

INFLUENȚA UNOR PARAMETRII DE ASAMBLARE ASUPRA COMPORTĂRII ÎMBINĂRILOR LA ELEMENTE PULTRUDATE DIN COMPOZITE POLIMERICE ARMATE CU FIBRE INFLUENCE OF ASSEMBLING PARAMETERS ON JOINTS BEHAVIOUR OF PULTRUDED ELEMENTS MADE OF FIBRE REINFORCED POLYMER COMPOSITES

**NICOLAE ȚĂRANU*, SERGIU POPOAEI, GABRIEL OPRIȘAN, PAUL CIOBANU,
PETRU MIHAI, VLAD MUNTEANU**

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

În lucrare se prezintă rezultatele unui studiu care cuprinde testări experimentale și modelări numerice efectuate pentru a investiga influența distanțelor marginale și a momentelor de strângere asupra comportării îmbinărilor prin suprapunere simplă, cu șuruburi metalice a unor elemente compozite de tip placă, fabricate prin pultrudare, din poliesteri armați cu fibre din sticlă (PAFS).

Programul experimental s-a concretizat prin analiza și testarea a optzeci de probe care corespund la patru configurații de asamblare, cu un număr variabil de șuruburi, având distanțe marginale diferite și două trepte ale momentelor de strângere.

Pentru fiecare configurație de asamblare testată experimental, s-a conceput câte un model numeric bazat pe folosirea elementelor finite, utilizând pachetul software ANSYS, comparându-se rezultatele obținute pe cele două căi și constatând apropierea relativă a valorilor eforturilor capabile.

The paper presents the results of a study including experimental tests and numerical modelling performed to investigate the influence of the edge distance and of the tightening torque on the behaviour of steel bolted lap joints of composite plates made of glass fibre reinforced polyesters (GFRP) manufactured by pultrusion.

The experimental program analysis and testing of eighty samples corresponding to four assembly configurations with a variable number of bolts, with different marginal distances and two steps of tightening torques.

Numerical models based on finite elements using ANSYS software package were designed for each assembly configuration tested experimentally, and the obtained results on bearing capacities for the studied joints have been compared.

Keywords: glass fiber reinforced polyesters, pultruded elements, bolted joints, bearing failure

1. Introducere

Elementele de construcții din poliesteri armați cu fibre din sticlă (PAFS) sunt utilizate pe scară largă în domeniul construcțiilor datorită proprietăților mecanice și elastice foarte bune, combinate cu greutatea proprie redusă și rezistența ridicată la coroziune [1]. În ingineria civilă, produsele compozite pe bază de PAFS sunt aplicate cu succes la consolidarea elementelor structurale din materiale de construcții tradiționale, la structuri ale unor construcții noi situate în medii agresive și ca armătură internă pentru elemente din beton, lemn sau zidărie [2-7].

În aplicațiile structurale, îmbinările cu șuruburi sunt utilizate frecvent datorită simplității și costului redus al execuției, precum și a posibilității de dezasamblare pentru realizarea inspecției și reparațiilor. Principala problemă asociată îmbinărilor mecanice este concentrarea tensiunilor

1. Introduction

Glass fibre reinforced polyesters (GFRP) construction elements are widely utilized in civil engineering due to their exceptional mechanical and elastic properties combined with low weight and high corrosion resistance [1]. In civil engineering, the GFRP products are successfully applied to strengthen structural elements made of traditional building materials, for new civil engineering structures located in aggressive environments or for the internal reinforcement of concrete, wood or masonry [2-7].

Bolted connections are frequently utilized in structural applications because of simplicity, low costs of execution, and easy of disassembling, for inspection and repair. The main issue associated with bolted joints is the stress concentration around the holes and the initiation of the failure modes [8]. In most cases, the joint region is the critical part of

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

în jurul găurilor și inițierea modurilor de cedare [8]. În cele mai multe cazuri zona îmbinării este regiunea critică a structurii și trebuie proiectată și detaliată cu atenție pentru a evita vulnerabilizarea excesivă a acestei regiuni [9].

Studiile recente realizate de către diferiți cercetători au evidențiat o creștere semnificativă a capacității portante a îmbinărilor prin aplicarea momentelor de strângere [10-11]. Predicția eforturilor capabile prin modelări numerice utilizând metoda elementelor finite poate fi realizată prin introducerea în analiză a unui criteriu de cedare adecvat [12-14]. Precizia rezultatelor obținute prin modelare numerică este influențată de tipurile elementelor finite utilizate la discretizarea componentelor, de condițiile de contur și de aplicare a încărcărilor adoptate în analiză, precum și de modelarea corespunzătoare a suprafețelor de contact dintre componentele care se asamblează.

Acest studiu face parte dintr-un amplu program de cercetare cu privire la comportarea elementelor și îmbinărilor specifice produselor compozite pultrudate, aflat în desfășurare în cadrul Facultății de Construcții și Instalații din Iași [15-16]. Lucrarea are ca obiectiv principal evaluarea influenței pe care o exercită distanța marginală și momentul de strângere asupra eforturilor capabile ale îmbinărilor cu șuruburi metalice, prin suprapunerea simplă a elementelor plate din PAFS obținute prin pultrudare. Studiul cuprinde încercări experimentale și modelări numerice pentru determinarea eforturilor capabile în cazul cedării la strivire.

2. Programul experimental

2.1. Pregătirea și testarea probelor

Programul experimental cuprinde testarea a două serii de îmbinări cu șuruburi realizate prin suprapunere simplă. Fiecare serie include configurații diferite de îmbinare, identificate conform tabelului 1. Diferențierea se realizează după numărul șuruburilor din îmbinare, poziția acestora în raport cu direcția forței aplicate și după momentul de strângere aplicat cu ajutorul cheii dinamometrice.

the structure and it must be carefully designed and detailed to avoid excessive vulnerability of the region [9].

Recent studies conducted by various researchers have shown a significant increase in the bearing capacity of joints by applying the tightening torques [10-11]. The prediction of the joint capacity by using finite element numerical modelling may be performed by introducing for analysis of an appropriate failure criterion [12-14]. The accuracy of the results obtained by numerical modelling is influenced by the type of finite element used to mesh the components, the boundary conditions and the solutions adopted for the application of loads in the analysis as well as the appropriate modelling of the contact surfaces of the parts to be assembled.

This study is part of an extensive research program regarding the behaviour of pultruded products and their connections, in progress at the Faculty of Civil Engineering and Building Services, Iași [15-16].

The paper's main objective is to assess the influence exercised by the marginal distance and torque on resistances of the single lap bolted connections between pultruded GFRP plates. The study includes experimental testing and numerical modelling in order to determine the bearing capacity of some bolted connections.

2. Experimental program

2.1. Specimens preparation and testing

The experimental program consists of testing of two series of single lap bolted connections. Each series includes various joint configurations identified in Table 1. The joints are differentiated with respect to the number of bolts, the marginal distances, and the relative position to the direction of the applied force and by the tightening torque applied.

The dimensions of the composite joint test specimens to evaluate the structural response of the connections have been selected according to ASTM D5961-13 [17] and ASTM D6873-08 [18]. The geometric characteristics of the tested samples are illustrated in Figure 1, in which the

Tabelul 1

Tipuri de probe analizate / Types of analysed specimens		
Tipul de strângere/Tightening type	Strângere manuală/ Manual tightening	Cu cheie dinamometrică și moment de strângere 10 Nm/ With wrench and torque moment equal to 10 Nm
Număr șuruburi/ Number of bolts		
1 șurub/ 1 bolt	A1, A2, A3	A11
2 șuruburi paralele cu direcția forței/ 2 bolts parallel to the force direction	A4, A5, A6	A41
2 șuruburi pe un rând perpendicular pe direcția forței / 2 bolts in one row normal to the force direction	B1, B2, B3	B11
4 șuruburi pe două rânduri / 4 bolts on two rows	B4, B5, B6	B41

Dimensiunile epruvetelor compozite care se îmbină au fost adoptate în concordanță cu normele ASTM D5961-13 [17] și ASTM D6873-08 [18], în scopul evaluării răspunsului structural al elementelor testate. În figura 1 sunt prezentate caracteristicile geometrice ale probelor încercate în cadrul programului experimental, în care lungimea de fixare în bacuri a epruvetelor este $l_g = 100$ mm; pentru distanța marginală notată cu e , au fost considerate valorile $e=3d$, $e=4d$ și $e=5d$ în care d este diametrul găurii.

