

# COMPORTAREA GRINZILOR DIN BETON ARMAT CONSOLIDATE CU FÂȘII COMPOZITE ARMATE CU FIBRE DE CARBON STRUCTURAL BEHAVIOUR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED BY CFRP PLATE BONDING

GABRIEL OPRÎȘAN, NICOLAE ȚĂRANU\*, MIHAI BUDESCU, IOANA ENTUC

Universitatea Tehnică "Gh. Asachi" Iași, Bdul. Mangeron nr. 43., 700050, Iași, România

## Compozitele polimerice armate cu fibre (CPAF)

se utilizează cu succes la consolidarea grinzilor din beton armat îmbunătățindu-le răspunsul structural la solicitările uzuale. Soluțiile cele mai frecvente se bazează pe utilizarea platbandelor prefabricate din CPAF lipite cu adezivi pe fața inferioară a grinzii sau pe aplicarea directă a unor fâșii din țesături cvasi-unidirecționale realizate din fibre de carbon sau sticlă, impregnate cu rășini polimerice.

În cadrul unui program experimental desfășurat la Facultatea de Construcții și Instalații din Iași au fost testate mai multe grinzi din beton armat consolidate, evidențiindu-se modul de lucru, tipurile de cedare și eficiența structurală a sistemelor propuse. Răspunsul structural a fost evaluat prin solicitarea grinzilor la momentul încovoietor constant, identificându-se diferențele în raport cu grinzele neconsolidate atât în privința capacității portante cât și a rigidității. Rezultatele au fost comparate cu cele obținute prin modelare numerică.

## Fibre reinforced polymer (FRP) composites are

currently successfully implemented to strengthening of reinforced concrete (RC) beams improving their structural response to frequent loading conditions. The most utilized techniques are based on prefabricated composite plates bonded to the tension side with adhesives or by bonding quasi-unidirectional fabrics made of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites or glass fibres fabrics impregnated with polymeric resins.

An experimental program has been carried out at The Faculty of Civil Engineering and Building Services Iași, to verify a number of strengthening solutions and reveal the working conditions, failure types and the structural efficiency of the proposed systems. The structural response has been evaluated through testing the RC beams under four points loading scheme. The difference in structural behaviour of unstrengthened and strengthened beams has been revealed on both loading bearing capacity and stiffness. The experimental results have been compared to those obtained by numerical modeling.

**Keywords:** plate bonding, failure modes, carbon fibres, numerical modeling, structural response

## 1. Introducere

În ultimii ani, în dezvoltarea sectorului de construcții au apărut tendințe și preocupări noi vizând reabilitarea funcțională și structurală a obiectivelor realizate cu circa jumătate de secol în urmă.

Aceste preocupări au apărut datorită faptului că un volum important al lucrărilor de infrastructură a fost realizat la mijlocul secolului trecut și are acum o vechime de peste 60 de ani. Multe structuri din beton armat proiectate și construite după cel de-al doilea război mondial nu au luat în considerare problema durabilității materialelor și structurilor de aceea prezintă deficiențe structurale care solicită o reabilitare imediată pentru a le permite utilizarea în continuare.

În ultima parte a secolului trecut, numai în Europa, circa 84.000 de poduri din beton armat și precomprimat au necesitat reparații și consolidări, lucrări care au atins costuri foarte ridicate [1]. În ultimele decade repararea și consolidarea structurilor din beton armat utilizând compozite polimerice armate cu fibre a devenit o soluție alternativă eficientă și viabilă la soluțiile bazate pe elemente din oțel.

## 1. Introduction

New tendencies have been developed in civil engineering, nowadays, namely those related to functional and structural rehabilitation of the infrastructure objectives constructed about half a century ago.

These objectives have arisen because an important amount of infrastructure work was built in the previous mid-century and now is about sixty years old.

Numerous reinforced concrete structures designed and built after the Second World War did not take into account the durability of materials and structures, therefore they have structural deficiencies that require immediate rehabilitation works to enable the extension of life span and continued use.

In the second half of the 20<sup>th</sup> century in Europe alone, about 84,000 concrete and prestressed concrete bridges requiring repair and consolidation works that have required very high financial resources [1]. In recent decades repairing and strengthening concrete structures using fibre reinforced polymer composites has become an effective and viable alternative to traditional

\* Autor corespondent/Corresponding author,  
Tel.: +4 0232 278 683 extension 1410, e-mail: taranu@ce.tuiasi.ro

Totuși, există anumite dezavantaje referitoare în special la reducerea ductilității elementelor consolidate cu soluții compozite. Această reducere a ductilității a condus în unele situații la evitarea aplicării soluțiilor compozite sau la introducerea unor condiții severe de proiectare mai ales pentru a evita moduri de rupere mai puțin previzibile decât în cazul elementelor clasice din beton armat. Principalii factori care impun consolidarea elementelor portante din beton armat sunt: *coroziunea* (în particular în cazurile în care elementele sunt supuse unui mediu agresiv); *oboseala materialului* (cauzată de efectul cumulativ al încărcărilor alternante, vandalism, incendii sau explozii); *erori de proiectare sau de execuție* (proiectare necorespunzătoare, execuție deficitară, materiale inferioare, calificare necorespunzătoare a lucrătorilor); *schimbarea schemelor de încărcare și a valorilor acestora* (impuse de modificări în procesul tehnologic din unități de producție, schimbarea destinației, iar în cazul podurilor creșterea încărcărilor pe osie); *modificarea cerințelor codurilor de proiectare* [2-5].

Tehnicile de consolidare utilizate sunt fie clasice sau combinate, bazate pe materiale tradiționale dar puse în operă prin torcretare cu mijloace speciale noi [6], prin evazarea secțiunilor, prin placarea cu profile metalice, prin pretensionare exterioară sau utilizând soluții bazate pe compozite polimerice armate cu fibre [7, 8]. Grupul de cercetare pentru aplicarea compozitelor în construcții de la Facultatea de Construcții și Instalații din Iași, a inițiat un program complex de cercetare dezvoltare privind introducerea compozitelor polimerice în ingineria civilă. Echipa de cercetare s-a concentrat pe studii analitice, cercetări experimentale și demonstrații practice referitoare la potențialul remarcabil al aplicării CPAF, inclusiv la reabilitarea structurală a elementelor portante din materiale de construcții tradiționale [9, 10].

## 2. Reabilitarea structurală a elementelor încovoiate din beton armat cu soluții din compozite polimerice armate cu fibre

Consolidarea elementelor din beton armat la solicitarea de încovoiere urmărește suplimentarea armăturii interioare din oțel existent în faza inițială, prin atașarea la fața inferioară, întinsă sau în șlițuri practicate în apropierea acesteia, a unor armături compozite sub formă de platbande cu armare cvasiunidirecțională, lipirea unei membrane compozite obținute prin impregnarea țesăturilor echilibrate sau cvasiunidirecționale, respectiv fâșii înguste sau bare înglobate lângă extremitatea zonei întinse.

Una din cele mai utilizate metode de consolidare a grinzilor din beton armat se aplică prin poziționarea platbandelor din compozite polimerice armate cu fibre de carbon (CPAFC) la

soluții, especially those based on steel elements.

