



**Universitatea *Transilvania* din Braşov**

## **TEZĂ DE ABILITARE**

**Titlu: MODELAREA, TESTAREA ŞI OPTIMIZAREA  
STRUCTURILOR DIN MATERIALE COMPOZITE  
RANFORSATE CU ȚESĂTURI ŞI FIBRE NATURALE**

**Domeniul: Inginerie Mecanică**

**Autor: Conf.dr.ing. Camelia CERBU**

**Universitatea *Transilvania* din Braşov**

**BRAŞOV, 2015**

## CUPRINS

CUPRINS .....	1
Lista de notații și simboluri .....	5
(A) Summary .....	7
(B) Realizări științifice și profesionale și planuri de evoluție și dezvoltare a carierei .....	9
(B-i) Realizări științifice și profesionale .....	9
Introducere .....	9
1. MODELAREA, TESTAREA ȘI OPTIMIZAREA STRUCTURILOR DIN MATERIALE COMPOZITE RANFORSATE CU ȚESĂTURI DIN FIBRE DE IN .....	15
1.1. Generalități privind materialele compozite ranforsate cu fibre naturale .....	15
1.2. Materiale testate și metoda de lucru .....	20
1.2.1. Structura materialului compozit testat.....	20
1.2.2. Testarea mecanică .....	23
1.3. Abordări teoretice .....	24
1.3.1. Teoria de grindă din material compozit stratificat .....	24
1.3.2. Cazuri particulare .....	30
1.3.3. Analiza cu metoda elementelor finite.....	34
1.4. Rezultate și discuții.....	37
1.4.1. Rezultate experimentale .....	37
1.4.2. Rezultate obținute cu modelul analitic .....	44
1.4.3. Rezultate obținute prin modelarea cu elemente finite .....	46
1.5. Comparația rezultatelor .....	57
1.5.1. Comparația între rezultatele obținute cu modelul analitic și cele obținute cu FEA	57
1.5.2. Comparația între rezultatele experimentale și cele obținute cu modelul analitic....	62
1.5.3. Comparația între rezultatele experimentale și cele obținute cu modelul FEA.....	63

1.6. Concluzii.....	65
2. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND COMPORTAREA MECANICĂ A MATERIALELOR COMPOZITE RANFORSATE CU ȚESĂTURI DIN STICLĂ ȘI FIBRE DE LEMN.....	71
2.1. Generalități privind materialele compozite pe bază de fibre de lemn .....	71
2.2. Cercetări privind efectul tipului de fibre de lemn asupra comportării mecanice a materialelor compozite .....	76
2.2.1. Materiale testate și metoda de lucru .....	76
2.2.2. Rezultate privind încercarea la încovoiere. Discuții. ....	77
2.2.3. Concluzii .....	80
2.3. Efectul tipului fibrelor de lemn asupra comportării mecanice după imersiune în apă a materialelor compozite ranforsate cu țesătură de sticlă și făină de lemn .....	80
2.3.1. Materialele testate și metoda de lucru .....	80
2.3.2. Rezultate și discuții .....	82
2.4. Comportarea mecanică în timp a materialului compozit de tip sticlă-E / făină de lemn de brad / epoxi sub acțiunea umidității.....	87
2.4.1. Materiale testate. Metoda de lucru .....	88
2.4.2. Rezultate și discuții .....	94
2.5. Concluzii.....	102
3. EFECTUL TIPULUI DE FIBRE DE LEMN ASUPRA COEFICIENTULUI DE CONTRACȚIE TRANSVERSALĂ ÎN CAZUL MATERIALELOR COMPOZITE HIBRIDE DE TIPUL STICLĂ-E / FĂINĂ DE LEMN / EPOXI.....	108
3.1. Introducere.....	108
3.2. Materiale și metoda experimentală.....	110
3.2.1. Materiale.....	110
3.2.2. Metoda de lucru.....	112
3.2.3. Aproximarea datelor experimentale .....	116
3.3. Rezultate și discuții.....	117
3.4. Concluzii.....	120