Elementele compozite au fost fabricate prin pultrudare din poliesteri armați cu fibre de sticlă, având principalele caracteristici mecanice prezentate în tabelul 2 [19]. Aceste valori au fost confirmate experimental de către autori [20] prin încercări standard de laborator [21]. Alcătuirea plăcilor pultrudate cu un sistem de armare combinat, în care straturile exterioare de armătură sunt realizate din țesătură fină din fibre de sticlă, (fig.1), favorizează preluarea locală a tensiunilor. Epruvetele au fost tăiate la dimensiunile necesare utilizând o mașină universală de tăiat cu disc diamantat, (fig. 2a), iar pentru minimizarea degradării pereților găurilor din fâșiile compozite au fost testate patru tipuri de burghie, cele mai bune rezultate obținându-se cu burghiul pentru lemn utilizat cu o viteză mică de rotație (1000 rot/min), (fig. 2b). Excesul de material rezultat după găurire a fost îndepărtat cu hârtie abrazivă fină. Pentru asamblarea epruvetelor au fost utilizate șuruburi din oțel M10, grupa 8.8, SR EN ISO 4014:2011 [22], piulițe metalice și șaibe cu diametrul de 25mm. Aplicarea momentelor de strângere controlate s-a realizat cu o cheie dinamometrică cu indicator, (fig. 2c).

fixing length in the machine grips is $l_g = 100$ mm, and the marginal distances e , have been selected as: $e=3d$, $e=4d$ and $e=5d$ where d is the hole diameter.

The composite elements have been manufactured by pultrusion from glass fibre reinforced polyesters, and their principal mechanical characteristics are presented in Table 2 [19]; these values have been experimentally confirmed by the authors [20] using standardized laboratory procedures [21]. The pultruded plates are reinforced with combined fibre reinforcing products in which the exterior reinforcing layers are made of fine glass fibre fabrics, (Fig.1), that resist the local stresses in directions different from the longitudinal axis of pultrusion. The test samples have been cut using a universal saw machine with diamond disk, (Fig.2.a). Four types of drills have been tested to select the most appropriate drilling device in order to minimize the deterioration of the hole wall. The best results were achieved with the drill for wood rotated with 1000 rotations/minutes, Fig.2b. The excess material resulted after drilling was removed with fine sandpaper. The joint specimens were assembled with steel bolts M10, class 8.8, SR EN ISO 4014:2011 [22], with steel nuts and with 25mm washer diameter. The tightening torques were applied with a torque wrench provided with a load indicator, (Fig. 2c).

The tensile tests of specimens have been performed with a 1000 kN universal testing machine (UTM), the speed of tests having been set at 2 mm/minute crosshead movement according to ASTM D5961-13. The UTM details and the positioning of the specimens in the UTM grips are presented in Figure 3.

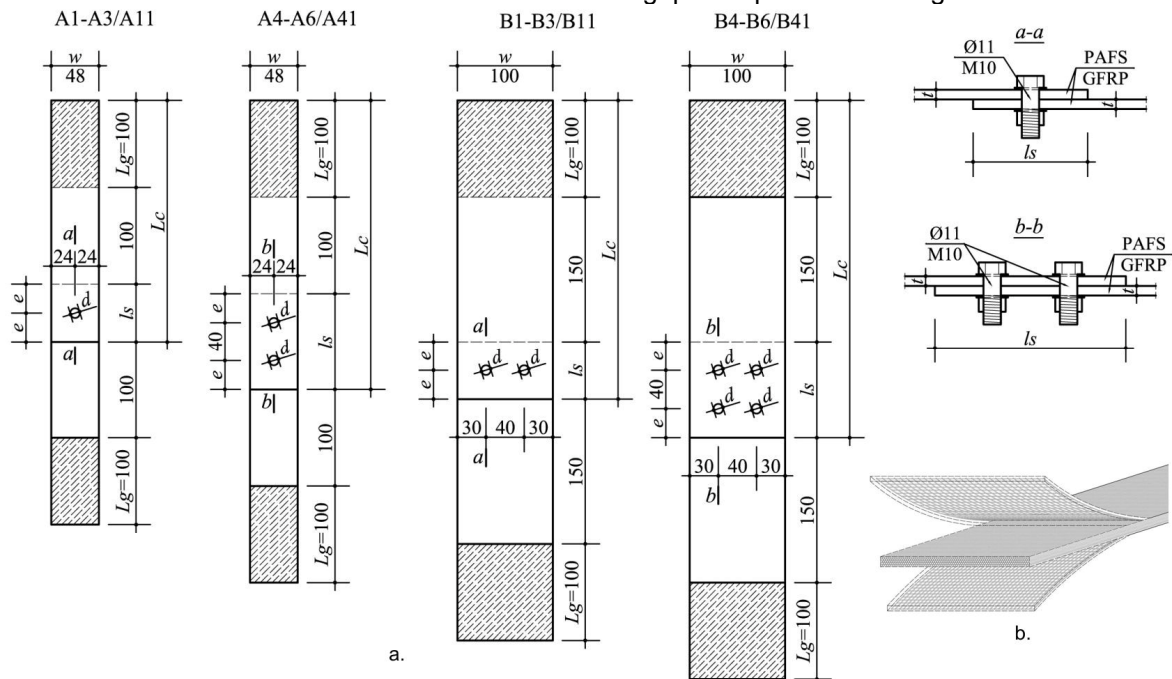


Fig. 1 - Epruvetele pentru programul experimental/ Samples for the experimental program: a – geometria probelor / specimens geometry (mm); b- detaliu armare compozit / composite reinforcement detail.



Fig. 2 - Confecționarea epruvetelor / Specimens preparation: a) tăierea probelor / samples cutting; b) selecția burghiului / drill selection; c) aplicarea momentelor de strângere / applying the tightening torque

Tabelul 2

Proprietățile mecanice ale plăcilor din PAFS / Mechanical properties of the GFRP plates [19]

Caracteristică / Characteristic	Platbande PAFS GFRP plates
Modulul de elasticitate longitudinal / Longitudinal tensile modulus, (GPa)	23
Modulul de elasticitate transversal / Transverse tensile modulus, (GPa)	8.5
Modulul de elasticitate la forfecare / Shear modulus, (GPa)	3
Coefficientul lui Poisson / Poisson's ratio	0.23
Rezistența la tracțiune în direcție longitudinală / Longitudinal tensile strength, $f_{t,0^\circ}$, (MPa)	240
Rezistența la compresiune în direcție longitudinală / Longitudinal compressive strength, $f_{c,0^\circ}$, (MPa)	240
Rezistența la tracțiune în direcție transversală / Transverse tensile strength, $f_{t,90^\circ}$, (MPa)	50
Rezistența la forfecare în planul plăcii PAFS / Shear strength in the plane of plate, f_τ , (MPa)	25

