



**MINISTERUL EDUCAȚIEI
UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ**



**PROCEDURI AVANSATE DE CONSOLIDARE
A COLOANELOR PĂTRATE DIN BETON CU
COMPOZITE CFRP ÎN DIFERITE
CONFIGURAȚII**

REZUMAT



Doctorand

Ing. MSc. Ali Najm Abed AL-Magsoosi

Coordonator Doctorat

Prof. Dr. Ing. Dan Paul Georgescu

JULY 1, 2021

București

1. INTRODUCERE

1.1 Aspecte generale

Comportamentul și realizarea coloanelor reprezintă aspecte extrem de importante pentru siguranța clădirilor și a structurilor. [1]

În prezent, se observă pe scară largă că este necesară consolidarea și/sau re tehnologizarea structurilor din beton, iar cele mai des folosite elemente sunt grinzile și stâlpii/coloanele. Deteriorarea structurilor din beton armat (RC) are loc din diverse motive, cum ar fi: vârsta, acțiunile mecanice, supraîncărcarea, acțiunile seismice, modificări ale utilizării facilității sau modificări ale cerințelor impuse de cod. Confinarea coloanelor din beton este o metodă eficientă utilizată pentru a îmbunătăți capacitatea de compresie axială și ductilitatea coloanelor. [2]

Inițial, vechea tehnică de ranforsare/re tehnologizare a stâlpilor de rezistență se executa folosind căptușeli din oțel sau din beton acoperite cu mortar până la miezul din beton, însă spre începutul anilor 1990 s-a schimbat, folosindu-se tehnica de căptușire pe bază de polimer armat cu fibre (FRP). Implementarea materialelor din FRP, cum ar fi polimerul armat cu fibre de carbon (CFRP) pentru ranforsarea/re tehnologizarea coloanelor, a devenit tot mai apreciată în ultimii ani, nu numai pentru ușurința sa de aplicare și flexibilitate, ci mai ales pentru proprietățile sale fundamentale ca material, cum ar fi: raport mare între rezistență și greutate și rezistență la coroziune. [2]

Confinarea cu CFRP se realizează prin înfășurarea fibrelor în principal în direcția cercului pe axa longitudinală a coloanei, realizând confinarea pasivă; odată ce miezul de beton începe să se dilate din cauza fisurilor interne, se activează căptușeala din CFRP.

1.2 Definirea problematii

Până în prezent, în majoritatea clădirilor, secțiunile transversale ale coloanelor sunt pătrate și dreptunghiulare. Prin urmare, trebuie acordată atenție specială consolidării și reabilitării acestora pentru a menține siguranța infrastructurii clădirilor, în special pentru secțiunile dreptunghiulare/pătrate cu grosimea secțiunii ≥ 300 mm, deoarece studiile recente au demonstrat că respectivul comportament de compresie al coloanelor confinate din FRP este semnificativ afectat atunci când mărimea unei secțiuni transversale dreptunghiulare/pătrate crește [66]. Această lucrare urmărește tehnicile de ranforsare aplicate coloanelor de beton pătrate cu rezistență redusă, care nu sunt suple, cu secțiune transversală de (300 x 300 mm) supuse unei sarcini de compresie.

1.3 Scop și domeniu de aplicare

Obiectivul principal al acestui studiu este de a realiza o cercetare experimentală și analitică a efectelor ranforsării cu CFRP în diferite configurații asupra rezistenței și capacității de susținere a sarcinii a coloanelor pătrate din beton cu rezistență redusă cu secțiunea (300 x 300mm) supusă încărcării axiale prin căptușirea foilor din CFRP și cu/fără fâșii din CFRP pe lângă faptul că pintenul de ancorare din CFRP s-a combinat astfel încât să crească suprafața confinată a secțiunilor pătrate, deoarece în cercetările anterioare, presiunea de confinare a CFRP se aplică de obicei asupra colțurilor pătrate din beton și nu asupra întregului parametru. Această lucrare și-a propus în special următoarele:

- 1) Să cerceteze eficiența ranforsării CFRP a coloanelor pătrate din beton cu rezistență redusă;
- 2) Să cerceteze efectul numărului de straturi de CFRP asupra capacității finale de sarcină a coloanelor pătrate din beton confinat;
- 3) Să cerceteze efectul utilizării confinării totale și parțiale asupra aceluiasi eșantion și asupra unui eșantion diferit;
- 4) Să evalueze efectul combinării sistemului pe bază de pinteni de ancorare CFRP cu căptușirea coloanelor pătrate în vederea ranforsării lor.

- 5) Să evalueze rezultatele experimentale cu modelele de predicții teoretice ale (ACI 440-17, FIB-90-19, CNR-DT 200-13 și modele prezentate de autori)
- 6) Un studiu parametric cu elemente finite a fost realizat pentru a evalua și a oferi comparații cu rezultatele experimentale.

2. REVIZUIREA LITERATURII DE SPECIALITATE

2.1 Utilizarea materialelor de ranforsare din FRP

2.1.1 Ranforsare FRP legată extern (EBR)

Una dintre abordările de ultimă oră din prezent constă în utilizarea materialelor din FRP, care sunt considerate în prezent de către inginerii structurali drept materiale noi și considerabil promițătoare în rezistența în construcții. Materialele compozite pentru ranforsarea structurilor de inginerie civilă sunt disponibile în general sub formă de: [6]

- Fâșii subțiri unidirecționale (grosime de aproximativ 1 mm); și
- Foi sau țesături flexibile, realizate din fibre, cu una sau cel puțin două direcții diferite, respectiv.

Fig. 2-1 arată compresia dintre diagramele tipice de efort-tensiune ale oțelului și compozite FRP unidirecționale sub sarcină monotonă pe termen scurt.

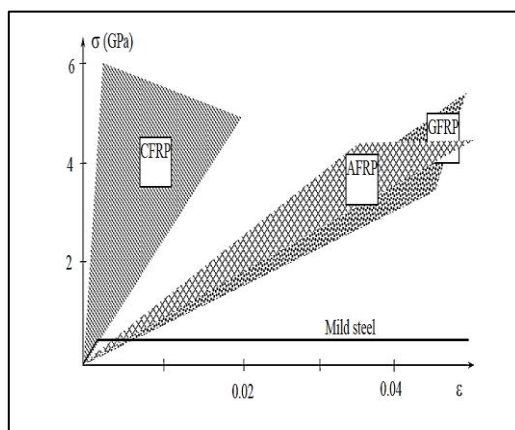


Fig. 2-1: Diagrame uniaxiale efort-tensiune pentru diferite FRP unidirecționale și oțel. CFRP = FRP de carbon, AFRP = FRP de aramidă, GFRP = FRP de sticlă. [6]

Pentru a asigura integritatea structurală totală a elementului ranforsat, este important să se utilizeze sisteme EBR FRP adecvate, iar proiectarea și executarea să se realizeze în mod corect. Starea elementului de beton înainte de ranforsare poate necesita tehnici de reparații înainte de aplicarea sistemului FRP EBR.

2.1.2 Avantajele și dezavantajele PRF

În general, materialele din FRP în comparație cu oțelul se caracterizează prin: [6]

- Rezistență excelentă la coroziune;
- Greutate redusă (1/4 până la 1/5 din oțel);
- Rigiditate adaptată cerințelor de proiectare;
- Rezistență chimică satisfăcătoare;
- Disponibilitate nelimitată în geometrie și dimensiuni;
- Capacitate mare de deformare; și
- Rezistență excelentă la oboseală și performanță de fluare/relaxare.

Cu toate acestea, compozitele pot avea anumite dezavantaje, cum ar fi:

- Comportament fragil, și anume elasticitate liniară la cedare fără cedare semnificativă (fără platou cedant) sau deformare plastică;
- Costul ridicat al materiilor prime;
- Coeficienți de expansiune termică incompatibili cu betonul; și
- Expunerea la temperaturi ridicate determină degradarea prematură a legăturii.

2.2. Utilizarea ancorelor din FRP pentru ranforsarea coloanelor de beton

Pintenii de ancorare sunt cunoscuți sub numele de ancore FRP sau ancore din fibră. Practic, sunt alcătuiți din șiruri de fibre cu un capăt legat în matricea compozită și celălalt capăt introdus în corpul de beton. Pot fi fabricați pentru a face față mai multor complexități geometrice, deoarece pot fi integrați perfect în matricea FRP ancorată. Un alt avantaj al utilizării pintenilor de ancorare este că pindenii pot fi fabricați din aceleași materiale FRP ca și țesătura legată extern, ceea ce facilitează construcția și elimină potențialele pericole de coroziune din alte materiale diferite. [47]

2.3 Beton comprimat axial confinat din FRP

2.3.1 Comportamentul betonului confinat

Este aprobat pe scară largă faptul că betonul confinat are o rezistență la compresie și o forță mai mare decât betonul neconfinat. De fapt, atunci când eșantioanele de beton sunt supuse încărcării axiale prin compresie, confinarea previne expansiunea betonului, rezultând o capacitate de încărcare mai mare. [8]

Prin urmare, până la apariția fisurilor longitudinale în beton, tensiunile din compozit sunt mici. Așa cum se arată în Fig. 2-2, curbele tipice de efort-tensiune ale betonului, bine confinat prin compozite FRP, constau în trei zone (elastică, de tranziție și zona plastică).

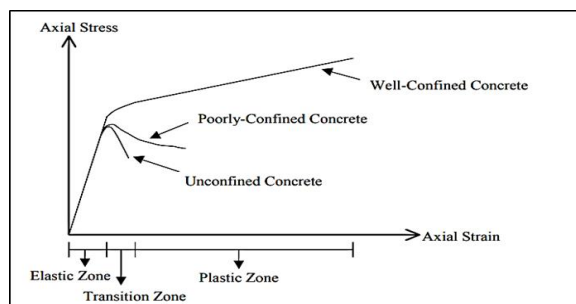


Fig. 2-2: Curbe tipice de efort-tensiune pentru beton confinat din FRP. [9]

În etapa inițială de încărcare, panta curbei de beton confinat este foarte asemănătoare cu betonul neconfinat, deoarece betonul oferă o expansiune mai mică sub un nivel mic de încărcare și aceasta nu activează presiunea în căptușeala FRP. [9]

Odată ce rezistența de vârf a betonului neconfinat a fost atinsă, zona plastică se dezvoltă imediat. La acest nivel de încărcare, betonul începe să se expandeze rapid și duce la activarea căptușelii din FRP. În zona plastică, o creștere mică a efortului generează o creștere considerabilă a expansiunii în lateral (în comparație cu cea elastică). [9]

2.3.2 Diverse constatări ale cercetării

Confinarea externă a coloanelor de beton cu polimer armat cu fibre (FRP) a fost una dintre sarcinile care m-au atras în ingineria civilă, realizată prin studii experimentale și teoretice.