4. CERCETĂRI PRIVIND STĂRILE DE TENSIUNI ȘI DEFORMAȚII ÎN CAZUL COMPONENTEI ȘEZUT-SPĂTAR DE SCAUN FABRICATĂ DIN MATERIAL COMPOZIT STICLĂ / FĂINĂ DE LEMN / EPOXI .....	123
4.1. Caracterizarea mecanică a materialului compozit hibrid definit în modelarea numerică	126
4.1.1. Caracteristici de tracțiune .....	127
4.1.2. Coeficientul de contracție transversală $\nu_{12}$ în planul de ranforsare 12.....	129
4.1.3. Caracteristici de încovoiere .....	129
4.1.4. Degradarea caracteristicilor mecanice din cauza absorbției de umiditate.....	130
4.2. Cercetările teoretice privind stările de tensiuni și deformații în cazul componentei de șezut-spătar din material compozit sticlă-E / făină de lemn de brad / epoxi <i>Epolam 2015</i> ....	131
4.2.1. Aspecte privind analiza cu elemente finite a structurilor din materiale compozite stratificate .....	131
4.2.2. Analiza teoretică a stărilor de tensiuni și deformații din componenta fabricată din material compozit de tipul țesătură de sticlă / făină de lemn de brad / rășină epoxi, din structura scaunului.....	135
4.3. Cercetările experimentale privind stările de deformații în cazul componentei de șezut-spătar din material compozit sticlă-E / făină de lemn de brad / epoxi <i>Epolam 2015</i> .....	142
4.3.1. Metoda tensometrică electrică rezistivă .....	143
4.3.2. Măsurarea deformațiilor specifice prin metoda tensometrică electrică rezistivă..	146
4.4. Comparația dintre rezultatele teoretice și cele experimentale .....	151
4.5. Aplicarea rezultatelor experimentale referitoare la degradarea proprietăților mecanice ale materialului compozit hibrid, la modelul de piesă .....	154
4.6. Concluzii.....	155
5. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ȘTIINȚIFICE ORIGINALE.....	157
(B-ii) Planuri de evoluție și dezvoltare a carierei .....	159
1. Elemente de succes în cariera profesională.....	159
1.1. Studii.....	159
1.2. Experiența profesională și didactică .....	160
1.3. Elemente definitorii ale activității de cercetare în domeniul tezei de abilitare .....	163

1.3.1.	Teza de doctorat .....	163
1.3.2.	Monografiile relevante pentru domeniul tezei de abilitare: .....	164
1.3.3.	Contracte de cercetare în domeniul temei abordate în prezenta teză de abilitare .	165
1.3.4.	Cerere brevet de invenție.....	166
1.3.5.	Cărți relevante .....	166
1.3.6.	Articole publicate în reviste cotate ISI sau în reviste / volume indexate BDI.....	167
1.4.	Autonomia și vizibilitatea activității științifice .....	167
1.4.1.	Publicații ca autor principal (Fișa pentru verificarea standardelor minimale) .....	167
1.4.2.	Granturi academice în calitate de coordonator de proiect.....	167
1.4.3.	Prezentări orale la conferințe internaționale din străinătate și din țară, dintre care se menționează:.....	168
1.4.4.	Numărul total de citări obținute pentru articolele publicate - 48 citări conform table 170	
1.4.5.	Prelegeri la universități de prestigiu:.....	171
1.4.6.	Burse obținute .....	171
1.4.7.	Prezentarea cărților publicate ca autor principal în reviste indexate BDI.....	171
1.4.8.	Referent științific și membru în Comisii de evaluare.....	171
2.	Planuri de dezvoltare a carierei .....	172
2.1.	Planuri de dezvoltare a activității didactice.....	172
2.2.	Planuri de dezvoltare a activității de cercetare științifică.....	173
2.3.	Concluzii.....	175
	Bibliografie.....	177

