

ÎMBUNĂTĂȚIREA RĂSPUNSULUI STRUCTURAL AL GRINZILOR DIN BETON ARMAT PRIN CONSOLIDARE CU FĂȘII COMPOZITE ÎNGLOBATE ÎN ZONA DIN IMEDIATA APROPIERE A FEȚEI ÎNTINSE

IMPROVING THE STRUCTURAL RESPONSE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH NEAR SURFACE MOUNTED COMPOSITE STRIPS

NICOLAE ȚĂRANU*, PAUL CIOBANU, SERGIU POPOAEI, PETRU MIHAI, MIHAI BUDESCU, VLAD LUPĂȘTEANU

Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași, B-dul Mangeron 43, Iași, 700050, România

În această lucrare se analizează din punct de vedere teoretic, experimental și prin modelare numerică, răspunsul structural al unor grinzi din beton armat consolidate cu fâșii înguste din compozite polimerice armate cu fibre din carbon (CPAFC), montate în zona din imediata apropiere a feței întinse (NSM). Probele consolidate au fost testate la încovoiere sub încărcare monoton crescătoare până la cedare. Inserția fâșiilor înguste din CPAFC a condus la o creștere semnificativă a capacității portante la încovoiere, de până la 220% și la o reducere a deplasărilor transversale maxime de până la 49%, în comparație cu grinzile de control, neconsolidate. Validitatea rezultatelor experimentale a fost verificată analitic și prin modelare numerică, utilizând programul pe bază de element finit ANSYS.

The behavior of reinforced concrete (RC) beams strengthened in flexure with Near Surface Mounted (NSM) carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites strips is theoretically, experimentally and numerically investigated in this paper. The specimens were tested in bending, under monotonic loading up to failure. Compared to the control specimens, the beams strengthened by NSM technique have shown a maximum increase in bending moment capacity of 220% and a mid-span deflection decrease up to 49%. The validity of the experimental results has been checked analytically and by numerical modeling, using the finite element (FE) computer software ANSYS.

Keywords: reinforced concrete beams, carbon fibre reinforced polymer composites, strengthening with composite strips, structural response, numerical modeling

1. Introducere

1.1. Utilizarea CPAFC la consolidarea elementelor din beton armat

În ultimele decenii, interesul folosirii compozitelor polimerice armate cu fibre din carbon (CPAFC) sau hibride la consolidarea elementelor din beton armat a crescut, în principal prin prisma faptului că oferă avantaje semnificative în comparație cu soluțiile bazate pe materialele de construcții tradiționale. Principalele avantaje ale produselor compozite utilizate la reabilitarea structurală a elementelor din beton armat sunt: rigiditate specifică ridicată și rezistență mare în raport cu greutatea, rezistență bună la coroziune, ușurință în aplicare și disponibilitate practic nelimitată din punct de vedere geometric [1, 2].

În contextul consolidării la încovoiere a grinzilor din beton armat, soluțiile de aplicare ale CPAFC, dezvoltate până în prezent, se bazează pe două tehnici: tehnica lipirii la exterior (EBR) a unor platbande compozite prefabricate și tehnica

1. Introduction

1.1. RC elements strengthened with CFRP composites

Over the latest decades, the interest of using CFRP composites for strengthening RC members has increased mainly due to the fact that they offer significant advantages when compared to traditional building materials. High specific stiffness and high strength to weight ratio, good corrosion resistance, ease of handling and practically unlimited availability of the geometric characteristics of composite products are the main advantages of these materials [1, 2].

Two main solutions based on composite reinforcement are utilized for the flexural strengthening of reinforced concrete beams: the externally bonded reinforcement (EBR) and the near surface mounted (NSM) techniques. The research work carried out until now has revealed that the full tensile strength of the CFRP product is almost impossible to be achieved with the EBR

* Autor corespondent/Corresponding author,
E-mail: taranu@ce.tuiasi.ro

înglobării unor fâșii înguste în imediata apropiere a fețelor întinse, (NSM). Programele de cercetare efectuate până în prezent au reliefat faptul că mobilizarea întregii rezistențe la tracțiune a CPAFC nu se poate realiza prin tehnica EBR. Concentrările de tensiuni la interfața dintre beton și adeziv duc la dezlipirea prematură a CPAFC, unul dintre cele mai frecvente moduri de cedare ale grinzilor la care se aplică aceste soluții de consolidare [3-5].

Consolidarea la încovoiere a grinzilor din beton armat utilizând tehnica NSM presupune montarea unor bare sau fâșii înguste din CPAFC în șlițuri pre-tăiate în stratul de acoperire cu beton din zona întinsă a acestor tipuri de elemente structurale. Principalele avantaje oferite de tehnica NSM, în comparație cu soluțiile EBR, sunt: risc mai redus de dezlipire prematură, expunere mai mică la acte de vandalism sau deteriorări mecanice și aspect estetic practic neschimbat [6, 7].

Comportarea la încovoiere a grinzilor din beton armat consolidate cu armături compozite a fost analizată de numeroase echipe de cercetare, vizând atât determinarea pe cale experimentală a creșterilor de capacitate portantă cât și corelarea rezultatelor obținute pe cale analitică sau numerică cu cele obținute din încercări experimentale.

Posibilitatea utilizării produselor din CPAFC la consolidarea grinzilor din beton armat a fost investigată în cadrul unui program experimental în care au fost testate la încovoiere grinzi din beton armat consolidate utilizând tehnica NSM. Rezultatele experimentale obținute au arătat creșteri semnificative ale momentelor încovoietoare capabile la elementele consolidate [8].

Un alt studiu comparativ pe trei serii de grinzi din beton armat folosind soluții diferite de consolidare a fost realizat în anul 2011 [9]. Prima serie de grinzi a fost consolidată folosind tehnica NSM, cea de-a doua serie a fost consolidată folosind tehnica EBR iar ultima serie a fost consolidată folosind tehnica prinderii mecanice a platbandelor din CPAFC (MF - EBR). Rezultatele experimentale au evidențiat o mai bună performanță structurală a grinzilor din beton armat consolidate prin MF - EBR la încercări monotone crescătoare. În urma încercărilor ciclice, cele mai mari creșteri de capacitate portantă au fost obținute la grinzi din beton armat consolidate prin tehnica NSM [9].

La Facultatea de Construcții și Instalații din Iași s-a realizat un program experimental complex cu scopul de a evalua eficacitatea utilizării tehnicii NSM pentru consolidarea la încovoiere a grinzilor din beton armat utilizând fâșii înguste din CPAFC. Obiectivul acestui program de cercetare se referă la modul în care această soluție de consolidare conduce la sporirea capacității portante și la îmbunătățirea rigidității elementelor din beton armat solicitate la încovoiere.

method. The stress concentrations at the adhesive – concrete interface lead to premature debonding, which has been shown to be one of the most common failure modes of this technique [3-5].

The NSM FRP strengthening technique involves bonding of FRP bars / strips into pre – cut grooves in the concrete cover of the structural element to be strengthened. The main advantages of the NSM technique are: mitigated risk of premature debonding, lower exposure to exterior factors or vandalism and undisturbed aesthetics [6,7].

Various flexural strengthening solutions based on FRP materials have been analyzed for RC beams by numerous research teams, either aiming to determine experimentally the increase of the flexural capacity or to correlate the results of the numerical and analytical models with the experimental ones.

The possibility of using CFRP composite products as strengthening elements has been investigated in an extensive experimental program in which RC beams were strengthened in flexure with CFRP strips using the NSM technique. The results have proven the efficiency of this strengthening technique, as the flexural capacity has greatly improved [8].

Another comparative study consisting of three types of strengthened RC beams was carried out in 2011 [9]. The RC beams of the first type were strengthened using the NSM technique, the second one using the EBR solution and the beams of third type were strengthened with mechanically fastened CFRP strips (MF – EBR). The experimental results have proven that the MF-EBR technique is suited for monotone increasing loading rates while the NSM strengthened beams have achieved the maximum increase in flexural capacity when subjected to cyclic loading rates [9].

A complex experimental program has been performed at the Faculty of Civil Engineering and Building Services Iași to assess the effectiveness of the Near Surface Mounted (NSM) carbon fibre reinforced polymer (CFRP) strengthening technique for the flexural strengthening of reinforced concrete (RC) beams. The objectives of the study were aiming at evaluating the efficiency of this strengthening solution on the bending moment capacity and on the overall stiffness of the beams.

1.2. Theoretical evaluation of the flexural capacity of RC beams strengthened with CFRP strips

A rational design of the RC beams implies an economical failure mechanism, where the concrete fails in compression after the tensile yielding of the reinforcements. In this manner, the mechanical properties of the materials are efficiently used.

In some circumstances of the RC beams

1.2. Evaluarea teoretică a momentului capabil pentru grinda consolidată cu fâșii din CPAFC

Proiectarea grinzilor din beton armat implică luarea în considerare a unui mecanism de cedare economic, în care betonul din zona comprimată ajunge la cedare după intrarea în curgere a armăturii din zona întinsă. Astfel, proprietățile mecanice ale materialelor sunt utilizate eficient.

În anumite cazuri ale exploatarei curente, coroziunea armăturilor reduce o parte a secțiunii acestora iar cedarea se produce doar în zona întinsă, betonul nefiind utilizat în mod eficient. În aceste condiții, este necesară suplimentarea armăturii din zona întinsă, prezentul studiu analizând performanțele utilizării CPAFC la consolidarea grinzilor din beton armat [10].