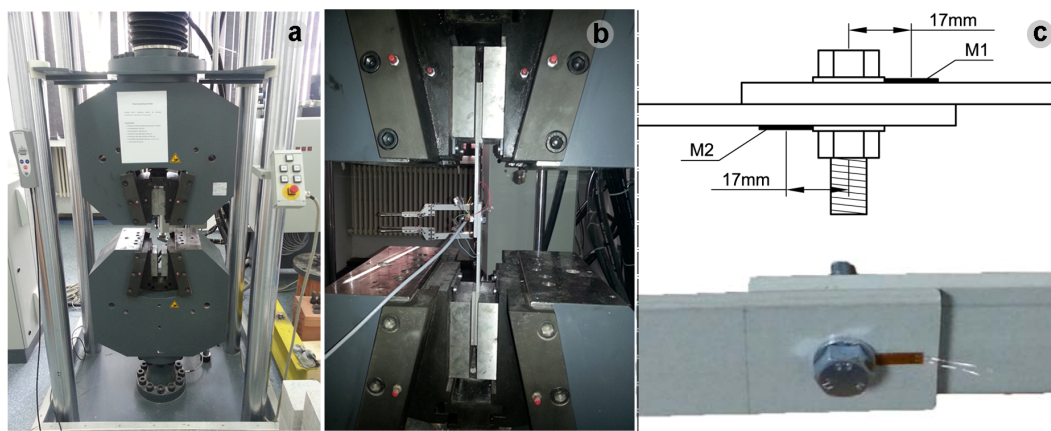


Fig. 3 - Instrumentarea și testarea epruvetelor / Specimens instrumentation and testing: a) mașină universală de încercat / Universal Testing Machine (UTM); b) poziționarea probei în bacurile presei / specimen positioning in the UTM grips; c) instrumentarea probelor cu mărci tensometrice / specimens instrumentation with strain gauges.

Testarea la tracțiune a probelor a fost realizată cu o mașină universală de încercat cu sarcina maximă 1000 kN, având viteza de deplasare egală cu 2 mm/minut în conformitate cu ASTM D5961-13. În figura 3 se prezintă poziționarea probei și detaliile de fixare în bacurile mașinii de încercat.

Forțele aplicate și deplasările au fost monitorizate pe toată durata încercărilor cu ajutorul celulei de forță și a traductorilor de deplasare din sistemul de achiziție al mașinii de încercat.

Pentru măsurarea deformațiilor specifice

The applied forces and displacements during the tests have been monitored using a load cell and displacement transducers integrated in UTM.

To monitor the strains in the composite plates near the holes, strain gauges (Kyowa KFRP 5-120-C1-1) were glued using cyano – acrylate base cement (CC-33A) and wired in half-bridge under laboratory conditions obeying the codes and manufacturer prescriptions [23]. The positions of the strain gauges are shown in Figure 3c. The recording of the experimental data was performed

liniare din apropierea găurilor, pe plăcile compozite au fost utilizate mărci tensometrice cu indicativele M1 și M2, de tip Kyowa KFRP 5-120-C1-1 cu adeziv pe bază de cianacrilat CC-33A [23], figura 3c. Înregistrarea datelor experimentale s-a realizat utilizând un sistem de achiziție de date de tip Adlink Technology [24].

2.2. Rezultate experimentale

Încercările la tracțiune ale îmbinărilor au fost realizate până la cedare, instrumentarea probelor asigurând monitorizarea forțelor și deplasărilor precum și a deformațiilor specifice liniare în cazul probelor A1 și A11. Pentru a evita caracterul brusc al cedării îmbinării, situație preferată de proiectanții structurilor din produse pultrudate din PAFS, s-a considerat efortul capabil pentru proba solicitată egal cu valoarea forței care produce o deformație specifică liniară în compozitul polimeric egală cu 0,4%, figura 4. Această valoare se referă la deformația specifică din piesele îmbinate stabilită cu traductorul electric rezistiv și nu ține seama de deplasările din îmbinare datorită diferenței dintre diametrul găurii și diametrul tijei.

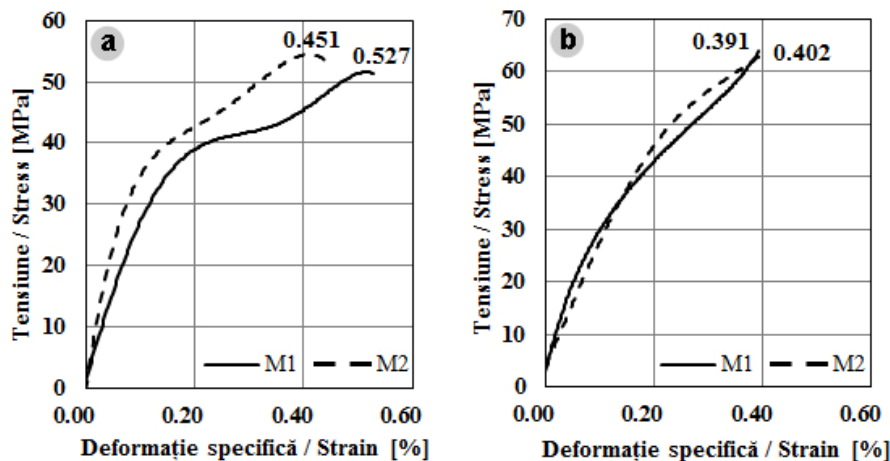


Fig. 4 - Diagrame tensiuni – deformații specifice / Stress - strain diagrams: a) epruveta A1 / specimen A1; b) epruveta A11/ specimen A11.

În figura 4 sunt prezentate curbele tensiuni – deformații specifice pentru epruvetele A1 și A11. Se poate observa influența momentului de strângere asupra distribuției tensiunilor și al deformațiilor specifice pentru probele având momentul de strângere egal cu 10 Nm.

Dacă se ia în considerare distanța marginală, (e) în raport cu diametrul (d) al găurii cele mai bune rezultate au fost obținute pentru epruvetele cu $e \geq 4d$ pentru îmbinările cu strângere manuală a șuruburilor. În cazul îmbinărilor cu moment de strângere controlat, rezultatele au arătat o creștere a efortului capabil pentru probele cu moment de strângere egal cu 10 Nm.

În tabelul 3 sunt prezentate rezultatele experimentale pentru probele din seria A, iar în figura 5 sunt ilustrate grafic curbele forță – deplasare pentru grupele acestei serii.

În cazul epruvetelor din seria A, fără moment de strângere suplimentar, eforturile capabile au

utilizat un sistem de achiziție de date de tip Adlink Technology [24].

2.2. Experimental results

The tensile tests of the assemblage have been performed up to failure and the instrumentation of the specimens enabled the monitoring the forces and displacements as well as the strains in the case of the A1 A11 samples.

To avoid a sudden joint failure, a condition preferred by structural designers using composite pultruded products made of GFRP, the load bearing capacity of the bolted connections was considered equal to the force required to produce a strain equal to 0.4%, Figure 4. This value refers to the strain of joined pieces equipped with the electrical strain gage and does not consider the movements of the joints due to the difference between the diameter of the hole and the diameter of the bolt shank.

The stress strain curves for the A1 and A11 test specimens are illustrated in Figure 4. The influence of the torque moment on the stress and strain distributions for the samples with the

tightening torque moment equal to 10 Nm can be noticed.

If the marginal distance (e) with respect to diameter (d) is taken into account, it can be observed that the best results were obtained for the samples with $e \geq 4d$ for manual tightening of the bolted joints. When a 10 Nm controlled torque was applied, the bearing strength has increased as shown in Table 3 and Figure 5, where the force displacement curves are drawn.

In case of specimens of series A with no additional tightening torque, the bearing capacity increased with the number of bolts along the direction of applied force. The experimental results showed an 83% increase of the bearing capacity of the joints with one row bolts (joint Type A4), with respect to the sample type A1.