M. Reza Esfahani și M. Reza Kianoush (2005) au prezentat rezultatele unui studiu referitor la rezistența la compresiune axială a coloanelor ranforsate cu folie de FRP. Partea experimentală a inclus testarea a trei coloane similare din beton armat circular (805 cu $D = 203\text{mm}$) ranforsate cu folie din FRP și trei coloane pătrate similare ($180 \times 180 \times 805\text{mm}$), două cu colțuri ascuțite, iar cealaltă cu colțuri rotunjite. Toate eșantioanele au aceeași armătură de oțel. [14]

Autorii au concluzionat că învelișul din FRP poate crește semnificativ rezistența axială și ductilitatea coloanelor circulare. Aplicarea învelișului FRP nu poate crește rezistența axială a coloanelor pătrate. Cu toate acestea, în situația în care colțurile coloanelor pătrate sunt rotunjite corespunzător, rezistența axială și ductilitatea coloanelor cresc considerabil. [14]

M. Razavi, A. Mohd, Y. Ahmad și K. Koushfar (2013) au realizat un test experimental pentru a examina efectul eficienței confinării asupra comportamentului prismelor circulare și pătrate de beton confinat cu compozite GFRP și CFRP și supuse unei încărcări de compresie până la cedare. Rezultatele au dovedit că prismele confinate cu compozite CFRP au obținut o rezistență la compresiune mai mare decât prismele confinate cu compozite GFRP. Cercetătorii au observat că prismele cu secțiuni circulare au atins o rezistență mai mare decât toate prismele cu secțiuni pătrate. [20]

Sushil S., Urmil V. și Himat S. (2013) au prezentat rezultatele testelor experimentale efectuate pe coloane pătrate din beton armat cu diferite colțuri rotunjite și confinate cu compozite GFRP supuse încărcării prin compresie până la cedare. Cercetarea experimentală a acestui studiu a dovedit că acele coloane confinate cu colțuri rotunjite s-au comportat mai bine decât coloanele de control din punct de vedere al îmbunătățirii rezistenței finale. În plus, coloanele confinate cu colțuri rotunjite egale cu 25 mm au avut o rezistență mai mare decât celelalte coloane confinate cu colțuri rotunjite egale cu 5 mm. [22]

C. S. Lewangamage, C. K. Rankoth și M. T. R. Jayasinghe (2017) au efectuat un studiu experimental pe stâlpi pătrați de beton armat și nearmat, confinat complet și parțial cu foi/fâșii din CFRP. Raportul volumetric al fâșii lor din CFRP a fost menținut constant pentru a studia efectul modelului de aranjare a căptușelii. Rezultatele au arătat că toate coloanele complet și parțial confinate au înregistrat o creștere considerabilă a rezistenței și ductilității. În plus, s-a observat că acele creșteri ale rezistenței și ductilității ar varia în funcție de locul unde sunt poziționate fâșiile respective. [26]

Xian Li și colab. (2017) [51] în acest studiu, cercetătorii au examinat efectul raportului dintre aspectul transversal și armătura internă din oțel asupra eficienței de confinare dată de o combinație de înfășurări FRP cu ancore FRP pentru coloane dreptunghiulare din BA. Rezultatele testului arată că învelișurile din CFRP au îmbunătățit rezistența la compresiune a coloanelor dreptunghiulare confinate din BA cu CFRP chiar și cu un raport de aspect mare de 2,25; cu toate acestea, nivelurile de îmbunătățire a rezistenței au scăzut odată cu creșterea raportului de aspect. Ancorele din CFRP au fost eficiente pentru a împiedica betonul să se ridice și astfel au îmbunătățit eficiența confinării învelișurilor din CFRP.

3. PROGRAM EXPERIMENTAL

3.1 Detalii privind eșantioanele

Un număr total de coloane prismatice din beton de 8 ($30 \times 30 \times 100$) cm cu o rază de colț de 3cm (se recomandă rotunjirea acestora la o rază de cel puțin 2 cm în conformitate cu CNR-DT 200 R1/2013) [52] a fost testat cu diferite aranjamente CFRP. Programul experimental a fost realizat în laboratorul Universității Tehnice de Construcții din București. Detaliile privind eșantioanele sunt prezentate în Fig.3-1 (a - f).

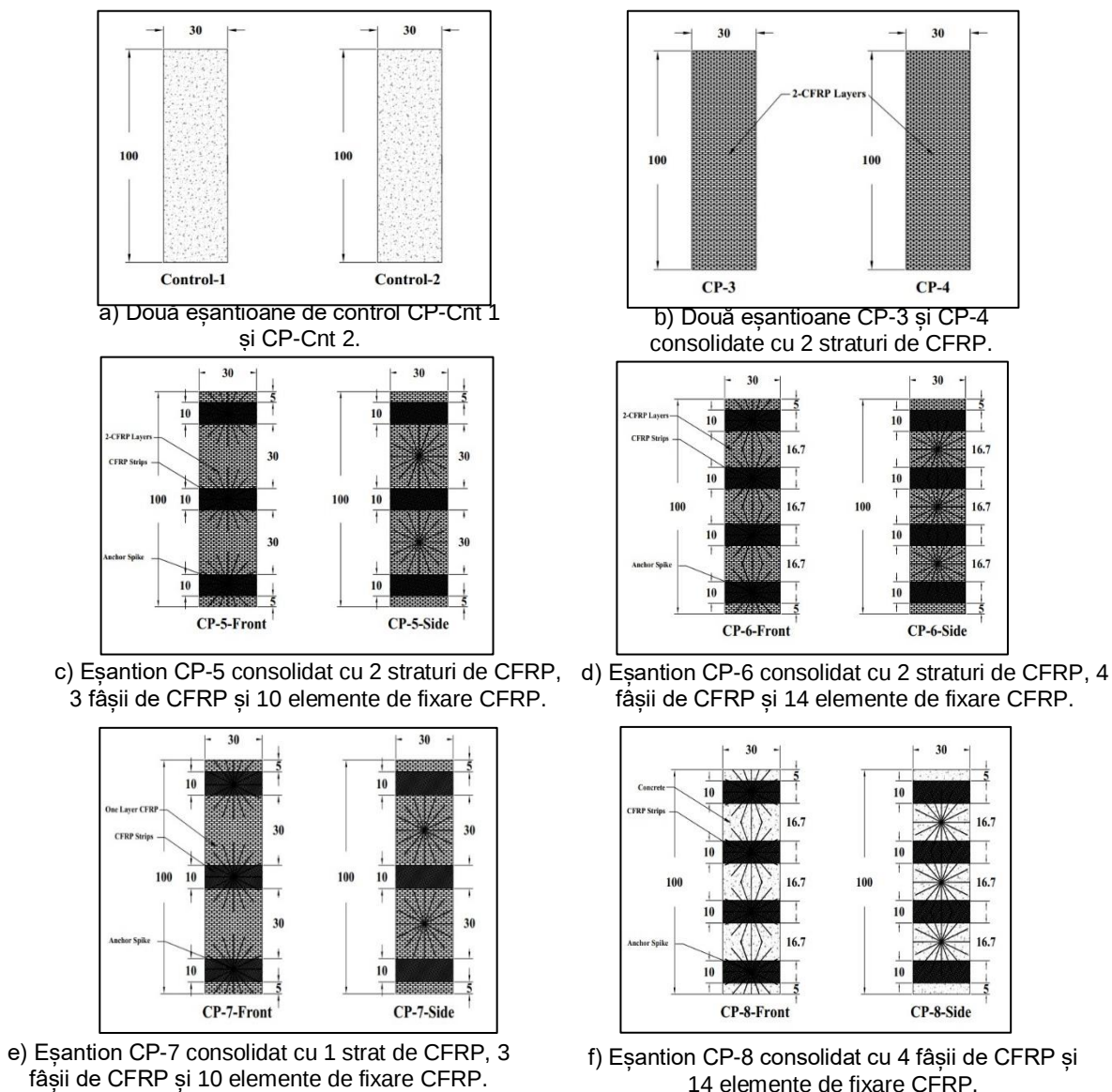


Fig. 3-1: Detalii privind eșantioanele testate.

Notă: toate dimensiunile coloanelor testate din figuri sunt exprimate în centimetri.

3.2 Materiale din beton

3.2.1 Ciment

În această lucrare s-a folosit ciment Portland obișnuit de tip CEM II B-LL 32,2 R.

3.2.2 Agregate

În această lucrare, s-au folosit agregate fine și grosiere cu dimensiuni între (0/4mm - 8/16mm), furnizate de compania AGREMIX (companie locală)

3.2.3 Plastiproof tip A (amestec)

PLASTIPROOF este un amestec lichid care acționează ca agent de impermeabilizare și plastifiant pentru beton (ASTM C-494: tip A) [55].

3.2.4 Apă

Apa obișnuită de la robinet a fost utilizată în scopuri de amestecare.

3.3 Proportia materialelor

În această lucrare au fost utilizate amestecuri proporționale ca greutate pentru a obține o rezistență la beton vibrat de aproximativ (beton cu rezistență redusă cu o rezistență la

compresiune medie de 28 de zile a cubului, de aproximativ C16/20), greutatea materialelor pentru beton este ilustrată în Tabelul (3- 1).

Tabelul 3-1: Proporțiile amestecului de beton.

Clasă	Ciment	Dozare ciment (kg/m ³)	Apă (L)	Aditiv Plastiproof 0.5% (L)	Agregate (kg)	0-4 (kg)	4-8 (kg)	8-16 (kg)
C 16/20	CEM II B-LL 32,5 R	280	188.33	1.26	1890	794	378	718

3.4 Testarea betonului proaspăt

Proprietățile betonului proaspăt pot fi examinate pe baza testului de tasare, care este un test standard de lucrabilitate pentru beton în conformitate cu EN 12350-2: 2009 [56], înălțimea de tasare a betonului compactat a fost măsurată și a fost de 13,5 mm, în conformitate cu EN 12350-2: 2009 [56].

3.5 Proprietăți mecanice ale betonului întărit

3.5.1 Rezistența la compresiune

Pentru fiecare lot, rezistența betonului a fost determinată prin testarea a șase cuburi standard după 28 de zile. Testele de compresie au fost efectuate folosind aparatul universal de testare. Tabelul 3-2 prezintă valorile medii ale rezistenței la compresiune ale cuburilor de beton la 28 de zile pentru fiecare lot.

Tabelul 3-2: Rezistența la compresiune a cuburilor de beton.

Nr. lot	Nr. Eșantion ID	$f_{c, cub} (MPa)$
1	CP-Cnt 1	22.5
	CP-3	
2	CP-Cnt 2	24.5
	CP-4	
3	CP-5	24.2
	CP-6	
4	CP-7	23.6
	CP-8	

3.6 Proprietățile materialelor CFRP

3.6.1 foi / fâșii CFRP

Țesătura din fibre de carbon MapeWrap C UNI-AX 240 rezistentă la tracțiune a fost folosită pentru căptușire/fâșii. Grosimea nominală a materialelor de CFRP a fost de 0,133 mm. Proprietățile mecanice ale foilor flexibile de CFRP au fost preluate din specificațiile de fabricație și sunt prezentate în Tabelul 3-3.

Tabelul 3-3: Proprietățile tehnice ale MapeWrap C UNI-AX 240.

Tip foaie de CFRP	Rezistența la tracțiune (MPa)	Modul de elasticitate (MPa)	Alungire la cedare (%):	Grosimea echivalentă a materialului uscat (mm)
MapeWrap C UNI-AX 240	4,830	252,000	2	0.133

3.6.2 MapeWrap C FIOCCO 8mm (pinten de ancorare)

MapeWrap C FIOCCO 8mm a fost folosit ca element de fixare din CFRP. Proprietățile tehnice ale CFRP (MapeWrap C FIOCCO) au fost preluate din specificațiile de fabricație și prezentate în Tabelul 3-4.

Tabelul 3-4: Proprietățile tehnice ale CFRP (MapeWrap C FIOCCO).

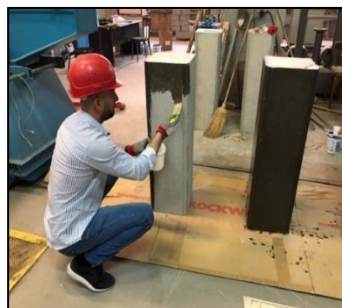
Conectori pinteni de ancorare pentru CFRP	Rezistența la tracțiune (MPa)	Modul de elasticitate (MPa)	Diametrul corzii din carbon (mm)
MapeWrap C FIOCCO	4,830	230.000	8

3.7 Căptușirea compozitelor din CFRP și montarea pintenilor de ancorare

În Fig. 3-2 (a-d) se arată etapele de învelire a foilor de CFRP.



a) Curățarea suprafeței de beton.



b) Aplicarea a două straturi de Amorsă MapeWrap 1.



c) Aplicarea rășinii epoxidice MapeWrap



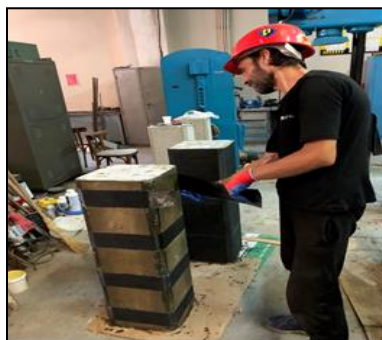
d) Învelirea foilor de CFRP cu fibrele orientate în direcția arătată de cerc

Fig. 3-2: Etapele de învelire a foilor din CFRP.