However, there are certain disadvantages relating in particular to a reduced ductility of the strengthened elements based on composite solutions.

This reduction in ductility has led, in some cases, to avoidance of composite solutions in structural rehabilitation or to introduction of very severe design provisions, in particular to avoid failure modes less predictable than in case of reinforced concrete elements.

The main factors that require strengthening of reinforced concrete structural members are: *corrosion* (in particular where the elements are working in an aggressive environment), *fatigue of material* (caused by the cumulative effect of alternating loads, vandalism, fire or explosions), *design or execution errors* (poor design, poor execution, use of inferior materials, unskilled workers) and *changes of the loading schemes as well as the loading values* (imposed by changes in the technological process of production units, the modification of loads position on bridges, and the increased axle loads); *changing the provisions of the modern design codes* [2-5].

The strengthening techniques utilized are either conventional or based on traditional materials applied by shotcreting with new special means [6], by section enlargement, by attaching metallic profiles by external prestressing or using solutions based on fiber reinforced polymer composites [7, 8].

The composite in construction research group from The Faculty of Civil Engineering Iasi initiated a comprehensive program of research and development on the introduction of polymer composites in civil engineering. The research team focused on analytical studies, experimental research and practical demonstrations relating to the remarkable potential for application CFRP, including rehabilitation of the bearing structural members made of traditional building materials [9, 10].

## 2. Rehabilitation of bent structural elements made of reinforced concrete with fiber reinforced polymer composites solutions

Strengthening of the reinforced concrete members subjected to bending aims to supplementing the existing initial steel reinforcement. This purpose is achieved by attaching CFRP plates to the tensioned side, or by embedding near surface narrow mounted composite strips. The attached composite products are prefabricated quasi-unidirectional reinforced plates, composite membranes obtained by impregnating balanced or quasi-unidirectional fabrics, or near surface composite bars or narrow strips.

partea întinsă folosind un adeziv epoxidic. Recomandarea utilizării CPAFC se bazează pe rezistență la întindere și rigiditate ridicate, rezistență la coroziune, densitate scăzută și o tehnologie ușoară de montaj.

Încercările experimentale, calculul analitic și simulările numerice au arătat că placarea grinzilor cu platbande din CPAFC mărește rezistența la încovoiere și rigiditatea acestora. Solicitarea la încovoiere a grinzilor placate cu platbande din CPAFC, a condus la apariția și identificarea unor moduri specifice de cedare [2]: cedarea la compresiune a betonului înainte de intrarea în curgere a armăturii din oțel, cedarea la compresiune a betonului după curgerea armăturii din oțel, ruperea platbandei din CPAFC, cedarea din forfecare, desprinderea platbandei din CPAFC de pe suprafața grinzii, destratificarea CPAFC, cedarea în zona acoperirii cu beton.

Obiectivul acestui articol îl reprezintă studiul răspunsului structural al grinzilor din beton armat placate cu platbande compozite din fibre de carbon și matrice epoxidică, armate cvasiunidirecțional. Răspunsul este evaluat prin relațiile încărcare-deformație și prin analiza comportării grinzii în zona de moment maxim constant, atât experimental cât și prin modelare numerică, utilizând programul de elemente finite LUSAS.

### 3. Programul experimental

#### 3.1. Materiale utilizate

Betonul a fost preparat folosind ciment portland EN 197-1 – CEM I 32,5 N [11], pietriș, nisip și apă, diametrul maxim al agregatelor fiind de 8 mm. Probele pentru determinarea proprietăților betonului au fost turnate în tipare cilindrice, compactate prin vibrare și păstrate timp de 28 zile într-o cameră cu umiditate relativă de 95% [12].

După 28 de zile a fost determinată rezistența la compresiune a betonului pe 5 cuburi de beton cu latura de 100 mm. Armarea grinzilor s-a realizat cu bare longitudinale din oțel beton PC 52, cu diametrul nominal egal cu 10 mm.

Elevația și secțiunea grinzilor din beton armat din cadrul programului experimental se prezintă în figura 1.

În tabelul 1 se prezintă proprietățile materialelor componente, beton și armătură, din care este confecționată grinda, iar în tabelele 2 și 3 sunt prezentate caracteristicile produselor utilizate la placarea grinzilor din beton armat.

One of the most utilised strengthening methods of the reinforced concrete beams is applied by placing the plates of CFRP composites to the tensioned side using an epoxy adhesive. Recommendation of the use of CFRP composites is based on their high tensile strength and high stiffness, corrosion resistance, low density and easy installation.

Experimental tests, analytical calculation and numerical simulations have shown that beams plated with CFRP strips have an increased load capacity to bending and an improved stiffness. However, the bending of the reinforced concrete beams plated with CFRP strips, has led to the identification of some specific modes of failure [2]: concrete compressive failure before the yield of steel reinforcement, concrete compressive failure after the yield of steel reinforcing bars, fracture of the CFRP plate, shear failure, debonding of the CFRP plate, delamination of the composite plate and failure within concrete cover layer.

The objective of this work is to evaluate the structural response of the reinforced concrete beams plated with carbon fibre reinforced epoxy composite strips with a quasi-unidirectional reinforcement. The response is evaluated through load-deformation relationships and the analysis of behavior the RC beam in the maximum constant bending moment portion. The evaluation has been carried out both experimentally and by numerical modeling using finite element software LUSAS.

### 3. Experimental program

#### 3.1. Materials

The concrete has been prepared using Portland cement EN 197-1 - CEM I 32.5 N [11], gravel, sand and water, the maximum diameter of the aggregates being 8 mm. The test specimens for determination of concrete properties have been casted into cylindrical molds, compacted by vibration and kept for 28 days in a room with relative humidity of 95% [12].

The compressive strength of concrete has been determined after 28 days on five concrete cylindrical samples with diameter of 150 mm and height equal to 300 mm. The beams have been reinforced with deformed steel bars PC 52, with a nominal diameter equal to 10 mm.

The elevation and the cross section of a typical reinforced concrete beam utilised in the experimental program is presented in Figure 1.

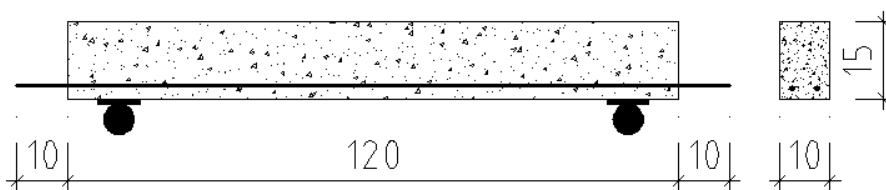


Fig. 1 - Caracteristicile geometrice ale grinzii din beton armat analizate / The geometrical characteristics of the analysed reinforced concrete (RC) beam.