This influence is less significant for samples of type A6 with respect to the A5 samples.

crescut cu numărul de șuruburi după direcția efortului aplicat. Rezultatele experimentale au relevat o creștere a eforturilor capabile din îmbinările cu un șir de șuruburi de până la 83% la îmbinările de tip A4 în raport cu îmbinările de tip A1.

Influența este mai puțin resimțită în cazul probelor de tip A6 față de probele de tip A5.

The values experimentally determined and the force - displacement curves of the series B samples are shown in Table 4 and Figure 6. Taking into account the load capacity of the joint, in the case of the specimens without the tightening torque, the best results have been obtained for samples with four bolts (B4), with 92% bearing capacity higher than the joints with two bolts (B1).

Tabelul 3

Rezultate experimentale pentru epruvetele din seria A / Experimental results for the A series specimens

Epruvetă/ Specimen	e	M (Nm)	Efort capabil la strivire / Bearing resistance (kN)	Deplasare/ Displacement (mm)
A1	3d	-	15.43	4.19
A2	4d	-	18.76	6.44
A3	5d	-	19.28	6.35
A4	3d	-	28.29	5.49
A5	4d	-	32.30	6.74
A6	5d	-	32.71	7.00
A11	3d	10	19.10	3.92
A41	3d	10	37.16	6.20

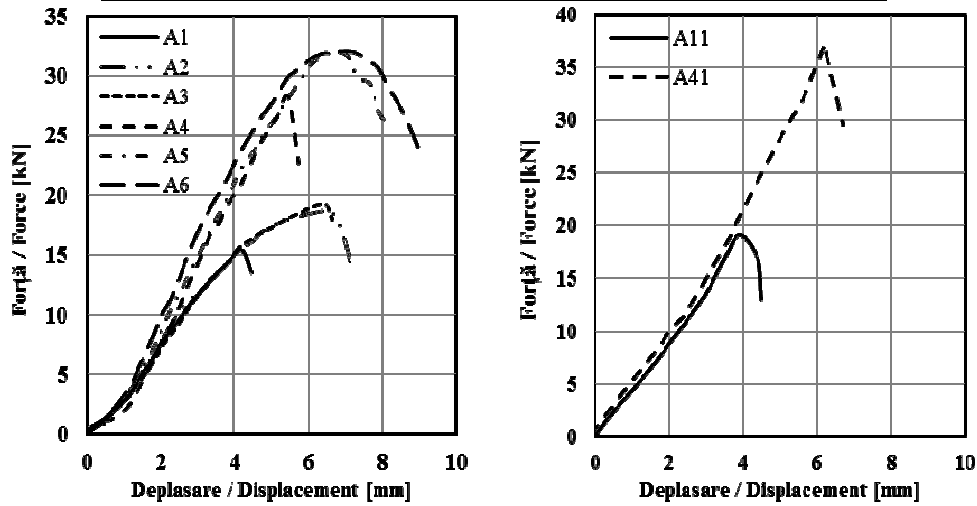


Fig. 5 - Diagrame forță – deplasare pentru epruvetele din seria A / Force - displacement diagrams for the A series specimens.

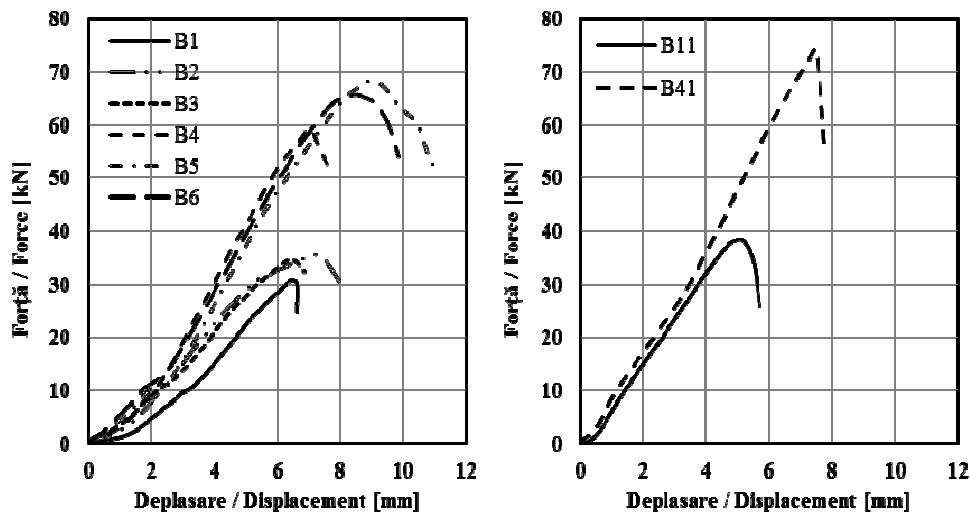


Fig. 6 - Diagrame forță – deplasare pentru epruvetele din seria B / Force - displacement diagrams for the B series specimens.

Tabelul 4

Rezultate experimentale pentru epruvetele din seria B / Experimental results for the B series specimens

Epruvetă Specimen	e	d (mm)	M (Nm)	Efort capabil la strivire / Bearing resistance (kN)	Deplasare Displacement (mm)
B1	$3d$	10	-	31.26	6.62
B2	$4d$	10	-	35.64	7.23
B3	$5d$	10	-	35.68	8.41
B4	$3d$	10	-	60.01	7.22
B5	$4d$	10	-	68.54	8.97
B6	$5d$	10	-	65.74	8.44
B11	$3d$	10	10	38.58	5.51
B41	$3d$	10	10	74.17	7.54

Valorile determinate experimental și curbele forță – deplasare pentru probele din seria B sunt prezentate în tabelul 4 și în figura 6. Dacă se ia în considerare efortul capabil al îmbinării, în cazul epruvetelor fără moment de strângere, cele mai bune rezultate au fost obținute pentru probele cu patru șuruburi (B4), având efortul capabil cu 92% mai mare decât în cazul îmbinărilor cu două șuruburi (B1).

3. Evaluarea analitică a efortului capabil la strivire

Un prim mod de cedare, cel mai frecvent, observat și în cadrul încercării experimentale la îmbinările cu șuruburi este strivirea materialului compozit cu matrice polimerică la contactul dintre tijă și peretele găurii șurubului. Strivirea compozitului în lungul fibrelor este progresivă și se accentuează după depășirea rezistenței limită a materialului, la compresiune în lungul fibrelor, $f_{c,0^\circ}$. Parametrii care intervin în acest mod de cedare sunt: rezistența la strivire în direcția fibrelor $f_{c,0^\circ}$, diametrul tijei șurubului d_s , și grosimea epruvetei t ; forța exercitată de tija șurubului pe peretele găurii este egală cu efortul capabil al șurubului, F_{cap} :

$$F_{cap} = f_{c,0^\circ} d_s t \quad (1)$$

În cadrul unui program experimental organizat anterior de către autori [15-16] a fost determinată rezistența la strivire a materialului din placa pultrudată; media valorilor obținută pe 10 probe a fost de 309 N/mm^2 . Efortul capabil se referă la caracteristica de scurtă durată, fiind egală cu $18,54 \text{ kN}$; aceasta valoare este foarte apropiată de caracteristica experimentală similară pentru $e=4d$.

Ținând seama de numărul redus de șuruburi din îmbinare și de comportarea materialului din piesele pultrudate care se îmbină, efortul capabil teoretic al îmbinării cu 2 și 4 șuruburi se poate stabili multiplicând efortul capabil al unui șurub cu numărul de șuruburi de o parte a rostului de îmbinare [25-26].

La primul grup de șuruburi a fost aplicat un moment de strângere care să asigure contactul ferm dintre piesele compozite [27], pultrudate, care se îmbină, moment care nu mărește efortul capabil.

