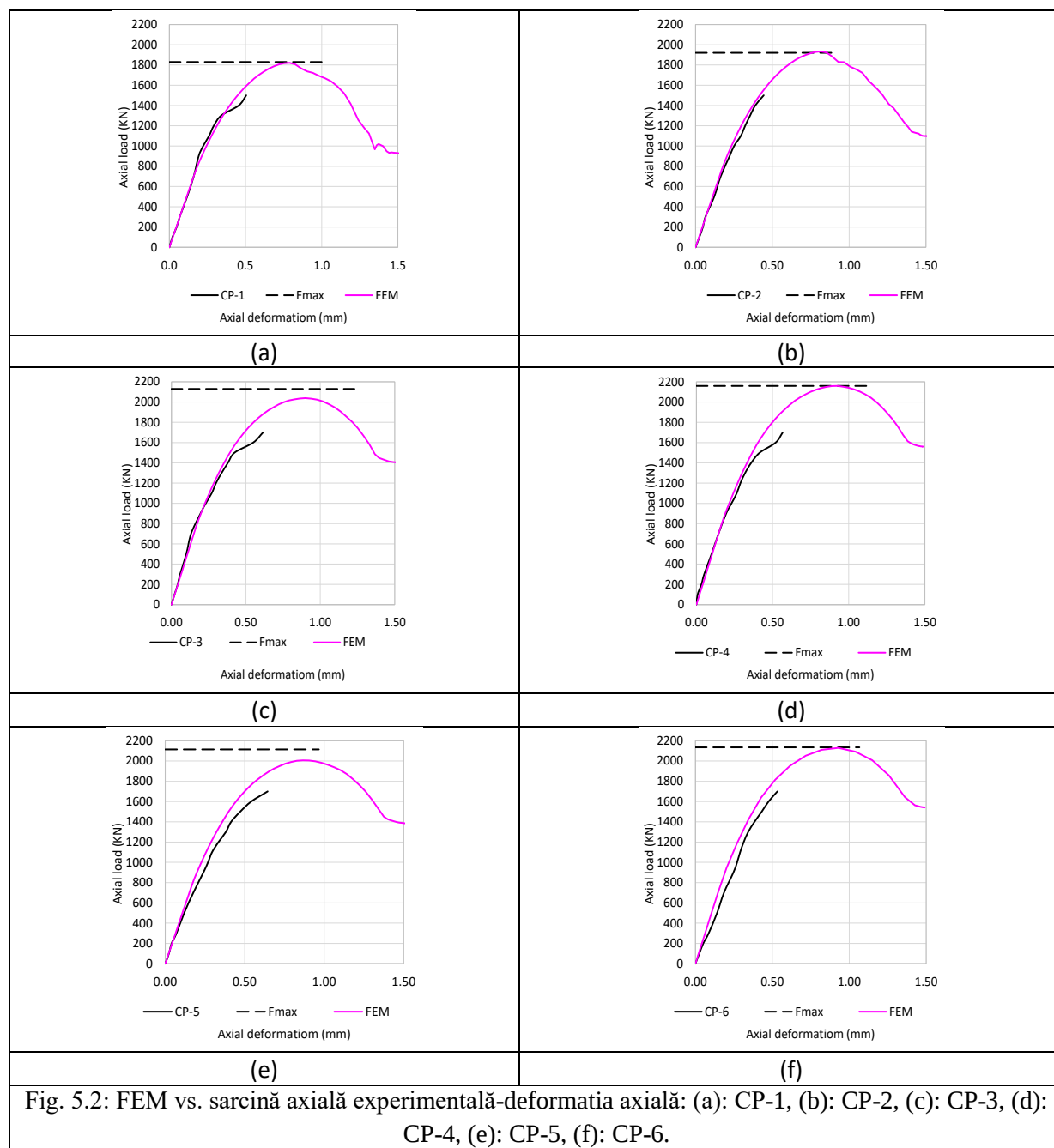
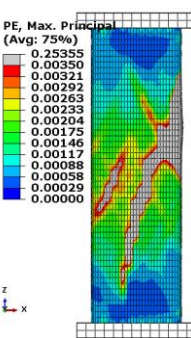
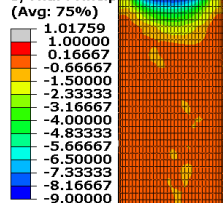
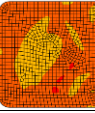
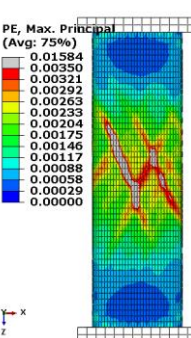
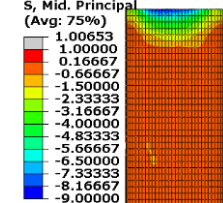
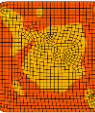
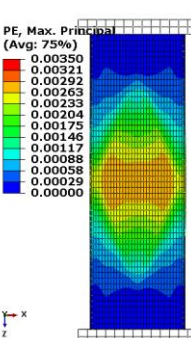
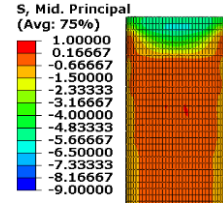
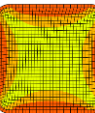
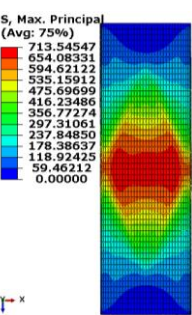
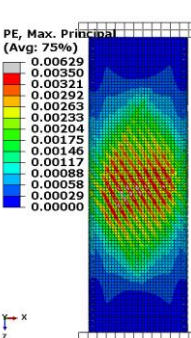
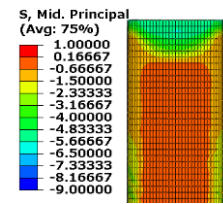
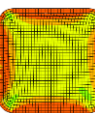
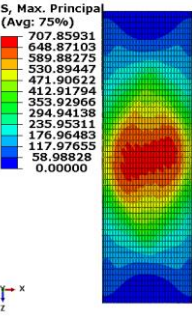


