

CONSOLIDAREA PLĂCILOR SUBȚIRI DIN BETON ARMAT FOLOSIND PLATBANDE COMPOZITE STRENGTHENING OF THIN REINFORCED CONCRETE SLABS WITH COMPOSITE STRIPS

NICOLAE ȚĂRANU^{1*}, DRAGOȘ BANU, GABRIEL OPRIȘAN,
MIHAI BUDESCU, LILIANA BEJAN

¹Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" Iași, B-dul Mangeron nr. 43, Iași, România, 700050

Compozitele polimerice armate cu fibre (CPAF) se utilizează cu succes la consolidarea plăcilor din beton armat (BA) îmbunătățindu-le răspunsul structural la diverse situații de încărcare. Soluțiile cele mai frecvente se bazează pe utilizarea platbandelor prefabricate din CPAF lipite cu adezivi la partea întinsă a plăcilor 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 de cercetare desfășurat la Facultatea de Construcții și Instalații din Iași, au fost testate mai multe plăci subțiri din beton armat, consolidate cu platbande CPAF de carbon în diferite configurații, evidențiindu-se modul de lucru, tipurile de cedare și eficiența structurală a sistemelor propuse. Răspunsul structural a fost evaluat prin testarea unor plăci din BA la moment încovoietor din încărcări transversale, identificându-se diferențele în raport cu plăcile neconsolidate atât în privința capacității portante cât și a rigidității. Rezultatele experimentale au fost verificate și prin modelare numerică cu elemente finite folosind pachetul software ABAQUS.

Fibre reinforced polymer (FRP) composites have been successfully implemented to strengthening of reinforced concrete (RC) slabs improving their structural response to various loading schemes. The most utilized techniques are based on prefabricated FRP composite strips bonded to the tension side with adhesives or by bonding quasi-unidirectional fabrics made of carbon or glass fibres impregnated with polymeric resins.

An extensive research program has been carried out at The Faculty of Civil Engineering and Building Services Iași, by testing a number of thin reinforced concrete (RC) slabs strengthened with CFRP strips in different solutions, to characterize the structural response, identify the failure modes and evaluate the structural efficiency of this composite strengthening solution. The structural response has been evaluated through testing a number RC slabs under bending from transverse loading. The difference in structural behaviour of unstrengthened and strengthened slabs has been revealed on both loading bearing capacity and stiffness. The validity of experimental results has been checked by numerical modelling using ABAQUS software package.

Keywords: thin RC slabs, strengthening, composite strips, bonding, failure modes, numerical modelling

1. Introducere

Plăcile din beton armat care sunt deteriorate, degradate sau pentru care este necesară creșterea capacității portante datorită schimbării destinației sau aplicării noilor standarde de proiectare, sunt supuse unui proces de reabilitare structurală care constă, de obicei, în lucrări de reparație și consolidare, pentru a satisface exigențele de performanță care sunt impuse acestora.

Metodele de consolidare a structurilor din beton armat au evoluat de-a lungul timpului, fiind folosite configurații și materiale noi, care permit depășirea deficiențelor care apar pe durata de exploatare a unei construcții [1]. Până în prezent au fost dezvoltate diferite tehnici de consolidare care folosesc materiale tradiționale precum betonul și oțelul [2]. Unele soluții moderne de consolidare a elementelor structurale au la bază produse compozite realizate din polimeri armați cu fibre

1. Introduction

Reinforced concrete plated structures that are damaged, degraded or in need to increase the load-carrying capacity due to altered functionality or new safety design standards, are subjected to a structural rehabilitation process that usually includes repair and strengthening operations, in order to fulfil their performance requirements.

The methods of strengthening reinforced concrete structures have evolved over time, involving new configurations and new materials, to overcome the deficiencies that appear during the lifetime of a building [1]. Different strengthening techniques have been developed for reinforced concrete slabs over time using traditional materials like concrete and steel [2]. Some modern solutions for the strengthening of structural elements imply the use of fibre reinforced polymer (FRP) composite materials because of their convenient

* Autor corespondent/Corresponding author,
Tel.: +40 0232 23 22 19, e-mail: taranu@ce.tuiasi.ro

(PAF), datorită caracteristicilor convenabile ale acestora, incluzând rezistență mare la tracțiune, modul de elasticitate ridicat, posibilitatea de direcționare a proprietăților mecanice, rezistență la acțiunea agenților corosivi și ușurință în aplicare [3-5].

Eficiența soluțiilor de consolidare a plăcilor din beton armat care folosesc compozite polimerice armate cu fibre (CPAF) a fost dovedită de numărul semnificativ de studii realizate de către diferite grupuri de cercetători. În cadrul acestor proiecte de cercetare s-au analizat tehnici diferite de aplicare a sistemelor compozite pe elementele structurale. Soluțiile de aplicare a produselor compozite dezvoltate până în prezent sunt bazate pe aplicarea la exterior a armăturilor CPAF prin lipire cu adezivi [6, 7], cu sau fără tije [8, 9]; montarea în șlițuri a fâșiilor subțiri sau a barelor din CPAF [10, 11]; pretensionarea platbandelor CPAF cu ancoraje mecanice la capete [12] și/sau cu fixare mecanică [13]. Fiecare dintre aceste tehnici de aplicare a sistemului de consolidare prezintă o serie de avantaje și dezavantaje, care fac referire la ușurința aplicării și modurile de cedare.

În cadrul acestei lucrări este prezentată tehnica aplicării la exterior a platbandelor din compozite polimerice armate cu fibre de carbon (CPAFC), prin lipire cu adezivi la fața întinsă a plăcilor din beton armat. Obiectivele acestui program de cercetare urmăresc studierea modului în care soluția de consolidare îmbunătățește performanța structurală a plăcilor subțiri din beton armat și modul în care acestea cedează sub încărcări normale pe planul median al elementelor.