## Lista de notații și simboluri

Simbol	U.M.	Mărimea
$[A]$	$\left(\frac{N}{mm}\right)$	- matricea de rigiditate în plan a elementului de placă din material compozit stratificat;
$\alpha_{1,2}$	(°)	- direcțiile principale de deformație;
$\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c$	(°)	- direcțiile în care se măsoară deformațiile specifice, cu marca tensometrică de tip rozetă;
$[B]$	(N)	- matricea de cuplare încovoiere-întindere a elementului de placă din material compozit stratificat;
$[D]$	(N·mm)	- matricea de rigiditate la încovoiere a elementului de placă din material compozit stratificat / matricea de rigiditate;
$[\delta]$	$(N^{-1}\cdot mm^{-1})$	- inversa matricei $[D]$ ;
$\delta_{ij}$	$(N^{-1}\cdot mm^{-1})$	- termenii matricei $\delta$ ;
$E_1, E_2$	(MPa)	- modulele de elasticitate longitudinale corespunzătoare materialului compozit, în raport cu axele 1 și respectiv, 2 ale sistemului de coordonate de material (sistem local) aliniat cu direcțiile de ranforsare cu fibre;
$E_x, E_y$	(MPa)	- modulele de elasticitate longitudinale echivalente ale materialului ortotrop fictiv, echivalent cu materialul compozit, în raport cu direcțiile axelor sistemului de coordonate $xOy$ ;
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	-	- deformațiile specifice principale care corespund direcțiilor principale de deformație notate cu $\alpha_{1,2}$ ;
$\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$	-	- deformațiile specifice liniare măsurate în cele trei direcții notate cu $a, b, c$ ale mărcii tensometrice de tip rozetă;
$\varepsilon_l$	-	- deformația specifică în direcția longitudinală a epruvetei solicitată la tracțiune (în direcția forței de tracțiune);
$\varepsilon_t$	-	- deformația specifică în direcția transversală a epruvetei solicitată la tracțiune (în direcția perpendiculară pe forța de tracțiune);
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	-	- deformațiile specifice în direcțiile axelor $Ox, Oy$ și respectiv, $Oz$ ;
$\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \gamma_{xy}\}^T$	-	- vectorul deformațiilor corespunzător unui punct oarecare dintr-o placă;
$F$	(N)	- forța concentrată;
$G_{xy}$	(MPa)	- modulul de elasticitate transversal echivalent al materialului ortotrop fictiv, echivalent cu materialul compozit, în raport cu direcțiile axelor sistemului de coordonate $xOy$ ;
$I$	(mm <sup>4</sup> )	- momentul de inerție axial;
$k$	-	- constanta traductorului electric rezistiv;
$K$	(kJ/m <sup>2</sup> )	- rezistența la impact sau reziliența;
$k_a, k_b, k_c$	-	- constantele predefinite (din fabricație) ale mărcii tensometrice de tip rozetă, corespunzătoare celor trei rezistențe notate cu $a, b$ și respectiv, $c$ ;