Fig. 5.2: FEM vs. sarcină axială experimentală-deformația axială: (a): CP-1, (b): CP-2, (c): CP-3, (d): CP-4, (e): CP-5, (f): CP-6.

| Experimental                                                                        | Plastic strain (all parts)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Confining stress (concrete)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Tensile stress (fibres FRM)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |  <p>PE, Max. Principal (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>0.25355</li> <li>0.00350</li> <li>0.00321</li> <li>0.00292</li> <li>0.00263</li> <li>0.00233</li> <li>0.00204</li> <li>0.00175</li> <li>0.00146</li> <li>0.00117</li> <li>0.00088</li> <li>0.00058</li> <li>0.00029</li> <li>0.00000</li> </ul>   |  <p>S, Mid. Principal (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1.01759</li> <li>1.00000</li> <li>0.16667</li> <li>-0.66667</li> <li>-1.50000</li> <li>-2.33333</li> <li>-3.16667</li> <li>-4.00000</li> <li>-4.83333</li> <li>-5.66667</li> <li>-6.50000</li> <li>-7.33333</li> <li>-8.16667</li> <li>-9.00000</li> </ul>  | No FRM.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| (a)                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|    |  <p>PE, Max. Principal (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>0.01584</li> <li>0.00350</li> <li>0.00321</li> <li>0.00292</li> <li>0.00263</li> <li>0.00233</li> <li>0.00204</li> <li>0.00175</li> <li>0.00146</li> <li>0.00117</li> <li>0.00088</li> <li>0.00058</li> <li>0.00029</li> <li>0.00000</li> </ul>   |  <p>S, Mid. Principal (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1.00653</li> <li>1.00000</li> <li>0.16667</li> <li>-0.66667</li> <li>-1.50000</li> <li>-2.33333</li> <li>-3.16667</li> <li>-4.00000</li> <li>-4.83333</li> <li>-5.66667</li> <li>-6.50000</li> <li>-7.33333</li> <li>-8.16667</li> <li>-9.00000</li> </ul>  | No FRM.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| (b)                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|   |  <p>PE, Max. Principal (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>0.00350</li> <li>0.00321</li> <li>0.00292</li> <li>0.00263</li> <li>0.00233</li> <li>0.00204</li> <li>0.00175</li> <li>0.00146</li> <li>0.00117</li> <li>0.00088</li> <li>0.00058</li> <li>0.00029</li> <li>0.00000</li> </ul>                   |  <p>S, Mid. Principal (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1.00000</li> <li>0.16667</li> <li>-0.66667</li> <li>-1.50000</li> <li>-2.33333</li> <li>-3.16667</li> <li>-4.00000</li> <li>-4.83333</li> <li>-5.66667</li> <li>-6.50000</li> <li>-7.33333</li> <li>-8.16667</li> <li>-9.00000</li> </ul>                |  <p>S, Max. Principal (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>713.54547</li> <li>654.08331</li> <li>594.62122</li> <li>535.15912</li> <li>475.69699</li> <li>416.23486</li> <li>356.77274</li> <li>297.31061</li> <li>237.84850</li> <li>178.38637</li> <li>118.92425</li> <li>59.46212</li> <li>0.00000</li> </ul> |
| (c)                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|  |  <p>PE, Max. Principal (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>0.00629</li> <li>0.00350</li> <li>0.00321</li> <li>0.00292</li> <li>0.00263</li> <li>0.00233</li> <li>0.00204</li> <li>0.00175</li> <li>0.00146</li> <li>0.00117</li> <li>0.00088</li> <li>0.00058</li> <li>0.00029</li> <li>0.00000</li> </ul> |  <p>S, Mid. Principal (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1.00000</li> <li>0.16667</li> <li>-0.66667</li> <li>-1.50000</li> <li>-2.33333</li> <li>-3.16667</li> <li>-4.00000</li> <li>-4.83333</li> <li>-5.66667</li> <li>-6.50000</li> <li>-7.33333</li> <li>-8.16667</li> <li>-9.00000</li> </ul>               |  <p>S, Max. Principal (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>707.85931</li> <li>648.87103</li> <li>589.88275</li> <li>530.89447</li> <li>471.90622</li> <li>412.91794</li> <li>353.92966</li> <li>294.94138</li> <li>235.95311</li> <li>176.96483</li> <li>117.97655</li> <li>58.98828</li> <li>0.00000</li> </ul> |
| (d)                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