Evaluarea stării de solicitare la starea limită ultimă (SLU) în elementele de beton armat încovoiate se bazează pe o serie de ipoteze simplificatoare [11], după cum urmează:

- secțiunile plane și normale pe axa barei înainte de încărcare, rămân plane și normale pe axa barei și după încărcare;
- deformațiile specifice liniare în beton și în armături sunt proporționale cu distanța până la axa neutră;
- conlucrarea dintre beton și armături este foarte bună, fără alunecări relative;
- rezistența la întindere a betonului este foarte mică și aportul acesteia poate fi neglijat;
- betonul din zona comprimată se consideră în stadiul III, în care se acceptă o diagramă dreptunghiulară a eforturilor unitare de compresiune în beton;
- deformația specifică maximă a betonului la compresiune este egală cu 0,0035;
- pentru armăturile din oțel se acceptă o relație liniară între tensiuni și deformații specifice până la limita de curgere;
- armăturile din CPAFC au o comportare liniar elastică până la rupere.

Evaluarea capacității portante a elementelor din beton armat consolidate cu CPAFC implică stabilirea eforturilor interne pe secțiune (fig. 1). Deoarece pe secțiunea grinzii sunt utilizate atât armături din oțel cât și din CPAFC, trebuie stabilit eforturile în cele două tipuri de armături.

Ținându-se cont de faptul că toate elementele se încarcă proporțional cu rigiditatea lor iar comportarea armăturilor se consideră elastică, se poate utiliza legea lui Hooke pentru stabilirea deformațiilor specifice în cele două tipuri de armături, după cum urmează:

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} \text{ și } \varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_{CPAFC}}, \quad (1)$$

unde: ε_s , ε_f – deformațiile specifice ale armăturilor din oțel, respectiv CPAFC;

service life, the steel reinforcing bars may corrode, leading to the yield of the tensioned steel reinforcing bars and, consequently an inefficient use of concrete, far from its bearing capacity. Under these conditions, an additional reinforcement is required in the tensioned zone, and this can be provided by CFRP strips. A theoretical approach aiming to investigate the influence of the supplementary composite reinforcement is presented in the following [10].

Some simplifying assumptions have to be adopted in order to evaluate of the stress and strain states on the cross-section of the RC beams subjected to bending, at ultimate limit state (ULS) [11]:

- the cross-sections of the element remain plane and normal before and after the loading;
- strains in concrete and the reinforcing elements are proportional to the distance from the neutral axis;
- concrete and reinforcements have a very good interfacial bond with no relative slip;
- the tensile strength of concrete is very small and can be neglected;
- the compressed concrete is considered to be in the 3rd working stage, where the compression stress diagram has a rectangular shape (constant stress);
- the maximum compressive strain in the concrete is assumed to be 0.0035;
- linear stress-strain variation for the steel reinforcements up to the yield limit;
- CFRP reinforcement exhibits a linear stress-strain behavior up to failure.

The calculation of the flexural capacity of RC beams strengthened with near surface mounted CFRP strips, implies the evaluation of the internal forces on the beam cross-section (Fig. 1). Since the beam has both steel and composite reinforcement, the evaluation of the internal forces in steel and composite strips is required.

Assuming that all components are loaded proportionally to their rigidity and that both reinforcing materials have a linear elastic behavior, the Hooke's Law can be used to determine the stresses in the steel reinforcement and in the CFRP strips:

$$(1) \varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} \text{ and } \varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_{CFRP}}, \quad (1)$$

where:

- ε_s , ε_f – the strains of the steel bars and of the CFRP strips, respectively;
- σ_s , σ_f – the stresses in the steel bars and in the CFRP strips, respectively;
- E_s , E_{CFRP} – the elasticity moduli of the steel and of the composite, respectively.

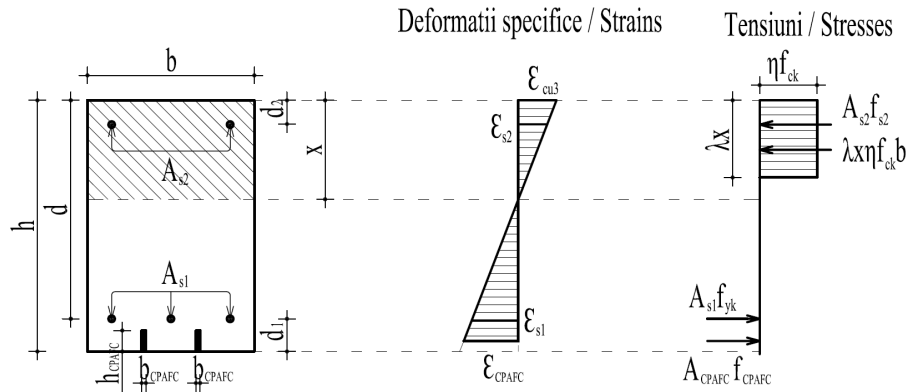


Fig. 1 - Eforturi unitare și deformații specifice pe secțiunea transversală a grinzii după intrarea în curgere a armăturilor din oțel / Stresses and strains on the beam cross-section after the yielding of the steel reinforcements

σ_s , σ_f – eforturile unitare de întindere în armătura de oțel, respectiv CPAFC;
 E_s , E_{CPAFC} – moduli de elasticitate ai armăturii de oțel, respectiv CPAFC.

În stadiul III, rezultanta eforturilor de compresiune în beton (F_c) și în armătura din oțel de la partea superioară (F_{s2}) trebuie să fie echilibrată de cele ale eforturilor de întindere de la partea inferioară în armătura de oțel (F_{s1}) și cele din armătura din CPAFC, (F_f):

$$F_c + F_{s2} = F_{s1} + F_f \quad (2)$$

Exprimându-se rezultantele din figura 1 ca produse dintre arii și tensiunile corespunzătoare și luând în considerare corelația dintre tensiunile din armătura CPAFC și cele din oțel, ecuația (2) devine:

$$\lambda x \eta f_{ck} b + A_{s2} f_{s2} = A_{s1} f_{yk} + A_{CPAFC} E_{CPAFC} 0.0035 \left(\frac{h-x}{x} \right) \quad (3)$$

unde:

λ – coeficient definind înălțimea utilă a zonei comprimate, SR EN 1992-1-1:2004, pct. 3.1.7(3) [12];

x – înălțimea zonei comprimate de beton (poziția axei neutre în raport cu fibra extremă comprimată);

η – coeficient care definește rezistența efectivă a betonului, SR EN 1992-1-1:2004, pct. 3.1.7(3) [12];

f_{ck} – rezistența caracteristică la compresiune a betonului;

b – lățimea grinzii;

A_{s2} – aria secțiunii armăturilor de oțel la partea superioară a grinzii;

A_{s1} – aria secțiunii armăturilor de oțel la partea inferioară a grinzii;

f_{yk} – rezistența caracteristică la întindere a armăturii de oțel;

f_{s2} – efortul unitar în armătura comprimată de oțel;

A_{CPAFC} – aria secțiunii armăturilor din

In the 3rd working stage, the resultant of the compression forces in the concrete (F_c) and in the steel reinforcement (F_{s2}) on the compressed zone of the cross-section must be balanced by the resultant of the tensile forces in the steel reinforcement (F_{s1}) and in the CFRP strips (F_f) on the tensioned zone of the cross-section:

$$F_c + F_{s2} = F_{s1} + F_f \quad (2)$$

Expressing the resultant forces as a product between the cross-sectional areas and the corresponding stresses and taking into account the correlation between the stresses in the CFRP strips and the ones in the steel reinforcements, equation (2) becomes:

$$\lambda x \eta f_{ck} b + A_{s2} f_{s2} = A_{s1} f_{yk} + A_{CPAFC} E_{CPAFC} 0.0035 \left(\frac{h-x}{x} \right), \quad (3)$$

where,

λ – factor defining the effective height of the compression zone, SR EN 1992-1-1:2004, pct. 3.1.7(3) [12];

x – the height of the compression zone;

η – factor defining the effective strength of the concrete, SR EN 1992-1-1:2004, pct. 3.1.7(3) [12];

f_{ck} – the characteristic compressive strength of the concrete;

b – the width of the beam;

A_{s2} – the cross-sectional area of the steel reinforcement at the upper side of the beam;

A_{s1} – the cross-sectional area of the steel reinforcement at the bottom side of the beam;

f_{yk} – the characteristic tensile strength of the steel reinforcements;

f_{s2} – the stress in the compressed steel reinforcement;

A_{CPAFC} – the cross-sectional area of the CFRP strips;

E_{CPAFC} – the modulus of elasticity of the CFRP strips;

CPAFC;

E_{CPAFC} – modulul de elasticitate al armăturilor din CPAFC;

h – înălțimea secțiunii grinzii din beton armat

ε_{cu3} – deformația specifică limită la compresiune a betonului = 0.0035.

Din ecuația (3) se determină înălțimea axei neutre, prin extragerea rădăcinii pozitive a ecuației de gradul 2 (vezi ecuația 4).

Deformația specifică liniară în armătura din CPAFC se obține prin asemănare, folosind ecuația (5).