$\kappa_x^0, \kappa_y^0, \kappa_{xy}^0$	$(mm^{-1})$	- curburile de la nivelul suprafeței mediane a elementului de placă stratificată din material compozit, solicitată la încovoiere;
$\{\kappa\}^T = \{\kappa_x^0, \kappa_y^0, \kappa_{xy}^0\}^T$	$(mm^{-1})$	- vectorul curburilor corespunzător punctului situat în suprafața mediană a plăcii din material compozit;
$l$	$(mm)$	- distanța între reazeme în cazul epruvetei solicitate la încovoiere;
$(M_x, M_y)$	$\left(\frac{N \cdot mm}{mm}\right)$	- momentele de încovoiere pe unitatea de lungime, care se dezvoltă la nivelul suprafeței mediane a elementului de placă din material compozit, având dimensiuni unitare;
$M_{xy}$	$\left(\frac{N \cdot mm}{mm}\right)$	- momentul de torsiune pe unitatea de lungime, care se dezvoltă la nivelul suprafeței mediane a elementului de placă din material compozit, având dimensiuni unitare;
$N_x, N_y, N_{xy}$	$\left(\frac{N}{mm}\right)$	- forțele pe unitatea de lungime, care se dezvoltă la nivelul suprafeței mediane a elementului de placă din material compozit, având dimensiuni unitare;
$\nu_{12}$	-	- coeficientul de contracție transversală (coeficientul lui <i>Poisson</i> ) în planul 12 de ranforsare al materialului compozit;
$\nu_{23}, \nu_{13}$	-	- coeficienții de cotracție transversală interlaminară (coeficienții lui <i>Poisson</i> ) din planele 23 și respectiv, 13 care sunt perpendiculare pe planul de ranforsare al materialului compozit;
$\nu_{xy}$	-	- coeficientul de contracție transversală (coeficientul lui <i>Poisson</i> ) în planul $xy$ al sistemului de coordonate global;
$p$	$(N/mm)$	- forța uniform distribuită pe unitatea de lungime;
$[Q]_k$	$(MPa)$	- matricea modul de elasticitate generalizată redusă a stratului din material compozit, în raport cu sistemul de coordonate local notat cu 123 (sistemul de coordonate de material);
$[\bar{Q}]_k$	$(MPa)$	- matricea modul de elasticitate generalizată redusă transformată corespunzătoare stratului $k$ al plăcii din material compozit stratificat, în raport cu sistemul de coordonate global $Oxyz$ ;
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	$(MPa)$	- tensiunile normale care se dezvoltă într-un punct oarecare al unui corp solicitat mecanic, în direcțiile axelor $Ox, Oy$ și respectiv, $Oz$ ;
$\{\sigma\}^T = \{\sigma_x \quad \sigma_y \quad \tau_{xy}\}^T$	$(MPa)$	- vectorul tensiunilor care se dezvoltă în planul $xOy$ ;
$t$	$(ore)$	- durata de imersiune în apă;
$u$	$(mm)$	- deplasarea în direcția axei $Ox$ ;
$U$	$(J)$	- energia de deformație;
$U_i$	$(V)$	- tensiunea de alimentare a mărcii tensometrice;
$v$	$(mm)$	- deplasarea în direcția axei $Oy$ ;
$w$	$(mm)$	- deplasarea în direcția axei $Oz$ ;
$z$	$(mm)$	- coordonata pe axa $Oz$ a punctului oarecare din grosimea plăcii din material compozit stratificat.

## (A) Summary

The habilitation thesis approaches a research theme in the *mechanical engineering* field, which refers to the modeling, simulation, testing and optimization of the parts and structures made of hybrid composite materials reinforced both with glass woven fabrics and with natural fibers (flax woven fabrics, wood flour). One presents the results of the researches conducted after obtaining of the scientific title of *doctor (PhD)*, in the field of the *mechanical engineering* (June, 2006).

The reasons for choosing of the theme are based on: requirements imposed by the economic environment related to the design of innovative lightweight structures, with minimum costs of manufacturing, which corresponds to the applications both in terms of the mechanical strength and in terms of durability under the action of the environmental factors (humidity, temperature variations, UV, etc.); necessity of the using of the natural fibers, especially those that are easily renewable (flax, jute, hemp, etc.), as sustainable source of raw materials for reinforcement of the composites; ecological requirements related to the use of recyclable waste (e.g. wood waste).

In *chapter 1*, one presents both the theoretical results (obtained with analytical model and with finite element analysis) and the experimental results (obtained by tensile testing and bending testing) concerning the mechanical behavior, in case of three kinds of composite materials based on epoxy resin, differently reinforced: one composite material reinforced only with flax woven fabric; two hybrid composites reinforced both with glass woven fabric and with flax woven fabric that are different by layouts of the layers. Finally, one comparatively presents the results and one establishes the optimal structure of the hybrid composite of type glass / flax / epoxy.

In *chapter 2*, one presents the experimental researches concerning the mechanical behavior of the hybrid composite materials reinforced both with glass fabric and with wood flour, researches that are gradually approached to finding an optimal structure both in terms of the mechanical properties and in terms of durability under the action of the effects of water absorbed after 6572 hours of immersion. It was analyzed the effects of the wood fiber type (different species), the effects of the glass fabric type, the effects of the immersion environment and of the immersion time on the mechanical characteristics. The causes of the degradation of the mechanical characteristics are justified by data related to the water absorption and by analysis of the material structure with digital microscope: micro-cracks at the interface between glass fibers and epoxy resin; oxidation of the resin; degradation of the wood fibers. The results were compared with the results obtained by other researchers in the case of composites based on wood chips, hot pressed.