Tabelul 1

Proprietățile betonului și oțelului folosite la grinda din beton armat / Material properties for concrete and steel utilized for the RC beam

Proprietăți / Properties	Beton / Concrete	Oțel / Steel
Rezistența caracteristică pe cilindri / Characteristic cylinder strength [MPa]	22.56	-
Rezistența la tracțiune / Tensile strength [MPa]	-	355
Modulul de elasticitate / Elastic Modulus [GPa]	29.36	210
Deformația specifică ultimă / Ultimate strain [%]	0.35	-

Tabelul 2

Proprietățile fâșiilor din CPAFC utilizate la placare / Properties of CFRP strips for plate bonding

Tipul fibrei/Fibre type	Fibre de carbon/Carbon fibres
Orientarea fibrelor / Fibres orientation	0°C (unidirecțional / unidirectional)
Aria / Area, [mm <sup>2</sup> ]	60
Grosimea / Thickness, [mm]	1.2
Rezistența la tracțiune a fibrelor / Tensile strength of fibres, [MPa]	2800
Modulul de elasticitate la tracțiune / Tensile modulus, [GPa]	160
Deformația specifică ultimă / Ultimate fibre strain, [%]	0.85

Tabelul 3

Proprietățile adezivului epoxidic / Properties of the epoxy adhesive

Proprietăți / Properties	Adeziv epoxidic / Epoxy adhesive
Densitatea / Density [g/cm <sup>3</sup> ]	1.30
Rezistența la tracțiune / Tensile strength [MPa]	24.8
Rezistența la forfecare / Shear strength [MPa]	24.8
Modulul de elasticitate la tracțiune / Tensile modulus [MPa]	4482
Alungirea la rupere / Fracture elongation [%]	3

Platbanda din compozite polimerice armate cu fibre de carbon este obținută prin pultrudere, [13] iar adezivul epoxidic utilizat la lipirea acesteia la intradosul grinzii din beton este de tipul bicomponent [14].

### 3.2. Consolidarea grinzilor cu platbande din CPAFC

Unul din cele mai importante aspecte ale montării platbandelor compozite la suprafețele din beton armat îl reprezintă pregătirea suprafeței de aplicare. S-a constatat că cele mai bune șanse de reușită în cazul îmbinărilor adezive dintre beton și produsele compozite rezultă prin folosirea adezivilor bicompenenți bazați pe rășini epoxidice [15].

Suprafața de beton s-a pregătit astfel încât s-au eliminat impuritățile dăunătoare realizării unei bune aderențe și asigurării durabilității acesteia. Betonul a fost șlefuit mecanic și aspirat pentru a înlătura praful rezultat în urma prelucrării. Platbandele compozite au fost degresate cu un solvent de curățare livrat de către furnizorul de materiale și produse compozite [13, 14]. Adezivul a fost aplicat într-un strat subțire de 2 mm și uniformizat cu ajutorul unui dreptar (figura 2a) după care s-a aplicat platbanda pe suprafața pregătită și s-a presat pentru a favoriza aderența la interfață (figura 2b).

Grinzile astfel consolidate au fost păstrate în condiții de laborator, timp de 14 zile, la temperaturi cuprinse între 20-23 °C.

Table 1 gives the properties of concrete and steel reinforcement used to make the reinforced concrete beam. In Tables 2 and 3 the characteristics of products used for plate bonding of concrete beams are presented. The CFRP polymeric strips were obtained by pultrusion, [13]; the epoxy adhesive used for bonding the plate to the bottom side of the concrete beam was a two component type [14].

### 3.2. Strengthening of the RC beams with CFRP plates

One of the most important aspects of the attaching the composite plates to the concrete surfaces is the adequate surface preparation. It has been found that the best chance of a successful attachment is achieved if the adhesive joints between concrete and composite products are performed with bi-component adhesives based on epoxy resins [15].

The concrete surface was prepared so that harmful impurities were removed for good adhesion and ensure the durability of the adhesive layer. The concrete surface was mechanically polished and vacuumed to remove dust from processing. The composite strips were degreased with a cleaning solvent delivered by the supplier of materials and composites [13, 14]. The adhesive was applied in a thin layer of 2 mm and levelled using a straight edge, Figure 2a; after that the tape was applied to the prepared surface and pressed to favorize a good adhesion at the interface (Figure 2b)

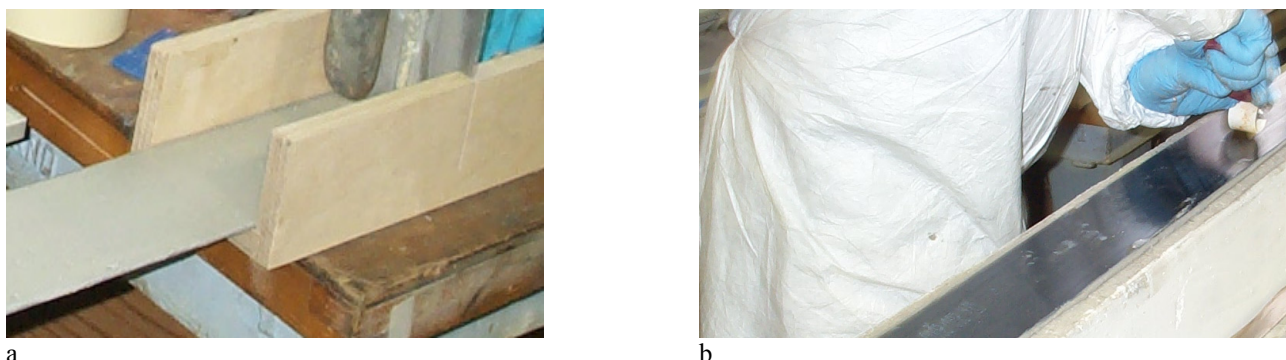


Fig. 2 - Placarea grinzii din beton armat: (a) - aplicarea stratului de adeziv pe fâșia compozită; (b) - presarea fâșiei din CPAFC pe suprafața de beton a grinzii / The plate bonding on the reinforced concrete beam: (a) - application of the adhesive layer on the composite strip; (b) - pressing the CFRP strip on the beam concrete surface.

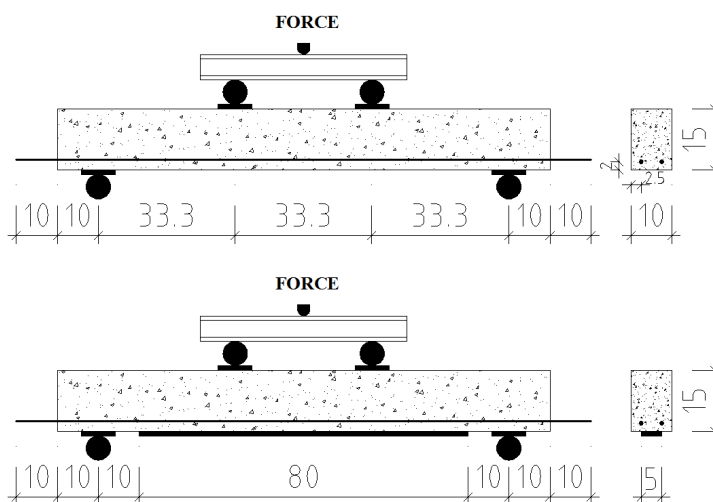


Fig. 3 - Schema de încărcare pentru încercare a grinzilor la încovoiere: (a) - grinda din beton armat; (b) - grinda consolidată cu platbanda compozită (dimensiuni în cm) / The loading scheme for the bending test of beams: (a) - the reinforced concrete beam; (b) - the plate bonded strengthened RC beam (dimensions in cm).