2. Programul experimental

2.1. Pregătirea probelor

Programul experimental constă în testarea a patru plăci din beton armat cu dimensiunile 1100x1100x50 mm. Plăcile au fost notate după cum urmează: SW-C pentru placa de control; SW-1 pentru placa din beton armat consolidată cu prima configurație a platbandelor; SW-2 și SW-3 pentru plăcile din beton armat consolidate cu a doua configurație a platbandelor (2 și 3 reprezintă numărul de ordine a două plăci identice). Dimensiunile au fost alese astfel încât să permită evaluarea răspunsului structural al plăcilor din beton armat pe două direcții. Plăcile au fost executate din beton de clasă C30/37, stabilită pe cale experimentală. Rețeta betonului a fost realizată cu ciment Portland EN 197-1 - CEM I 32.5 N [14], agregate și apă, dimensiunea maximă a sortului fiind egală cu 7 mm. Probele pentru determinarea proprietăților betonului au fost turnate în tipare cilindrice și cubice, compactate prin vibrare și păstrate timp de 28 zile într-o cameră cu umiditate relativă de 95% [15]. După 28 de zile a fost determinată rezistența la compresiune a betonului pe 6 cuburi de beton cu latura de 150mm

characteristics including high tensile strength, high elastic modulus, tailor ability of mechanical properties, resistance to corrosive agents and ease of application [3-5].

Many studies carried out by different research teams have proven the efficiency of using FRP composites in flexural strengthening of the reinforced concrete (RC) slabs. These research projects have also analyzed different systems for applying the FRP solutions to the structural element. The application solutions for the FRP materials developed until now are based on exterior bonding (EB) with adhesives [6, 7], without or with fasteners [8, 9]; near surface mounted (NSM) strips or bars [10, 11]; prestressed FRP strips mechanically anchored at the ends [12] and/or mechanically fastened (MF) [13]. Each of these application techniques have their own advantages and disadvantages referring to ease of application and failure modes.

In this paper the external bonding is utilised to apply the carbon fibre reinforced polymer strips (CFRP) to the tensioned side of the slab. The objectives of the research are to study how this strengthening solution will increase the structural performance of thin RC slabs and how the failures of the elements will occur when transverse loading is applied.

2. Experimental program

2.1. Specimens preparation

The experimental program included the testing of four RC slabs with dimensions 1100x1100x50 mm. The slabs have been denoted as follows: SW-C for the control slab; SW-1 for the RC slab strengthened with the first scheme of strips arrangement; SW-2 and SW-3 for the RC slabs strengthened with the second scheme of strips placement (2 and 3 represent the index of two identical slabs). The dimensions have been chosen to enable the evaluation of the two ways RC slabs structural response. The slabs were cast from concrete grade C30/37, determined experimentally. The concrete was prepared using Portland cement EN 197-1 - CEM I 32.5 N [14], gravel, sand and water; the maximum aggregate size was 7 mm. The test specimens for determination of concrete properties have been casted into cylindrical and cubic moulds, compacted by vibration and kept for 28 days in a room with relative humidity of 95% [15]. The compressive strength of concrete has been determined after 28 days on six concrete cubes with the size of 150 mm and on six concrete cylindrical samples with diameter of 150 mm and height equal to 300 mm. The slabs were reinforced at the tensioned side with steel wire mesh reinforcement SPPB 4x100x100 mm, with the yield strength of 460 N/mm², determined

și pe 6 probe cilindrice având diametrul de 150 mm și înălțimea de 300 mm. Armarea la partea inferioară s-a realizat cu plasă sudată din oțel SPPB 4x100x100 mm, aceasta având limita de curgere egală cu 460 N/mm², determinată experimental pe 5 probe extrase din lotul folosit (valoare confirmată de către producător și normative) [16,17]. Dimensiunile secțiunii transversale ale platbandelor compozite au fost selectate în conformitate cu sortimentul oferit de producător (tabelul 2). Caracteristicile geometrice ale plăcilor din beton armat fără, și cu sistemul de consolidare sunt prezentate în figura 1. Datorită grosimii reduse a plăcilor din beton armat, acoperirea din beton a fost stabilită la 10 mm.

experimentally on 5 specimens manufactured from the used batch (value confirmed by the manufacturer and norms) [16, 17]. The cross-sectional dimensions of the composite strips have been selected in concordance with the producers supply offer (Table 2). The geometric characteristics of the RC slabs with and without the strengthening FRP strips are presented in Figure 1. Due to the reduced thickness of the RC slab, the concrete cover has been selected equal to 10 mm.

The strengthening of the RC slabs was made with CFRP strips bonded with adhesives to the tensioned face. The technological steps for applying the strengthening systems were carefully

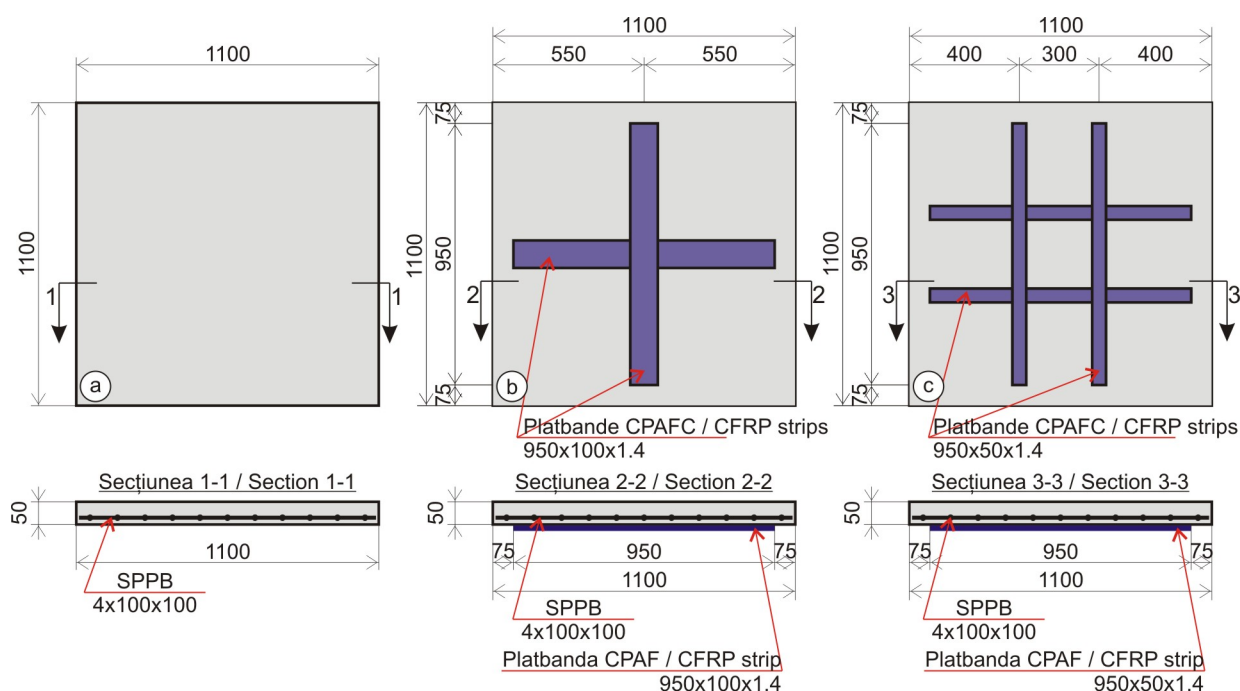


Fig. 1 - Caracteristicile geometrice ale plăcilor din beton armat (mm) / Geometric characteristics of the RC slabs (mm): a) SW-C; b) SW-1; c) SW-2, SW-3