The experimental researches presented in *chapter 3*, were imposed as a necessity in terms of



knowledge of the transverse contraction coefficient  $\nu_{12}$  (*Poisson's ratio*) within the reinforcing plane 12, in the purpose of the accurately modeling of the material in case of the structures made of composite materials. The effects of the reinforcing with wood fibers on *Poisson's ratio*  $\nu_{12}$ , are presented. Four kinds of composite materials were tested: one reinforced only with oak wood flour; one reinforced only with glass fabric; two hybrid composite materials reinforced both with glass woven fabric and with oak wood flour or fir wood flour, respectively. In order to concurrently determine both the longitudinal strain  $\varepsilon_x$  in the direction of the tensile force and the transverse strain  $\varepsilon_y$ , it was combined the tensile testing and the method of digital image correlation by using the *Aramis 2M* (Polytechnic University of Bucharest) for the acquisition and for the post-processing of the images. The experimental data  $(\varepsilon_x, \varepsilon_y)$  were approximated by linear regression and the slope of the linear function represents *Poisson's ratio*  $\nu_{12}$ . It was proved that the reinforcing with wood leads to the increasing of *Poisson's ratio*  $\nu_{12}$ .

In the chapter 4, one presents the theoretical and experimental researches concerning the stress and strain states developed in the chair seat-backrest component made of composite material of the glass / fir wood flour / epoxy type that is analyzed in chapters 2 and 3.

The research results presented in *chapter 1* are obtained in recent years (2014-2015) and these were published in the journal *Advances in Mechanical Engineering* (*SAGE Journals*, SRI: 0.787 / 2014) and *Procedia Technology* (*Elsevier*). Part of the research results presented in *chapters 2...4* constituted the research objectives of the grants which the author of the present habilitation thesis, had coordinated as project manager since 2007 and these results were published in 10 papers indexed ISI (5 papers in ISI quoted journals) and 16 papers indexed in BDI. Referring to the career development plans, it was proposed projects that are in evaluation process, in order to attract funds, which continue the research themes approached in the present habilitation thesis and extend the research methodology for other types of structures made of sandwich composite materials reinforced with natural fibers. The results will be disseminated in: ISI quoted papers and ISI / BDI indexed papers. In terms of didactic activities, it aims regular updating of the courses, with results of own researches. Professional development plan is sustainable considering the competences and abilities proved by: coordinating of three (3) research grants gained through national competition, as director; collaborating as a team member in 11 contracts; one (1) patent application; 13 ISI indexed papers; 20 papers indexed in international databases (BDI); publication of two monographies (1-single author, 1 -coautor); 4 course supports as main author.

## **(B) Realizări științifice și profesionale și planuri de evoluție și dezvoltare a carierei**

### **(B-i) Realizări științifice și profesionale**

#### **Introducere**

Teza de abilitare prezintă realizările științifice și profesionale ale autoarei în perioada 2005-2015, după finalizarea tezei de doctorat. Pe parcursul ultimilor zece ani, autoarea tezei de abilitare și-a continuat cercetările în același domeniu de cercetare ca cel abordat pe parcursul elaborării Tezei de doctorat intitulată “*Cercetări privind optimizarea structurală a unor piese din materiale compozite solificate mecanic în condiții de mediu agresiv*” elaborată sub coordonarea științifică a d-lui *prof.dr.ing.dr.h.c.* Ioan Curtu, susținută public la *Universitatea Transilvania din Brașov* în decembrie 2005. Autoarea prezentei teze de abilitare a primit *titlul științific de doctor* în domeniul *Inginerie Mecanică* (domeniul fundamental *Științe Inginerești*), cu diploma de doctor, în iunie 2006.