### 3.3. Încercarea grinzilor consolidate cu platbande CPAF

În cadrul programului experimental au fost testate cinci grinzi din beton armat (figura 3a) și cinci grinzi consolidate cu platbande din CPAFC atașate la fața inferioară întinsă a acestora, (figura 3b).

Grinzile au fost încercate conform schemei din figura 3 cu moment constant între forțele concentrate. Fiecare grindă a fost instrumentată cu 6 traductori de deplasare (LVDT) având următoarele funcțiuni: un traductor de forță, un traductor pentru măsurarea deplasării la mijlocul deschiderii grinzii și patru traductori montați longitudinal la partea superioară și la partea inferioară a grinzii, pe porțiunea centrală a acesteia (figura 4).

Înainte de testarea grinzilor, mașina de încercat de tip BD 300 a fost calibrată, iar echipamentul de achiziție și prelucrare a datelor pregătit pentru operaționalizare. În Figura 5 este ilustrată o imagine completă a montajului experimental.

The strengthened beams have been kept in laboratory conditions for 14 days at temperatures between 20-23 °C.

### 3.3. Testing of the plate bonding strengthened CFRP beams

Five unstrengthened reinforced concrete beams, Figure 3a, and five RC beams strengthened with attached CFRP plates, Figure 3b, have been tested in bending.

All beams have been tested as illustrated in Figure 3 with a constant moment between the two concentrated forces. Each beam has been instrumented with six linear voltage displacement transducers (LVDTs) with the following destination: a force transducer, a transducer for measuring beam displacement in the middle span, and four transducers mounted longitudinally on the top and the bottom of the beam in the central portion, Figure 4.

The testing machine type BD 300 was calibrated, before loading the beams, while data acquisition and processing equipment has been prepared for operation. A complete picture of the

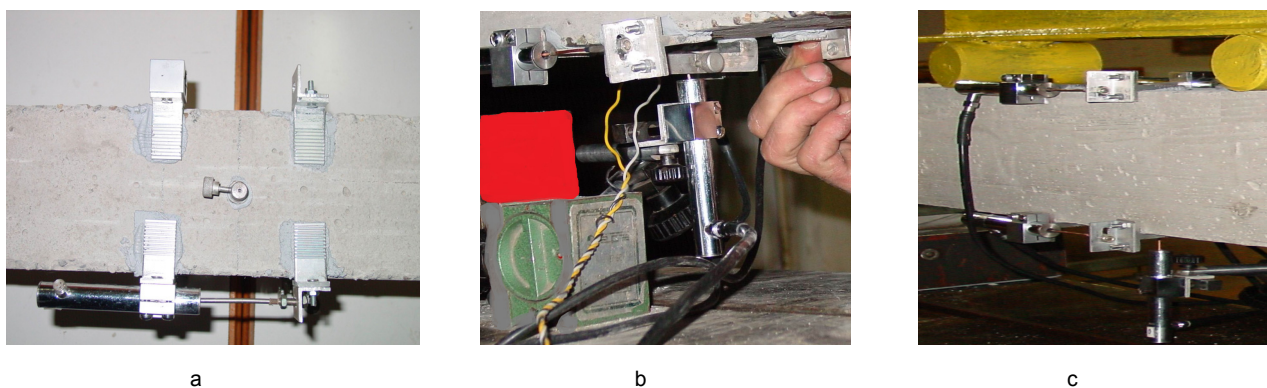


Fig. 4 - Instrumentarea grinzilor cu traductori pentru măsurarea deplasărilor (a) – dispozitive auxiliare pentru fixarea traductorilor; (b) – instalarea traductorului vertical pentru măsurarea deplasării transversale; (c) – traductori și rulouri de încărcare / The instrumentation of the beams with linear voltage displacement transducers (LVDTs): (a) – auxiliary devices for transducers fixing; (b) – installing the vertical transducer for transverse deflection; (c) – transducers and loading cylinders.

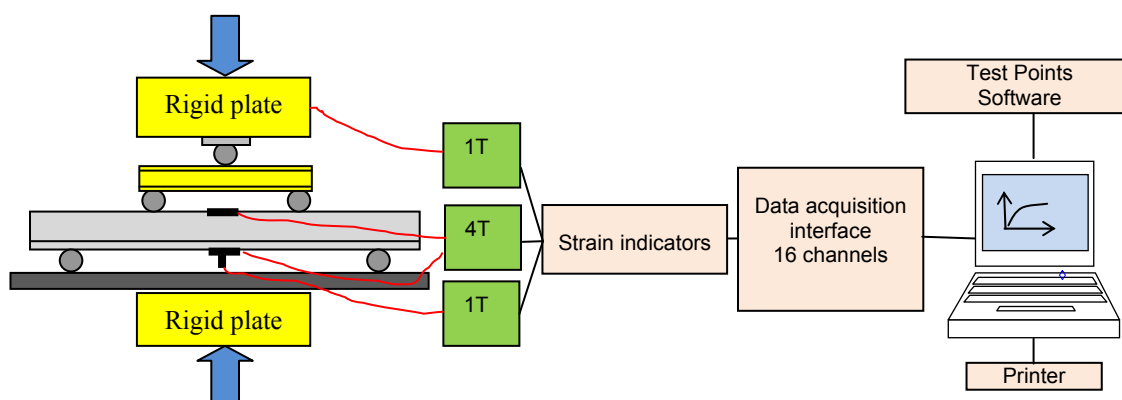


Fig. 5 - Instrumentarea completă pentru achiziția și prelucrarea datelor experimentale / The complete instrumentation for the experimental data acquisition and processing.

Instalația de măsurare tensometrică cu 16 canale, utilizată la încercare a asigurat achiziția și prelucrarea datelor în mai multe puncte conform instrumentării prezentate anterior. Aparatura este prevăzută cu sisteme de echilibrare în modul și în fază, în trepte și în modul continuu.

Probele au fost supuse la încovoiere folosind mașina universală de încercat, BD 300 cu o capacitate maximă de 3000 kN. Treptele de încărcare au fost stabilite la 10 kN iar testarea s-a efectuat în condiții de temperatură (20-22 °C) și umiditate (60%) specifice laboratoarelor de încercare.

Pentru procesarea datelor experimentale obținute în timp real a fost utilizat un modul de canale de semnal, cu o interfață de comandă/control dezvoltată pe platforma programului "Test Point". Toate încercările au fost efectuate cu control pe forță, cu o rată de creștere a tensiunilor de 0,5 MPa/s.

#### 4. Rezultate experimentale și discuții

Răspunsul structural al grinzii din beton armat ilustrează existența unor importante stadii ale comportării: în primul stadiu grinda se comportă cvasielastice, rigiditatea acesteia fiind relativ

experimental installation is presented in Figure 5.

The 16 channels installation for strain gauge measurements, utilised in the experimental program has been utilised to acquired and process the experimental data The apparatus has been fitted with balancing and phase mode.