3. Analytical evaluation of the joint bearing resistance

A first mode of failure, most frequently observed in the experimental test is bolted joints crushing of the composite material with the matrix polymer upon contact of the bolt and the wall of the bolt hole. The failure of the composite along the fibres is gradual and the crushing is especially noticed when the contact stress between the bolts shank and the hole wall exceeds the longitudinal compressive strength of the material along the fiber, $f_{c,0^\circ}$.

The parameters involved in this mode of failure are: resistance to bearing in the direction of the fibres $f_{c,0^\circ}$, the bolt shank d_s and the test specimen thickness t ; the force exerted by the bolt shank on the wall of the hole is equal to the bearing load capacity of the bolt, F_{cap} :

$$F_{cap} = f_{c,0^\circ} d_s t \quad (1)$$

The short term bearing resistance of the composite from the pultruded plate was determined in an experimental program performed earlier by the authors [15-16]. The average value of these characteristic on a ten samples test was equal to 309 N/mm^2 , and the short term bearing capacity of a single bolt calculated with formula (1) was found equal to 18.54 kN ; this value is very close to the experimental value when the marginal distance $e = 4d$.

The bolted connections analysed in this paper include a small number of bolts joining the pultruded material parts; therefore, the theoretical load capacity of the joints with 2 and 4 bolts can be determined by multiplying the load bearing capacity of the single bolt by the number of fasteners [25-26].

A small tightening torque was applied to the first group of bolted connections in order to provide a firm contact of composite pultruded parts [27], but this factor does not influence the bearing capacity of the fasteners.

A 10 Nm tightening torque was applied on the second group of bolted joints, to assess the

Pentru evaluarea influenței momentului de strângere asupra capacității de rezistență a îmbinării cu un șurub s-a aplicat un moment de strângere egal cu 10 Nm cu ajutorul cheii dinamometrice. Introducerea acestui efort suplimentar generează apariția unei forțe de frecare la contactul dintre piesele îmbinate, iar valoarea acesteia se determină cu relația:

$$F_{fr} = \mu F_{tor} \quad (2)$$

în care:

μ este coeficientul de frecare, care se ia în intervalul 0,2 - 0,3 [28];

F_{tor} este forța normală de compresiune produsă de momentul de strângere al șurubului prin torsiune determinată cu:

$$F_{tor} = \frac{M_{tor}}{kd} \quad (3)$$

unde:

M_{tor} este momentul de strângere al șurubului;

k este un coeficient de strângere prin torsiune cu valoarea 0,2 [29];

d este diametrul șurubului.

Pentru apariția cedării la strivire este necesară, în primul rând, depășirea forței de frecare.

4. Modelare numerică

Pentru modelarea numerică au fost generate șaisprezece modele numerice utilizând pachetul software pe bază de element finit ANSYS. În figura 7 se prezintă geometria epruvetelor și elementele finite utilizate la discretizarea plăcilor compozite și a șuruburilor (SOLID185); sunt precizate de asemenea contactele dintre suprafețe (CONTA174 și TARGE170). Elementul finit SOLID185 este utilizat în modelarea tridimensională a structurilor și este definit de opt noduri având fiecare câte trei grade de libertate [30].

Plăcile compozite au fost modelate ca material ortotrop, utilizând caracteristicile mecanice determinate pe cale experimentală de către autori [31-32]. Șuruburile metalice sunt fabricate din oțel, având modulul de elasticitate egal cu 200 GPa și coeficientul lui Poisson egal cu 0,3.

Șuruburile, piulițele și șaibe au fost considerate în simulări ca un singur solid. Efectul momentului de strângere a fost introdus ca presiune pe șaibe. Pentru contactul dintre șaibă și compozit s-a adoptat un coeficient de frecare 0,2 [29].

Efortul capabil din îmbinare pentru fiecare model numeric a fost determinat cu ajutorul criteriilor de cedare pe baza deformațiilor specifice maxime introduse în analiză pentru plăcile compozite.

În figura 8 se prezintă răspunsul probelor analizate prin modelare numerică corespunzător îmbinărilor testate experimental. Pe scala culorilor

influence of this factor on the bolt bearing capacity. The introduction of this additional effort generates a frictional force at the contact between the joined parts, and its value is determined by the relationship:

$$F_{fr} = \mu F_{tor} \quad (2)$$

in which:

μ is the friction coefficient, equal to 0.2 – 0.3 [28]; F_{tor} is the normal compressive force generated by the tightening torque, calculated with:

$$F_{tor} = \frac{M_{tor}}{kd} \quad (3)$$

where:

M_{tor} is the tightening torque applied on the bolt;

k is a tightening torsion coefficient equal to 0.2, [29];

d is the bolt diameter.

The friction force should be overcome during joint loading, before the composite failure in bearing.

4. Numerical modelling

For the numerical modelling sixteen finite element models (FEM) have been generated using the ANSYS software package. The geometry of the bolted connection and finite elements used for the meshing of the composite plates and steel bolts (SOLID185) as well as the surface-to-surface contacts (CONTA174 and TARGE170) are presented in Figure 7. The SOLID185 element is used for the 3D modelling of solid structures and is defined by eight nodes having three degrees of freedom at each node [30].

The composite plates have been modelled as an orthotropic material having the mechanical characteristics determined experimentally in a previous work carried out by the authors [31-32]. A linear elastic material model was assigned to the steel bolts having the Poisson ratio equal to 0.3, and a 200 GPa elasticity modulus.

The bolts, nuts and washers were considered as a single solid in the simulations. The effect of the tightening torque has been simulated as a pressure on washers. A frictional contact was adopted between bolts shank and composite plates having the friction coefficient equal to 0.2 [29].

The load capacity for each numerical modelling has been determined by failure criteria based on the maximum strains introduced into the analysis of composite plates.

Figure 8 illustrates the response of the analysed samples by the appropriate numerical modelling connections experimentally tested. The values above one indicate the failure occurrence based on the strain criterion with normalized values, on the colour scale.

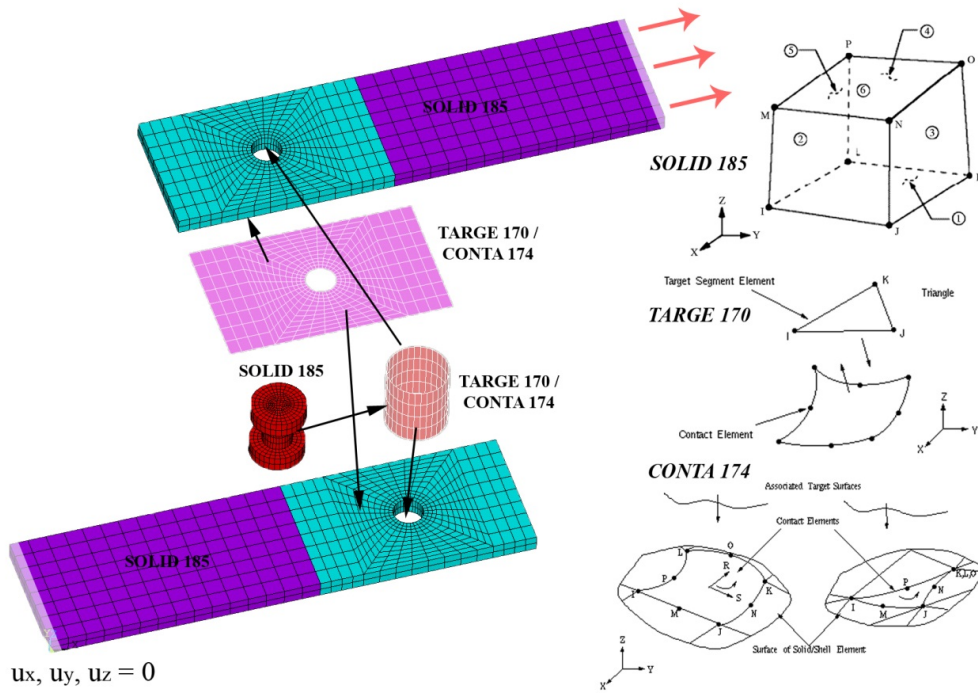


Fig. 7. - Geometria epruvetelor și elementele finite utilizate / Geometry of the specimens and the used finite elements