Momentul încovoietor capabil al grinzilor din beton armat consolidate cu CPAFC se poate determina din ecuația de echilibru pe secțiune (fig.1) Vezi ecuația 6.

unde:

M_{Rb} – momentul capabil al grinzii de beton armat consolidate cu fâșii înglobate din CPAFC

d – înălțimea utilă a secțiunii grinzii

ω_{CPAFC} – coeficient de reducere a rezistenței armăturii din CPAFC (0,7) cf. ACI 440.2R-2008, pct. 10.2.10 [13]

h_{CPAFC} – înălțimea secțiunii fâșiilor compozite din CPAFC.

$$x^2 \lambda \eta f_{ck} b + x (A_{s2} f_{yk} - A_{s1} f_{yk} + A_{CPAFC} E_{CPAFC} 0.0035) - A_{CPAFC} E_{CPAFC} 0.0035 h = 0 \quad (4)$$

$$\varepsilon_{CPAFC} = 0.0035 \left(\frac{h-x}{x} \right) \quad (5)$$

$$M_{Rb} = \lambda x \eta f_{ck} b \left(x - \frac{\lambda x}{2} \right) + A_{s1} f_{yk} (d - x) + A_{s2} E_s \varepsilon_{cu3} \frac{(x - d_2)^2}{x} + \quad (6)$$

$$A_{CPAFC} E_{CPAFC} \varepsilon_{CPAFC} \omega_{CPAFC} \left(h - x - \frac{h_{CPAFC}}{2} \right)$$

2. Programul experimental

2.1. Pregătirea probelor

Programul experimental a cuprins testarea a douăsprezece grinzi din beton armat cu lungimea de 3000 mm și secțiunea transversală de 200 x 300 mm² grupate astfel [14]:

- trei grinzi din beton armat de tip A, neconsolidate având rolul de probe martor (fig. 2);

- trei grinzi din beton armat de tip B consolidate cu câte trei fâșii înguste din CPAFC având secțiunea transversală de 1,4 x 12 mm²,

h – the height of the RC beam cross-section
 ε_{cu3} – the limit strain of the concrete in compression = 0.0035.

The height of the neutral axis can be obtained from equation (3) by extracting the positive square root of the 2nd degree equation (see equation 4).

The strain in the CFRP strips can be obtained by applying the similar triangles theorem, using equation (5).

The bending moment capacity of the strengthened RC beam can be obtained by writing the bending moment equilibrium equation (Fig. 1). See equation 6:

where,

M_{Rb} – bending moment capacity of the strengthened RC beam

d – the effective depth of the RC beam

ω_{CPAFC} – safety factor reducing the tensile strength of the CFRP strips (0.7) according to ACI 440.2R-2008, pct. 10.2.10 [13]

h_{CPAFC} – cross-sectional height of the CFRP strips.

2. Experimental program

2.1. Specimens preparation

The experimental program consisted of testing twelve RC beams, 3000 mm in length and 200 x 300 mm² rectangular cross-section. The beams have been strengthened with different quantities of CFRP, hereunder [14]:

- Type A: three unstrengthened beams, serving as control specimens (Fig.2).

- Type B: three beams strengthened in flexure with three CFRP strips, 1.4 x 12 mm² cross-section, mounted at the tensioned part, in pre-cut grooves of 5 mm thickness and 15 mm depth (Fig. 3).

Type C: three beams strengthened in

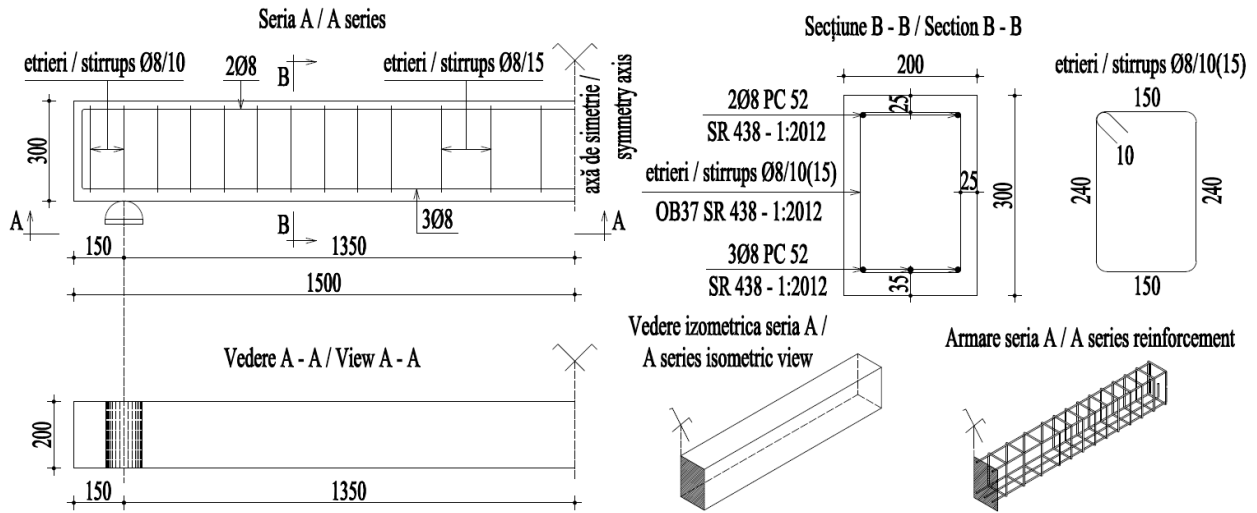


Fig. 2 - Caracteristicile geometrice ale grinzilor din seria A / Geometric characteristics of the beams from A series (mm).

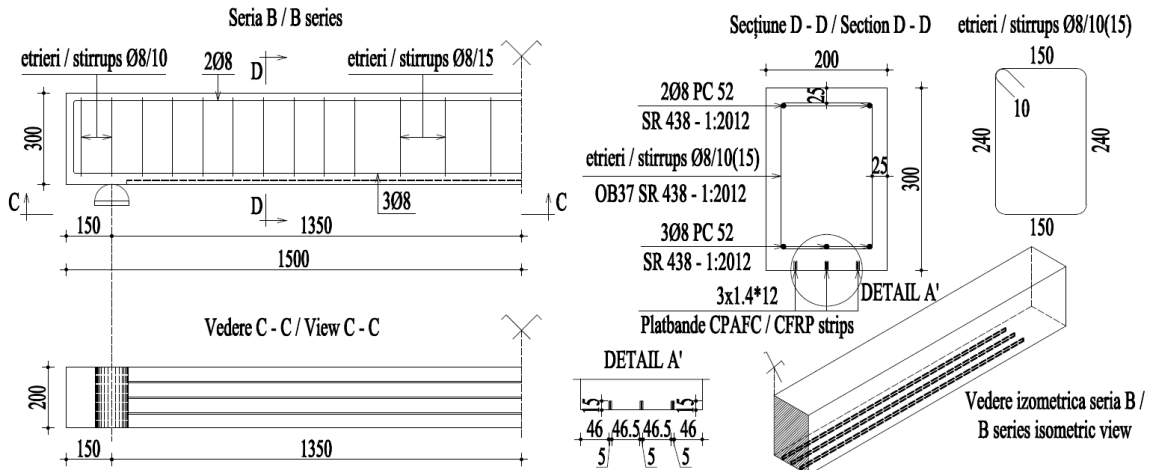


Fig. 3 - Caracteristicile geometrice ale grinzilor din seria B / Geometric characteristics of the beams from B series (mm).

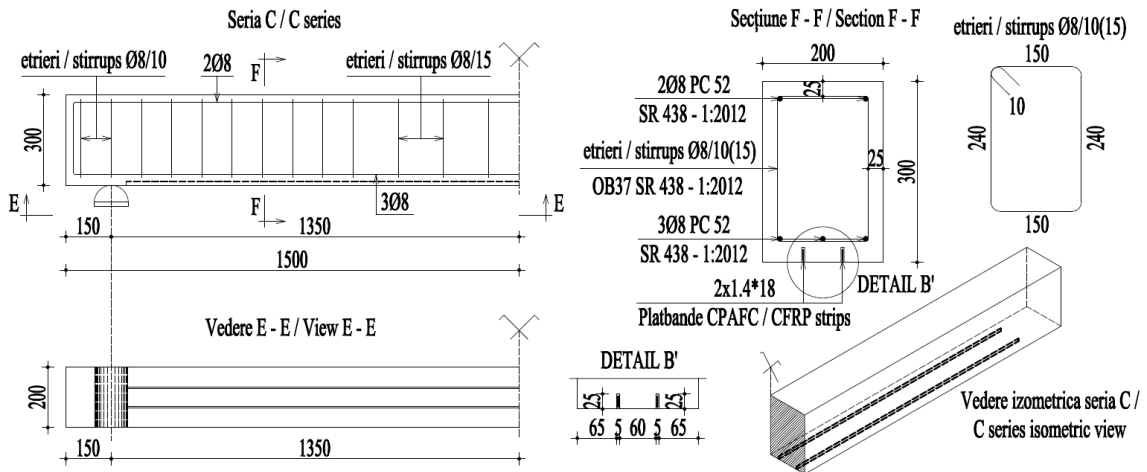


Fig. 4 - Caracteristicile geometrice ale grinzilor din seria C / Geometric characteristics of the beams from C series (mm)

introduse în șlițuri cu lățimea de 5 mm și adâncimea de 15 mm, în acoperirea cu beton de la partea întinsă a grinzilor din beton armat (fig. 3);

- trei grinzi din beton armat de tip C consolidate cu câte două fâșii înguste din CPAFC având secțiunea transversală de 1,4 x 18 mm²,

flexure with two CFRP strips, 1.4 x 18 mm² cross-section, mounted at the tensioned part, in pre-cut grooves of 5 mm thickness and 25 mm depth (Fig. 4).