În Fig.3-3 se arată etapele de montare a conectorilor MapeWrap C FIOCCO.



a) Învelirea fâșiilor de CFRP.



b) Învelirea fâșiilor de CFRP.



c) Executat orificii pentru elementele de fixare.



d) Inserarea corzii MapeWrap FIOCCO în fiecare orificiu.



e) Injectarea fixatorului Mapefix VE SF 300 pentru a umple orificiile.



f) Aplicarea unui strat de MapeWrap 31 peste substrat, apoi lărgirea tuturor fibrelor.

Fig. 3-3: Etapele de montare a elementelor de fixare din CFRP.

3.8 Măsurători ale sarcinilor

Testul experimental a fost efectuat folosind o mașină de testare universală cu o capacitate maximă de 3000 KN, disponibilă în laboratorul Universității Tehnice de Construcții din București. Mașina este prezentată în Fig. 3-4.



Fig. 3-4: Mașină universală de testare folosită pentru a testa coloanele din beton.

3.9 Măsurători ale eforturilor axiale

Eforturile axiale au fost măsurate folosind un cadran mecanic, iar citirile s-au făcut din față și din spate, după cum se arată în Fig. 3-5.



Fig. 3-5: Măsurarea efortului axial.

3.10 Procedura de testare

Toate eșantioanele au fost supuse unei sarcini de compresie axială monotonă până la cedare, folosindu-se o mașină de testare universală electro-hidraulică, cu o capacitate de încărcare verticală de 3000 KN. Sarcina axială a fost înregistrată la fiecare creștere a sarcinii, de 200 KN, în primele 1000KN și la fiecare 100KN de la 1100KN până la sarcina de cedare. Sarcina a fost aplicată treptat. La fiecare creștere a sarcinii, citirile au fost înregistrate manual. Tensiunile axiale au fost înregistrate pentru fiecare creștere a sarcinii de până la aproximativ $0,75P_u$, din cauza utilizării cadranelor mecanice pentru citirea tensiunii, estimându-se cedarea explozivă a coloanelor testate, făcând testul periculos și complex.

4. REZULTATELE TESTULUI

4.1 Observații constatate în urma testului și moduri de cedare

4.1.1 Coloane neconfinat

Performanța și modul de cedare finală a coloanelor neconfinat (CP-Cnt1 și CP-Cnt2) sub sarcină axială au fost cele estimate. În primele etape de încărcare se poate presupune un comportament elastic liniar al betonului, odată cu creșterea sarcinii axiale aplicate, micro-fisurarea miezului de beton va începe să se genereze și să se propage. În consecință, se produce o diminuare a rigidității betonului, micro-fisurile se unesc între ele, ducând treptat la fisuri longitudinale vizibile paralele cu direcția de încărcare. Pentru aceste două coloane, cedarea s-a produs brusc din cauza fisurilor longitudinale cu direcția de încărcare, urmate de sfărâmarea betonului.

Pentru coloana (CP-Cnt1) prima fisură a fost observată la 1500KN de încărcare și a cedat la 1830KN, în timp ce pentru (CP-Cnt2) prima fisură a fost observată la 1550KN de încărcare și a cedat la 1920KN. Fig. 4-1 arată modul de cedare a coloanelor neconfinat.



a) Coloană din beton (CP-Cnt1)



b) Coloană din beton (CP-Cnt2)

Fig. 4-1: Modul de cedare al coloanelor neconfinat.

4.1.2 Coloane confinate

Formele finale de cedare ale eșantioanelor din beton armat pot fi văzute în Fig.4-2 din (a - f). Coloanele ranforsate s-au comportat foarte asemănător cu cele din beton neconfinat în timpul etapelor inițiale ale sarcinii aplicate, deoarece în zona elastică, betonul oferă o expansiune mică sub un nivel mic de sarcini și, prin urmare, nu activează căptușeala pentru a produce presiune de confinare.

Odată cu creșterea sarcinii axiale, are loc propagarea microfisurării miezului de beton, rezultând în expansiunea laterală a betonului, care activează căptușeala din CFRP și eforturile încep transferul din betonul expandat către căptușeala din CFRP. În timpul creșterii sarcinii aplicate până la 85% din sarcina de cedare, se puteau auzi anumite zgomote (prima crăpătură a CFRP), indicând tensionarea sistemului CFRP și crăparea rășinii epoxidice, ceea ce arată că rășina a cedat, lăsând doar fibrele de carbon să preia tensiunea din cerc. Toate coloanele din beton armat supuse testării au cedat prin ruperea foii/fâșii de fibre de carbon aproape de punctul mediu al înălțimii eșantionului și/sau în limita marginilor coloanei. În plus, cedarea fiecărei coloane ranforsate s-a produs brusc cu un sunet de explozie și cu sfărâmarea betonului. Cedarea bruscă, prin explozie, presupune eliberarea unei valori excepționale de energie datorită presiunii de confinare asigurate prin confinare sistemului CFRP.

Pentru coloana CP-3, prima fisură a CFRP a fost înregistrată la 1925KN de încărcare și a cedat la 2250KN, în timp ce pentru coloana CP-4 prima fisură a CFRP a fost observată la 2250KN și a cedat la 2350KN. Pentru coloana CP-5 prima fisura CFRP a fost înregistrată la 1950KN de încărcare și a cedat la 2150KN, în timp ce coloana CP-6 a înregistrat prima fisură a CFRP la 2007KN și a cedat la 2190KN. Pentru coloana CP-7 prima fisură a CFRP a fost înregistrată la 1850KN de încărcare și a cedat la 2200KN, în timp ce pentru coloana CP-8 prima fisură a CFRP a fost observată la 1720KN și a cedat la 2070KN.



Fig. 4-2 a: Mod de cedare a coloanei ranforsate (CP-3).



Fig. 4-2 b: Mod de cedare a coloanei ranforsate (CP-4).

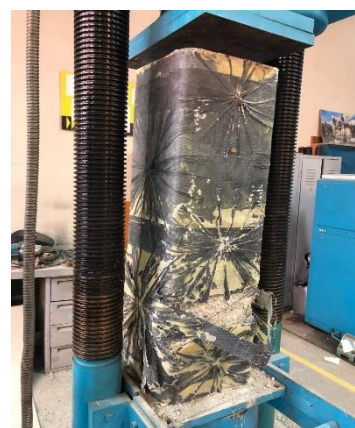


Fig. 4-2 c: Mod de cedare a coloanei ranforsate (CP-5).



Fig. 4-2 d: Mod de cedare a coloanei ranforsate (CP-6).



Fig. 4-3 e: Mod de cedare a coloanei ranforsate (CP-7).



Fig. 4-3 f: Mod de cedare a coloanei ranforsate (CP-8).

Fig. 4-2: Mod de cedare a coloanelor ranforsate testate.

4.2 Capacitatea de încărcare și rezistența la compresiune

Tabelul 4-1 indică rezultatele în ceea ce privește îmbunătățirea rezistenței la compresiune axială și a capacității de încărcare în raport cu eșantioanele supuse verificării. Creșterea maximă a capacității de compresie și de încărcare realizată în CP-3 și CP-4 (ambele coloane confinate cu 2 straturi de CFRP) în ceea ce privește controlul au fost de 23% și respectiv 22%, în timp ce creșterea minimă realizată în CP-8 parțial confinat cu 4 fâșii CFRP și 14 ancore CFRP) a fost de 10%, în timp ce cele obținute CP-5 (confinat cu 2 straturi de CFRP, 3 fâșii CFRP și 10 ancore CFRP), CP-6 (confinat cu 2 straturi de CFRP, 4 fâșii CFRP și 14 ancore CFRP) și CP7 (confinat cu 1 strat de CFRP, 3 fâșii CFRP și 10 ancore CFRP) au fost de 14%, 16%, 17% și respectiv.

Tabelul 4-1: Rezultate Experimentale.

Nr.Eșantion*	$f_{c, cube}$ MPa	$f_{c, cyl} =$ $0.8 f_{c, cube}$ MPa**	Detalii de ranforsare pe bază de CFRP	$P_{u, exp}$ (KN)		$\frac{P_{u, exp, cc}}{P_{u, exp, co}}$	$f_{c, exp} =$ $\frac{P_{u, exp}}{A_c (300 \times 300) mm}$ MPa
CP-Cnt 1	22.5	18	-	1830	Av. (1875)	-	20.33
CP-Cnt 2	24.54	19.6	-	1920		-	21.33
CP-3	22.5	18	2 straturi CFRP	2250***		1.23	25
CP-4	24.5	19.6	2 straturi CFRP	2350***		1.22	26.11
CP-5	24.2	19.3	2 straturi CFRP +3 fâșii CFRP +10 elemente de fixare CFRP	2150***		1.14	23.88
CP-6	24.2	19.3	2 straturi CFRP +4 fâșii CFRP +14 elemente de fixare CFRP	2190***		1.16	24.33
CP-7	23.6	18.8	1 strat CFRP +3 fâșii CFRP +10 elemente de fixare CFRP	2200***		1.17	24.44
CP-8	23.6	18.8	4 fâșii CFRP +14 elemente de fixare CFRP	2070***		1.10	23

*: Aria secțiunii transversale a tuturor coloanelor testate este de 300 x 300mm.

** : Rezistența echivalentă la compresiune a cilindrului $f_{c, cyl} = 0.8 f_{c, cub}$, EN-206:2013 [57]

*** : Capacitatea maximă de încărcare a CP-3 în comparație cu CP-Cnt 1, deoarece provine din același lot de beton și are aceeași rezistență la compresiune. La fel s-a întâmplat pentru CP-4 comparativ cu CP-Cnt 2. În timp ce pentru CP-5, CP-6, CP-7 și CP-8 au fost comparate cu valorile medii ale puterii CP-Cnt 1 și CP-Cnt 2.

În Fig. 4-3 până în Fig. 4-9 se arată sarcinile axiale – curbele de deformare axială a eșantioanelor neconfinat și confinat, respectiv.

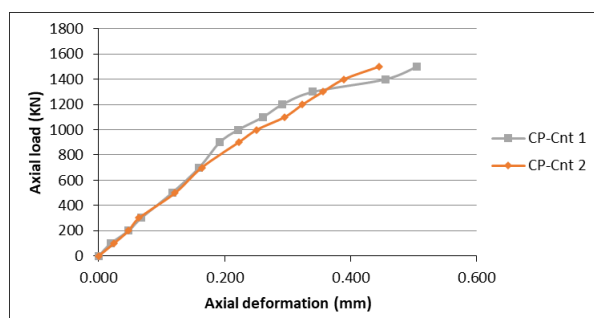


Fig. 4-3: Sarcină – deformare axială pentru coloanele testate (CP-Cnt 1 și CP-Cnt 2).

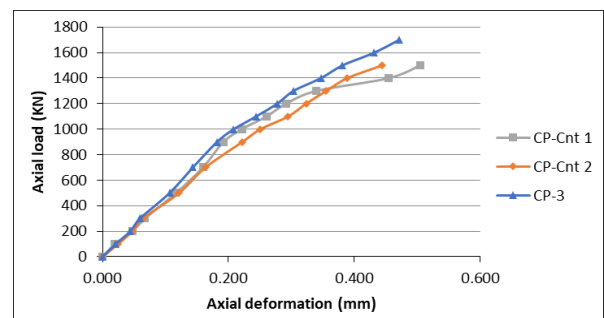


Fig. 4-4: Sarcină – deformare axială pentru coloanele testate (CP-Cnt 1, CP-Cnt 2 și CP-3).