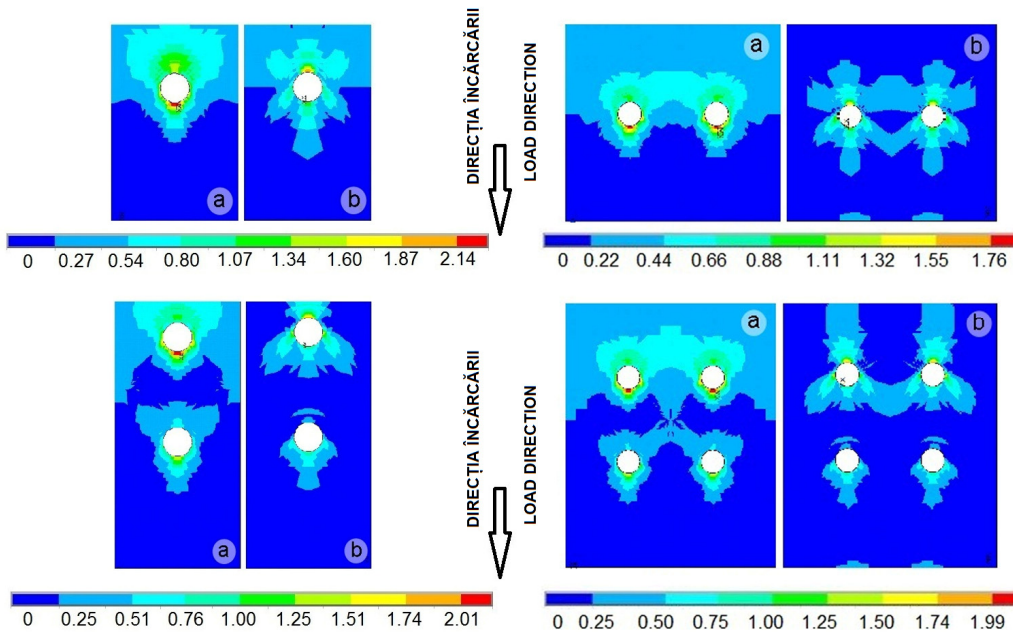


Fig. 8 - Caracteristicile cedării pentru probele analizate prin modelare numerică / failure characteristics for the samples numerically analyzed: a) față interioară / inner face; b) față exterioră / outer face.

valorile supraunitare indică cedarea după criteriul deformațiilor specifice liniare cu valori normalizate.

5. Analiza rezultatelor obținute

În cazul elementelor compozite formate prin pultrudere și asamblate cu șuruburi, cedarea prin strivire la contactul dintre tija șurubului și peretele găurii este progresivă, evitând caracterul brusc al altor tipuri de cedări posibile (cedarea la tracțiune în secțiunea netă, forfecarea marginală sau clivajul). Pentru a asigura o proiectare eficientă și

5. The analysis of results

The bearing failure of the bolted lap joints for the composite pultruded elements, at the contact between the bolts shank and the wall of the hole, is progressive avoiding the sudden failures that might occur in these types of connections (net section tensile failure, shear out or cleavage).

To ensure efficient and safe design of bolted connections, the effective bearing stresses must be kept at low levels. The use of fasteners made of

sigură a îmbinării cu șuruburi, eforturile unitare de strivire efective trebuie păstrate la valori reduse. Folosirea unor tije alcătuite din oțeluri superioare nu este recomandabilă, mai ales în cazul compozitelor pultrudate cu armarea principală unidirecțională. Efortul capabil al îmbinărilor cu șuruburi la elemente compozite este evident influențat de arhitectura fibrelor de armare și de succesiunea de strivire a straturilor [28].

Din încercările experimentale s-a constatat că cedarea prin strivire se produce în zona de contact dintre tijă și peretele găurii. Introducerea momentului de strângere și utilizarea unui diametru al șaibe de circa $2,5d$ [19], contribuie la creșterea efortului capabil al îmbinării.

Cedarea prin strivire a probelor testate este ilustrată în figura 9; imaginile sunt similare precizărilor din ASTM D5961-13 [17]. S-a constatat că pentru a obține cedarea prin strivire a îmbinării este necesară impunerea unei distanțe marginale minime $e \geq 4d$, astfel încât să fie prevenită forfecarea marginală a piesei compozite.

Rezultate asemănătoare au fost obținute și publicate în lucrări anterioare [25, 26].

Modurile de cedare identificate în modelarea numerică sunt în bună concordanță cu cele obținute pe cale experimentală.

high strength steel it is not advisable, especially for pultruded composite elements with main unidirectional reinforcement. The load bearing capacity of these bolted connections of composite pultruded elements is obviously influenced by the architecture of reinforcing fibres and stacking sequence of the layers [28].

From the experimental tests it has been found that crushing failure might occur at the contact between the bolt shank and the wall of the hole. The introducing the tightening torque and the use of a $2.5 d$ washer diameter [19], improve the load capacity of the joint.

The crushing failures of the test samples are illustrated in Figure 9, the images are similar to the ASTM D5961-13 specifications [17]. It was found that to obtain the bearing failure of the joint, it is necessary to impose a minimum marginal distance $e \geq 4d$, so as to prevent the shear out of the composite part.

Similar results were obtained and published in previous works [25, 26].

The failure modes identified by numerical modelling are in good agreement with those obtained experimentally.

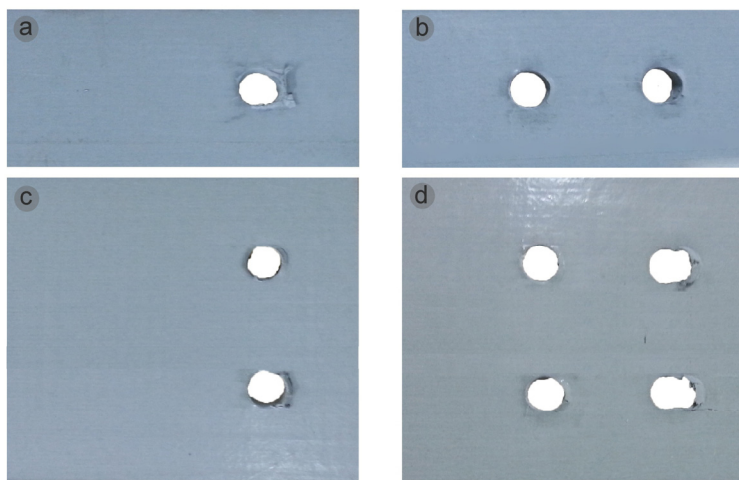


Fig. 9 - Cedarea prin strivire a îmbinărilor cu șuruburi / Bearing failure of the bolted joints

- a) îmbinări din seria A cu un șurub / A series joints with one bolt; b) îmbinări din seria A cu două șuruburi / A series joints with two bolts; c) îmbinări din seria B cu două șuruburi / B series joints with two bolts; d) îmbinări din seria B cu patru șuruburi / B series joints with four bolts;

Instrumentarea probelor A1 și A11 cu mărci tensometrice a asigurat validarea modelelor numerice. În figura 10 este prezentată valoarea deformației specifice localizată în zona mărcilor tensometrice pentru proba A1. Diferența mică, egală cu 3,17%, dintre valoarea experimentală a deformației specifice liniare și valoarea aceleiași caracteristici determinată prin modelare numerică este acceptabilă și confirmă validitatea rezultatelor.