- Type D: three beams strengthened in flexure with three CFRP strips, 1.4 x 24 mm²,

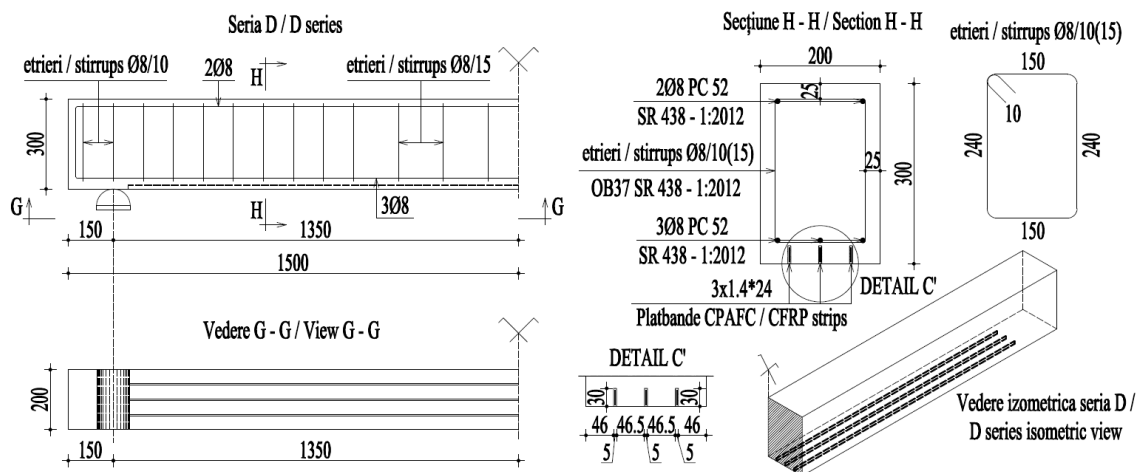


Fig. 5 - Caracteristicile geometrice ale grinzilor din seria D / Geometric characteristics of the beams from D series (mm).

montate în șlițuri cu lățimea de 5 mm și adâncimea de 25 mm, în aceeași zonă (fig. 4).

■ trei grinzi din beton armat de tip D consolidate cu câte trei fâșii înguste din CPAFC având secțiunea transversală de 1,4 x 24 mm², montate în șlițuri cu lățimea de 5 mm și adâncimea de 30 mm, inserate în acoperirea cu beton din zona tensionată (fig. 5).

Rețeta betonului de clasă C35/45, utilizat la turnarea grinzilor din beton armat, a fost realizată folosind ciment Portland de tip EN 197-1 - CEM I 52.5 R, agregat cu dimensiunea maximă de 16 mm și apă [15]. Pentru fiecare grindă s-au realizat și păstrat câte trei cuburi din beton cu latura de 150 mm timp de 28 zile într-o cameră cu umiditate relativă de 95%, în scopul determinării rezistenței la compresiune a betonului [16]. Valorile obținute ale acestei caracteristici au fost cuprinse între 48,6 MPa și 50,4 MPa.

Armarea la partea superioară și inferioară a grinzilor s-a realizat cu bare longitudinale din oțel PC52 având diametrul nominal de 8 mm. Armarea transversală s-a realizat cu etrieri OB37, având secțiunea circulară cu diametrul de 8 mm, poziționați la distanța de 100 / 150 mm, astfel încât cedarea din forță tăietoare să fie evitată. Armăturile PC52 și OB37 sunt conforme cu normativul SR 438-1:2012, iar valoarea limitei de curgere a acestora este de 355 MPa și respectiv 255 MPa [17].

Acoperirea din beton este de 25 mm la partea superioară și spre fețele laterale ale grinzilor și respectiv de 35 mm la partea inferioară a acestora.

Fâșiile compozite unidirecționale (Carboplate E170) folosite la consolidarea grinzilor din beton armat au fost selectate în concordanță cu sortimentul uzual al producătorului (tabel 1).

Materialul folosit la umplerea șlițurilor (Adesilex PG1) este un adeziv epoxidic bicomponent, cu un raport de amestec de 3 (rășină):1 (întăritor). Grundul MapeWrap Primer1 a fost folosit cu scopul de a se îmbunătăți aderența

mounted at the same location as beams of type B and C, in pre-cut grooves of 5 mm thickness and 30 mm height (Fig. 5).

The beams were cast of C35/45 concrete with EN 197-1 – CEM I 52.5 R Portland cement, normal aggregate with maximum size of 16 mm and water [15]. For every beam, three 150 mm sided cube specimens were sampled and stored in 95% humidity conditions for 28 days. The cubes were tested in compression and the characteristic strengths ranged between 48.6 MPa and 50.4 MPa [16].

The longitudinal steel reinforcement consisted of 8 mm PC rebars and the transverse one consisted of 8 mm OB stirrups, mounted at 100 and 150 mm to avoid the shear failure of the beams. PC 52 and OB37 reinforcements follow the provisions of SR 438-1:2012 norm, their yielding stress being 355 MPa and 255 MPa, respectively [17].

For all beams, the concrete cover was 25 mm for the upper and lateral sides and 35 mm for the bottom side.

The CFRP strips (Carboplate E170) were selected in accordance with the suppliers' offer and their properties are presented in Table 1.

The groove-filling material (Adesilex PG1) utilized in the experimental program is a two component epoxy adhesive with a mixing ratio of 3 (resin):1(hardener) by weight. In order to enhance the adherence between the concrete and the FRP composites, a primer (MapeWrap Primer1) was used. The properties of these materials are given in Table 2.

The strengthening of the RC specimens has been made following the technological steps that are also documented in literature [21]. The grooves were cut in the tensioned side of the RC beams, after marking their precise positions in advance, using a diamond blade cutter. Compressed air was used to remove the dust and debris resulted from cutting. A thin layer of primer was then applied in order to ensure a proper

Tabelul 1

Proprietățile fâșiilor din CPAFC / Properties of CFRP strips [18]		
Caracteristici / Characteristics	Tipul/Type - MAPEI Carboplate170	
Grosime x lățime / Thickness x width (mm)	1.4 x 100	
Densitate / Density (g/cm ³)	1.61	1.61
Modulul de elasticitate / Modulus of elasticity (GPa)	170	170
Rezistența la tracțiune / Tensile strength (N/mm ²)	≥3100	≥3100
Alungirea la rupere / Ultimate elongation (%)	2	2

Tabelul 2

Proprietățile adezivului epoxidic și ale grundului / Properties of the epoxy adhesive and of primer [19, 20]		
Caracteristici / Characteristics	Adesilex PG1	MapeWrap Primer1
Raport amestec / Mixing ratio	Component A:Component B = 3:1	Component A : Component B = 3:1
Densitate / Density (g/cm ³)		1.1
Temperatura de aplicare / Application temperature range	+5° to +30°C	+10° to +30°C
Timp întărire finală / Complete hardening time	7 zile / 7 days	7 zile / 7 days
Aderența dintre beton și Carboplate / Concrete-Carboplate bond strength (N/mm ²)	> 3 (cedarea betonului / failure of concrete)	> 3 (după 7 zile la +23°C) / (after 7 days at +23°C)
Modulul de elasticitate la compresiune / Compressive modulus of elasticity (N/mm ²)	8000	-
Rezistența la compresiune / Compressive strength (N/mm ²)	70	-
Rezistența la forfecare / Shear strength (N/mm ²)	40	-

dintre beton și CPAFC (tabel 2).

Consolidarea grinzilor din beton armat cu fâșii înguste din CPAFC s-a realizat urmărind etapele tehnologice cunoscute, atât din experiența proprie cât și cercetări experimentale asemănătoare [21].

Șlițurile au fost tăiate la partea întinsă a grinzilor din beton armat, folosind un polizor unghiular cu disc diamantat, după trasarea precisă în prealabil a pozițiilor acestora. Particulele de praf și bucățile mici de beton rezultate în urma tăierii au fost îndepărtate prin suflare cu aer sub presiune. Un strat subțire de amorsă a fost apoi aplicat pentru a se îmbunătăți aderența dintre adeziv și substratul de beton. Fiecare șliț a fost parțial umplut cu adeziv epoxidic, după prepararea în

bonding between the epoxy adhesive and the concrete substrate. Each groove has been partially filled with epoxy adhesive, prepared in advance according to the manufacturer's instructions. The carbon narrow strips were then placed into grooves and gently pressed along their whole length, so that the spaces between the composites and the sides of the slits were completely filled. The surface was then leveled and the excess of adhesive was removed (Fig. 6).

2.2. Testing procedure

The RC beams were tested with the ZDM 300 universal hydraulic press equipment, located at The Faculty of Civil Engineering and Building Services, Iași. The used testing machine can be



Fig. 6 - Prepararea șlițurilor / Slits preparation: a) trasarea pozițiilor șlițurilor / marking the grooves position; b) tăierea șlițurilor / saw-cutting the slits; c) curățarea șlițurilor / cleaning the grooves; d) aplicarea grundului / applying the primer; montarea fâșiilor din CPAFC în șlițuri / inserting the CFRP strips into the cut grooves; e) aplicarea adezivului / applying the adhesive; f) montarea fâșiilor din CPAFC / mounting the CFRP strips; g) înlăturarea excesului de adeziv / removing the excess epoxy adhesive.

prealabil a acestuia conform indicațiilor date de producător. Fâșiile înguste din CPAFC au fost apoi introduse în caneluri și presate ușor pe toată lungimea acestora, astfel încât volumul dintre armătura compozită și marginile șlițurilor să fie umplut în totalitate. Suprafața a fost apoi nivelată iar excesul de adeziv a fost îndepărtat (fig. 6).

2.2. Metodologia testării

Grinzile din beton armat au fost testate la mașina universală de încercat ZDM 300 aflată în dotarea Facultății de Construcții și Instalații din Iași cu o capacitate de 3000 kN. Standul de încercări a fost construit astfel încât schema statică a grinzilor din beton armat să fie simplu rezemată, cu deschiderea între reazeme de 2700 mm (fig. 7).

controlled manually and it can apply loads up to 3000 kN. The testing stand has been designed so that the RC beams could be loaded as simply supported, with the span between the supports equal to 2700 mm (Fig. 7).