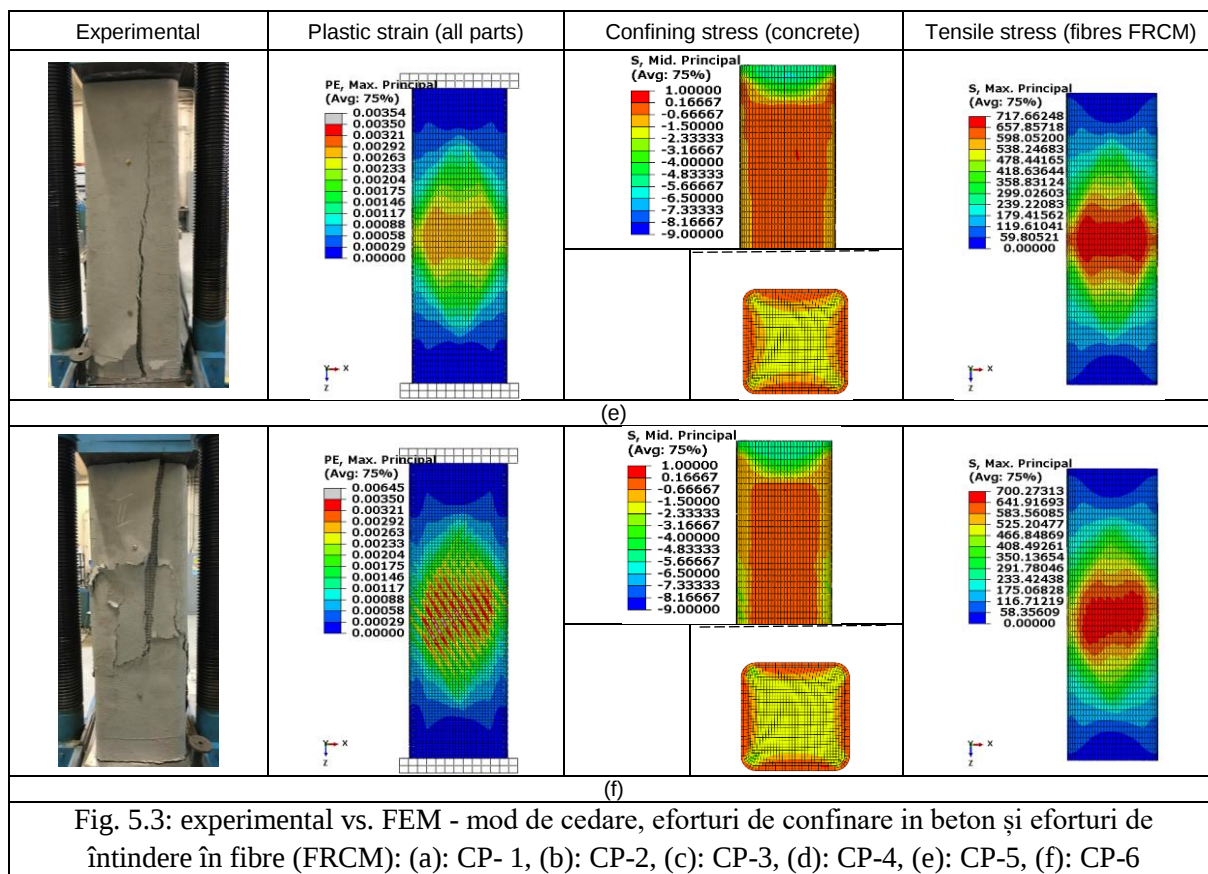


Fig. 5.3: experimental vs. FEM - mod de cedare, eforturi de confinare in beton și eforturi de întindere în fibre (FRCM): (a): CP- 1, (b): CP-2, (c): CP-3, (d): CP-4, (e): CP-5, (f): CP-6

## Capitolul 6: Predicții analitice

Modelele analitice reprezintă instrumentele de proiectare pentru ingineri atunci când, în practica curentă, se confruntă cu probleme legate de consolidarea elementelor structurale. Codurile de proiectare adoptă, dintre modelele analitice existente în literatura tehnică, pe cele mai precise, asigurând o proiectare conservatoare și economică. Scopul acestui capitol este de a determina creșterea capacității după confinarea cu FRCM utilizând modele analitice bazate pe coduri și, de asemenea, alte modele disponibile în literatură.