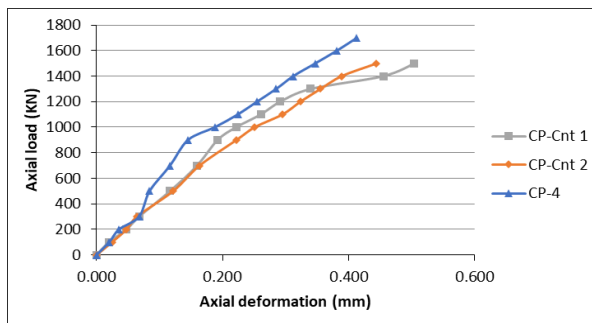


Fig. 4-5: Sarcină – deformare axială pentru coloanele testate (CP-Cnt 1, CP-Cnt 2 și CP-4).

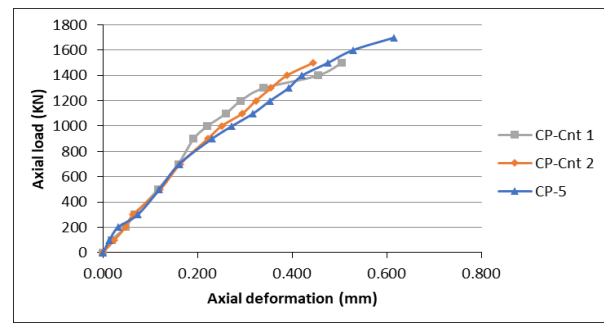


Fig. 4-6: Sarcină – deformare axială pentru coloanele testate (CP-Cnt 1, CP-Cnt 2 și CP-5).

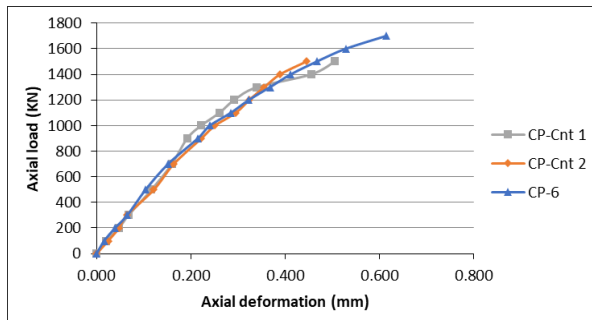


Fig. 4-7: Sarcină – deformare axială pentru coloanele testate (CP-Cnt 1, CP-Cnt 2 și CP-6).

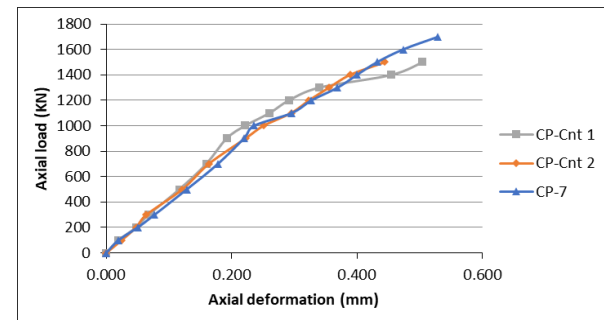


Fig. 4-8: Sarcină – deformare axială pentru coloanele testate (CP-Cnt 1, CP-Cnt 2 și CP-7).

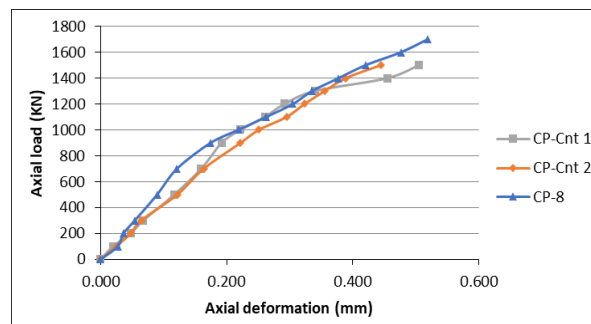


Fig. 4-9: Sarcină – deformare axială pentru coloanele testate (CP-Cnt 1, CP-Cnt 2 și CP-8).

Notă: Toate cifrele conțin valori înregistrate de până la aproximativ $0,75P_u$ din cauza utilizării cadranului mecanic, citirile deformării axiale au fost înregistrate pentru aproximativ 75% din sarcina axială finală (sarcina de cedare).

Din curbe, se poate observa că eșantioanele ranforsate s-au comportat foarte asemănător cu cele neranforsate în etapele de încărcare inițiale, deoarece în zona elastică betonul oferă o expansiune mică sub un nivel mic de sarcini și, astfel, nu activează căptușeala pentru a produce presiunea de confinare în miezul betonului; odată cu creșterea nivelului de încărcare aplicat, micro-fisurile încep să se propage în miezul betonului, ceea ce face ca betonul să se extindă lateral, activând căptușeala din CFRP. Atunci începe comportamentul plastic al zonei de creștere.

5. PREDICȚIA TEORETICĂ A CAPACITĂȚII DE SUSȚINERE A SARCINII A CULOANELOR DIN BETON

5.1 Aspecte generale

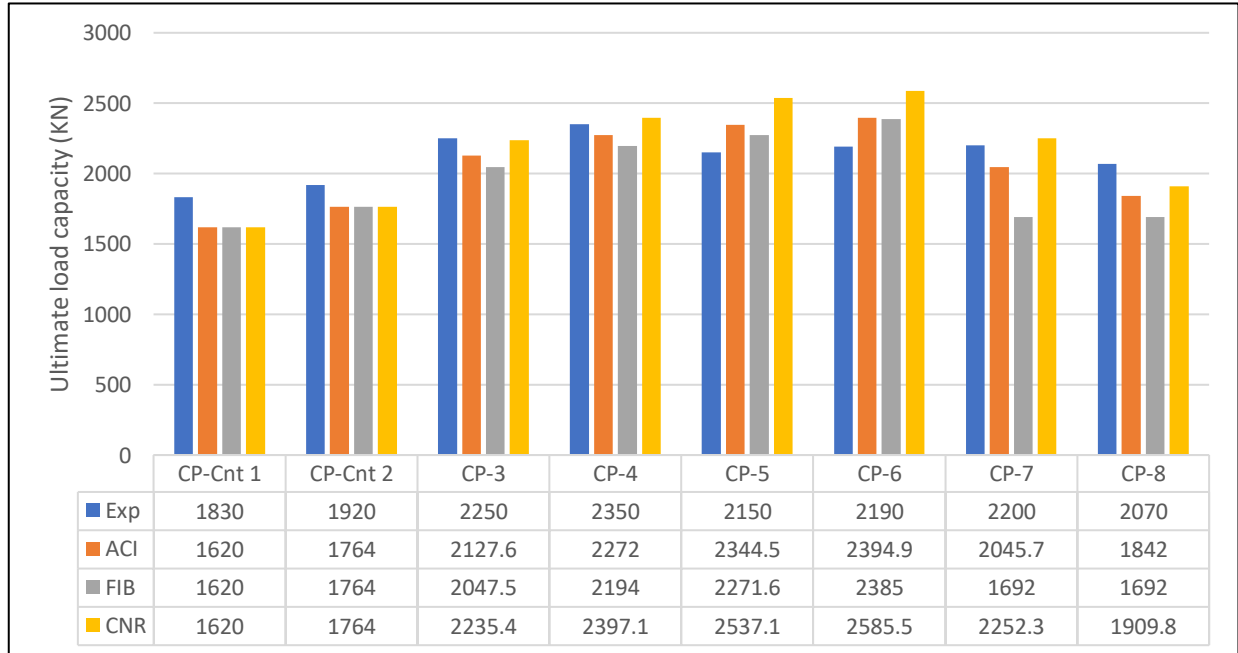
În această parte a studiului, au fost prezentate calculele rezistenței finale la compresiune și a capacității de susținere a sarcinii a coloanelor din beton testate prin predicțiile teoretice ale modelelor raportate prin următoarele coduri și de următorii cercetători:

1. ACI 440.2R-2017; [59]
2. Buletin FIB-90-2019; [60]
3. CNR-DT 200 R1-2013; [52]
4. Modelul Lam și Teng 2003b; [62]
5. Modelul Ouyang și Liu 2007; [63]
6. Modelul Wang și colab. 2016; și [66]
7. Modelul T. C. Triantafillou și colab. (2015). [70]

Tabelul 5-1 și Fig. 5-1 prezintă o comparație între rezultatele experimentale din acest studiu și predicțiile teoretice pe baza a trei coduri ACI 400.2R-17, Buletin FIB-90-19 și CNR-DT 200 R1-13, în timp ce Tabelul 5-2 și Fig. 5-2 prezintă o comparație între rezultatele experimentale din acest studiu și predicțiile teoretice pe baza a patru modele prezentate de autorii menționați mai sus.

Tabelul 5-1: Comparație între previziunile experimentale și teoretice pe Coduri.

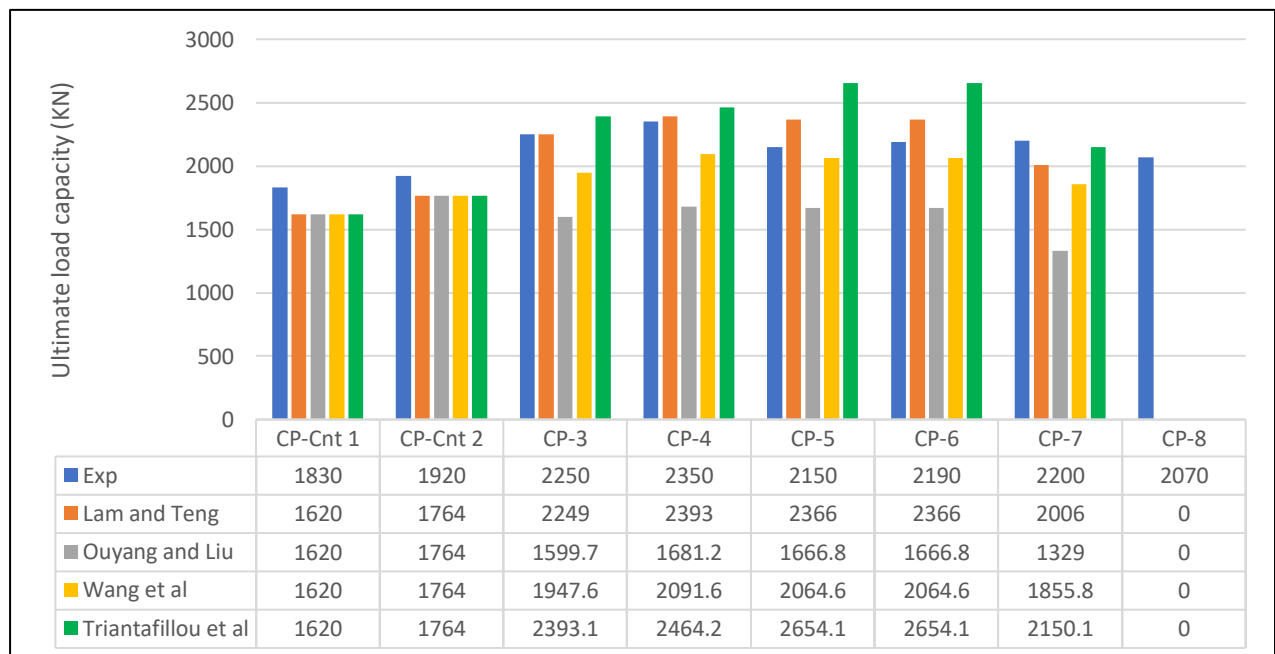
Nr. Eșantion	$P_{u,exp}$ (KN)	$P_{u,ACI}$ (KN)	$P_{u,exp}/P_{u,ACI}$	$P_{u,FIB}$ (KN)	$P_{u,exp}/P_{u,FIB}$	$P_{u,CNR}$ (KN)	$P_{u,exp}/P_{u,CNR}$
CP-Cnt 1	1830	1620	1.13	1620	1.13	1620	1.13
CP-Cnt 2	1920	1764	1.08	1764	1.08	1764	1.08
CP-3	2250	2127.6	1.05	2047.5	1.09	2235.4	1.006
CP-4	2350	2272	1.03	2194	1.07	2397.1	0.98
CP-5	2150	2344.5	0.91	2271.6	0.94	2537.1	0.84
CP-6	2190	2394.9	0.91	2385	0.91	2585.5	0.84
CP-7	2200	2045.7	1.07	1692	1.30	2252.3	0.97
CP-8	2070	1842	1.12	1692	1.22	1909.8	1.08

**Fig. 5-1:** Comparație între previziunile experimentale și teoretice pe Coduri.

Tabelul 5-2: Comparație între previziunile experimentale și teoretice pe autori.