Consolidarea plăcilor din beton armat a fost realizată folosind platbande CPAFC lipite cu adezivi pe fața întinsă. Fazele tehnologice necesare aplicării sistemului de consolidare au fost urmărite cu atenție pentru a evita cedarea datorită aplicării greșite a materialelor sau o pregătire incorectă a suprafeței de aplicare [18, 19].

Suprafața plăcilor din beton armat a fost pregătită prin îndepărtarea laptelui de ciment și a substanțelor folosite pentru decofrare; pe lângă acestea, suprafața a fost aspirată pentru a îndepărta toate particulele de praf (fig. 2). Un strat subțire de amorsă a fost aplicat pe plăcile din beton armat pentru a îmbunătăți aderența dintre stratul de adeziv și substratul de beton.

După ce suprafața plăcilor din beton armat a fost pregătită, adezivul a fost aplicat în zonele marcate și pe platbandele compozite (fig. 3). După

observed to avoid any failure due to mishandling the materials or bad surface preparation [18, 19].

The surface of the reinforced concrete slab was prepared by removing all traces of cement laitance and form-release oil; in addition, the surface was vacuumed in order to remove all the dust particles (Fig. 2). A primer was applied on the RC slab in order to improve the bonding between the adhesive layer and the concrete substrate.

After the surface preparation the adhesive was applied in the marked positions on the RC concrete slabs and on the CFRP strips (Fig. 3). After the CFRP external reinforcement was positioned, the excess adhesive was removed by pressing uniformly on the entire length of the strip.

In Tables 1, 2 and 3 the main required characteristics of the materials used for strengthening the RC slabs are given.



Fig. 2 - Pregătirea suprafeței: a) îndepărtarea laptelui de ciment și a substanțelor de decofrare; b) aspirarea prafului; c) marcarea pozițiilor platbandelor CPAFC / *Surface preparation: a) removing cement laitance and traces of form-release oil; b) vacuum dust removing; c) marking the CFRP strips position.*



Fig. 3 - Aplicarea platbandelor CPAFC pe placa din beton armat: a) aplicarea adezivului pe placă; b) aplicarea adezivului pe platbanda CPAFC; c) aplicarea platbandei CPAFC pe placa din beton armat / *Applying the CFRP strips on RC slab: a) applying the adhesive on the RC slab; b) applying adhesive on the CFRP strip; c) applying the CFRP strip on the RC slab.*

ce platbandele compozite au fost poziționate, excesul de adeziv a fost îndepărtat prin apăsarea uniformă pe întreaga lungime a armăturilor exterioare.

În tabelele 1, 2 și 3 sunt date caracteristicile principale ale materialelor folosite la consolidarea plăcilor din beton armat.

2.2. Testing procedure

The RC slabs have been considered to be simply supported on all sides since the supports were designed to enable rotations. The transverse load has been transmitted to the tested slab through 4 points using rubber elements [23, 24]. The elements have been positioned to transmit the

Tabelul 1

Proprietățile adezivului epoxidic / *Properties of epoxy adhesive* [20]

Caracteristica / <i>Characteristic</i>	ADESILEX PG1
Raport amestec / <i>Mixing ratio</i>	Component A:Component B = 3:1
Timp întărire finală / <i>Complete hardening time</i>	7 zile / 7 days
Aderența dintre beton și Carboplate / <i>Concrete-Carboplate bond strength (N/mm²)</i>	> 3 (cedarea betonului / failure of concrete)
Modulul de elasticitate la compresiune / <i>Compressive modulus of elasticity (N/mm²)</i>	6000
Rezistența la compresiune / <i>Compressive strength (N/mm²)</i>	> 70
Rezistența la forfecare / <i>Shear strength (N/mm²)</i>	> 25

Tabelul 2

Proprietățile platbandei CPAFC / *Properties of CFRP strips* [21]

Caracteristici / <i>Characteristics</i>	Tipul/Type - MAPEI Carboplate	
Grosime x lungime x lățime / <i>Thickness x length x width (mm)</i>	1.4 x 950 x 50	1.4 x 950 x 100
Densitate / <i>Density (g/cm³)</i>	1.56	1.56
Modulul de elasticitate / <i>Modulus of elasticity (GPa)</i>	200	200
Rezistența la tracțiune / <i>Tensile strength (N/mm²)</i>	3300	3300
Deformația specifică liniară la rupere / <i>Ultimate strain (%)</i>	1.4	1.4

Tabelul 3

Proprietățile amorsei / *Properties of primer* [22]

Caracteristici / <i>Characteristics</i>	MapeWrap Primer 1
Raport amestec / <i>Mixing ratio</i>	Component A : Component B = 3:1
Densitate / <i>Density (g/cm³)</i>	1.1
Temperatura de aplicare / <i>Application temperature range</i>	+10° to +30°C
Aderența dintre beton și Carboplate / <i>Concrete-Carboplate bond strength (N/mm²)</i>	> 3 (după 7 zile la +23°C) / (after 7 days at +23°C)
Timp întărire finală / <i>Complete hardening time</i>	7 zile / 7 days

2.2. Metodologia testării

Plăcile din BA au fost considerate simplu rezemate pe toate laturile, reazemele fiind proiectate să permită rotațiile. Încărcarea transversală a fost transmisă plăcii prin patru puncte, folosind elemente din cauciuc [23, 24]. Aceste elemente au fost poziționate astfel încât să transmită forța la intersecția platbandelor CPAFC. În figura 4 sunt ilustrate cadrul suport și sistemul de transmitere al încărcărilor.