The beams were tested under four point bending. The total load was transmitted to the tested concrete elements through two metallic cylindrical parts situated in one third of the span, thus resulting one interval of pure bending, and two intervals with bending and shear.

The applied force has been monitored using a 200 kN load cell, connected directly to the loading system. During the experiment, the deflections were measured using five linear variable differential transducers (LVDT), mounted at 450 mm spacing (Fig. 7).

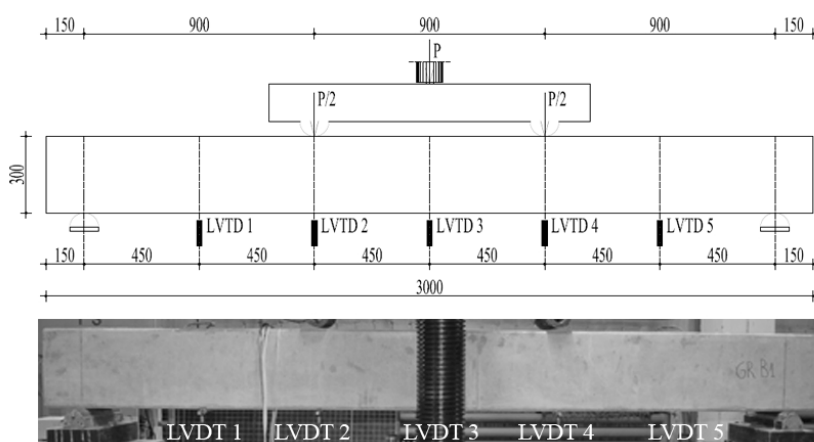


Fig. 7 - Standul experimental și poziționarea traductoarelor
The experimental set up and the LVDT positioning (mm).

Grinzile au fost solicitate la încovoiere cu moment încovoiator constant pe treimea centrală. Încărcarea totală a fost transmisă la elementele din beton armat prin intermediul a două piese metalice cilindrice poziționate la limitele treimii centrale, realizându-se astfel un interval de solicitare la încovoiere pură și două intervale de solicitare la încovoiere cu forfecare.

Forța aplicată a fost monitorizată folosind o celulă de forță de 200 kN, conectată direct la sistemul de încărcare. În timpul experimentului, deplasările transversale au fost măsurate folosind cinci traductoare inductive de deplasare cu fir (LVDT), montate la distanță de 450 mm între ele (fig. 7).

2.3 Rezultate experimentale

Grinzile din beton armat au fost testate până la cedare, sub încărcări statice monoton crescătoare. În timpul experimentului, au fost monitorizați următorii parametri: valoarea forței aplicate, apariția și dezvoltarea fisurilor și deplasarea transversală măsurată în cinci puncte stabilite anterior.

Curbele forță – deplasare pentru toate grupele de grinzi testate sunt reprezentate grafic în figura 8 și reprezentând răspunsul structural al elementelor încercate.

2.3 Experimental results

The RC beams have been tested up to failure under static monotonically increased loading. During the testing, the following parameters have been monitored: the applied load, the crack initiation and development, and the transverse displacements measured in the previously established five points. The load-displacement curves of all groups of the tested beams are plotted in Figure 8, illustrating the effect of the NSM FRP strengthening system on the behaviour of the RC beams, and the structural response of all tested elements.

Typically, the force – displacement curve for the tested RC specimens can be divided into three parts as it follows: the pre – cracking zone, the typical working zone, and the post – yielding zone [21]. In the initial stages of loading, the structural response of all tested RC beams was linear elastic and the NSM FRP reinforcement had an insignificant effect. Once cracks were initiated in the tension sides of the RC beams and until the yielding of the steel reinforcement, a significant increase in stiffness of the strengthened specimens was noticed, when compared to the control specimen. The last stage comprised the interval between the steel yielding and the effective failure of the RC beams. In this stage, as

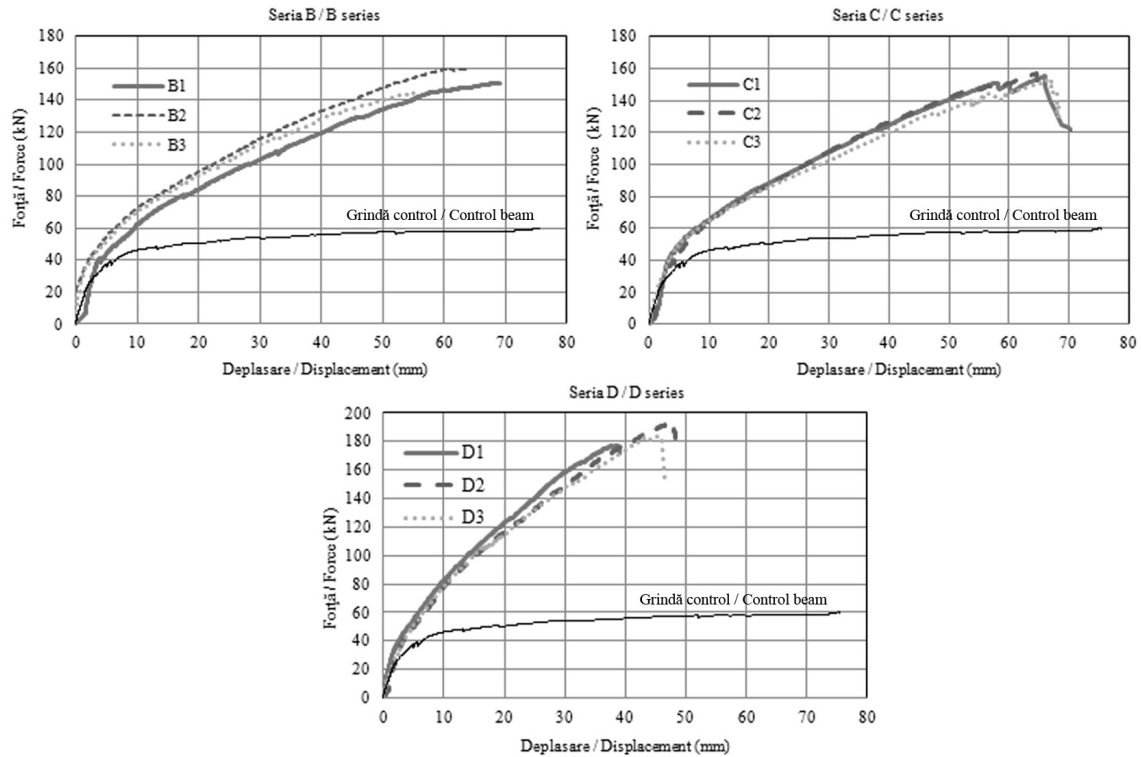


Fig. 8 - Diagrame forță – deplasare / Load - displacement curves.

În general, curba forță – deplasare de la toate grupele de grinzi testate poate fi împărțită în trei sectoare, după cum urmează: zona de pre – fisurare; zona tipică de lucru și zona de după intrarea în curgere a armăturii [21].

În etapele inițiale de încărcare, răspunsul tuturor grinzilor a fost linear elastic, aportul armăturii NSM la probele consolidate fiind nesemnificativ. Odată cu apariția fisurilor la partea tensionată a grinzilor și până la intrarea în curgere a armăturii din oțel, a fost observată o creștere semnificativă a rigidității la probele consolidate, în comparație cu grinzile de control. Ultima etapă de încărcare surprinde intervalul de după intrarea în curgere a armăturii din oțel și cedarea efectivă a grinzilor din beton armat. În această etapă, pe măsură ce forța se mărește, rata de creștere a deplasărilor transversale este mai mare decât cea din etapele anterioare.

the load increased, the transverse deflections increased at a higher rate than in the previous stages.

The experimental results of all the tested specimens are summarized in Table 3.

The control specimen of type A failed by concrete crushing after the yielding of the bottom steel reinforcement.

For beams of type B and C, strengthened with identical areas of CFRP (50.4 mm^2), an increase of the bending moment capacity up to 168% and a decrease of the mid – span deflection up to 24% were recorded, compared to the control specimens.

Beams of type D, strengthened with 100.8 mm^2 of CFRP, increased their bending moment capacity up to 220% and decreased their mid – span deflection up to 49%.

Tabelul 3

Rezultate experimentale / Experimental results				
Serie / Series	Grinzi / Beam	Cedare grindă / Beam Failure		Mod cedare / Failure mode
		Forță / Force (kN)	Deplasare / Displacement (mm)	
A	A1	58.3	74.8	Curgere armătură Reinforcement yielding
	A2	59.7	75.5	
	A3	60.2	76.1	
B	B1	151	68.5	Desprindere acoperire beton Concrete cover separation
	B2	159.8	64.8	
	B3	144.8	57.5	
C	C1	155.3	66.2	
	C2	157	64.7	
	C3	153.5	66.9	
D	D1	177.7	38.7	
	D2	191.5	46.6	
	D3	183.6	45.6	

În tabelul 3 sunt centralizate rezultatele experimentale ale tuturor grinzilor testate.

Grinzile din beton armat neconsolidate din seria A au cedat prin strivirea betonului după intrarea în curgere a armăturii din oțel de la partea inferioară.

Pentru grinzile din seriile B și C, consolidate cu o arie similară de armătură din CPAFC (50,4 mm²), s-au obținut creșteri ale capacității portante de până la 168% și reduceri ale deplasărilor transversale maxime de până la 24%, în comparație cu grinzile de control.

Grinzile din seria D, consolidate cu o arie de 100,8 mm² de armătură din CPAFC, au înregistrat creșteri de capacitate portantă de până la 220% și reduceri ale deplasărilor transversale la mijlocul deschiderii de până la 49%, în comparație cu probele martor.