<i>Nr.Eșantion</i>	$P_{u, exp}$ (KN)	$P_{u, Lam}$ and Teng (KN)	$P_{u, exp}$ / P_u , Lam și Teng	P_u , Ouyang și Liu (KN)	$P_{u, exp}$ / P_u , Ouyang și Liu	P_u , Wang et al (KN)	$P_{u, exp}$ / P_u , Wang et al	P_u , Triantafillou et al (KN)	$P_{u, exp}$ / P_u , Triantafillou et al
CP-Cnt 1	1830	1620	1.3	1620	1.3	1620	1.3	1620	1.3
CP-Cnt 2	1920	1764	1.08	1764	1.08	1764	1.08	1764	1.08
CP-3	2250	2249	1.00	1599.3	1.40	1947.6	1.15	2393.1	0.94
CP-4	2350	2393	0.98	1681.2	1.39	2091.6	1.12	2464.2	0.95
CP-5	2150	2366	0.90	1666.8	1.29	2064.6	1.04	2654.1	0.81
CP-6	2190	2366	0.92	1666.8	1.31	2064.6	1.06	2654.1	0.82
CP-7	2200	2006	1.09	1329	1.65	1855.8	1.18	2150.1	1.02
CP-8	2070	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Notă: NA, înseamnă că tehnica de ranforsare a CP-8 nu a fost aplicabilă modelelor teoretice de predicție prezentate de cercetători.

**Fig 5-2:** Comparație între previziunile experimentale și teoretice pe autori.

6. MODELAREA ȘI UTILIZĂRILE ELEMENTELOR FINITE

6.1 Aspecte generale

În această parte a studiului, un model tridimensional de formulare a elementelor finite neliniare a fost prezentat folosind ANSYS-16.1 (program de calculator) pentru a analiza coloanele din beton cu rezistență redusă cu secțiune pătrată, ranforsate cu compozite CFRP în diferite configurații.

S-a făcut o comparație între rezultatele obținute din analiza elementelor finite (FEA) și datele experimentale.

Studiul parametric a fost efectuat pentru a studia impactul celor mai importanți parametri, cum ar fi: rezistența la compresiune a betonului, grosimea straturilor de CFRP și prezența armăturii din oțel asupra performanței coloanelor modelate supuse sarcinii de compresie.

6.2 Verificarea coloanelor pătrate de beton testate ranforsate cu CFRP

Eșantioanele de coloană testate au fost analizate pe baza a FEA. Un total de patru coloane au fost selectate din testul experimental al acestui studiu pentru a fi modelate pe bază de FEA. Toate coloanele aveau aceeași dimensiune a secțiunii transversale, de 300 × 300 și 1000 mm înălțime.

6.3 Rezultatele analizei numerice (capacitatea de încărcare finală)

Sarcinile finale ale coloanelor modelate au fost specificate prin faptul că respectivele coloane nu mai pot suporta sarcini suplimentare, după cum o arată cedarea de convergență din programul ANSYS, care nu a reușit să găsească nicio soluție. Tabelul 6-1 prezintă sarcina finală a coloanelor modelate obținute folosind programul de calculator (ANSYS 16.1) cu rezultatele testelor experimentale.

Tabelul 6-1: Analiza experimentală și numerică (ANSYS) a capacităților sarcinilor finale.

Nr. Coloană	Sarcina finală kN		$P_{u,Exp} / P_{u,Ansys}$
	$P_{u,Exp}$	$P_{u,Ansys}$	
CP-Cnt 1	1830	1680	1.09
CP3	2250	2193	1.02
CP-5	2150	2260	0.95
CP-7	2200	2111	1.04

Curbele axiale sarcină-deformare axială ale coloanelor CP-Cnt 1, CP-3, CP-5 și CP-7, dobândite din analiza numerică, împreună cu curbele experimentale, sunt prezentate și comparate în Fig. 6-1. Aceste cifre dezvăluie un bun acord între rezultatele experimentale și

elementele finite ale sarcinilor axiale-deformării axiale. În plus, curbele complete au fost obținute din ANSYS, în timp ce curbele experimentale au fost de până la 75% din P_u din pricina utilizării cadrului mecanic în citirea deformării axiale din timpul testului. Fig. 6-2 arată efortul nodal în direcția y la sarcina de cedare a coloanelor modelate.

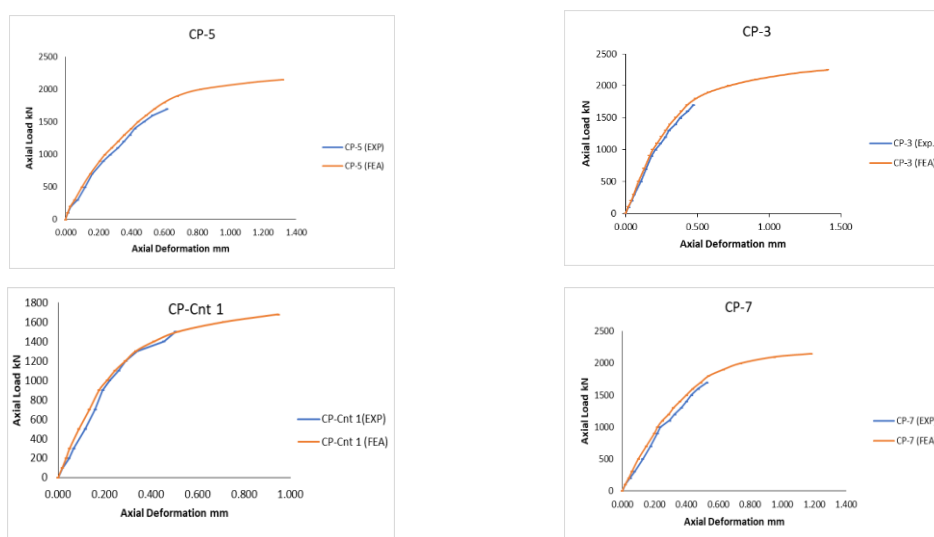
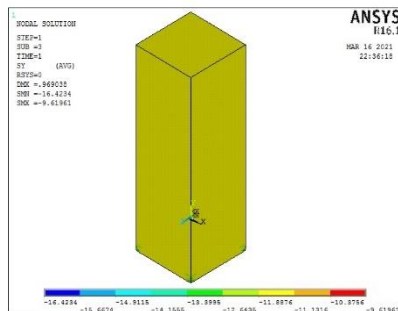
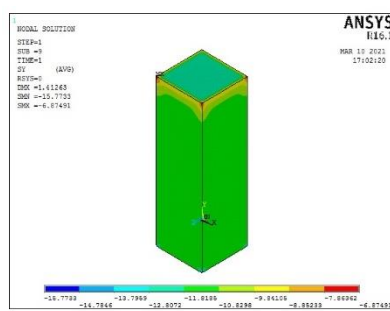


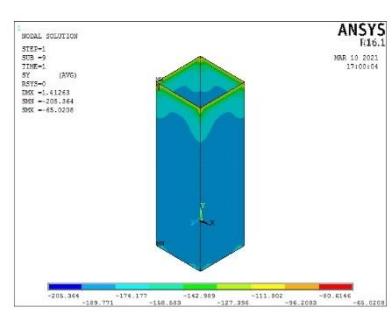
Fig. 6-1: Curbele axiale sarcină-deformare axială ale coloanelor CP-Cnt 1, CP-3, CP-5 și CP-7 atât pentru analize, cât și pentru experimente



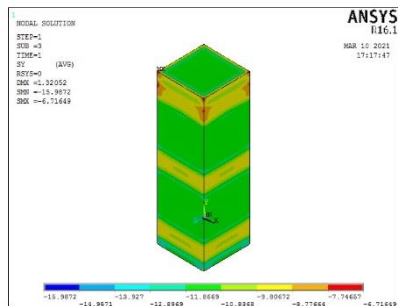
Eforturi de beton ale CP-Cnt 1



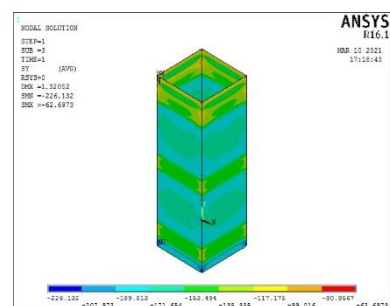
Eforturi de beton ale CP-3



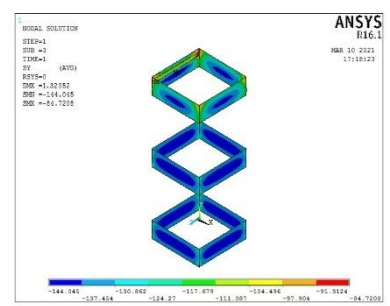
Eforturi ale căptușelii CFRP a CP-3



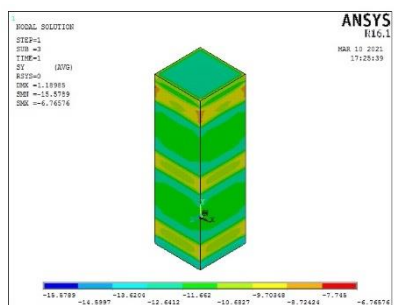
Eforturi de beton ale CP-5



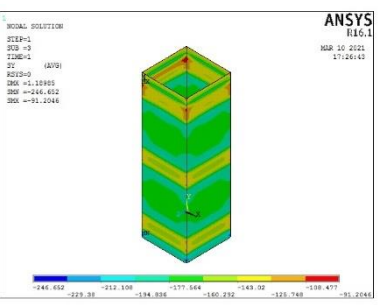
Eforturi ale căptușelii CFRP a CP-5



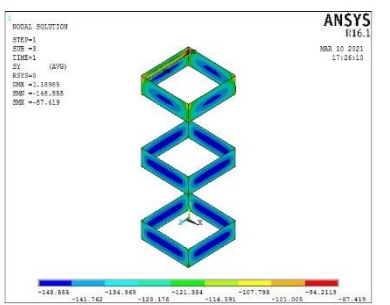
Eforturi ale fâșurilor CFRP a CP-5



Eforturi de beton ale CP-7



Eforturi ale căptușelii CFRP a CP-7



Eforturi ale fâșurilor CFRP a CP-7

Fig. 6-2: Efortul nodal în direcția y la sarcina de cedare a coloanelor.

6.4 Studiu parametric

Evaluarea efectului celor mai importanți parametri asupra comportamentului coloanelor pătrate din beton, care nu a putut fi realizată în timpul testului experimental, a avut loc utilizând elementul finit numeric ANSYS. În studiul parametric, trei parametri au fost folosiți pentru a evalua efectul lor asupra sarcinii finale a coloanelor modelate. Parametrii incluși în acest studiu parametric sunt:

6.4.1 Efectul numărului de straturi de CFRP

Pentru a studia efectul numărului de straturi de CFRP utilizate pentru coloanele CP-3 și CP-5, coloanele au fost analizate numeric folosind diferite numere de straturi de CFRP (straturi complete). Numerele selectate de straturi au fost 3 și 4. Comparația dintre sarcinile finale numerice obținute din diferite cantități de straturi de CFRP (3 și 4 straturi) din coloanele testate este prezentată în Tabelul 6-2 și respectiv în Tabelul 6-3. Este evident că sarcina finală crește odată cu creșterea numărului de straturi de CFRP. Atunci când cantitatea de straturi de CFRP a crescut de la 2 la 3 straturi, sarcina finală a crescut cu aproximativ 5% atât pentru CP-3, cât și pentru CP-5, respectiv, după cum se arată în Tabelul 6-2, în timp ce, atunci când cantitatea de straturi de CFRP a crescut de la 2 la 4 straturi, sarcina finală a crescut cu aproximativ 10% atât pentru CP-3, cât și pentru CP-5, respectiv, după cum se arată în Tabelul 6-3.