Aplicarea încărcărilor s-a controlat folosind o celulă de forță conectată direct la sistemul de încărcare. În timpul experimentului, deplasările transversale corespunzătoare celor patru puncte au fost măsurate folosind traductoare de deplasare cu fir (LVDT). În figura 5 sunt indicate pozițiile traductoarelor.

forces at the intersection of the CFRP strips. In Figure 4 the supporting frame and the loading system are illustrated.

The applied force has been monitored using a load cell connected directly to the loading system. During the experiment, the transverse displacements in the corresponding four points were measured using linear variable differential transducers (LVDT). In Figure 5 the positions of the transducers are figured out.

2.3 Experimental results

The RC slabs have been tested up to failure under static loading, using a displacement rate of the loading system of 0.16 mm/sec. The load-displacement curves for each slab are represented in Figure 6, illustrating the effect of the strengthening system on the behaviour of the slabs.



Fig. 4 - Organizarea experimentului: a) cadrul suport; b) dispozitivul de transmitere a încărcărilor; c) ansamblu experimental
Experimental set-up: a) perimetral support system; b) load transmitting device; c) the experimental set-up.

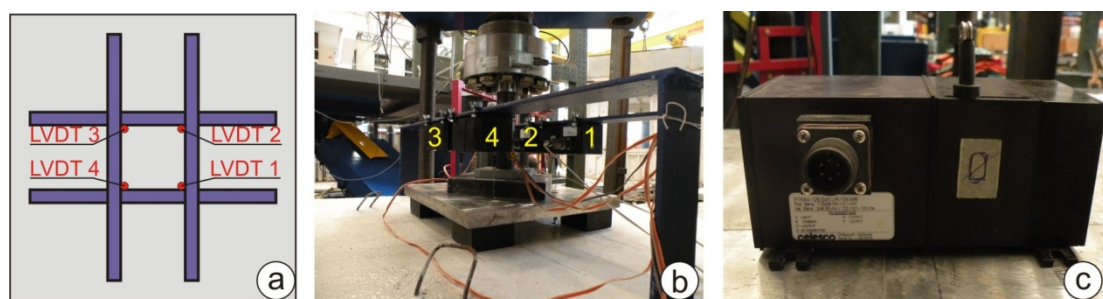


Fig. 5 - Poziționare LVDT: a) poziționarea pe placa din BA; b) poziționarea pe standul experimental; c) model LVDT
LVDT positioning: a) positioning on the RC slab; b) positioning on the experimental stand; c) LVDT type.

2.3 Rezultatele experimentale

Plăcile din beton armat au fost testate până la cedare sub încărcări statice, folosind o viteză de deplasare a sistemului de încărcare egală cu 0,16 mm/sec. Diagramele forță-deplasare pentru fiecare placă sunt reprezentate în figura 6, ilustrând efectul sistemului de consolidare asupra comportamentului plăcilor.

Forța ultimă corespunzătoare plăcilor SW-2 și SW-3 a crescut cu 18,6% și respectiv cu 29,3% în comparație cu valoarea înregistrată la placa de control. Pentru placa SW-1, nu a fost înregistrată o creștere semnificativă a valorii forței ultime datorită cedării premature a sistemului de consolidare prin desprinderea platbandelor CPAFC. Desprinderea a

The ultimate load for the strengthened slabs SW-2 and SW-3 has increased by 18.6% and 29.3% respectively compared to the control specimen. For the strengthened slab SW-1 there has not been noticed a significant increase in the ultimate load value due to the premature failure of the strengthening system by debonding of the CFRP strips. Debonding occurred in the concrete cover layer, typical failure for other flexural elements [19]. The values of the flexural deflections measured in the 4 points were significantly reduced. In comparison with the control slab the maximum displacement for slab SW-1 was reduced by 41%, for slab SW-2 by 57% and for slab SW-3 by 54%. These values

avut loc prin stratul de acoperire cu beton, cedare tipică și pentru alte tipuri de elemente încovoiate [19]. Valorile săgeților din încovoiere măsurate în cele patru puncte s-au redus semnificativ. Comparativ cu placa de control deplasarea maximă pentru placa SW-1 a fost redusă cu 41%, pentru placa SW-2 cu 57% iar pentru placa SW-3 cu 54%. Aceste valori demonstrează că armăturile compozite asigură o creștere semnificativă a rigidității plăcilor. În tabelul 4, sunt prezentate rezultatele programului experimental.

demonstrate that the composite reinforcement provides a significant increase in slab stiffness. In Table 4 the results of the experimental program are presented.

The failure mode of the strengthened slabs has been induced by the debonding of the composite strips, accompanied by their flexural cracking. The debonding of CFRP strips occurred through the concrete cover near the surface of the RC element. The first flexural cracks have been initiated under the loading area and propagated

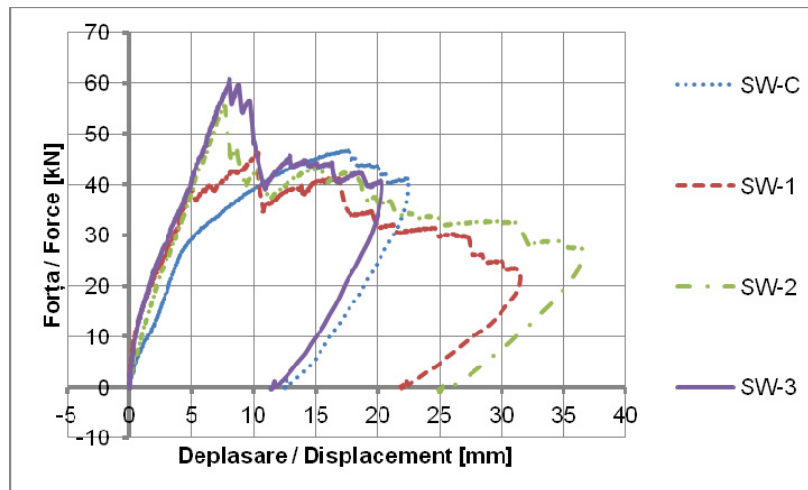


Fig. 6 - Diagramele forță-deplasare / Load-displacement curves.