The test specimens were subjected to bending using universal test machine, BD 300 with a maximum capacity of 3000 kN. The loading steps were set at 10 kN and the testing was performed in the laboratory conditions of temperature (20-22 °C) and humidity (60%).

The experimental data have been obtained in real time using a signal channel mode with an interface/control platform developed on the "Test Point". All tests have been performed in the force-control mode, with a stressing rate of 0.5 MPa.

#### 4. Experimental results and discussions

The structural response of the reinforced concrete beam shows the existence of the following important stages of behaviour: in the first stage the beam behaves quasi-elastically and its rigidity is relatively high; in the second stage the concrete cracks occur on the tension side then the

ridicată; în stadiul al doilea se produc fisuri ale betonului la partea întinsă, apoi fisurile din încovoiere și forță tăietoare se dezvoltă până la cedare.

Comportarea grinzilor din beton armat este relativ fragilă, datorită armării deficitare la forță tăietoare, situație care nu a asigurat curgerea armăturii din zona întinsă; curba forță-deplasare atinge un vârf de forță egal cu 26 kN, corespunzător săgeții de 1,87 mm (figura 6, curba a). Curbele încărcare-săgeată din această figură sunt construite cu media valorilor celor cinci grinzi similare din beton armat.

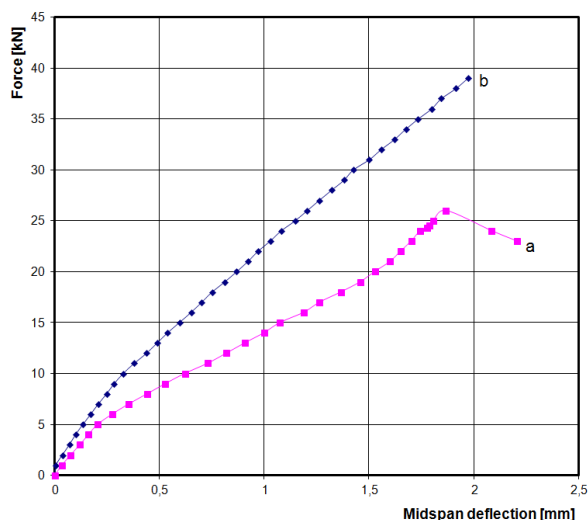


Fig. 6 - Răspunsul structural al grinzilor testate la încovoiere: (a) – grinda din beton armat; (b) – grinda consolidată cu platbandă compozită / Structural response of the beams tested in bending: (a) – RC beam; (b) – CFRP strengthened beam.

În cazul grinzilor consolidate cu platbande compozite acest „genunchi” nu apare pe curbă (fig.6b), în acest caz se observă, însă, o scădere a ductilității. Atașarea platbandei compozite modifică și modul de producere al fisurării. Primele fisuri din încovoiere apar la mijlocul deschiderii grinzii, dar cele mai periculoase fisuri sunt cele înclinate, amorsate la capetele platbandei compozite (figura 7), datorită vulnerabilității la forța tăietoare.

Încercarea a fost întreruptă înaintea cedării definitive pentru a proteja traductorii de deplasare.

## 5. Analiza cu elemente finite

### 5.1. Modelarea numerică a grinzii din beton armat

Analiza cu elemente finite (AEF) a fost utilizată pentru verificarea rezultatelor experimentale, referitoare la relația încărcare-săgeată, folosind pachetul de programe LUSAS 14 [16]. Modelul studiat are aceleași dimensiuni ca și grinziile încercate, comparațiile fiind efectuate la valorile încărcare-deplasare la mijlocul grinzii. S-au studiat de asemenea stările de tensiuni și deformațiile specifice din întindere și compresiune ale betonului.

bending and shear cracks grow until failure.

The behavior of the RC beams is relatively brittle due to the inadequate shear reinforcing; this reinforcement was not provided, therefore the yield of the longitudinal steel reinforcement on the tension side has not occurred. The force-displacement curve has reached a peak force equal to 26 kN, corresponding to 1.87 mm transverse deflection, Figure 6, curve a. The load-deflection curves in this figure are constructed with the average values of the five tested similar concrete beam samples.

In case of beams strengthened with composite strips this "knee" does not appear on the curve, Figure 6b; in this case a decrease in ductility has been observed. The attachment of the composite strips has also modified the pattern of crack appearance. The first cracks occurred in the middle of the bent beam, but the most dangerous cracks were those inclined and originating at the ends of the composite strips, Figure 7, due to vulnerability to shear.



Fig. 7 - Fisura din forfecare la grinda consolidată cu platbandă din CPAFC / Shear crack of the CFRP strengthened beam.

The testing has been interrupted just before the final failure to protect the displacement transducers.

## 5. Finite element analysis

### 5.1. Numerical modeling of the RC beam

Finite Element Analysis (FEA) has been used to verify the experimental results relating to load-deflection, utilising the LUSAS software package 14 [16]. The model has the same dimensions as the tested beams, comparisons being made to load-displacement values at the midspan of the beam. In addition the stress and strain states from tension and compression of the concrete.

The modeling has been performed in the following sequence: selection of the solid type finite element, definition and defining characteristics of materials, meshing the beam, introducing the boundary conditions, application of the load steps, running the program. This procedure has been followed by a critical analysis of results, selecting specific stress and strain maps and drawing diagrams corresponding to the loading

Modelarea s-a efectuat în următoarea succesiune: selectarea elementului finit de tip solid; definirea materialelor și precizarea caracteristicilor acestora; discretizarea grinzii; introducerea condițiilor de contur; aplicarea în trepte a încărcării; rularea programului și analiza critică a rezultatelor; selectarea hărților de tensiuni și deformații specifice și trasarea diagramelor cu rezultatele obținute pe treptele de încărcare. În figura 8 sunt introduse hărțile de tensiuni corelate cu deplasările transversale obținute pe grinda din beton armat, la mijlocul deschiderii acesteia, în condițiile limitării deformației specifice la compresiune din beton la valoarea 0,3 %.

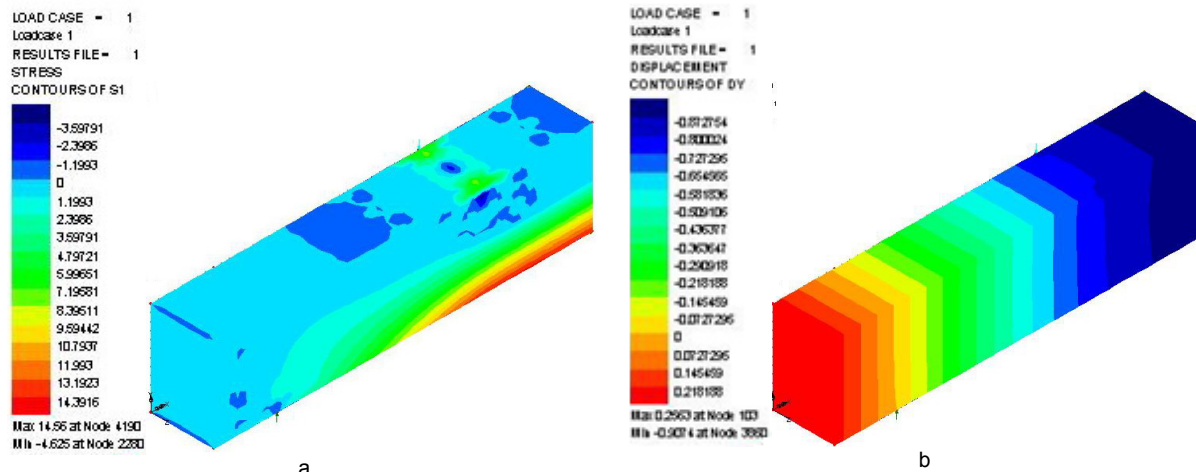


Fig. 8 - Tensiuni și deplasări obținute prin modelare numerică pe grinda din beton armat: (a) - tensiuni principale; (b) – deplasările transversale la mijlocul deschiderii / *Stresses and transverse displacements through numerical modeling-RC beam: (a) – principal stresses; (b) – midspan transverse displacements.*