În figura 11 și în tabelul 5 se prezintă comparativ rezultatele experimentale și cele obținute prin modelare numerică.

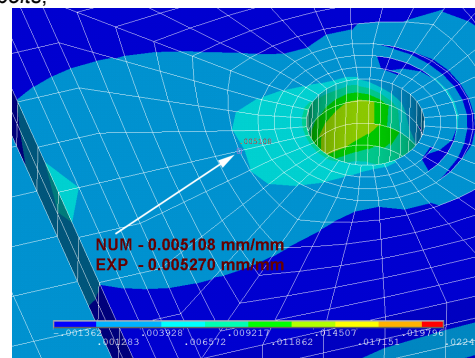


Fig. 10 - Harta deformațiilor specifice pentru epruveta A1 / Strains map for the A1 specimen.

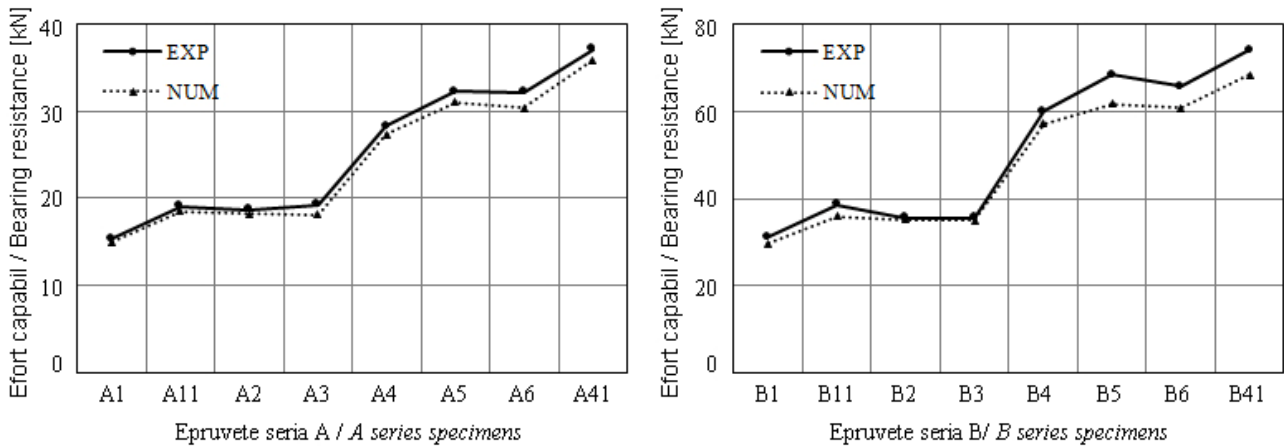


Fig. 11 - Comparația rezultatelor experimentale cu cele obținute prin modelare numerică / Comparison of the experimental results with those obtained by numerical simulation

Tabelul 5

Comparația rezultatelor / Results comparison

Epruvetă Specimen	Efort capabil experimental/ Experimental bearing resistance (kN)	Efort capabil modelare/ Modelling bearing resistance (kN)	Epruvetă Specimen	Efort capabil experimental/ Experimental bearing resistance (kN)	Efort capabil modelare/ Modelling bearing resistance (kN)
A1	15.43	15.06	B1	31.26	29.63
A2	18.76	18.23	B2	35.64	35.23
A3	19.28	18.14	B3	35.68	34.96
A4	28.29	27.35	B4	60.01	57.25
A5	32.30	31.06	B5	68.54	61.88
A6	32.21	30.36	B6	65.74	60.83
A11	19.10	18.50	B11	38.58	36.03
A41	37.16	35.87	B41	74.17	68.48

Din figura 11 se poate observa că eforturile capabile determinate prin modelare numerică sunt în bună concordanță acceptabilă cu cele obținute în cadrul programului experimental, înregistrându-se o variație a rezultatelor cuprinsă între 1,16% și 10,76%.

Valorile obținute pe cale experimentală precum și cele rezultate din modelarea numerică au arătat că eforturile capabile și modurile de cedare sunt afectate direct de distanța marginală și de momentele de strângere, acestea din urmă asigurând o creștere semnificativă.

Datorită durității relativ reduse a matricei poliesterice momentele de strângere trebuie limitate pentru a nu conduce la strivirea compozitului.

Împrăștierea rezultatelor experimentale se explică prin natura compozitului din produsele pultrudate, la care armătura longitudinală asigură parametrii ridicați de rezistență și rigiditate doar în această direcție, pe celelalte direcții fiind necesară prevederea unei armări cu fibre pe direcție perpendiculară față de cea a forței aplicate sau mat din fibre scurte orientate aleatoriu.

Dacă se ia în considerare distanța marginală în cazul îmbinărilor fără momente de strângere, cele mai bune rezultate au fost obținute pentru

Instrumentation of the samples A1 and A11 with strain gages has provided recorded data for the validation of the numerical models. The values of the strains given by the gages installed on the sample A1 are illustrated in Figure 10.

The small difference, equal to 3.17%, between the experimental value and the same characteristic determined by numerical modelling is acceptable and confirms the validity of the results.

In Figure 11 and Table 5 the comparative results between experimental values and those obtained by numerical modelling are presented.

It can be seen from Figure 11 that the bearing resistances determined by numerical modelling are in good agreement with those determined experimentally; the differences between these sets of results are between 1.16% and 10.76%.

The values of the bearing resistances obtained experimentally and the results of numerical modelling have shown that the load capacities and the failure modes are directly affected by marginal distance and by the tightening torques, the latter providing a significant increase.

Due to the relatively low hardness of the polyester matrix the tightening torques must be

îmbinările cu $e \geq 4d$. Dacă se compară aceste eforturi capabile cu rezultatele obținute pe probele cu $e = 3d$, se constată o creștere cu 21% pentru probele cu un șurub (A2), respectiv 14% pentru epruvetele cu două și patru șuruburi (A5, B2, B5).

Atunci când în configurația îmbinării A1 se mai adaugă un șurub, se înregistrează o creștere a efortului capabil al îmbinării cu 83% (A4).

În cazul probelor din seria B, dacă se adaugă două șuruburi în configurația îmbinării B1 se obține o creștere a eforturilor capabile cu 92%.

Prin aplicarea momentului de strângere egal cu 10 Nm au rezultat creșteri ale eforturilor capabile cu 23-24%.

6. Concluzii

Capacitatea portantă a structurilor realizate din elemente pultrudate pe bază de poliesteri armați cu fibre de sticlă este influențată în mod decisiv de eforturile capabile ale îmbinărilor.

La structurile alcătuite din platbande pultrudate din PAFS se recomandă folosirea îmbinărilor cu șuruburi întrucât acestea sunt asamblate și demontate ușor, necesită un timp redus de pregătire a pieselor, unelte simple pentru decupare și găurire, execuția rapidă, costuri reduse, precum și asigurarea posibilităților de control al calității și de reparare pe durata de exploatare a investiției.

În cadrul lucrării s-au testat optzeci de probe, corespunzătoare a patru configurații de îmbinări cu șuruburi, fără strângere inițială și cu un moment de strângere, concepția acestora fiind orientată spre obținerea unei cedări progresive prin strivirea la contactul dintre tijă și pereții găurii din platbanda compozită.

În cazul îmbinării prin suprapunere, prin aplicarea unui moment de strângere se obține creșterea efortului capabil din îmbinare, dar valoarea acestui moment se limitează pentru a evita deteriorarea locală a compozitului prin strivire sub șaibă.

Pentru obținerea modului de cedare prin strivire se impune un anumit raport între distanța marginală și diametrul găurii, evitându-se cedarea piesei la forfecare marginală.