Tabelul 4

Rezultatele experimentale / Experimental results

Placa / Slab	Forța Ultimă Ultimate Load [kN]	Deplasarea Displacement LVDT 1 [mm]	Deplasarea Displacement LVDT 2 [mm]	Deplasarea Displacement LVDT 3 [mm]	Deplasarea Displacement LVDT 4 [mm]
SW-C	46.96	17.07	18.12	17.97	17.60
SW-1	46.62	9.14	12.05	11.65	8.70
SW-2	55.71	7.73	7.83	7.73	7.32
SW-3	60.71	7.83	8.43	8.58	7.58

Modul de cedare al plăcilor consolidate a fost indus de desprinderea platbandelor compozite, însoțită de fisurarea la încovoiere a acestora. Desprinderea platbandelor CPAFC s-a realizat cu antrenarea betonului, planul de cedare situându-se în stratul de acoperire din beton aflat în vecinătatea suprafeței elementului. Primele fisuri din încovoiere au fost inițiate sub zona de încărcare și s-au propagat spre marginile plăcilor odată cu creșterea încărcărilor (Fig. 7).

Sistemul de consolidare cu CPAFC a influențat într-un mod semnificativ comportamentul la fisurare al plăcilor din BA. Numărul fisurilor care s-au format la fața întinsă a plăcilor din BA consolidate a fost mai redus, dimensiunile acestora fiind vizibil mai mici decât cele formate la placa din beton armat neconsolidată (Fig. 7). Între platbandele CPAFC nu s-a observat fisurarea betonului. Strivirea betonului la fața superioară a fost observată prin formarea unor fisuri sub formă circulară, în jurul zonei de încărcare. (Fig. 7)

towards the slab edges with the increase of load (Fig. 7).

The CFRP strengthening system had a significant influence on the cracking behaviour of the RC slabs. The number of cracks that were developed on the tensioned side of the strengthened RC slabs was reduced, their dimensions being visible smaller than those from the unstrengthened RC slab (Fig. 7). Between the reinforcing CFRP strips no cracking of the concrete has been observed. Crushing of the concrete has been noticed on the top surface, a circular pattern (Fig. 7) around the loading area being formed.

3. Numerical modelling

3.1 Geometry of the slabs

For the numerical modelling of the studied specimens the software package ABAQUS has been used. In this study two models have been

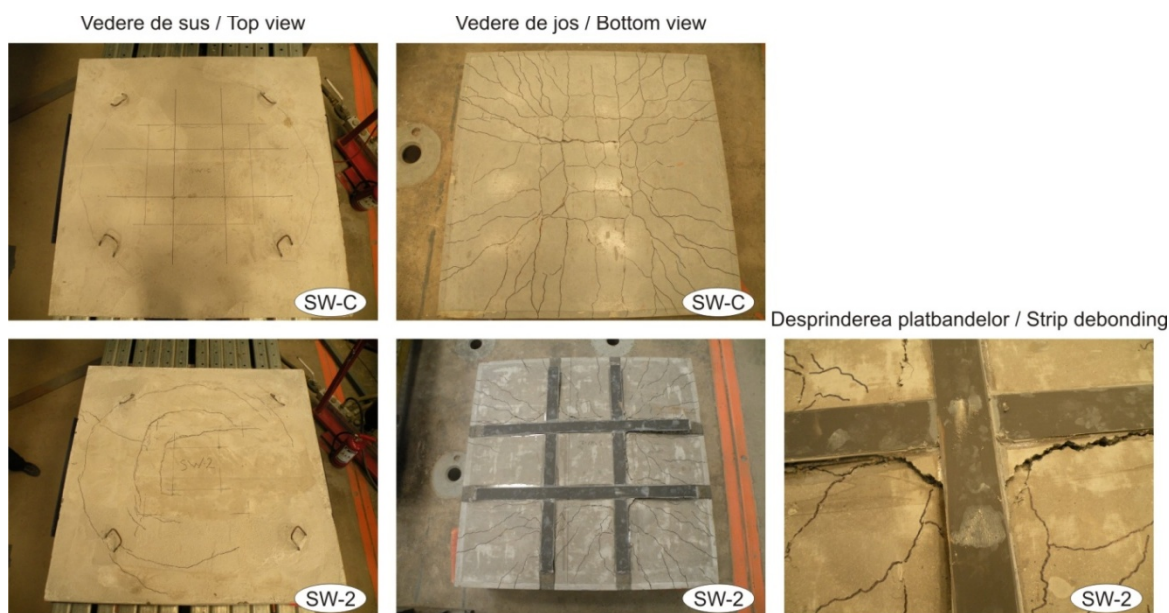


Fig. 7 - Modul de fisurare și desprinderea sistemului de consolidare compozit / Crack patterns and debonding of the composite strengthening system.

3. Modelarea numerică

3.1. Geometria plăcilor

Pentru realizarea modelării numerice a probelor studiate, s-a folosit pachetul software ABAQUS. În cadrul acestui studiu au fost create două modele, unul corespunzător plăcii din beton armat neconsolidate, iar cel de-al doilea reprezentând proba consolidată folosind a doua configurație din cadrul programului experimental (SW-2 și SW-3).

Geometria și modul de încărcare a plăcii din beton armat neconsolidate sau consolidate cu platbande CPAFC a permis simplificarea modelului cu elemente finite prin considerarea simetriei pe două direcții, analizându-se astfel doar un sfert de placă [25, 26]. În figura 8, sunt ilustrate geometria plăcii și elemente finite folosite la discretizarea betonului (CRD8R), a armăturilor din oțel (T3D2) și a platbandelor compozite (S4R) [27].

Betonul a fost modelat folosind modelul Concrete Damaged Plasticity (CDP) din cadrul programului de analiză, pentru care parametrii referitori la plasticitate, comportamentul la compresiune și tracțiune au fost definiți bazându-se pe valorile din literatura de specialitate [28-30] care tratează cazuri similare și pe testele de laborator asupra materialelor. Armătura din oțel a fost modelată ca un material elasto-plastic iar pentru a putea defini interacțiunea cu betonul din imediata vecinătate s-a folosit funcția de înglobare [27]. Platbandele compozite au fost modelate folosind conceptul de lamelă din cadrul programului pentru care au fost definite caracteristicile de rigiditate și rezistență ale materialului compozit. S-a considerat că la contactul dintre substratul de beton și compozit există o conlucrare perfectă.

created, one representing the unstrengthened RC slab and the second one representing the strengthened specimen, using the second configuration from the experimental program (SW-2 and SW-3).