Procentul de creștere a forței axiale a variat în funcție de fiecare model sugerat de fiecare cercetător și, prin urmare, unele rezultate au fost foarte adecvate și apropiate de rezultatele experimentului nostru, în timp ce altele au dat rezultate oarecum departate. Toate rezultatele sunt prezentate în tabelul 6.1.

Rezultatele referitoare la creșterea rezistenței la compresiune axială din Tabelul 6.1 pot fi comparate din punct de vedere al proiectării cu rezultatele lucrărilor experimentale din Tabelul 4.2. Cele mai bune rezultate au fost obținute cu ajutorul modelului propus de Di Ludovico și colab. [33]; comparația produce predicții exacte atât pentru un strat de FRCM (raportul  $f_{cc}/f_{c,exp}$  este  $0,88 \sim 0,92$ ) cât și pentru două straturi de FRCM (raportul  $f_{cc}/f_{c,exp}$  este  $0,96 \sim 1,00$ ).

Calculul predicției analitice au fost efectuate pe baza următoarelor modele propuse:

- Triantafillou et al. [8]
- Di Ludovico et al. [33]
- De Caso et al. [34]
- ACI 549.4R-13 [14]
- Colajanni et al. [35]
- Ombres [10]

Toate modelele analitice utilizate în acest capitol se bazează pe o formă generală descrisă de ecuația (6-1), în care efectul de confinare în termeni de rezistență este exprimat în funcție de presiunea efectivă de confinare laterală  $f_{l,e}$ :

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = \alpha + k_1 \left( \frac{f_{l,e}}{f_{co}} \right)^m \quad (6-1)$$

Unde:  $f_{co}$  este rezistența maximă la compresiune a eșantioanelor neconfinat și este egală cu rezistența inițială la compresiune  $f_{c,initial}$  care reprezintă aproximativ 0,9 din rezistența la compresiune a cubului;  $f_{cc}$  este rezistența maximă la compresiune limitată a eșantioanelor;  $\alpha$ ,  $k_1$  și  $m$  sunt parametri nedimensionali evaluați experimental. Pentru cămasuiala FRCM, factorul  $k_1$  poate fi determinat ca  $k_1 = \alpha k_{1,R}$ , considerând  $\alpha$  ca un coeficient de eficacitate care depinde de sistemul de căptușire specific, și  $k_{1,R}$  ca parametru nedimensional calibrat pentru eșantioanele consolidate folosind sistemul FRCM. Pentru evaluarea ecuației de presiune de confinare laterală efectivă (6-2) se folosește:

$$f_{l,e} = \frac{1}{2} \rho_f E_f \varepsilon_f k_e \quad (6-2)$$

Unde:  $\rho_f$  este raportul de confinare,  $E_f$  și  $\varepsilon_f$  sunt modulul de elasticitate și deformația cămasuielii în direcție laterală, respectiv,  $k_e$  este coeficientul de eficiență care ia în considerare variația presiunii de confinare în eșantioanele cu secțiune transversală pătrată și dreptunghiulară față de cele circulare, aproape de colțuri.

Tabelul 6.1 prezintă toate rezultatele predicțiilor analitice conform mai multor modele analitice propuse de unii cercetători. Se observă faptul că prin aplicarea modelului propus de Di Ludovico și colab. [33] s-au obținut cele mai bune rezultate predictive ale creșterii rezistenței axiale. În

timp ce cea mai mare diferență de predicție a creșterii forței axiale a fost dată de modelul propus de Ombres [10]. Toate rezultatele sunt prezentate în Tabelul 6.1.