Tabelul 6-2: Rezultatele numerice ale sarcinii finale cu 2 și 3 straturi de CFRP

Nr. Eșantion	f_c (MPa)	Ranforsare FEA (Nr. Straturi de CFRP)	$P_{u, Ansys}$ (kN)	Ranforsare FEA (Nr. Straturi de CFRP)	$P_{u, Ansys}$ (kN)	Raport $P_{u, Ansys}$
CP-Cnt 1	18	-	1680	-	-	-
CP-3	18	2 straturi CFRP	2193	3	2305	1.05
CP-5	19.3	2 straturi CFRP +3 fâșii CFRP +10 elemente de fixare CFRP	2260	3	2375	1.05

Tabelul 6-3: Rezultatele numerice ale sarcinii finale cu 2 și 4 straturi de CFRP.

Nr. Eșantion	f_c (MPa)	Ranforsare FEA (Nr. Straturi de CFRP)	$P_{u, Ansys}$ (kN)	Ranforsare FEA (Nr. Straturi de CFRP)	$P_{u, Ansys}$ (kN)	Raport $P_{u, Ansys}$
CP-Cnt 1	18	-	1830	-	-	-
CP-3	18	2 straturi CFRP	2193	4	2413	1.10
CP-5	19.3	2 straturi CFRP +3 fâșii CFRP +10 elemente de fixare CFRP	2260	4	2475	1.10

6.4.2 Efectul rezistenței la compresiune a betonului

În această analiză numerică inclusă în studiu, valorile selectate ale rezistenței la compresiune a betonului (f_c) au fost de 42 și 60 MPa pentru coloanele CP-3, CP-5 și CP-7. Sarcinile finale numerice obținute din diferite valori ale rezistenței la compresiune a betonului coloanelor testate împreună cu valorile experimentale sunt enumerate în Tabelul 6-4. Din tabel se poate observa că rezistența la compresiune a betonului are un efect semnificativ asupra sarcinii finale. Când rezistența la compresiune a coloanelor CP-3, CP-5 și CP-7 a crescut la 42 MPa, capacitățile finale de sarcină au crescut cu 228%, 211% și respectiv 232%. Când rezistența la compresiune a coloanelor CP-3, CP-5 și CP-7 a crescut la 60 MPa, capacitățile finale de sarcină au crescut cu 311%, 286% și respectiv 327%. Acest efect era de așteptat deoarece coloana este un element de compresie și depinde în esență de rezistența la compresiune a betonului, cu cât mai mult, în acest studiu, sarcinile aplicate au fost de compresie pură (sarcină concentrică).

Tabelul 6-4: Rezultatele numerice ale sarcinii finale cu diferite rezistențe la compresiune.

Nr. Coloană	f_c (MPa) (Exp)	$P_{u,Ansys}$ (kN)	f_c (MPa) (ANSYS)	$P_{u,Ansys}$ (kN)	Raport $P_{u,Ansys}$	f_c (MPa) (ANSYS)	$P_{u,Ansys}$ (kN)	Raport $P_{u,Ansys}$
CP-Cnt 1	18	1680	-	-	-	-	-	-
CP3	18	2193	42	5004	2.28	60	6840	3.11
CP-5	19.3	2260	42	4770	2.11	60	6470	2.86
CP-7	18.8	2111	42	4914	2.32	60	6903	3.27

6.4.3 Prezența armăturii din oțel

Pentru a evalua efectul prezenței armăturilor din oțel asupra capacității finale de sarcină a coloanelor pătrate din beton supuse testării, confinate cu CFRP, presupunând că acele coloane (CP-Cnt 1, CP-3, CP-5 și CP-7) au un detaliu de ranforsare din oțel (4 - Ø16 pentru armătura principală și 7 Ø 10 pentru etrieri)

Rezultatele numerice obținute din software-ul pentru elemente finite ANSYS au arătat că oțelul de armătură nu a avut niciun efect clar asupra capacității finale de sarcină a coloanelor confinate, motivul fiind că aceste coloane au fost supuse unei sarcini de compresie axială și a fost confirmat anterior că betonul este supus celei mai mari acțiuni sub compresie, mai mult decât oțelul folosit în plan longitudinal; mai mult decât atât, eșantioanele de coloane au confinare cu CFRP și nu etrieri din oțel, în timp ce coloana neconfinită CP-Cnt1 a câștigat o creștere mai mare în capacitatea de sarcină finală cu 13% datorită prezenței armăturilor din oțel, care nu au CFRP

extern. Tabelul 6-5 prezintă capacitățile de sarcină finală ale coloanelor modelate cu și fără armături din oțel.

Tabelul 6-5: Capacități de sarcină finală ale coloanelor modelate cu și fără armături din oțel.

Nr. coloană	Sarcina finală		Raport $P_{u,Ansys}$
	Fără oțel de ranforsare	Cu oțel de ranforsare	
	$P_{u,Ansys} (kN)$	$P_{u,Ansys} (kN)$	
CP-Cnt 1	1680	1900	1.13
CP3	2193	2315	1.05
CP-5	2260	2230	0.98
CP-7	2111	2290	1.08

7. CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI

7.1 Concluzii

Următoarele concluzii sunt extrase din fazele experimentale și analitice ale acestei lucrări:

7.1.1 Faza experimentală:

1. Rezultatele experimentale au confirmat în mod clar că învelișul compozit din CFRP în diferite proceduri de confinare poate crește capacitatea de sarcină finală și rezistența finală la compresiune a coloanelor din beton sub sarcină axială.
2. Deformarea laterală a betonului din cauza încărcării axiale poate fi oprită prin învelirea compozitelor pe bază de CFRP în direcția cercului, ceea ce sporește rezistența finală la compresiune a betonului.
3. Rezultatele testării au arătat valori neașteptate ale capacității finale de sarcină pentru CP-5 și CP-6 (confinat cu două straturi de CFRP și cu fâșii de CFRP combinate cu ancore pentru CFRP), care au fost mai mici decât CP-3 și CP-4 (confinat cu 2 straturi de CFRP) și chiar mai mici de CP-7 (confinat cu un singur strat de CFRP cu fâșii de CFRP combinate cu fâșii de CFRP). Aceste valori neașteptate în ceea ce privește capacitățile finale s-ar putea înregistra din cauza dispunerii alternative a elementelor de fixare (nu în aceeași poziție pe aceeași latură). Dar, pe de altă parte, sistemul de ancorare s-a îmbunătățit pe baza modului final de cedare al acestor coloane confinate, unde cedarea nu s-a produs în zonele de ancorare, care a reprezentat unul dintre obiectivele cercetării noastre. Pentru a obține o confinare mai eficientă, fâșiile de FRP sunt constrânse pe toate laturile prin utilizarea ancorelor, creând astfel distanțe mai mici, care sunt confinate între ancore.

4. Numărul de straturi de materiale din CFRP reprezintă parametrul major, având o influență semnificativă asupra comportamentului eșantioanelor. Rezultatele testelor din testele preliminare au dovedit că beneficiul confinării ar putea fi sporit prin creșterea rigidității confinării externe prin aplicarea mai multor straturi. Atunci când eșantionul a fost învelit într-un strat de CFRP (CP-7), rezistența la compresiunea finală și capacitatea de sarcină axială finală au crescut în ceea ce privește valorile medii, astfel încât eșantioanele de control au fost de 17%, în timp ce, atunci când eșantionul a fost învelit cu două straturi de CFRP (CP-3), rezistența la compresiune și capacitatea de sarcină axială au crescut în raport cu eșantionul de control cu 23%. Aceasta înseamnă că, atunci când se dublează cantitatea de fibre (100%), creșterea este cu 6% mai mult.
5. Rezultatele testelor CP-7 au arătat, de asemenea, o opțiune mai bună a tehnicii economice din punct de vedere al rezistenței. Cu alte cuvinte, utilizarea stratului cu un singur CFRP (confinarea completă) și a fâșii lor CFRP (confinarea parțială), combinate cu ancorele pentru CFRP, duc la creșterea atât a capacității de sarcină axială, cât și a rezistenței finale la compresiune față de eșantionul de control cu 17%.
6. Din rezultate, atât capacitatea de sarcină axială, cât și rezistența la compresiune finală, în raport cu eșantionul de control, au crescut cu 10% prin utilizarea confinării parțiale (fâșii 4 CFRP) combinate cu ancore pentru CFRP (CP-8), care pot fi considerate o tehnică de armare acceptabilă din punct de vedere al rezistenței.
7. Modurile finale de cedare ale tuturor coloanelor confinate s-au întâmplat brusc, însoțite de un sunet ca de explozie. Cedarea bruscă și explozivă se referă la eliberarea unei cantități excepționale de energie datorită presiunii de confinare dată de ranforsarea cu compozite pe bază de CFRP.

7.1.2 Faze analitice și numerice:

1. Toate modelele folosite prezic valorile de rezistență mai mici decât valorile experimentale ale coloanelor neconfinat și ale unora dintre coloanele confinate.
2. Cele trei modele prezentate prin codurile ACI, FIB și CNR calculează contribuția CFRP la confinarea totală și parțială.
3. Cele trei modele ale lui Lam și Teng, Ouyang și Liu și Wang și colab. înregistrează numai contribuția CFRP la confinarea totală, astfel încât s-a putut calcula rezistența coloanelor testate care au numai confinare totală (CP-3, CP-4, CP-5, CP-6 și CP-7), în timp ce modelul prezentat de Triantafillou a fost conceput pentru a calcula contribuția CFRP a confinării totale în combinație cu ancorele pentru CFRP.
4. Valorile prevăzute ale CP-3 obținute aplicând codurile ACI, FIB și CNR au arătat o bună concordanță cu valorile experimentale cu 5%, 9% și respectiv 0,06% mai mici decât

valorile experimentale. La fel s-a întâmplat și cu CP-4 cu 3% și 7% mai puțin decât cele experimentale pentru ACI și respectiv FIB și cu 2% mai mare decât cele experimentale cu CNR, în timp ce valorile experimentale pentru ambele coloane CP-3 și CP-4 au arătat o bună concordanță cu modelul lui Lam și Teng cu valori de 0% pentru valoarea experimentală pentru CP-3 și cu 2% mai mare decât valorile experimentale pentru CP-4. În plus, modelul Triantafillou a arătat o bună concordanță cu valorile experimentale ale CP-3 și CP-4 cu 6% și respectiv cu 5% mai mari decât valorile experimentale.

5. Valorile prevăzute ale CP-5 și CP-6 obținute din modelele ACI și FIB au arătat un acord bun cu valori cuprinse între (6% -9%) mai mari decât valorile experimentale, în timp ce valorile obținute din CNR nu au fost bune în acord cu valorile experimentale cu 16% mai mari decât valorile experimentale. În plus, valorile prevăzute ale CP-5 și CP-6 obținute din modelul Lam și Teng au arătat o bună concordanță cu valorile experimentale cu 10% și respectiv 8% mai mari decât cele experimentale; la fel și modelul lui Wang, a arătat o bună concordanță cu valorile experimentale cu 4% și respectiv 6% mai mici decât valorile experimentale, în timp ce modelul lui Ouyang și Liu a fost conservator, cu aproximativ 30% mai puțin decât valorile experimentale.

6. Valorile prevăzute ale CP-7 obținute aplicând codurile ACI și CNR au arătat o bună concordanță cu valorile experimentale cu 7% mai puțin decât valoarea experimentală pentru ACI și cu 3% mai mare decât valoarea experimentală pentru CNR, în timp ce valoarea modelului FIB a fost conservatoare, cu 30% mai puțin decât valoarea experimentală. În plus, valorile prevăzute obținute atât din modelul Lam și Teng, cât și din modelul Triantafillou, au arătat o bună concordanță cu valorile experimentale cu 9% și respectiv 2% mai mici decât valorile experimentale, în timp ce valoarea obținută aplicând modelul Ouyang și Liu a fost conservatoare, cu 65% mai mică decât valoarea experimentală.