The geometry and loading pattern of the unstrengthened or strengthened reinforced concrete slab with CFRP strips enabled to simplify the finite element model by considering symmetry on two directions thus analysing only a quarter of the whole slab [25, 26]. In Figure 8 the slab geometry and finite elements used for the meshing of the concrete (C3D8R), reinforcing steel (T3D2) and composite strips are presented (S4R) [27].

The concrete has been modelled using the Concrete Damaged Plasticity (CDP) model from the software for which the parameters regarding the plasticity, compression and tension behaviour have been defined, based on values found in the literature [28-30], studying similar cases and on the laboratory tests on the materials. The steel has been modelled as an elasto-plastic material and the embedded function has been used in order to define the interaction with the surrounding concrete [27]. The CFRP strips have been modelled using the lamella concept from the software for which the stiffness and strength characteristics of the composite material have been defined. It has been considered that a perfect bonding exists at the concrete substrate - composite interface.

3.2 Numerical modelling results

The results obtained from the numerical models for the unstrengthened and strengthened two-way RC slabs have proven the efficiency of the applied composite strengthening solution. The

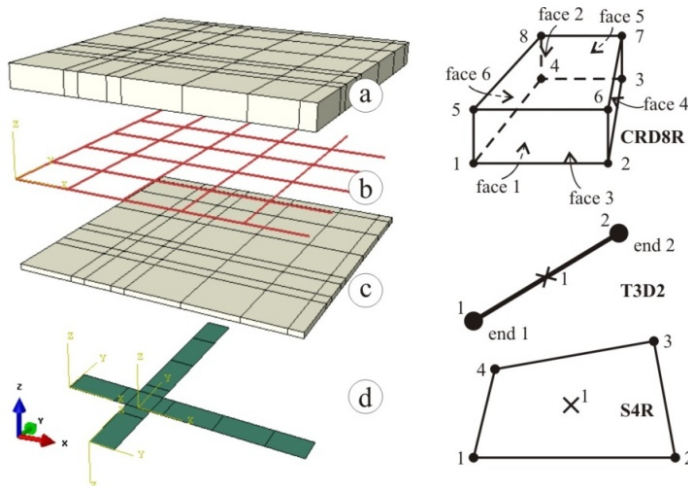


Fig. 8 - Geometria plăcii și elementele finite: a) volum de beton; b) armătura din oțel; c) acoperirea din beton; d) platbande CPAFC
 Geometry of the slab and finite elements:
 a) concrete part;
 b) reinforcing steel;
 c) concrete cover; d) CFRP strips.

3.2. Rezultatele modelărilor numerice

Rezultatele obținute din modelările numerice ale plăcilor din beton armat neconsolidate și consolidate au dovedit eficiența soluției compozite de consolidare care a fost aplicată. Rezultatele generale ale modelărilor numerice sunt prezentate în tabelul 5.

Tabelul 5

Rezultatele modelărilor numerice
 Numerical modelling results

Placa / Slab	Forța ultimă Ultimate load [kN]	Deplasarea Displacement [mm]
SW-CM	47.2	12.4
SW-3M	64.6	14.1

Pentru modelul consolidat forța ultimă a crescut cu aproximativ 44,2% comparativ cu elementul neconsolidat. Deplasarea transversală a crescut cu aproximativ 13,7% pentru placa consolidată comparativ cu placa neconsolidată, evidențiind o creștere a ductilității pentru acest mod de abordare, fenomen evidențiat și în [31]. În figura 9, sunt ilustrate diagramele forță-deplasare pentru plăcile care au fost modelate.

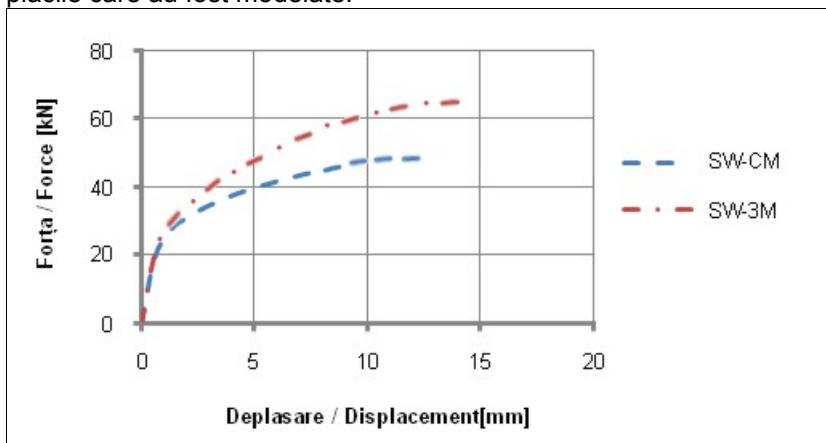


Fig. 9 - Diagramele forță-deplasare pentru plăcile modelate
 Load displacement diagrams for the modelled slabs.

4. Discuții asupra rezultatelor

În cazul plăcii din beton armat pe două direcții, fără consolidare, valoarea forței ultime obținute din programul experimental este cu 5%

general results from the numerical modelling are presented in Table 5.

For the strengthened model the ultimate load has increased with about 36.9% in comparison with the unstrengthened specimen. The transverse displacement has increased approximately 13.7% for the strengthened slab in comparison to the unstrengthened one, highlighting a gain in ductility for this type of approach, phenomena observed also in [31]. In Figure 9 the load-displacement diagrams for the modelled slabs are illustrated.

4. Discussions on the results

In case of the unstrengthened two-way RC slab the value for the ultimate load obtained from experimental testing is 5% smaller than the one obtained from the numerical modelling; for the strengthened slab the ultimate load from the experiment is 6.5% smaller. From transversal displacements point of view, the general behaviour of the strengthened slab is similar until the strengthening system fails. In the next figure the comparative force-displacement diagrams for the

unstrengthened slab SW-C (Fig. 10,a) and strengthened slab (Fig. 10,b) are illustrated according to the experimental results and the numerical modelling.

mai mică decât cea obținută prin modelarea numerică; pentru placa consolidată forța ultimă din experiment este cu 6,5% mai mică. Din punct de vedere al deplasărilor transversale, comportamentul general al plăcilor consolidate este similar până în momentul cedării sistemului de consolidare. În figura 10 sunt reprezentate comparativ diagramele forță-deplasare pentru placa neconsolidată SW-C (fig. 10, a) și pentru placa consolidată SW-3 (fig. 10, b) conform rezultatelor obținute din programul experimental și din modelările numerice.