| Tabelul 6.1: Rezultatele analitice ale efectului de confinare.                                                                     |                                |           |       |       |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------|-------|-------|-------|
| Modelul propus                                                                                                                     | Variabile                      | Specimens |       |       |       |
|                                                                                                                                    |                                | CP-3      | CP-5  | CP-4  | CP-6  |
| Triantafillou et al. [8]<br>$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 1.9 \frac{f_{l,e}}{f_{co}}$                                               | No. layers                     | 1         | 1     | 2     | 2     |
|                                                                                                                                    | $f_{co} = f_{c,initial}$ (MPa) | 19        | 18    | 19    | 18    |
|                                                                                                                                    | $f_{cc}$ (MPa)                 | 20.67     | 19.67 | 22.34 | 21.34 |
|                                                                                                                                    | $f_{cc}/f_{co}$                | 1.09      | 1.09  | 1.18  | 1.19  |
|                                                                                                                                    | $f_{c,exp}$ (MPa)              | 23.67     | 23.49 | 24.00 | 23.72 |
|                                                                                                                                    | $f_{cc}/f_{c,exp}$             | 0.87      | 0.84  | 0.93  | 0.90  |
| Di Ludovico et al. [33]<br>$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 2.35x \left(\frac{f_{l,e}}{f_{co}}\right)^{0.85}$                          | No. layers                     | 1         | 1     | 2     | 2     |
|                                                                                                                                    | $f_{co} = f_{c,initial}$ (MPa) | 19        | 18    | 19    | 18    |
|                                                                                                                                    | $f_{cc}$ (MPa)                 | 21.71     | 20.69 | 23.89 | 22.85 |
|                                                                                                                                    | $f_{cc}/f_{co}$                | 1.14      | 1.15  | 1.26  | 1.27  |
|                                                                                                                                    | $f_{c,exp}$ (MPa)              | 23.67     | 23.49 | 24.00 | 23.72 |
|                                                                                                                                    | $f_{cc}/f_{c,exp}$             | 0.92      | 0.88  | 1.00  | 0.96  |
| De Caso Y Basalo et al. [34]<br>$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 3.34 \frac{f_{l,e}}{f_{co}}$                                          | No. layers                     | 1         | 1     | 2     | 2     |
|                                                                                                                                    | $f_{co} = f_{c,initial}$ (MPa) | 19        | 18    | 19    | 18    |
|                                                                                                                                    | $f_{cc}$ (MPa)                 | 22.62     | 21.62 | 26.24 | 25.24 |
|                                                                                                                                    | $f_{cc}/f_{co}$                | 1.19      | 1.20  | 1.38  | 1.40  |
|                                                                                                                                    | $f_{c,exp}$ (MPa)              | 23.67     | 23.49 | 24.00 | 23.72 |
|                                                                                                                                    | $f_{cc}/f_{c,exp}$             | 0.96      | 0.92  | 1.09  | 1.06  |
| ACI 549.4R-13 [14]<br>$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 3.1 K_a \frac{f_{l,e}}{f_{co}}$                                                 | No. layers                     | 1         | 1     | 2     | 2     |
|                                                                                                                                    | $f_{co} = f_{c,initial}$ (MPa) | 19        | 18    | 19    | 18    |
|                                                                                                                                    | $f_{cc}$ (MPa)                 | 20.22     | 19.22 | 21.43 | 20.43 |
|                                                                                                                                    | $f_{cc}/f_{co}$                | 1.06      | 1.07  | 1.13  | 1.14  |
|                                                                                                                                    | $f_{c,exp}$ (MPa)              | 23.67     | 23.49 | 24.00 | 23.72 |
|                                                                                                                                    | $f_{cc}/f_{c,exp}$             | 0.85      | 0.82  | 0.89  | 0.86  |
| Colajanni et al. [35]<br>$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_{l,e}}{f_{co}}} - 2 \frac{f_{l,e}}{f_{co}} - 1.254$ | No. layers                     | 1         | 1     | 2     | 2     |
|                                                                                                                                    | $f_{co} = f_{c,initial}$ (MPa) | 19        | 18    | 19    | 18    |
|                                                                                                                                    | $f_{cc}$ (MPa)                 | 23.49     | 22.47 | 27.34 | 26.27 |
|                                                                                                                                    | $f_{cc}/f_{co}$                | 1.24      | 1.25  | 1.44  | 1.46  |
|                                                                                                                                    | $f_{c,exp}$ (MPa)              | 23.67     | 23.49 | 24.00 | 23.72 |
|                                                                                                                                    | $f_{cc}/f_{c,exp}$             | 0.99      | 0.96  | 1.14  | 1.11  |
| Ombres [10]<br>$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 5.268 \frac{f_{l,e}}{f_{co}}$                                                          | No. layers                     | 1         | 1     | 2     | 2     |
|                                                                                                                                    | $f_{co} = f_{c,initial}$ (MPa) | 19        | 18    | 19    | 18    |
|                                                                                                                                    | $f_{cc}$ (MPa)                 | 26.42     | 25.42 | 33.85 | 32.85 |
|                                                                                                                                    | $f_{cc}/f_{co}$                | 1.39      | 1.41  | 1.78  | 1.83  |
|                                                                                                                                    | $f_{c,exp}$ (MPa)              | 23.67     | 23.49 | 24.00 | 23.72 |
|                                                                                                                                    | $f_{cc}/f_{c,exp}$             | 1.12      | 1.08  | 1.41  | 1.38  |

## Capitolul 7: Concluzii

### 7.1 Sinteza rezultatelor cercetarilor

Concluzii principale din fiecare capitol sunt prezentate în acest capitol.