7. Pentru coloana CP-8, doar valoarea prevăzută a CNR a arătat o bună concordanță cu valoarea experimentală, cu 8% mai mică decât valoarea experimentală, în timp ce modelele proiectate de cercetători nu au fost aplicabile pentru CP-8, deoarece toate au fost concepute pentru confinare totală, iar CP-8 a fost confinată numai parțial.

8. Rezultatele numerice FEA ANSYS au arătat că ranforsarea externă cu compozite pe bază de CFRP este foarte eficientă în re tehnologizarea capacității de sarcină finală a coloanelor pătrate din beton de mari dimensiuni (300 x 300 x 1000 mm).

9. Rezultatele au mai arătat și o bună concordanță între ANSYS și rezultatele testelor experimentale.

10. Rezultatele analitice FEA din studiul parametric au arătat că atunci când straturile de CFRP au crescut de la 2 la 3 și de la 2 la 4 straturi, sarcina finală a eșantionului de coloană CP-3 a crescut cu 5% și respectiv 10%. De asemenea, atunci când straturile CFRP au crescut de la 2 la 3 și de la 2 la 4 straturi, sarcina finală a eșantionului de coloană CP-5 a crescut cu 5% și respectiv 10%.

11. Rezultatele numerice FEA au dovedit că rezistența la compresiune a arătat un efect semnificativ asupra îmbunătățirii sarcinii finale, atunci când rezistența la compresiune a coloanelor modelate a crescut la 42MPa și la 60 MPa, sarcina finală a eșantionului de coloană CP-3, CP- 5 și CP-7 a crescut la aproximativ 200% și, respectiv, la aproximativ 300%. Acest efect era de așteptat deoarece coloana este un element de compresie și depinde în esență de rezistența la compresiune a betonului, cu atât mai mult cu cât, în acest studiu, sarcinile aplicate au fost de compresie pură (sarcină concentrică).

12. Rezultatele numerice FEA au arătat că prezența armăturilor din oțel nu a avut un efect clar asupra sarcinii finale a coloanelor confinate. Motivul pentru aceasta ar putea fi faptul că aceste coloane au fost supuse unei sarcini de compresie axială și s-a confirmat anterior ca betonul preia cea mai mare acțiune în compresie, ami mult decât oțelul aplicat longitudinal, în plus față de faptul că exemplarele de coloane au confinare externă din CFRP, care a îmbunătățit confinarea, folosindu-se în schimbul etrierilor din oțel, în timp ce coloana neconfinată CP-Cnt 1 a obținut o creștere mai mare a capacității de sarcină finală cu 13% datorită prezenței armăturii din oțel, care nu avea CFRP extern.

7.3 Alte lucrări viitoare

1. Studiarea efectului tehnicilor de ranforsare a CFRP utilizate în acest studiu, dar fără sistem de ancorare, asupra comportamentului betonului pătrat supus încărcării axiale.
2. Investigarea comportamentului coloanelor pătrate din beton cu secțiune transversală mai mare de > 300 mm cu aceleași tehnici de ranforsare a CFRP utilizate în acest studiu, dar cu ancore pentru a fi în aceeași poziție de fiecare parte și supuse unei sarcini de compresie axială.
3. Investigarea comportamentului coloanelor pătrate/dreptunghiulare din beton confinate cu fâșii CFRP cu schimbarea pozițiilor fâșiilor pentru a evalua efectul poziției fâșiei asupra rezistenței finale atunci când sunt supuse unei sarcini axiale de compresie.
4. Investigarea efectului sistemului de ancorare utilizat pentru coloanele pătrate/dreptunghiulare din beton atunci când coloanele confinate sunt expuse la foc.
5. Utilizarea secțiunii transversale dreptunghiulare pentru a studia efectul raportului de aspect lateral h/b asupra comportamentului coloanelor din beton atunci când sunt confinate cu aceleași tehnici de ranforsare utilizate în acest studiu.

6. Utilizarea betonului de înaltă performanță (UHPC) pentru a investiga comportamentul de compresiune al coloanelor pătrate din beton confinate cu aceleași tehnici de ranforsare utilizate în acest studiu.

Bibliografie: Mai jos sunt enumerate toate referințele folosite pentru a scrie această teză

- [1]. Rocca R., Galati N. și Nanni A. (2008). *Metodologia diagramei de interacțiune pentru proiectarea coloanelor din beton armat confinate cu FRP*. Construcții și materiale de construcții, (23), PP 1508-1520.
- [2]. Rocca R. (2007). *Evaluare experimentală și analitică a coloanei de beton armat de dimensiuni mari, confinată cu FRP*. Teză de doctorat, Universitatea din Missouri - Rolla.
- [3]. Randall K. Noon. (2001). *Investigație de inginerie criminalistică*. International Standard Book, Florida, SUA.
- [4]. Sika CarboDur. (2003). *Compozite FRP pentru repararea și consolidarea structurilor*, Raport tehnic, Sika Polonia, martie.
- [5]. Mieczyslaw Kamiński și Tomasz Trapko. (2006). *Comportamentul experimental al modelelor de coloane din beton armat ranforsate cu materiale CFRP*. Jurnal de Inginerie Civilă și Management, XII (2), PP 109-115.
- [6]. Buletinul FIB - 14, Grupul operativ 9.3 (2001). - *Armare FRP cu legătură externă pentru structuri din BA*, Raport tehnic, Elveția.
- [7]. Holloway L.C. și Teng J.G. (2008) *Ranforsarea și reabilitarea infrastructurilor civile utilizând compozite din polimer armat cu fibre (FRP)*. Book, Cambridge, Anglia.
- [8]. Perumalsamy Balaguru, Antonio Nanni și James Giancaspro. (2009). *Compozite FRP pentru structuri din beton armat și precomprimate*. Un ghid pentru noțiuni fundamentale și proiectare pentru reparații și re tehnologizare. E-Book, ed. 1, New York, SUA.
- [9]. Christopher Cole și Abdeldjelil Belarbi. (2001). *Caracteristicile de confinare ale coloanelor dreptunghiulare din BA cu căptușeală pe bază de FRP*. Lucrările celui de-al cincilea Simpozion internațional privind polimerul armat cu fibre pentru structuri din beton armat (FRPRCS-5), iulie, PP 823-832, Cambridge, Marea Britanie.
- [10]. Amir Mirmiran și Mohsen Shahawy. (1997). *Comportamentul coloanelor confinate din compozite cu fibre*. Jurnal de Inginerie Structurală, (5), PP 583-590.
- [11]. Amir Mirmiran și Mohsen Shahawy. (1998). *Efectul parametrilor coloanei asupra betonului confinat pe bază de FRP*. Jurnal de Inginerie Structurală, (4), PP 175-185.
- [12]. Xiao Y. și Wu H. (2000). *Comportamentul compresiv al betonului confinat prin căptușeli compozite din fibră de carbon*. Jurnal de materiale de inginerie civilă, 12 (2), PP 139-146.
- [13]. Raquel Fernandes de Paula și Manuel Gonçalves da Silva. (2002). *Efecte de muchie ascuțită ale coloanelor pătrate din BA cu confinare pe bază de FRP*. Lucrare de conferință, această publicație la: <https://www.researchgate.net/publication/234169672>.
- [14]. Reza M. Esfahani și Reza M. Kianoush. (2005). *Rezistența la compresie axială a coloanelor din beton armat învelite cu polimeri armați cu fibre (FRP)*. IJE Tranzacții B: Aplicații, 18 (1), PP 1-11.
- [15]. Azadeh Parvin și Aditya S. Jamwal. (2006). *Performanța coloanelor armate din FRP extern pentru modificări ale unghiului și grosimii înfășurării și rezistenței betonului*. Jurnalul structurilor compozite, (73), PP 451-457.
- [16]. Riad Benzaid, Nasr-Eddine Chikh și Habib Mesbah. (2008). *Comportamentul coloanei pătrate din beton confinat cu înveliș compozit GFRP*. Jurnal de Inginerie Civilă și Management, 14 (2), PP 115-120.
- [17]. Yu-Fei Wu și You-Yi Wei. (2010). *Efectul raportului de aspect transversal asupra rezistenței coloanelor dreptunghiulare din beton confinat cu CFRP*. Jurnal de Structuri de inginerie, (32), PP 32-45.
- [18]. Pedram Sedeghian, Mohammed și Alireza Rahai. (2010). *Efectul orientării fibrelor asupra comportamentului compresiv al coloanelor din beton confinate cu CFRP*. Jurnal de materiale plastice și compozite armate, 29 (9), PP 1335-1346.
- [19]. Sherif M. Elzeiny și Mohamed S. Issa. (2011). *Comportamentul coloanelor din beton confinat cu tuburi polimerice armate cu fibră de sticlă circulară*. Jurnalul HBRC, 7 (2), PP 56-70.

- [20] Meisam Razavi, Abdul Rahman Mohd. Sam, Yusof Ahmad și Kiarash Koushfar. (2013). *Comportamentul diferitelor forme de prismă de beton armat cu material FRP sub sarcină axială compresivă*. Jurnalul australian de științe de bază și aplicate, 7 (4), PP 203-212.
- [21] Leonyce Sousa dos Santos, Iana Ingrid Rocha Damasceno, Leila Cristina Nunes Ribeiro și Dênio Ramam Carvalho de Oliveira. (2013). *Coloane rotunjite pentru colțuri armate cu CFRP*. Jurnal de tehnologie, 35 (3), PP 463-468.
- [22] Sushil S. Sharmaa, Urmil V. Daveb și Himat Solankic. (2013). *Înveliș FRP pentru coloane din BA cu raze de colț variabile*. Piste de inginerie chimică, civilă și mecanică din cadrul celei de-a treia conferințe internaționale de inginerie a Universității Nirma (NUICONE-2012), Procedia Engineering 51, PP 220 - 229.
- [23]. Vasumathi A. M, Rajkumar K. și Ganesh Prabhu. (2014). *Comportamentul compresiv al coloanei din BA cu beton armat cu fibre confinat prin fâșii de CFRP*. Progrese în știința și ingineria materialelor, Număr articol 601915, 10 pagini.
- [24]. Sameh Yehia. (2015). *Comportamentul coloanelor scurte cu rezistență redusă la compresiune, ranforsate folosind tehnici pe bază de fâșii de GFRP/căptușeli externe*. Jurnalul internațional de îmbunătățiri tehnologice și cercetări ingineresti emergente, 3 (04), PP 1-5.
- [25]. Khaled Fawzy. (2017). *Performanța noii tehnici de armare pentru coloane pătrate din beton armat cu confinări inovatoare pe bază de CFRP*. Jurnalul internațional de inginerie și tehnologie inovatoare (IJEIT), 6 (10), PP 8-18.
- [26]. Lewangamage C. S, Rankoth C. K. și Jayasinghe M. T. R. (2017). *Un studiu asupra coloanelor din beton armat parțial confinat cu polimer armat cu fibră de carbon (CFRP)*. Jurnalul Instituției Inginerilor, L (04), PP 41-50.
- [27]. Shamil K. Ahmed. (2018). *Rezistența finală și tensiunea axială a coloanelor circulare din beton armată pe bază de FRP*. Jurnal de Inginerie Concludentă, 5, PP 1-21.
- [28]. Wei Chang, Meijing Hao și Wenzhong Zheng. (2020). *Comportamentul compresiv al UHPC confinat atât de etrierii spirali, cât și de polimerul armat cu fibră de carbon (CFRP)*. Construcții și materiale de construcții 230, PP 1-11.
- [29]. Teng J.G, Chen J.F, Smith S.T. și Lam L. (2003). *Comportamentul și forța structurilor din BA ranforsate cu FRP: o analiză de ultimă generație*. Articol din Structuri și clădiri.
- [30]. Koichi Maekawaa și Xuehui An. (2000). *Cedarea la forfecare și ductilitatea coloanelor din BA după cedarea armăturii principale*. Mecanica fracturilor în inginerie, 65, PP 335 - 368.
- [31]. MURTY. C. V. R. (2005). *SFATURI ÎN CAZ DE CUTREMUR: Învățarea proiectării și a construirii în caz de cutremur*. Carte, Departamentul de Inginerie Civilă, Institutul Indian de Tehnologie Kanpur.
- [32]. Hamid Saadatmanesh, Mohammad R. Ehsani și Limin Jin. (1997). *Repararea coloanelor din BA avariate de cutremur cu învelișuri din FRP*. Jurnal Structural ACI, Lucrare tehnică, PP 206-214.
- [33]. Xiao T, Wu H și Martin G. R. (1999). *Învelișul compozitelor prefabricate ale coloanelor din BA pentru a spori rezistența la forfecare*. Jurnal de Inginerie Structurală, 125 (3), PP 255-264.
- [34]. Cem YALÇIN și Osman KAYA. (2004). *Un studiu experimental privind comportamentul coloanelor din beton armat folosind material FRP*. A 13-a Conferință mondială privind ingineria cutremurelor, lucrarea nr. 919.
- [35]. Prota G. Manfredi, Balsamo A, Nanni A și Cosenza E. (2005). *Tehnică inovatoare pentru îmbunătățirea din punct de vedere seismic a coloanelor pătrate din BA*. SP-230—73, PP 1289-1304.
- [36]. Muhammad S. Memon și Shamim A. Sheikh. (2005). *Rezistența seismică a coloanelor pătrate din beton, retehnologizate cu polimer armat cu fibră de sticlă*. Jurnal Structural ACI, Lucrare Tehnică, Titlul nr. 102-S79, PP 774-783.
- [37]. Abdel-Mooty M. A. N, Issa. M. E, Farag. H. M și Bitar. M. A. (2006). *Îmbunătățirea seismică a coloanelor pătrate și dreptunghiulare din BA utilizând învelișul FRP*. Structuri și materiale de înaltă performanță III, Tranzacții WIT pe mediul construit, 85, PP 419-428.
- [38]. Okan Ozcana, Baris Binicib și Guney Ozcebeb. (2007). *Îmbunătățirea performanței seismice a coloanelor de beton armat deficitare utilizând polimeri armați cu fibră de carbon*. Jurnal de Structuri de inginerie, 30, PP 1632–1646.
- [39]. Olivová. K. și Bilčík. J. (2009). *Consolidarea coloanelor de beton cu CFRP*. Jurnal slovac de inginerie civilă, PP 1 - 9.
- [40]. Casadei P, Faella C, Napoli A, Perri F, Realfonzo R și Ruiz Pinilla J. G. (2012). *Comportamentul ciclic al coloanelor din BA confinate cu folii din polimer armat cu oțel*. 15 WCEE, LISBOA, PP 1-10.