Cedarea grinzilor consolidate din beton armat a avut loc prin desprinderea acoperirii de beton de la partea tensionată a acestora, (fig. 9).

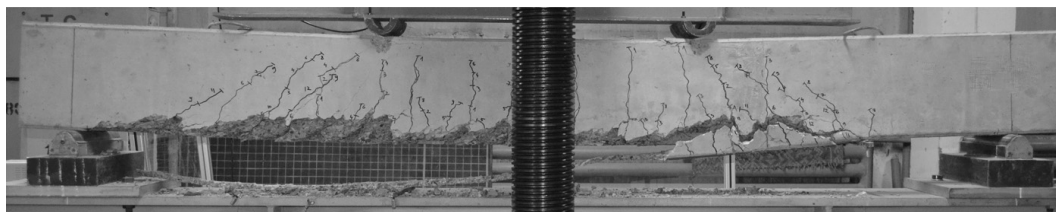


Fig. 9 - Mod tipic de cedare pentru grinzile consolidate / Typical failure mode for the strengthened beams.

3. Modelare numerică

3.1 Modele geometrice pe bază de element finit

Studiul realizat în cadrul acestei lucrări a fost completat cu modelări numerice; au fost generate patru modele numerice tri – dimensionale (fig. 10) folosind programul pe bază de element finit ANSYS [22]. Modelele au aceeași geometrie, proprietăți ale materialelor și condiții limită ca și grinzile din beton armat testate în cadrul programului experimental.

Datorită simetriei longitudinale și transversale a geometriei, modelele numerice realizate cuprind doar un sfert din volumul grinzilor din beton armat testate experimental. Condiția de simetrie a fost asigurată prin constrângerea tuturor deplasărilor în planul perpendicular pe planul de simetrie. Pentru a se evita concentrările de tensiuni în reazeme și în punctele de încărcare ale grinzilor au fost adăugate plăci rigide din oțel cu dimensiunea de 100 x 200 x 25 mm.

Betonul a fost simulat folosind elemente structurale de tip SOLID 65, cu opt noduri și trei grade de libertate în fiecare nod. Aceste elemente sunt adecvate pentru modelarea caracterului neliniar al betonului datorită fisurării acestui material la tensiune și de strivire la compresiune. Armătura longitudinală / transversală din oțel și fâșiile înguste din CPAFC, montate în zona din imediata apropiere a fețelor întinse, au fost

For all strengthened specimens, failure occurred by concrete cover separation (CCR), starting at the cut off section of the NSM reinforcement, (Fig. 9).

3. Numerical modelling

3.1 Geometry of the FE models

As part of the research presented in this paper, four 3D finite element (FE) models (Fig. 10) were developed using the ANSYS software package [22]. The models have the same geometry, material properties and boundary conditions as the RC specimens tested in the experimental program.

Due to the longitudinal and transversal symmetry of the geometry and of the boundary conditions, the numerical models have included only one quarter of the experimentally tested beams. The symmetry was simulated by restraining the displacement in the plane

perpendicular to the plane of symmetry. To avoid stress concentration issues, steel plates (100 x100 x 25 mm) were added, both to the supports and to the loading points of the beams.

The concrete was simulated using the SOLID 65 solid structural element defined by eight nodes with three degrees of freedom at each of them. The element is suitable for modelling the nonlinear behaviour of the concrete, due to its capability to accommodate cracking in tension and crushing in compression. The longitudinal and transversal steel reinforcement and the NSM CFRP reinforcement were simulated using the 3D spar element LINK 8. This element has two nodes and three degrees of freedom at each edge node. The contact between the concrete and the steel reinforcement and also between the adhesive and the composite material was considered to be perfect. Both the steel and the NSM reinforcement were included in the FE models as a discrete model. The rigid steel supports and the filling material (epoxy adhesive) were modelled using the SOLID 45 structural element.

Figure 11 presents the element types used in the FE models.

In this study, the nonlinear behaviour of the concrete was defined using its following mechanical properties: compressive strength (f_c) of 50 MPa, tensile strength (f_t) of 4.3 MPa, elastic modulus (E_c) of 32655 Mpa, and Poisson ratio of

simulate folosind elemente tri – dimensionale de tip LINK 8, cu două noduri și trei grade de libertate în fiecare nod. Atât conlucrarea dintre beton și armăturile din oțel cât și cea dintre adeziv și fâșiile înguste din CPAFC au fost considerate perfecte. Modelarea armăturilor din oțel și a celor din carbon s-a realizat folosind modul discret de reprezentare. Plăcile rigide din oțel și adezivul epoxidic au fost modelate folosind elemente structurale de tip SOLID 45.

0.2. The compressive uniaxial stress – strain curve for the concrete [23] was incorporated in the FE models with the Multi – linear Isotropic Hardening (MISO) option (Fig. 12). The William and Warke model [24] along with the Von Mises failure criteria were used to define the failure of the concrete and steel reinforcement, respectively. The response of the steel reinforcement bars was assumed to be linear elastic – perfectly plastic. A Poisson ratio of

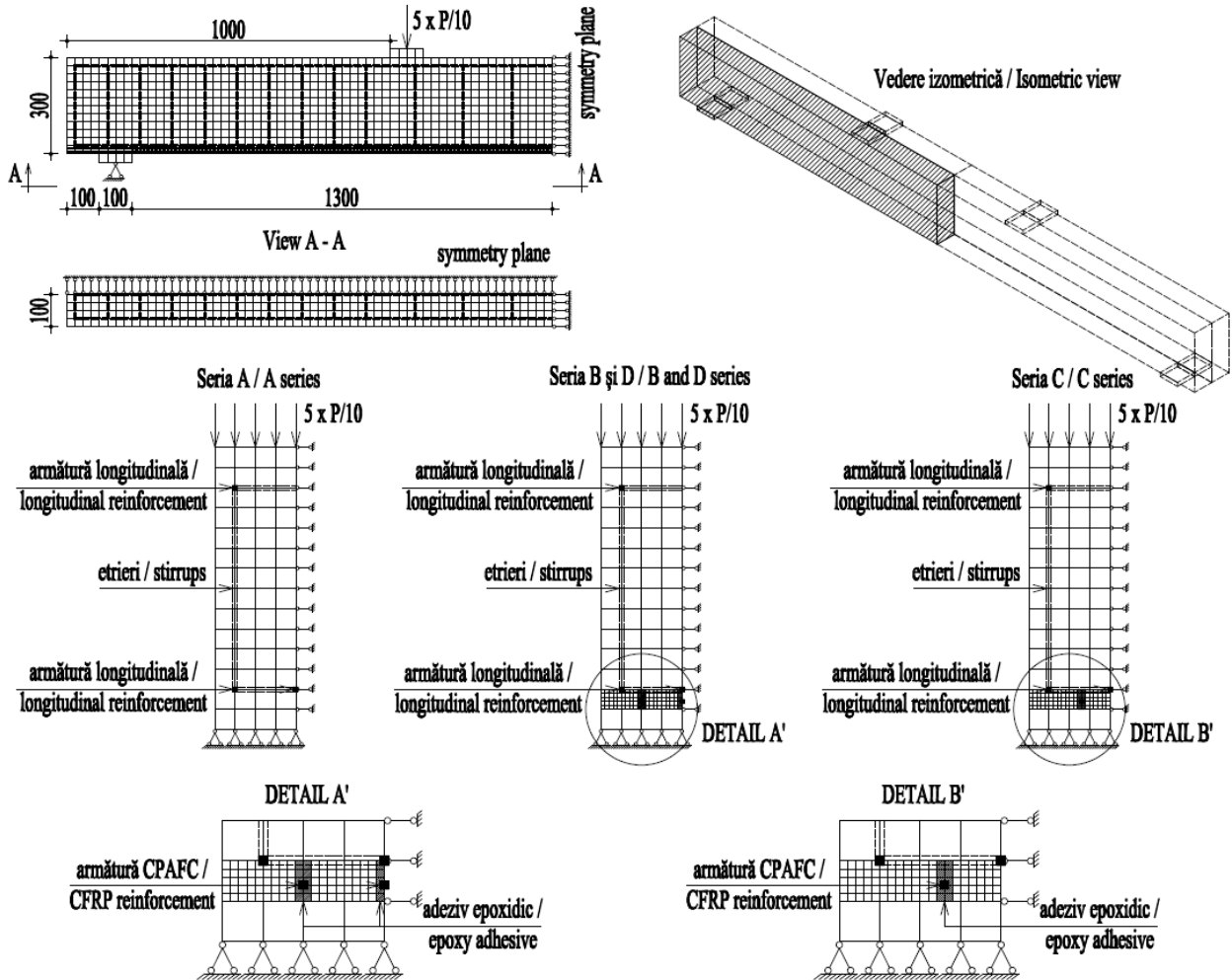


Fig. 10 - Geometria modelelor utilizate la analiza cu EF / The geometry of the FE analysis models.