#### Capitolul 1: Reabilitarea structurilor din beton armat

Din Capitolul 1 se pot trage mai multe concluzii. Deși betonul armat este un material durabil, pot apărea deteriorări care să genereze necesitatea din mai multe cauze a consolidării structurilor din beton. Tehnicile de intervenție pot fi aplicate la nivel local sau global pentru a crește rezistența, rigiditatea și ductilitatea elementelor existente din BA. Inginerul de structuri trebuie să stabilească cu atenție strategia de intervenție pentru a evita modurile de cedare neductile a structurii (de ex. grinzi puternice - stalpi slabi). Pe baza strategiei de intervenție și a tehnicii utilizate, poate fi ales materialul potrivit. Unele materiale pot fi utilizate pentru reparații, în timp ce altele sunt utilizate pentru consolidarea structurală. În practica actuală, există unele tehnici de consolidare care sunt preferate altora, în funcție de tipul elementului din BA și în funcție de performanța structurală, de criteriile economice și tehnologice.

#### Capitolul 2: Matricea pe bază de ciment, armată cu fibre (FRCM): compoziție și proprietăți

Concluziile din Capitolul Doi fac referire la sistemul cu matrice pe bază de ciment, armată cu fibre (FRCM). FRCM este un sistem relativ recent utilizat pentru consolidarea locală a elementelor din beton prin creșterea rezistenței și ductilității acestora. FRCM a fost dezvoltat ca o versiune îmbunătățită a sistemului clasic de Polimer armat cu fibre (FRP) prin soluționarea unei serii de probleme legate de matrice.

Structura FRCM (matrice din ciment, fibre de armare și interfață fibră-matrice) poate fi adaptată astfel încât proprietățile sale fizice și mecanice să se potrivească cu condițiile de mediu și de acțiuni mecanice. Acest lucru face ca sistemul FRCM să fie o soluție de consolidare mai fezabilă în comparație cu sistemul clasic FRP.

Pentru a asigura o bună calitate a aplicării sistemului FRCM, există mai multe aspecte tehnologice specifice care trebuie avute în vedere. Există mai multe verificări care se efectuează în timpul proceselor de pregătire a matricei, dar și în timpul aplicării sistemului FRCM.

**Capitolul 3: Studiu bibliografic asupra cercetarilor efectuate privind consolidarea stalpilor din beton armat** indica faptul ca sunt limitate studiile experimentale și numerice pe stalpi realizate din beton simplu cu secțiune pătrată. Majoritatea studiilor au fost realizate pe stalpi cu secțiune circulară din beton armat.

#### Capitolul 4: Cercetari experimentale, rezultate și discuții

Concluziile Capitolului Patru se bazează pe programul experimental care a inclus atât teste pe stalpi din beton, cât și teste pe beton.

O serie de șase stalpi din beton simplu cu rezistență redusă, confinate cu FRCM, a fost testată monoton la compresiune axială. Doi stalpi CP-3 și CP-5 au fost confinați cu un singur strat de FRCM, două straturi au fost utilizate pentru CP-4 și CP-6, iar pentru eșantioanele de referință CP-1 și CP-2 nu a existat confinare. Adăugarea unui strat de FRCM a condus în cazul eșantioanelor CP-3 și CP-5 la un spor de capacitate portanta de 13,17%, în raport cu capacitatea medie a eșantioanelor de referință CP-1 și CP-2. S-a obținut o creștere a capacității de 14,53% pentru eșantioanele cu două straturi, CP-4 și CP-6. Rezistența la compresiune axială obținută pentru stalpi a fost comparată cu rezistența inițială la compresiune  $f_{c,initial}$ , care este de aproximativ 0,9 din rezistența la compresiune cubica. Creșterea rezistenței la compresiune a

fost în medie mai mare cu 28% pentru stalpii cu un singur strat și de 29% pentru stalpii cu două straturi. Astfel, există o mică diferență în rezistența la compresiune între stalpii cu unul și cu două straturi. Sistemul FRCM a redus deformația eșantioanelor confinate, în comparație cu eșantioanele din referință. Două straturi de FRCM (CP-4, CP-6) au redus ușor deformația față de eșantioanele cu un singur strat (CP-3, CP-5). Modul de cedare al eșantioanelor confinate a fost mai puțin fragil în comparație cu cele neconfinate. Cedarea eșantioanelor confinate a fost observată la/aproape de mijlocul înălțimii stalpului. Cedarea este amorțită de o fisură poziționată la jumătatea înălțimii eșantionului care se dezvoltă pe verticală până la extremitățile stalpului când are loc cedarea.

## **Capitolul 5: Simulări FEM**

Concluziile Capitolului Cinci se bazează pe cele două serii de simulări care au fost efectuate cu scopul de a evalua: (1) precizia modelului matematic atribuit materialului în prezicerea răspunsului la efort unitar-deformație specifică la solicitarea de compresiune axială; (2) performanța structurală a stalpilor consolidați cu FRCM.

Pentru calibrarea materialelor de tip beton utilizate pentru fiecare stalp, modelul din Eurocodul 2 a fost adoptat pentru a genera curbele „experimentale” de efort unitar-deformație specifică. A fost utilizat modelul de beton cu plasticitate deteriorată, disponibil în Abaqus, și s-au obținut predicții precise.