- [41]. Zhou Changdong, Lu Xilin, Li Hui și Tian Teng. (2013). *Studiu experimental privind comportamentul seismic al coloanelor circulare din BA ranforsate cu fâșii de FRP supuse eforturilor în prealabil*. Jurnal de Ingineria Cutremurelor și de Vibrații în Inginerie, 12, PP 625-642.
- [42]. Engin C. Seyhan, Caglar Goksu, Ahmet Uzunhasanoglu și Alper Ilki. (2015). *Comportamentul seismic al coloanelor din BA substandard re tehnologizate cu armare din polimer armat cu fibră de aramidă (AFRP)*. Jurnalul polimerilor, 7, PP 2535–2557.
- [43]. Li-Jun Ouyang, Wan-Yang Gao, Bin Zhen și Zhou-Dao Lu. (2016). *Retehnologizarea seismică a coloanelor pătrate din beton armat folosind foi de polimer armat cu bazalt și cu fibră de carbon: un studiu comparativ*. Jurnalul structurilor compozite, 162, PP 294-307.
- [44]. Daiyu Wang, Zhenyu Wang, Scott T. Smith și Tao Yu. (2017). *Performanța seismică a coloanelor circulare din beton de înaltă rezistență, confinate cu CFRP, cu un raport de compresie axial ridicat*. Jurnalul de materiale de construcții și construcții, 134, PP 91–103.
- [45]. Sassan Eshghi și Vahid Zanjanzadeh. (2018). *Repararea coloanelor din BA avariate de cutremur cu fibră de sticlă - polimer armat*. Jurnalul internațional de inginerie civilă. 5 (3), PP 210-223.
- [46]. Ehsan Noroozieh și Ali Mansouri. (2019). *Rezistența laterală și ductilitatea coloanelor din beton armat ranforsate cu armături NSM FRP și căptușeala FRP*. Jurnalul internațional de inginerie structurală avansată, 11, PP 195–209.
- [47]. Stephen V. Grelle și Lesley H. Sneed. (2013). *Revizuirea sistemelor de ancorare pentru laminatele din FRP lipite extern*. Jurnalul internațional al structurilor și materialelor din beton, 7 (1), PP.17–33.
- [48]. Insung Kim, James O. Jirsa și Oguzhan Bayrak. (2009). *Utilizarea ancorelor pentru CFRP pentru a consolida îmbinările de la bază ale coloanelor dreptunghiulare din BA*. Document de conferință (FRPRCS-9 Sydney), PP -1-5, Australia, iulie.
- [49]. Raphaëlle Sadone, Marc Quiertant, Emmanuel Ferrier, Sylvain Chataigner și Julien Mercier. (2013). *Ancorarea laminatelor FRP pentru armarea seismică a coloanelor din BA*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00852003>.
- [50]. Najwa F. Hany și colab. (2016). *Răspunsul generalizat la tensiune axială a coloanelor dreptunghiulare confinate folosind căptușeli și ancore din CFRP*. Jurnal de Structuri Compozite, ASCE, DOI: 10.1061 / (ASCE) CC.1943-5614.0000724.
- [51]. Xian Li și colab. (2017). *Rezistența axială a coloanelor dreptunghiulare din BA confinate cu FRP cu diferite raporturi de aspect transversal*. Revista de cercetare a betonului, PP 1-16.
- [52]. CNR-DT 200 R1: (2013). *Ghid pentru proiectarea și construcția sistemelor din FRP legate la exterior pentru armarea structurilor existente*. Consiliul Național de Cercetare, Roma.
- [53]. SR EN 197-1: (2011). *Ciment Partea 1: Compozite, specificații și criterii de conformitate pentru cimenturi comune*. Comitetul European pentru Standardizare.
- [54]. SR EN 12620 + A1: (2008). *Agregate pentru beton*. Comitetul European pentru Standardizare.
- [55]. C 494 / C 494M - 05a: (2006). *Specificație standard pentru amestecuri chimice pentru beton*. Societatea Americană pentru Testare și Materiale (ASTM).
- [56]. BS EN 12350-2: (2009). *Testarea betonului proaspăt Partea 2: Testul de tasare*. Standard Britanic.
- [57]. BS EN 206: (2013). *Beton - Specificații, performanță, producție și conformitate*. Standard Britanic.
- [58]. Raportul Comitetului ACI 318 (2014). *Cerințe privind codurile în construcții pentru beton structural și comentarii* Raportat de Comitetul ACI ACI 318R-14.
- [59]. Raportul Comitetului ACI 440 (2017). *Ghid pentru proiectarea și construcția sistemelor din FRP lipite extern pentru armarea structurilor din beton*. Comitetul ACI 440, Documentul Comitetului Tehnic 440.2R-17.
- [60]. Buletin FIB nr. 90, Grup operativ 5.1. (2019). *Armarea pe bază de FRP aplicată extern pentru structuri din beton*. Raport tehnic.
- [61]. Lam L și Teng J. G. (2003a). *Model de efort-tensiune orientat către proiectare pentru beton confinat pe bază de FRP*. Jurnal de materiale de construcții, 17, PP 471–489.
- [62]. Lam L și Teng J.G. (2003b). *Model de efort-tensiune orientat către proiectare pentru beton confinat pe bază de FRP în coloane dreptunghiulare*. Jurnal de plastic și compozite armate, 22 (13), PP 1146-1186.

- [63]. Ouyang Y și Liu N. K. (2007). *Model de efort-tensiune pentru coloane dreptunghiulare din beton confinate cu FRP*. Conferința Asia-Pacific privind FRP în structuri, PP 149-154.
- [64]. Mirmiran, A., și colab. (1998). *Efectul parametrilor coloanei asupra betonului confinat cu FRP*. Jurnal de compozite pentru construcții, ASCE, 2 (4), PP 175-185.
- [65]. Rochette, P. și Labossiere, P. (2000). *Testarea axială a modelelor de coloane dreptunghiulare confinate cu compozite*. Jurnal de Compozite pentru Construcții, ASCE, 4 (3), PP 129-136.
- [66]. Wanga D.Y. și colab. (2016). *Efectul dimensiunilor asupra comportamentului axial la efort-tensiune al coloanelor din beton pătrat confinat cu CFRP*. Jurnal de materiale de construcții, 118, PP 116–126.
- [67]. Raportul Comitetului ACI 440 (2008). *Ghid pentru proiectarea și construcția sistemelor din FRP legate extern pentru consolidarea structurilor din beton*. Comitetul ACI 440, Documentul Comitetului Tehnic 440.2R-08.
- [68]. Pessiki S, Harries K. A, Kestner, J. T, Sause R și Ricles, J. M. (2001). *Comportamentul axial al coloanelor din beton armat confinate cu căptușeală din FRP*. Jurnal de Compozite pentru Construcții, ASCE, 5 (4), PP 237-245.
- [69]. Lam L și Teng J. G. (2004). *Condiția finală a betonului confinat cu polimeri armați cu fibre*. Jurnal de Compozite pentru Construcții, ASCE, 8 (6), PP 539-548.
- [70]. Triantafillou T. C și colab. (2015). *Confinarea pe bază de FRP a coloanelor de beton armat similare cu peretele*. Jurnalul de materiale și structuri, 49 (1-2), PP 651-664.
- [71]. Bassma Ibrahim Gawil. (2016). *Modelarea cu elemente finite a grinzilor și coloanelor din beton armat cu FRP la temperaturi diferite*. Universitatea de Stat Wayne. Doctorat Teză, Detroit, Michigan.
- [72]. Bangash M. Y. H. (1989). *Beton și structuri de beton: modelare numerică și aplicații*. Editori Elsevier Science, 22, Essex, Anglia.
- [73]. Gervera E, Hinton E și Hassan O. (1987). *Analiza neliniară a structurilor din beton armat și a structurilor învelișului utilizând elementul de căărămidă izoparametrică cu 20 noduri*. Calculatoare și structuri, 25 (6), PP 845-869.
- [74]. ANSYS, „Ajutor ANSYS”, versiunea 16.1, Copyright 2016.
- [75]. OWEN D. R. J și HINTON E. (1980). *Elemente finite în plasticitate: teorie și practică*. Book, Pineridge Press, Swansea, Marea Britanie
- [76]. Al-Shaarbaf I. A. S. (1990). *Analiza cu elemente finite neliniare tridimensionale a grinzilor din beton armat în torsiune*. Doctorat Teză, Universitatea din Bradford.
- [77]. Rogowsky D. M, MacGregor J. G și Ong S. Y. (1983). *Testările grinzilor groase din beton armat*. Raport de inginerie structurală, Canada.
- [78]. Chen W. F. și Saleeb A. F. (1994). *Ecuații constitutive pentru materiale de inginerie*. Volumul 1: Elasticitate și modelare, carte. SUA, 580 PP.
- [79]. Barbato D. Hu, M. (2014). *Modelarea simplă și eficientă a elementelor finite ale coloanelor din beton armat confinate cu polimeri armați cu fibre*. Jurnal de Structuri de inginerie, 72, PP 113-122.
- [80]. Autar K. Kaw (2006). *Mecanica materialelor compozite*. A doua ediție, Taylor & Francis Group, SUA, 473 PP.
- [81]. Mohammed Hussein Ashour, (2015). *Analiza elementelor finite neliniare ale grinzilor din BA ranforsate cu suprapuneri din beton armat cu fibră de oțel (SFRC)*. Teză de Master, Universitatea Islamică - Gaza.
- [82]. Nessen C (1981). *O metodă iterativă eficientă și precisă, care permite pași mari incrementali, pentru a soluționa problemele elastico-plastice, informatice și structurale*. Jurnal informatic și de structuri, 13, PP 63-71.