Din studiul efectuat prin documentare și prin încercările experimentale rezultă o valoare orientativă a acestui raport egală cu 4.

Prin impunerea unei distanțe corespunzătoare marginale la capătul suprapunerii se poate evita forfecarea în lungul fibrelor, obținându-se, de asemenea cedarea prin strivire. Valorile stabilite prin experiment și prin modelare numerică se încadrează în intervalul 1,16% și 10,76%, de aceea corespondența dintre cele două seturi de valori se consideră acceptabilă.

limited so that the crushing of the composite normal to the plates plane is avoided.

The scattering of the the experimental results can be explained by the composite nature of pultruded products, that ensures high strength and stiffness in the longitudinal direction while in all other directions it is necessary to provide a reinforcing fibers in a direction perpendicular to the applied force or to provide chopped strand mats with randomly oriented short fibres.

Taking into account the marginal distance without tightening torques, the best results were obtained for joints with $e \geq 4d$. If the load capacities obtained in the above mentioned conditions are compared with the corresponding results for samples with $e = 3d$, and increase of 21% fro the test specimens with one bolt (A2), and an increase of 14% for the specimens with two and four bolts (A5, B2, B5) has been noticed.

When to the joint configuration A1 is added another bolt, an increase in the bearing resistance of the joint capacity equal to 83% (A4) is obtained.

In the B series of samples, when two bolts are added in the B1 joint configuration, an increase in the bearing resistance equal to 92% is obtained.

By applying the tightening torque equal to 10 Nm increases by 23-24% of the load capacities have resulted.

6. Conclusions

The load carrying capacity of the structures made of glass fibre reinforced polyester pultruded elements is decisively influenced by the load capacities of the joints.

The bolted connections are especially recommended to the composite structures made of GFRP pultruded shapes because of their simplicity, low cost of execution, and easy of disassembling, for inspection and repair. In addition, all assembling operations require simple tools for cutting and drilling, ensuring convenient opportunities for quality control and repair on the life span of construction.

Eighty samples corresponding to four configurations bolted joints without initial tightening, and with tightening torques have been tested; their design was conceived to obtain a progressive bearing failure at the contact between the bolt shanks and the wall hole of the composite plate.

In case of lap joints the application of the tightening torque leads to an increase of the connections load capacities, but the tightening should be limited to avoid the local deterioration of the composite by crushing under washer.

A specific ratio between the marginal distance and the hole diameter should be imposed

REFERENCES

1. N. Taranu, L. Bejan, R. Cozmanciuc and R. Hohan, Elements of composite materials, Politehniun Publishing House, Iași, 2013.
2. 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.
3. 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, New York, 2009.
4. G. Opreșan, N. Țăranu, V. Munteanu, M. Budescu, C. Cozmanciuc, R. Oltean, Improvement of concrete strength through confining with composite membranes, Romanian Journal of Materials, 2011, **41**(4), 302.
5. G. Opreșan, N. Țăranu, M. Budescu, I. Ențuc, Structural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by CFRP plate bonding, Romanian Journal of Materials, 2012, **42**(4), 387.
6. N. Țăranu, D. Banu, G. Opreșan, M. Budescu, L. Bejan, Strengthening of thin reinforced concrete slabs with composite strips, Romanian Journal of Materials, 2011, **41**(4), 302.
7. Taranu N., Banu C., Opreșan G., Budescu M., Munteanu V., Ioniță O., Tensile characteristics of glass fibre reinforced polymeric bars, Romanian Journal of Materials, 2010, **40**(4), 323.
8. P. Camanho and L. Tong, Composite joints and connections. Principles modelling and testing, Woodhead Publishing, Philadelphia, 2011.
9. A. Mossalam, Design guide for FRP composite connections, ASCE- American Society of Civil Engineers, Reston, 2011.
10. U. Khashaba, H. Sallam, A. Shorbagy, M. Seif, Effect of washer size and tightening torque on the performance of bolted joints in composite structures, Composites Structures, 2006, **73**, 310.
11. F. Sen, M. Pakdil, O. Sayman, S. Benli, Experimental failure analysis of mechanically fastened joints with clearance in composite laminates under preload, Materials and Design, 2008, **29**, 1159.
12. S. Zhou, Z. Wang, J. Zhou, X. Wu, Experimental and numerical investigation on bolted composite joint made by vacuum assisted resin injection, Composites: Part B, 2013, **45**, 1620.
13. M. Ozen, O. Sayman, Failure loads of mechanical fastened pinned and bolted composite joints with two serial holes, Composites: Part B, 2011, **42**, 264.
14. J. Yun, J. Choi, J. Kweon, A study on the strength improvement of the multi-bolted joint, Composites Structures, 2014, **108**, 409.
15. S. Popoaei, N. Țăranu, P. Ciobanu and D. Banu, Experimental program regarding the behaviour of composite materials joints, The Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, Construction. Architecture Section, 2012, **LVIII (LXII)**(4),17.
16. S. Popoaei, N. Țăranu, P. Ciobanu, and G. Opreșan, Structural response of various single lap joint connections for pultruded E-glass fibre reinforced isophthalic polymers composite plates, The Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, Construction. Architecture Section, 2013, **LIX (LXIII)**(5),111.
17. ***ASTM D5961M – 13, Standard test method for bearing response of polymer matrix composite laminates, West Conshohocken, USA.
18. ***ASTM D6873M – 08, Standard practice for bearing fatigue response of polymer matrix composite laminates, West Conshohocken, USA.
19. ***Fiberline Composites A/S, <http://www.fiberline.com>.
20. S. Popoaei, N. Țăranu, P. Ciobanu, G. Opreșan and V. Lupășteanu, Evaluation of tensile properties for pultruded glass fibre reinforced polyesters coupons, The Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, Construction. Architecture Section, 2013, **LIX (LXIII)**(4),169.
21. ***ASTM D3039M-08 Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, West Conshohocken, USA.
22. ***, SR EN ISO 4014:2011 Șuruburi cu cap hexagonal parțial filetate. Grade A și B, ASRO, www.asro.ro.
23. ***Technical Sheet: Kyowa KFRP 5-120-C1-1 and CC-33A, <https://www.kyowa-ei.co.jp/eng>.
24. Adlink Technology, User's manual USB-2401 DAQ module, 2013.
25. A. S. Mosallam, Design guide for FRP composite connections. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No.102, American Society of Civil Engineers, Reston, 2011.
26. C. N. Rosner Single bolted connection for orthotropic fibre-reinforced composite structural members, MSc Thesis, University of Manitoba, Winipeg, 1992.
27. J.T. Mottram, Friction and load transfer in bolted joints of pultruded fibre reinforced polymer section, in FRP composites in Civil Engineering – CICE 2004, ed. R. Seracino, Taylor and Francis, London, 2005.
28. H. Ahmad, A.D. Crocombe and P.A. Smith, Strength prediction in CFRP woven laminate bolted double-lap joints under quasi-static loading using XFEM, Composites: Part A, 2014, **56**, 192.
29. A. Olmedo, C. Santiuste and E. Barbero, An analytical model for the secondary bending prediction in single-lap composite bolted joints, Composite Structures, 2014, **111**, 354.
30. *** ANSYS Academic Research Release 12.0, Help system, ANSYS INC, 2014.
31. P. Mihai, N. Țăranu, G. Opreșan, S. Popoaei and I.S. Entuc, Structural response of composite pultruded elements subjected to shear, The Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, Construction. Architecture Section, 2013, **LIX (LXIII)**(6), 65.
32. G. Opreșan, N. Țăranu, P. Mihai, S. Popoaei and I.S. Entuc, Stiffness properties along principal material axes of FRP pultruded plate elements, The Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, Construction. Architecture Section, 2013, **LIX (LXIII)**(6), 55.