Pentru fiecare stalp a fost dezvoltat un model numeric FEM și s-au obținut predicții exacte. De asemenea, au fost determinate atât rigiditatea axială, cât și sarcina axială maximă  $N_{max}$ . Modul de cedare a fost evaluat prin evaluarea eforturilor unitare maxime; distribuția fisurilor este similară cu rezultatele experimentale. Eforturile de confinare ale betonului au fost evaluate utilizând deformațiile medii. S-a ajuns la concluzia că: nivelul de confinare de-a lungul înălțimii stalpului este mai mare la capete datorită prezenței forțelor de frecare la contactul cu plăcile de oțel; distribuția eforturilor de confinare și nivelul de confinare în secțiunea transversală variază de la modelele neconfinate la cele confinate; o confinare mai bună se obține pentru modelele cu două straturi de FRCM, comparativ cu modelele cu un singur strat. Eforturile de tracțiune din câptușelile FRCM au fost evaluate utilizând efortul principal maxim. S-a ajuns la concluzia că: nivelul de efort de-a lungul înălțimii stalpului este mai mare în zona mediană a părții cu FRCM datorită deformărilor transversale ale betonului și mortarului confinat; distribuția eforturilor de tracțiune în secțiunea transversală variază de la colțuri până la zonele centrale; eforturi mai mici sunt înregistrate la colțuri; se obțin eforturi puțin mai mici pentru modelele cu două straturi de FRCM (CP-4 și CP-6); pentru modelele cu un singur strat de FRCM (CP-3 și CP-5), eforturile de tracțiune sunt mai concentrate în zona centrală a înălțimii stalpului.

## **Capitolul 6: Predicții analitice**

Se pot trage mai multe concluzii din Capitolul Șase. Modelele analitice au arătat diferite valori ale predicțiilor pentru creșterea rezistenței la compresiunea axială. Cea mai bună aproximare a fost obținută aplicând modelul propus de Di Ludovico și colab. [33]. Pentru a face o comparație cu rezultatele testelor, această metodă oferă predicții exacte pentru un strat de FRCM (raportul  $f_{cc}/f_{c,exp}$  este 0,88~0,92) și pentru două straturi de FRCM (raportul  $f_{cc}/f_{c,exp}$  este 0,96~1,00).

### **Bibliografie selectiva**

- [1] Ali A. Mohammed, Allan C. Manalo, Wahid Ferdous, Yan Zhuge, P.V. Vijay, Ashraf Q. Alkinani and Amir Fam. State-of-The-Art of Prefabricated FRP Composite Jackets for Structural Repair. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2020. Vol. 23, Issue 5, Pages 1244-1258. ISSN 2215-0986.
- [2] Dan Dubina. Seismic Retrofitting of Existing Structures Using Steel-Based Solutions. In International workshop organised within the framework of FRS2-CT-2014-00022 STEELEARTH, Timisoara, Romania, 23th November 2015.
- [3] Akram Jawdhari, Abheetha Peiris, Issam Harik. Experimental Study on RC Beams Strengthened with CFRP Rod Panels. Eng. Struct., 2018. Vol. 173: p. 693-705.
- [4] Luciano Ombres. Flexural Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened with a Cement Based High Strength Composite Material. Compos. Struct., 2011. Vol. 94: p. 143-155.
- [5] Angelo D'Ambrisi and Francesco Focacci. Flexural Strengthening of RC Beams with Cement-Based Composites. J. Compos. Constr., 2011. Vol. 15: p. 707-720.
- [6] Majid M.A. Kadhim, Ali Hadi Adheem and Mohammed J Altaee. Shear Strengthening of RC Beams with FRCM Technique. Int. J. Eng. Technology, 2018. Vol. 7: p. 629-635.
- [7] Meyyada Y. Alabdulhady, Lesley H. Sneed, Omar I. Abdelkarim and Mohamed A. ElGawady. Finite Element Study on the Behavior of RC Beams Strengthened with PBO-FRCM Composite Under Torsion. Composite Structures, 2017. Vol. 179: p. 326-339.
- [8] T.C. Triantafillou, C.G. Papanicolaou, P. Zissimopoulos and T. Laourdekis. Concrete Confinement with Textile Reinforced Mortar Jackets. ACI Structural Journal, January 2006. Vol. 103 (1): pp. 28-37.
- [9] A. Peled. Confinement of Damaged and Nondamaged Structural Concrete with FRP and TRC Sleeves. J. Compos. Constr., 2007. Vol. 11: p. 514-522.
- [10] L. Ombres. Concrete Confinement with a Cement Based High Strength Composite Material. Compos. Struct., 2014. Vol. 109: p. 294-304.
- [11] T. Trapko. Effect of Eccentric Compression Loading on the Strains of FRCM Confined Concrete Columns. Constr. Build. Mater., 2014. Vol. 61: p. 97-105.
- [12] T. Trapko. Behaviour of Fibre Reinforced Cementitious Matrix Strengthened Concrete Columns Under Eccentric Compression Loading. Materials&Design (1980-2015), 2014. Vol. 54: p. 947-954.
- [13] L. Ombres and Salvatore Verre. Structural Behaviour of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Strengthened Concrete Columns Under Eccentric Loading. Composites Part B: Engineering, June 2015. Vol. 75, Pages 235-249.