### 5.2. Modelarea numerică a grinzii din beton armat consolidate cu CPAFC

În figura 9 se prezintă discretizarea utilizată în cazul grinzii din beton armat, consolidată cu platbandă compozită din fibre de carbon și adeziv epoxidic. Modelul este mai complex decât în cazul precedent datorită introducerii noilor componente: platbanda din CPAFC și adezivul epoxidic la interfața beton-compozit. Se evidențiază sistemul de axe ales, platbanda compozită, condițiile de rezemare și pozițiile forțelor concentrate la reazem și la treimea deschiderii. Utilizând caracteristicile programului s-au determinat, în primul rând, tensiunile principale la solicitarea de încovoiere conform schemei de încărcare adoptate. În figura 10 este întocmită harta tensiunilor principale cu indicarea zonelor după nivelul de solicitare.

Folosind modelul bidimensional, pe baza facilitățile programului LUSAS, s-a efectuat analiza neliniară a modelului hibrid rezultat prin consolidarea cu platbandă compozită în vederea stabilirii releveului fisurilor (figura 11). Se evidențiază, în particular, fisurile dezvoltate în porțiunea centrală a grinzii consolidate, zonă cu tensiuni maxime de întindere.

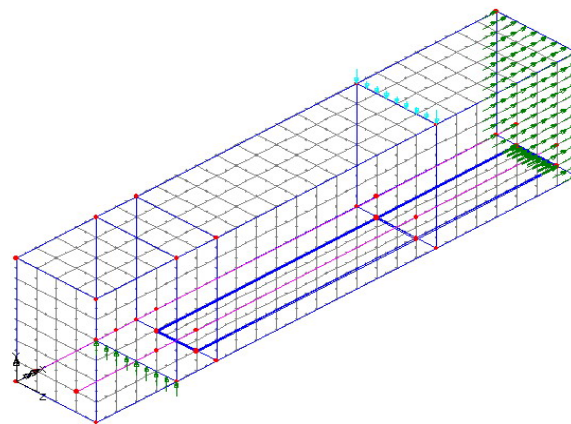


Fig. 9 - Discretizarea grinzii din beton armat consolidată cu platbandă din CPAFC / *Meshing of the CFRP strip strengthened RC beam.*

epoxy adhesive at the concrete-composite interface. The chosen axes system, the composite plate, as well as the boundary conditions and the positions of the concentrated loads are indicated. Using the program characteristics the main stresses from bending have been firstly determined, according to the adopted loading scheme. The map of the principal stresses determined from the 3D numerical modeling is given in Figure 10.



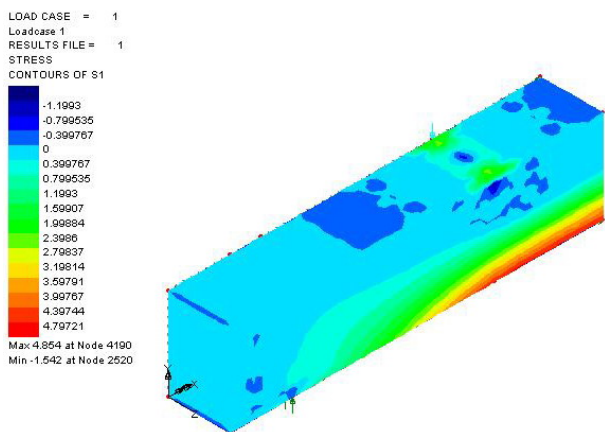


Fig. 10 - Tensiuni principale obținute prin modelare numerică pe modelul tridimensional / Principal stresses resulted from 3D numerical modelling.

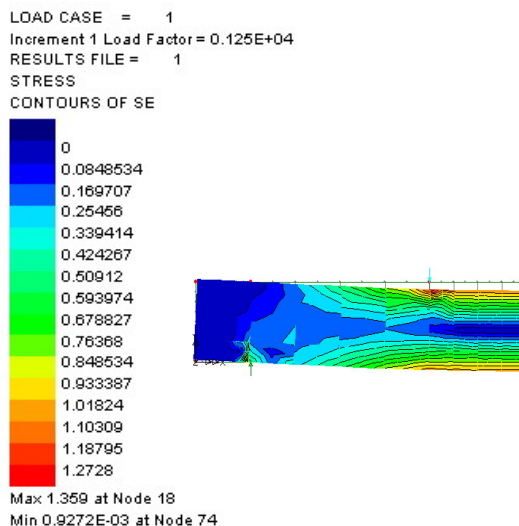
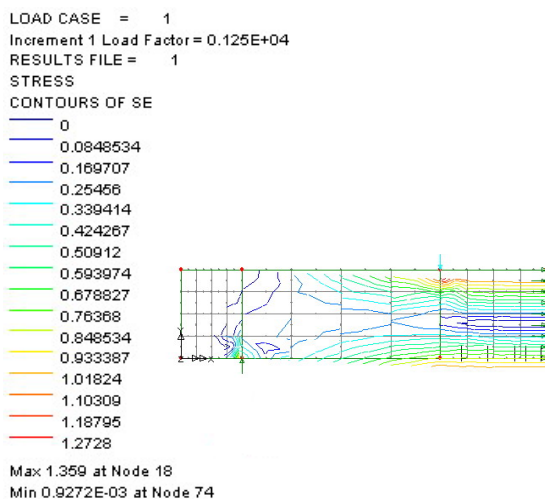


Fig. 11 - Rezultatele modelării numerice bidimensionale: (a) – dispunerea fisurilor la mijlocul grinzii; (b) – harta tensiunilor și deformația grinzii consolidate cu CPAFC / 2D numerical modeling results on cracks surveying: (a) – cracks at midspan; (b) – stress mapping and deformation of the CFRP strengthened beam.

## 6. Analiza comparativă a rezultatelor obținute pe cale experimentală și prin modelare numerică

Modelul tridimensional este alcătuit din elemente finite tridimensionale (elemente de tip solid pentru beton și bar 3D pentru armătura din oțel), respectiv ortotropic pentru platbanda compozită și element de tip solid pentru adeziv. Pentru compararea rezultatelor obținute pe cale experimentală și prin modelare numerică s-au trasat diagramele încărcare-deplasare transversală din figura 12.