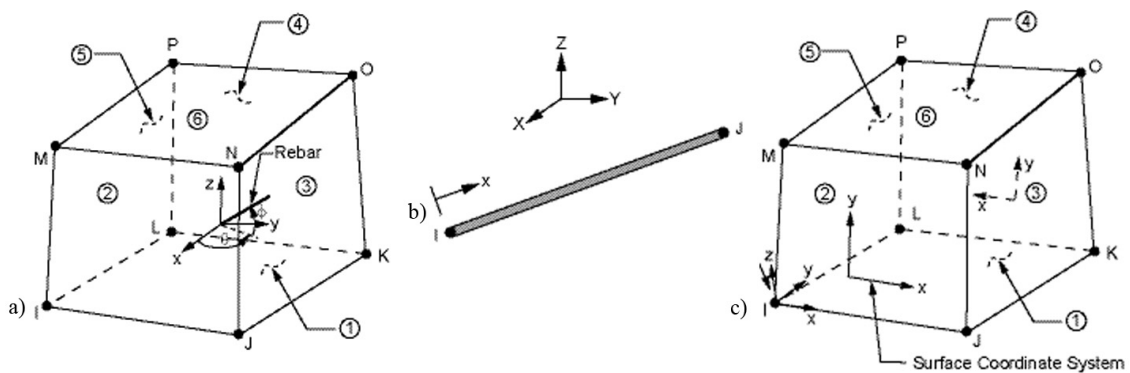


Fig. 11 - Tipuri de elemente folosite în modelele cu EF / Element types used in FE models: a) SOLID 65; b) LINK 8; c) SOLID 45.

În figura 11 sunt prezentate tipurile de elemente folosite pentru realizarea modelelor numerice.

În acest studiu s-a considerat comportarea neliniară a betonului utilizând următoarele caracteristici mecanice: rezistența la compresiune (f_c) egală cu 50 MPa, rezistența la întindere (f_t) egală cu 4,3 MPa, modulul de elasticitate (E_c) cu valoarea 32655 MPa și coeficientul lui Poisson egal cu 0,2. Curba de compresiune uniaxială a betonului [23] a fost încorporată în modelul numeric folosind opțiunea MISO a programului pe bază de element finit (Fig.12). Modul de cedare al betonului a fost definit folosind modelul propus de William și Warke [24], iar pentru armături s-a folosit criteriul de cedare Von Mises. Răspunsul armăturilor din oțel a fost considerat liniar - elastic - perfect plastic. Pentru coeficientului lui Poisson s-a adoptat valoarea 0,3, iar valorile modulului de elasticitate și a limitei de curgere au fost considerate 255 GPa și respectiv 355 MPa. Armăturile din carbon, adezivul epoxidic și plăcile rigide din oțel s-au modelat prin materiale cu proprietăți liniar - elastice, valorile acestora fiind prezentate anterior.

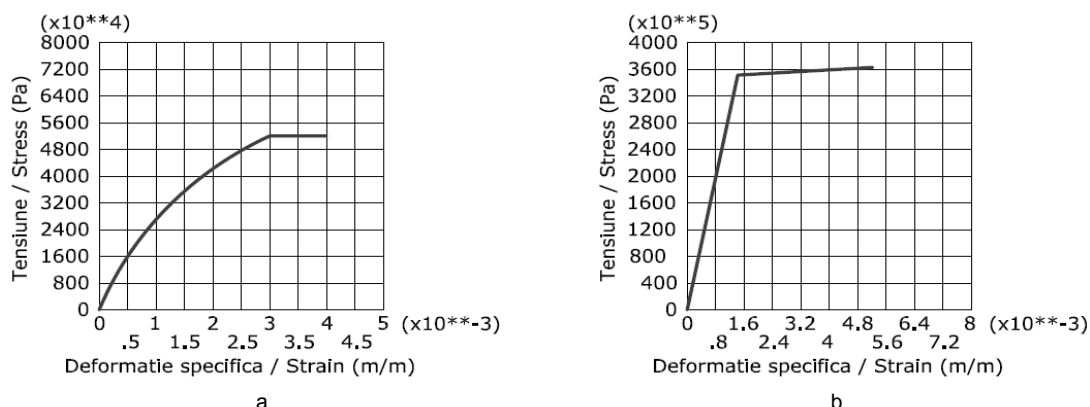


Fig. 12 - Curbe tensiuni – deformații specifice / Stress – strain curves: a) beton / concrete; b) oțel / steel.

În analiza neliniară, forța totală aplicată modelului geometric a fost divizată într-o serie de trepte și sub - trepte de încărcare. La sfârșitul fiecărei trepte de încărcare, programul a ajustat automat matricea de rigiditate a modelului, folosind iterațiile de echilibru Newton – Raphson utilizând criteriile de convergență legate de forță și deplasare. Programul utilizat are limitele de toleranță pentru convergență 0,5 % pentru verificarea forței și 5 % pentru verificarea deplasărilor. Forța limită ultimă a fiecărui model geometric a fost atinsă când pasul de 10 N nu a mai îndeplinit criteriile de convergență [25].

3.2 Rezultatele modelării numerice

Validitatea modelelor numerice create a fost evaluată comparând rezultatele obținute în urma modelării cu cele obținute pe cale experimentală (tabel 4) și a celor calculate pe cale teoretică, (tabel 5).

0.3 was specified and the elastic modulus and yield strength were 255 GPa and 355 MPa, respectively. A linear elastic material was assigned to the CFRP reinforcement, epoxy adhesive and rigid steel plates. Their mechanical properties have been previously presented.

The nonlinear analysis requires dividing the applied monotonic load into a series of load steps and sub - steps. At the end of each incremental solution the stiffness matrix was adjusted using the Newton – Raphson equilibrium iterations. The convergence criteria used was based on force and displacement. The convergence tolerance limits were 0.5 % for force checking and 5% for displacement checking. The predicted ultimate load of each numerical model was achieved when the 10 N load increment did not converge [25].

3.2 Numerical modelling results

In order to assess the validity of the developed FE models, the results of numerical simulations were compared with those obtained experimentally. A summary of the experimental and numerical results is presented in Table 4. Results obtained analytically are presented in Table 5.

A comparison between the average experimentally recorded and numerically simulated load-displacement diagrams for the control beams and the strengthened ones is illustrated in Figure 13.

4. Summary and conclusions

The use of the NSM CFRP reinforcement strengthening technique for the flexural strengthening of RC beams was experimentally, numerically and analytically investigated in this paper.

The experimental results confirmed the efficiency of the NSM strengthening technique. The ultimate load on the beams has been significantly increased, as it follows: for beams of type B and C, strengthened with 50.4 mm² of CFRP, the maximum increase in ultimate load was 158% while for beams of type D, strengthened with 100.8 mm² of CFRP, the maximum increase of

În figura 13 este prezentată o comparație între diagramele forță – deplasare cu valorile medii obținute în urma testărilor experimentale și a modelărilor numerice pentru toate grupele de grinzi testate.

load was 220%. Also, this strengthening technique improves the rigidity of the RC beams. For specimens of type B and C the maximum mid-span deflection decreased with 17.33% and for the ones of type D, with 49%.

Tabelul 4

Rezultate experimentale și numerice / Experimental and numerical results

Seria Series	Grinzi Beams		Prima fisură / First Crack		Curgere armătură Steel Yielding		Forță ultimă / Ultimate force	
			Forță / Force (kN)	Depl. / Displ. (mm)	Forță / Force (kN)	Depl. / Displ. (mm)	Forță / Force (kN)	Depl. / Displ. (mm)
A	A1	Exp.	31.5	2.8	47.9	11.8	58.3	74.8
	A2	Exp.	32	2.9	48.3	12.3	59.7	75.5
	A3	Exp.	33	3	49.5	13.2	60.2	76.1
	A-NUM	Num.	31.5	0.7	48.6	11.5	54.5	33.4
B	B1	Exp.	32	3	80.9	18.5	151	68.5
	B2	Exp.	31.5	2.9	82	16	159.8	64.8
	B3	Exp.	31.7	1.1	81	15.5	144.8	57.5
	B-NUM.	Num.	31	1.1	79.5	16.1	144.2	46.2
C	C1	Exp.	32.5	2.6	59.9	7.7	155.3	66.2
	C2	Exp.	31.9	2.3	60.2	8.2	157	64.7
	C3	Exp.	32	2.4	62.2	8.9	153.5	66.9
	C-NUM.	Num.	30	0.9	57.2	8.6	146.3	47.9
D	D1	Exp.	31	1.5	81	9.6	177.7	38.7
	D2	Exp.	31.5	2.5	82.2	10.9	191.5	46.6
	D3	Exp.	30.9	1.5	80.4	9.5	183.6	45.6
	D-NUM.	Num.	30.2	0.8	81	9.8	174.3	33.6