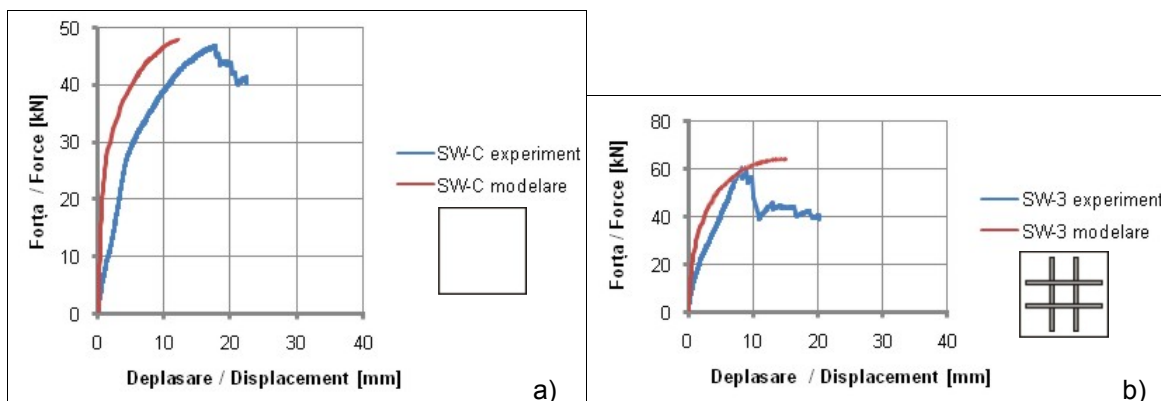


Fig. 10 - Comparația diagramele forță-deplasare: a) placa neconsolidată SW-C; b) placa consolidată SW-3
Comparative load-displacement diagrams: a) unstrengthened slab SW-C; b) strengthened slab SW-3.

5. Concluzii

Consolidarea plăcilor subțiri din beton armat folosind tehnica aplicării la exterior a platbandelor CPAFC prin lipire cu adezivi este o soluție eficientă pentru creșterea capacității portante a acestor elemente structurale.

Fazele tehnologice pentru aplicarea platbandelor compozite prin lipire cu adezivi trebuie realizate cu atenție pentru fiecare componentă a sistemului; pregătirea suprafeței, aplicarea adezivului și condițiile de maturare trebuie de asemenea respectate.

Rezultatele experimentale au dovedit că armătura compozită externă suplimentează efectul armăturilor interne din oțel conducând la creșterea momentului capabil și a rigidității la încovoiere reducându-se deplasările transversale.

Forțele ultime ale plăcilor consolidate au crescut cu până la 29,3% iar deplasările transversale au scăzut cu valori de până la 57% comparativ cu placa de control neconsolidată.

Diferite mecanisme de cedare pot apărea pentru plăcile subțiri din beton armat pe două direcții consolidate datorită condițiilor de solicitare, calitatea acoperirii din beton, aderența dintre beton – adeziv – platbande CPAFC și a condițiilor de rezemare; de aceea sunt necesare măsuri suplimentare pentru prevenirea diferitelor moduri de cedare a sistemului de consolidare compozit, în special la capetele platbandelor compozite.

Modelarea numerică folosind elemente finite

5. Conclusions

Strengthening of thin reinforced concrete slabs by CFRP plate bonding proves to be an effective solution to increase the load bearing capacity of this type of structural elements.

The technological steps for applying the composite plates by adhesive bonding have to be carefully followed for each component; surface preparation, adhesive application and curing conditions must also be respected.

The experimental results have proven that the external composite reinforcement supplements

the effect of the internal steel reinforcing bars leading to the increase of bending capacity and of the flexural stiffness, reducing the transverse displacements.

The ultimate loads of the strengthened slabs, determined experimentally have increased up to 29.3% while the transverse displacements have decreased with values up to 57% in comparison to the unstrengthened control slab.

For the strengthened thin two-way reinforced concrete slabs different failure mechanisms may occur due to loading conditions, concrete substrate quality, bonding between concrete-adhesive-CFRP strips and support conditions; thus additional measures are necessary to prevent different failure modes of the composite strengthening system, especially at the ends of the composite strips.

The numerical modelling using finite elements to evaluate the structural response of slabs strengthened with composite strips is a useful tool that can provide information needed to develop better experimental models with less workload and to support the design and implementation of improved solutions.

The correspondence of the results obtained from the experiments and from the numerical models is influenced by a series of factors like: the behaviour of the slabs during the tests and their failure modes, the analytical models for the materials and the simplifying assumptions used in order to create the geometrical models.

pentru evaluarea răspunsului structural al plăcilor consolidate reprezintă un mijloc util care să asigure informații necesare pentru dezvoltarea unor modele experimentale adecvate cu mai puțin efort și pentru a susține proiectarea și implementarea soluțiilor îmbunătățite.

Concordanța rezultatelor obținute din programul experimental cu cele din modelările numerice este influențată de o serie de factori precum: comportamentul plăcilor pe durata testării și modurile de cedare, modelele analitice ale materialelor și ipotezele simplificatoare folosite pentru crearea modelelor geometrice.

Mulțumiri

Autorii mulțumesc Guvernului României și Fondului Social European pentru finanțare în cadrul POS DRU 2007-2013, grantul EURODOC, proiect ID 59410.