Grinzile din beton armat testate la încovoiere, cu deficiențe evidente în ce privește armarea cu bare metalice au prezentat o vulnerabilitate sporită, cauzată de o ancorare inadecvată la capetele elementelor și de lipsa etrierilor; această fază a programului experimental pe o grindă cu deficiențe de proiectare urmează să

Based on the features of LUSAS and using the 2D modeling, the nonlinear analysis has been performed; the cracks surveying resulted on the hybrid model by strengthening the beam with the composite strip is shown in Figure 11. In particular, it highlights the cracks developed in the central part of the beam, the portion with maximum tensile stresses.

## 6. Comparative analysis of the experimental and numerical modeling results

The 3D model consists of three-dimensional finite elements (solid type elements for concrete and bar 3D for steel reinforcement), an orthotropic model for the composite plate and a solid type element for the adhesive layer. The load-displacement diagrams have been traced to compare the results obtained experimentally and by numerical modeling, Figure 12.

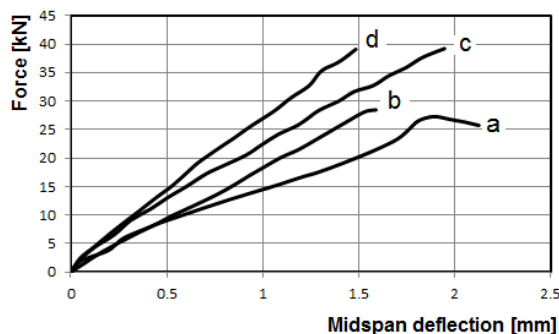


Fig. 12 - Curbe comparative cu datele experimentale și rezultatele obținute prin modelare numerică: (a) – grinda din beton armat, experiment; (b) – grinda din beton armat, modelare numerică; (c) – grinda consolidată cu platbandă din CPAFC, experiment; (d) – grinda consolidată cu platbandă din CPAFC, modelare numerică / Comparative curves of experimental data and numerical modeling results: (a) – RC beam, experimental; (b) – RC beam, numerical modeling; (c) – CFRP strengthened beam, experimental; (d) – CFRP strengthened beam, numerical modeling.

fie continuată cu dispunerea unor fâșii compozite pe pereții grinzii, care să suplinească absența etrierilor.

Din acest motiv grinzile din beton armat au cedat relativ repede, mai ales din forță tăietoare, fisurile înclinate dezvoltându-se la valori reduse ale încărcărilor concentrate transversale.

Lipsa armăturii transversale, în cazul grinzii din beton armat neconsolidate a cauzat fragilitatea accentuată a grinzii și o sensibilitate sporită la depășirea rezistenței la întindere.

Modurile de cedare identificate la consolidarea grinzilor cu platbande din fibre de carbon după încercarea experimentală s-au caracterizat prin apariția relativ rapidă a fisurilor înclinate datorită lipsei etrierilor și ancorării insuficiente a armăturilor longitudinale din oțel. Din această cauză nu s-a dezvoltat mecanismul clasic al cedării grinzilor din beton armat, caracterizat prin curgerea armăturii longitudinale din zona întinsă, cedarea la compresiune a betonului din zona comprimată.

Prin consolidarea grinzilor cu platbande compozite din CPAFC s-a îmbunătățit capacitatea de rezistență a acestora și a crescut rigiditatea la încovoiere, dar a scăzut ductilitatea.

Mecanismele de cedare observate impun îmbunătățirea fixării platbandelor compozite la capete prin soluții care să prevină desprinderea prematură a acestora, inițierea și propagarea fisurilor înclinate.

Consolidarea la încovoiere prin placare cu fâșii compozite în zona întinsă are un efect favorabil pronunțat dacă este însoțită de soluții de consolidare la forfecare prin fâșii compozite transversale atașate laturilor verticale ale grinzilor.

De aceea autorii consideră necesară completarea programului experimental pentru perfecționarea soluțiilor de consolidare cu platbande și fâșii compozite a grinzilor din beton armat prin tratarea adecvată a zonelor marginale.

În comparație cu analiza bidimensională (2D), rezolvarea problemei tridimensionale (3D) oferă mai multe informații legate de deformațiile specifice și tensiunile în orice nod sau secțiune a grinzii din beton armat consolidate cu CPAF.

Evitarea cedării grinzii din beton armat placate cu platbanda din fibre de carbon prin desprinderea acesteia la extremități se poate realiza prin folosirea la capetele fâșiilor compozite a unor ancoraje sau profile tip L lipite la intrados și pe fețele laterale ale grinzii din beton.

Modelarea numerică este un instrument util pentru stabilirea unor mărimi și caracteristici necesare studiului comportării grinzilor din beton armat și a celor consolidate.

În acest fel se pot stabili hărțile de tensiuni și deformații specifice tipului de solicitare a elementelor încovoiate, identificându-se releveele de fisuri și deformațiile grinzilor încovoiate.

Valorile obținute prin simulare numerică sunt

The reinforced concrete beams tested in bending with obvious deficiencies in the reinforcing solutions have shown increased vulnerability caused by improper anchoring at the ends of the elements and missing of the stirrups. Therefore, the experimental program on a beam with design deficiencies is going to be continued after disposal of the composite strips on the vertical sides of the beam aiming to compensate the absence of the stirrups.

For this reason the concrete beams have failed relatively quickly, especially from shear with inclined cracks developing at low values of the concentrated transverse loads.

The missing transverse reinforcement in case of the unstrengthened RC beam has caused an increased beam fragility and also a significant sensitivity to exceeding the concrete tensile strength.

The failure modes of the CFRP strengthened beams through experimental tests have been characterized by a relatively quick appearance of inclined cracks, due to the lack of stirrups and insufficient anchoring of the longitudinal steel bars. Therefore, the classical failure mechanism of reinforced concrete beams, characterized by yielding of steel longitudinal reinforcement and the compressive failure of the concrete in the compressed area has not occurred.

An improved load capacity has been obtained by strengthening the beams with CFRP strips, their bending stiffness has increased, but the ductility has decreased.

The observed failure mechanisms require the improvement of the plate ends fixing to prevent a premature separation, initiation and propagation of the inclined cracks.

The CFRP strengthening in bending by attaching composite strips on the tension side has a pronounced favourable effect if it is accompanied by improving the shear reinforcing solutions using composite strips attached to the vertical sides of the beams.

Therefore, the authors consider necessary to complete the experimental program to improve the strengthening solutions with composite plates and strips attached to the reinforced concrete beams, by an adequate detailing of the marginal areas.

The 3D analysis offers more detailed information about strains and stresses in any node or cross section of the CFRP strengthened RC beam compared two-dimensional (2D) analysis.

Avoiding the failure of the CFRP strengthened beams through debonding of the composite plates at their ends can be achieved by using anchors at the strips ends, or by bonding L-type composite profiles at soffit, glued to the lateral sides of the concrete beam.

The numerical modeling represents a useful tool to initially determine the factors and the

superioare celor măsurate experimental datorită diferențelor dintre caracteristicile ideale utilizate la modelare și valorile reale afectate de anumite imperfecțiuni.