- [14] ACI (American Concrete Institute). Guide to Design and Construction of Externally Bonded FRCM Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures. ACI 549.4R-13: Farmington Hills, MI 48331, 2013. 978-0-87031-852-8.
- [15] Abdulla Jabr, Amr El-Ragaby and Faouzi Ghrib. Effect of the Fibre Type and Axial Stiffness of FRCM on the Flexural Strengthening of RC Beams. MDPI, Canada, January 2017.
- [16] A. Parvin and D. Brighton. FRP Composites Strengthening of Concrete Columns Under Various Loading Conditions. Toledo, OH 43606, USA: Polymers-O.A.J., 2014. ISSN 2073-4360.
- [17] Liviu Crainic and Mihai Munteanu. Seismic Performance of Concrete Buildings. CRC Press/Balkema, 2013. Vol.9. ISBN: 978-0-415-63186-0.
- [18] NAGY-GYÖRGY T. (2017). Reinforced concrete I – course notes. <https://www.ct.upt.ro/studenti/cursuri/nagy-gyorgy/Beton%20Armat%201%20Curs/>
- [19] <https://basiccivilengineering.com/2019/09/reinforced-concrete-and-importance-of-rebar.html>
- [20] <https://theconstructor.org/concrete/repair-rehabilitation-concrete-structure-failure-damage/13870/>
- [21] Meera Prasad and Gopika Moorthy. Flexural Strengthening of RC Beam Using Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM). India: IJSRSET, 2016. Vol. 2. 2394-4099.
- [22] Diana Arboleda. Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composites for Infrastructure Strengthening and Rehabilitation: Characterization Methods. Coral Gables, Florida: University of Miami Libraries Scholarly Repository, August 2014.
- [23] Abdulla Jabr, Amr El-Ragaby and Faouzi Ghrib. Effect of the Fiber Type and Axial Stiffness of FRCM on the Flexural Strengthening of RC Beams. MDPI, Fibers, 2017. Vol. 5, No. 1: 2.
- [24] Gustavo Tumialan Antonio DeLuca. FRCM systems: The Second Generation of Externally Bonded Composite System for Strengthening of Concrete and Masonry Structures. Journal of structural engineering, pp.22-24, 2014.
- [25] Alva Peled and Barzin Mobasher. Tensile Behaviour of Fabric Cement-Based Composites: Pultruded and Cast. Journal of Materials in Civil Engineering, April 2007. Vol. 19.
- [26] Alva Peled, Barzin Mobasher and Jitendra Pahilajani. Pultrusion of Fabric Reinforced High Flyash Blended Cement Composites. Proceedings, RILEM Technical Meeting, BEFIB, 2004. pp. 1473-1482.
- [27] Alva Peled and Barzin Mobasher. Properties of Fabric- Cement Composites Made by Pultrusion. Materials and Structures, October 2006. Vol. 39, No. 8, pp. 787-797.
- [28] Alva Peled, Sachiko Sueki and Barzin Mobasher. Bonding in Fabric-Cement Systems: Effects of Fabrication Methods. Journal of Cement and Concrete Research, 2006. Vol. 36, No. 9, pp. 1661-1671.
- [29] S.Palanivel, M.Sekar and N.Subramanian. Experimental And Numerical Investigation on Effect of Corner Radius on Confinement Effectiveness of GFRP and Lateral Ties Confined

Polyolefin Fibre Reinforced Concrete Prisms under Monotonic Axial Compression. Orlando, Florida, United States: International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, 2014. pp. 1303-1311. ISBN (print): 9780784413616.

[30] CEN - European Committee for Standardization. Eurocode 2. Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. Eurocode 2-1-1/2004, 2004.

[31] Abaqus, FEA. Abaqus 6.14 Documentation. Dassault Systemes, Providence, RI, USA, 2014.

[32] Cadar I., Clipii T., Agneta Tudor. Beton armat, ediția II-a, Ed. Orizonturi Universitare Timișoara, 2004.

[33] Di Ludovico M, Prota A, Manfredi G. Structural Upgrade Using Basalt Fibers for Concrete Confinement. ASCE J. Compos. Constr., 2010. Vol. 14(5): p. 541–552.

[34] Francisco J. De Caso y Basalo, Fabio Matta, Antonio Nanni. Fiber Reinforced Cement-Based Composite System for Concrete Confinement. Constr. Build. Mater., 2012. Vol. 32. p. 55–65.

[35] Piero Colajanni, Fabrizio De Domenico, Antonino Recupero, Nino Spinella. Concrete Columns Confined with Fibre Reinforced Cementitious Mortars: Experimentation and Modelling. Construction and Building Materials, 2014. Vol. 52. p. 375–384.