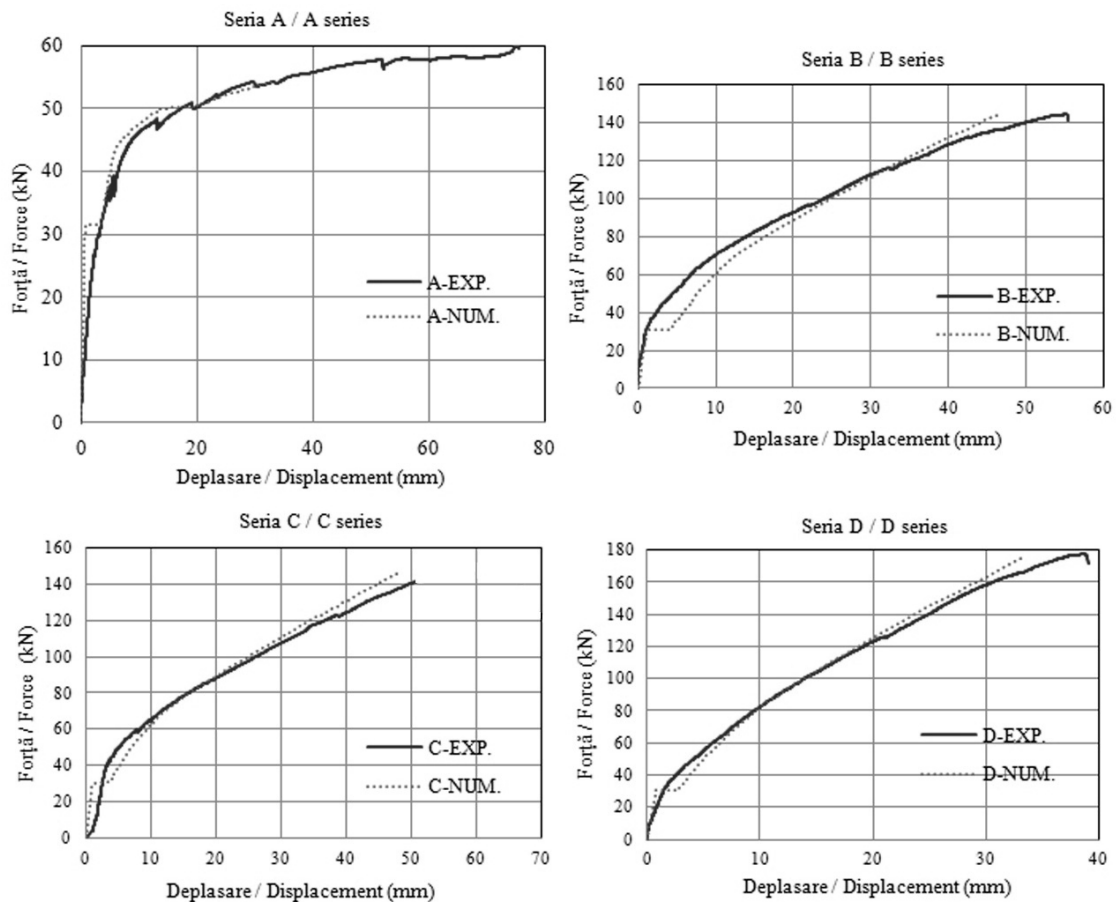


Fig. 13 - Comparații între diagramele forță – deplasare obținute experimental și numeric / Comparison between experimental and numerical load – displacement diagrams.

Tabelul 5

Forțele ultime obținute pe cale experimentală, numerică și teoretică
Experimental, numerical and theoretical results for the ultimate force

Seria / Series	Grinzi / Beams	Metodă / Method	Forță ultimă / Ultimate force (kN)
A	A1	Exp.	58.3
	A2	Exp.	59.7
	A3	Exp.	60.2
	A-NUM	Num.	54.5
	A-TEOR.	Teor.	61.3
B	B1	Exp.	151
	B2	Exp.	159.8
	B3	Exp.	144.8
	B-NUM	Num.	144.2
	B-TEOR.	Teor.	144.8
C	C1	Exp.	155.3
	C2	Exp.	157
	C3	Exp.	153.5
	C-NUM	Num.	146.3
	C-TEOR.	Teor.	143.6
D	D1	Exp.	177.7
	D2	Exp.	191.5
	D3	Exp.	183.6
	D-NUM	Num.	174.3
	D-TEOR.	Teor.	190.1

4. Concluzii

În lucrare a fost analizată din punct de vedere teoretic, experimental și prin modelare numerică comportarea grinzilor din beton armat consolidate cu fâșii înguste din CPAFC montate în zona din imediata apropiere a feței întinse.

Rezultatele experimentale au evidențiat faptul că instalarea fâșiilor din CPAFC la partea întinsă a grinzilor din beton armat a condus la creșterea semnificativă a forței ultime, astfel: pentru grinzile din seriile B și C, consolidate cu 50,4 mm² CPAFC, creșterea forței ultime a fost de 158%, iar pentru grinzile din seria D, consolidate cu 100,8 mm² CPAFC, forța ultimă a crescut cu 220%. De asemenea, consolidarea grinzilor cu fâșii din CPAFC conduce la creșterea rigidității acestora. Pentru grinzile din seriile B și C, deplasarea maximă verticală a scăzut cu 17,33% iar pentru cele din seria D, cu 49%.

Cedarea grinzilor consolidate din beton armat, testate la încovoiere sub încărcare monoton crescătoare, s-a produs prin desprinderea acoperirii de beton de la partea întinsă a acestora, fiind inițiată la un capăt al armăturii din CPAFC.

Rezultatele obținute în urma verificărilor analitice și numerice sunt în bună concordanță cu cele obținute pe cale experimentală.

REFERENCES

1. L. C. Hollaway and J.G. Teng, Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites, CRC Press, Boca Raton, USA, 2008.
2. L. Bejan, N.Taranu, A. Sarbu, Advanced polymeric composites with hybrid reinforcement, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2010, 12 (9), 1930

The failure mode for all strengthened specimens occurred by debonding in the form of concrete cover separation, starting at the cut off section of the NSM reinforcement.

The results obtained by analytical and numerical models simulation are in good accordance with the ones experimentally obtained.

3. G. Oprișan, N. Țăranu, M. Budescu and I. Ențuc, Structural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by CFRP plate bonding, Romanian Journal of Materials, 2012, 42(4), 387.
4. N. Țăranu, D. Banu, G. Oprișan, M. Budescu and L. Bejan, Strengthening of thin reinforced concrete slabs with composite strips, Romanian Journal of Materials, 2013, 43(1), 3.
5. G. Oprișan, N. Taranu, V. Munteanu, M. Budescu, Cozmanciuc, R. Oltean, Improvement of concrete strength through confining with composite membranes, Romanian Journal of Materials, 2011, 41 (4), 302
6. W. K. K. G. Kalupahana, T. J. Ibell, A. P. Darby, Bond characteristics of near surface mounted CFRP bars, Construction and Building Materials, 2013, 43, 58.
7. I. A. Sharaky, L. Torres, J. Comas and C. Barris, Flexural response of reinforced concrete (RC) beams strengthened with near surface mounted (NSM) fibre reinforced polymer (FRP) bars, Composite Structures, 2014, 109, 8.
8. F. Al – Mahmoud, A. Castel, R. Francois, C. Tourneur, Strengthening of RC members with near – surface mounted CFRP rods, Composite Structures, 2009, 91, 138
9. J. M. Sena – Cruz, J. A. O. Barros, M. R. F. Coelho, L. F. F. T. Silva, Efficiency of different techniques in flexural strengthening of RC beams under monotonic and fatigue loading, Construction and Building Materials, 2011, 29, 175
10. P. Balaguru, A. Nanni and J. Giancaspro, FRP composites for reinforced and prestressed concrete structures. A guide to fundamentals and design for repair and retrofit, Taylor & Francis Group, New York, 2009.
11. H.V.S. GangaRao, N. Taly, P.V. Vijay, Reinforced concrete with FRP composites, CRC Press, Boca Raton, 2007.
12. SR EN 1992-1-1:2004 – Design of concrete structures. Part 1 – General rules and rules for buildings.

13. xxx, ACI 440.2R-2008 – Guide for design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures.
14. P. Ciobanu, N. Taranu, S. Popoaei, P. Mihai and A. Axinte, Structural response of reinforced concrete beams strengthened in flexure with near surface mounted fibre reinforced polymer reinforcement. Experimental results, The Bulletin of the Polytechnic Institute of Iasi, Construction. Architecture Section, 2012, **LIX(LVIII)**(4), 108.
15. xxx, SR EN 197-1 Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements.
16. xxx, SR EN 12390-2:2002. Testing hardened concrete - Part 2: Making and curing specimens for strength tests.
17. xxx, SR 438-1:2012, Steel products for reinforced concrete. Part 1: Hot rolled reinforcements, Romanian Association for Standardization, Bucharest, Romania, 2012
18. xxx, Technical Sheet: Carboplate: Pultruded carbon fibre plate pre-impregnated in epoxy based resin, protected by a double plastic film, MAPEI, Milano, Italia, 2010.
19. xxx, Technical Sheet: Adesilex PG1 / Adesilex PG2: Two - component thixotropic epoxy adhesives for structural bonding, MAPEI, Milano, Italia, 2010.
20. xxx, Technical Sheet: MapeWrap Primer 1: Epoxy primer for MapeWrap system, MAPEI, Milano, Italia, 2010.
21. S. Rankovic, R. Folic and M. Mijalkovic, Flexural behaviour of RC beams strengthened with NSM CFRP and GFRP bars – Experimental and numerical study, Romanian Journal of Materials, 2013, **43**(4), 377.
22. xxx, ANSYS – release version 11. A finite element computer software theory and user manual for nonlinear structural analysis, ANSYS 2007; Inc. Canonsburg, PA
23. E. Hognestad, N. W. Hanson and D. McHenry, Concrete stress distribution in ultimate strength design, ACI J Proc, 1955, **52** (12), 455.
24. K. William, E. D. Warnke, Constitutive model for the triaxial behaviour of concrete, Proceedings, international association for bridge and structural, 1975, **19**.
25. R. A. Hawileh, Nonlinear finite element modeling of RC beams strengthened with NSM FRP rods, Construction and Building Material, 2012, **27**, 461.

MANIFESTĂRI ȘTIINȚIFICE / SCIENTIFIC EVENTS

ICCBM 2015 : XIII International Conference on Construction and Building Materials Copenhagen, Denmark, June 11 - 12, 2015



The **ICCBM 2015: XIII International Conference on Construction and Building Materials** aims to bring together leading academic scientists, researchers and research scholars to exchange and share their experiences and research results about all aspects of Construction and Building Materials. It also provides the premier interdisciplinary and multidisciplinary forum for researchers, practitioners and educators to present and discuss the most recent innovations, trends, and concerns, practical challenges encountered and the solutions adopted in the field of Construction and Building Materials.

Topics:

Materials and constructions
Systems
Building technologies
Energy and Sustainability
Heritage, rehabilitation and Maintenance,
Building Construction
Management

Contact: <http://www.waset.org/conference/2015/06/copenhagen/ICCBM>