## 7. Concluzii

Consolidarea grinzilor din beton armat prin placare cu platbande compozite din CPAFC reprezintă o soluție eficientă și rațională pentru creșterea capacității portante a elementelor structurale.

Atașarea prin lipire a platbandelor compozite necesită respectarea unei tehnologii adecvate referitoare la pregătirea suprafețelor fiecărui component, aplicarea adezivului și a condițiilor de întărire.

Armătura exterioară compozită suplimentează efectul armăturii interioare metalice conducând la creșterea momentului capabil.

Placarea zonei întinse folosind platbande din CPAFC reduce ductilitatea generală a grinzii dar îmbunătățește comportarea acesteia în domeniul elastic, prin sporirea rigidității.

La grinzile consolidate este posibilă apariția unor mecanisme de cedare diferite în raport cu grinzile din beton armat, de aceea sunt necesare măsuri suplimentare de prevenire a unor fenomene de cedare diferite, mai ales la capetele platbandelor compozite.

Valorificarea potențialului plăcii grinzilor cu produse compozite pentru sporirea momentului capabil este condiționată de armarea corespunzătoare la forța tăietoare eventual prin aplicarea unor fâșii compozite atașate lateral pe fețele grinzii din beton armat.

Modelarea numerică prin elemente finite pentru evaluarea răspunsului structural al grinzilor consolidate cu platbande compozite reprezintă o etapă extrem de utilă care ar trebui să preceadă programul experimental pentru a evita volumul excesiv de muncă și pentru a sprijini proiectarea și realizarea unor modele experimentale adecvate.

## REFERENCES

1. L.C. Hollaway, Key Issues in the use of fibre reinforced polymer composites in the rehabilitation and retrofitting of concrete structures, in: Service life estimation and extension of civil engineering structures, V.M. Karbhari and Lee L.S eds., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2011.
2. L.C. Hollaway and J.G. Teng eds, Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites, CRC Press, Boca Raton, USA, 2008.
3. xxx, Fédération Internationale du Beton (fib), Bulletin 14, Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Technical report on the Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures, Published by the International Federation for Structural Concrete, Lausanne, 2001.

features required when the study of behavior of reinforced concrete beams and strengthened beams is carried out.

In this way the stress and strain maps for a specific loading case of bent elements can be determined also identifying the cracks surveying and deformed shapes of the beams.

The values obtained by numerical simulation are higher than those measured experimentally due to the differences between the ideal and actual values, affected by certain imperfections used in modeling.

## 7. Conclusions

Strengthening of reinforced concrete beams by CFRP plate bonding is an effective and rational solution to increase the load bearing capacity of structural members.

Attaching the composite plates by adhesive bonding requires compliance with a suitable technology for each component, surface preparation, adhesive application and curing conditions.

The external composite reinforcement supplements the effect of the internal metallic reinforcing bars leading to the increase of bending capacity.

The CFRP plate bonding of the tensioned zone reduces the beam ductility but improves its behavior in the elastic range by increasing the stiffness.

In case of strengthened beams it is possible to occur different failure mechanisms of beams; therefore, additional measures are necessary to prevent different failure phenomena, especially at the ends of the composite plates.

The potential of plate bonding of RC beams with composite products capable of increasing the moment capacity is conditioned by a proper shear force reinforcing, possibly by the application of composite strips laterally attached to the sides of the concrete beam.

The numerical modeling using finite elements to evaluate the structural response of beams strengthened with composite strips is a very useful phase that should precede the experimental program to avoid excess workload and to support the design and implementation of appropriate experimental models.

\*\*\*\*\*

4. xxx, ACI 440.2R-08, Guide test for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, Farmington Hills, USA, 2008.
5. xxx, MTCT (2005), Norm on strengthening concrete structural elements with fibres (in Romanian), Official Monitor no.132 bis/11 February 2005, Bucharest.

6. R. Giuşcă, and V. Corobceanu, New technologies for strengthening damaged reinforced concrete structures, *Current Science*, 2010, **98**(6), 829.
7. N. Țăranu, G. Oprişan, D. Isopescu, I. Entuc, and Munteanu V. , Composite Strengthening Solutions for Engineering Structures, Stef Publishing House, Iasi, Romania, 2006.
8. G. Oprişan, N. Țăranu, V. Munteanu, M. Budescu, C. Cozmanciuc, and R. Oltean, Improvement of concrete strength through confining with composite membranes, *Romanian Journal of Materials*, **41** (4), 302, 2011.
9. N. Țăranu, G. Oprişan, I. Entuc, M. Budescu, V. Munteanu, and G. Țăranu, Composite and hybrid solutions for sustainable development in civil engineering, *Environmental Engineering and Management Journal*, 2012, **11**(4), 783.
10. N. Țăranu, M. Budescu, L. Bejan, G. Oprişan, V. Munteanu, and C. Banu, Hybrid structures made of polymeric composites and traditional building materials, Final Report, PN II/IDEI/ 2008-2011, Nr. ID\_369.
11. xxx, SR EN 197-1 Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements.
12. xxx, SR EN 12390-2:2002. Testing hardened concrete - Part 2: Making and curing specimens for strength tests.
13. xxx, Sika, 2011, www.sikausa.com, Lyndhurst, NJ., Sika Carbodur, Product Data Sheet, Edition 7.1.2008, C120.
14. xxx, Sika, 2010, www.sikausa.com, Lyndhurst, NJ., Sikadur 30, Product Data Sheet, Edition 7.1.2008, Identification no.332-15.
15. xxx, A.R. Hutchinson, Surface Preparation of component materials, in Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites, L.C. Hollaway and J.G. Teng eds, CRC Press, Boca Raton, USA, 2008.
16. xxx, LUSAS Software, Theory manual volume 1 & 2, Surrey, U.K., 2011.

\*\*\*\*\*

## MANIFESTĂRI ȘTIINȚIFICE / SCIENTIFIC EVENTS

**2013**  
**nanoPORTUGAL**  
International Conference

February 13-15, Porto

**NanoPT** is an International Conference taking place in Porto (Portugal) in February, 2013.

The first edition will be held with the purpose of strengthen ties nationally and internationally on Nanotechnology and, pretends to be a reference in Portugal in the upcoming years.

This conference will encourage industry and universities working on the Nanotechnology field to know each other and to present their research, allowing new collaborations.

**NanoPT** will be held every year in Portugal and will let the participants presenting a broad range of current research in Nanoscience and Nanotechnology, not only the most prominent investigations/studies in Portugal but from all over the world.

- Nanomaterials
- NanoChemistry
- Nanobio/NanoMedicine
- Graphene/Nanotubes
- Optics/Photonics/Plasmonics
- Modeling at the nanoscale
- Scientific Policy / Tech transfer
- Nanoinstrumentation

**Contact:** [www.nanopt.org](http://www.nanopt.org)

**Dr. Antonio Correia**  
Tel: +34 911402144  
E-mail: antonio@phantomsnet.net

**Viviana Estêvão**  
Tel: +34 911402145  
E-mail: viviana@phantomsnet.net

\*\*\*\*\*