REFERENCES

1. W. Radomski, Bridge rehabilitation, Imperial College Press, London, UK, 2002.
2. D. Banu, N. Țăranu, Traditional solutions for strengthening reinforced concrete slabs, The Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, Construction. Architecture Section, 2010, **LVI (LX)** (3), 53.
3. N. Țăranu, G. Opreșan, D. Isopescu, I. Entuc, and V. Munteanu, Composite strengthening solutions for engineering structures, STEF Publishing, Iași, 2006.
4. 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.
5. G. Opreșan, N. Țăranu, M. Budescu, and I. Entuc, Structural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by CFRP plate bonding, Romanian Journal of Materials, 2012, **42(4)**, 387.
6. Z.F. Chen, L.L. Wan, S. Lee, M. Ng, J.M. Tang, M. Liu, and L. Lee, Evaluation of CFRP, GFRP and BFRP material systems for the strengthening of RC slabs, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2008, **27(12)**, 1233.
7. A.S. Farghaly, and T. Ueda, Prediction of punching shear strength of two-way slabs strengthened externally with FRP sheets, Journal of Composites for Construction, 2011, **15(2)**, 181.
8. S.T. Smith, S. Hu, S.J. Kim, and R. Seracino, FRP-strengthened RC slabs anchored with FRP anchors, Engineering Structures, 2011, **33(4)**, 1075.
9. Z.M. Wu, C.H. Hu, Y.F. Wu, and J.J. Zheng, Application of improved hybrid bonded FRP technique to FRP debonding prevention, Construction and Building Materials, 2011, **25(6)**, 2898.
10. G. Foret, and O. Limam, Experimental and numerical analysis of RC two-way slabs strengthened with NSM CFRP rods, Construction and Building Materials, 2008, **22(10)**, 2025.
11. S.C. Floruț, V. Stoian, T. Nagy-György, D. Dan, and D. Diaconu, Retrofitting of two-way RC slabs with and without cut-out openings by using FRP composite materials. 3rd WSEAS International Conference on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology (EMESEG '10), 22-24 Iul 2010, Corfu, Greece, 245.
12. Y.J. Kim, J.M. Longworth, R.G. Wight, and M.F. Green, Punching shear of two-way slabs retrofitted with prestressed or non-prestressed CFRP Sheets, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2012, **29(8)**, 1206.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the funding by Romanian Government and European Social Fund, POS DRU 2007-2013, under grant EURODOC, project ID 59410.

13. W. Elsayed, U. Ebead, and K. Neale, Mechanically fastened FRP-strengthening two-way concrete slabs with and without cutouts, Journal of Composites for Construction, 2009, **13(3)**, 198.
14. xxx, SR EN 197-1 Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements.
15. xxx, SR EN 12390-2:2002. Testing hardened concrete - Part 2: Making and curing specimens for strength tests.
16. xxx, SR 438-3, Steel products for reinforcement of concrete. Welded fabric, Romanian Standards Associations, 1998.
17. xxx, SR EN ISO 6892-1, Metallic materials. Tensile testing. Part 1: Method of test at room temperature, Romanian Standards Associations, 2010.
18. xxx, ACI 440.2R-02, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI Committee 440, Farmington Hills, USA, 2008.
19. xxx, MTCT (2005), Normative on strengthening with fibres of load bearing concrete elements, Monitorul Oficial nr.132 bis/February 2005, Bucharest.
20. xxx, Technical Sheet: Adesilex PG1 / Adesilex PG2: Two - component thixotropic epoxy adhesives for structural bonding, MAPEI, Milano, Italia, 2010.
21. xxx, Technical Sheet: Carboplate: Pultruded carbon fibre plate pre-impregnated in epoxy based resin, protected by a double plastic film, MAPEI, Milano, Italia, 2010.
22. xxx, Technical Sheet: MapeWrap Primer 1: Epoxy primer for MapeWrap system, MAPEI, Milano, Italia, 2010.
23. D. Banu, N. Țăranu, and R.C. Barros, Experimental study on two way RC slabs with or without openings strengthened with composite strips. Part A: Experimental setup, The Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, Construction. Architecture Section, 2012, **LVIII(LXII)(2)**, 87.
24. D. Banu, N. Țăranu, R.C. Barros, P. Ciobanu, S. Popoaei, Experimental study on two way RC slabs with or without openings strengthened with composite strips. Part B: Experimental results, The Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, Construction. Architecture Section, 2012, **LVIII(LXII)(3)**, 23.
25. D. Banu, R.C. Barros, and N. Țăranu, Numerical modelling of two way reinforced concrete slabs strengthened with carbon fiber polymers strips, Proceeding of 15th International Conference on Experimental Mechanics ICEM 15, 22-27 iulie 2012, Porto, Portugalia, 1185.
26. R. Al-Rousan, M. Issa, and H. Shabila, Performance of reinforced concrete slabs strengthened with different types and configurations of CFRP, Composites Part B: Engineering, 2012, **43(2)**, 510.
27. xxx, ABAQUS/CAE User's Manual V 6.11, SIMULIA, Dassault Systèmes, 2011.
28. T. Jankowiak, and T. Łodygowski, Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model, Foundations of Civil and Environmental Engineering, 2005, **6**, 53.

29. O. Martin, Comparison of different constitutive models for concrete in ABAQUS/Explicit for missile impact analyses, Publications Office of the European Union, Joint Research Centre, Luxembourg, 2010.
30. P. Kmiecik, and M. Kaminski, Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2011, **XI**(3), 623.
31. M.J. Radik, E. Erdogmus, and T. Schafer, Strengthening two-way reinforced concrete floor slabs using polypropylene fiber reinforcement, Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, **23**(5), 562.

MANIFESTĂRI ȘTIINȚIFICE / SCIENTIFIC EVENTS

ICG Prague, 1- 5 July 2013 23rd International Congress on Glass in the Czech Republic in 2013.

Plenary talks, invited talks, contributed papers and posters sessions will cover all topics in glass science, technology and production. In addition to the common topics, the Congress will focus on new directions of glass developments and applications:

- Theory of glass
- Glass modelling
- Glass transitions
- Relaxation of glass
- Glass surfaces
- Thermodynamics of glass
- Other glass properties
- Optical properties
- Mechanical properties
- Glass & vibrations
- Crystallization
- Non-oxide glass
- Optically active glass
- Glass chemical durability and safety of nuclear power plant
- Sol-gel
- Glass forming
- Bio-glasses
- New glasses
- Glass melting and forming
- Environmental issues
- Raw materials & Refractories

TC Sessions

- Glass structure (TC03)
- Vitrification of Hazardous and Nuclear Wastes (TC05)
- Indentation and Nanoindentation of Glasses and Coated Glass Substrates (TC06)
- Topological Principles in Glass Science (TC06 & TC07 & TC08)
- Materials for Glass Manufacturing (TC11)
- Other materials (TC11 & TC14)
- Nanostructured sol-gel glasses (TC16)
- The Scientific Investigation of Asian Faience (TC17)
- History and Development of Bohemian and Western European Glasses (TC17)
- Glass melting processes and melting efficiency (TC18)