Realizările științifice și profesionale ale autoarei prezentei teze de abilitare, se încadrează în domeniul *Ingineriei Mecanice*, în direcția mecanicii materialelor compozite care este un domeniu de cercetare vast, modern și de mare actualitate, atingând subiecte legate de: testarea mecanică a materialelor și structurilor din materiale compozite; analiza stărilor de tensiuni și deformații din structuri fabricate din materiale compozite ranforsate hibrid cu țesături din fibre textile vegetale (fibre de in) și țesături din fibre de sticlă; cercetările privind efectele factorilor interni (tipul fibrelor de ranforsare, tipul rășinii) și externi (absorbția de apă, durata de imersiune) asupra comportării mecanice a materialelor compozite stratificate pe bază de rășină epoxi ranforsată atât cu țesătură de sticlă cât și cu făină de lemn; cercetările privind efectele ranforsării suplimentare cu făină de lemn și efectele tipului de fibre de lemn asupra coeficientului de contracție transversală  $\nu_{12}$  (coeficientul lui *Poisson*) în planul de ranforsare.

Motivația alegerii temelor de cercetare menționate mai sus, referitoare la testarea, modelarea și simularea comportării mecanice a structurilor din materiale compozite ranforsate cu fibre naturale (făină de lemn sau fibre textile vegetale cum sunt fibrele de in), se datorează:

- tendințelor actuale manifestate în toate domeniile industriale (industria aero-spațială, industria autovehiculelor, industria construcțiilor, industria mobilei etc.), de a găsi soluții

de utilizare a surselor naturale de materii prime ieftine și ușor regenerabile (fibre textile vegetale, deșeuri agricole);

- nevoia de utilizare ca sursă de materie primă pentru fabricarea materialelor compozite, a materialelor reciclabile cum sunt deșeurile din lemn rezultate din industria de procesare a lemnului și nu numai, lemnul fiind o sursă naturală în general, greu regenerabilă;
- nevoia de optimizare a structurilor din materiale compozite ranforsate hibrid cu țesături din fibre de sticlă și cu țesături din fibre naturale, în ceea ce privește modul de dispunere sau alternare a straturilor ranforsate cu materiale diferite, în scopul îmbunătățirii caracteristicilor mecanice;
- necesitatea estimării duratei de viață a materialelor compozite prin cercetări legate de: efectele condițiilor de mediu (umiditate, temperatură, cicluri termice, raze ultra-violete) care sunt în funcție de aplicația pentru care se utilizează materialul compozit, asupra proprietăților elastice și mecanice; modul de variație a proprietăților (în general, degradare) după menținere pe termen mai lung în astfel de medii (de exemplu, prin imersiune în apă timp de nouă luni sau până la saturație);
- necesitatea explicării mecanismelor de degradare a materialului compozit (absorbție de apă, umflarea fibrelor naturale, oxidarea rășinii, fisuri la interfața fibre-matrice, legături chimice între moleculele de apă și structura celulozică a fibrelor naturale etc.) care cauzează reducerea proprietăților mecanice (rezistența la tracțiune sau la încovoiere) și a proprietăților elastice (modul de elasticitate  $E$  la tracțiune / încovoiere), în cazul materialelor compozite ranforsate hibrid cu țesături de sticlă și făină de lemn cu aplicații în industria construcțiilor (panouri de izolare termică sau fonică), în industria mobilei (componente de mobilier inclusiv pentru mobilier de grădină sau terase);
- necesitatea de modelare și simulare a comportării mecanice a structurilor din materiale compozite ranforsate hibrid cu țesături de sticlă și cu fibre naturale;
- necesitatea testării experimentale a structurilor din materiale compozite în scopul validării modelelor teoretice (modele analitice sau modele cu elemente finite) prin comparația dintre rezultatele teoretice și cele obținute experimental.

Fibrele naturale utilizate pentru fabricarea materialelor compozite reprezintă surse regenerabile de materii prime. Pe lângă acest avantaj major, fibrele naturale prezintă încă două avantaje în comparație cu materialele clasice utilizate pentru ranforsare (fibrele de sticlă, de carbon, de aramidă etc.): sunt mai ieftine datorită costurilor reduse în ceea ce privește tehnologia de fabricație a firelor și țesăturilor din fibre vegetale; sunt mai ușoare (au densitatea mai mică) (Barbu, 1999; Cerbu, 2015).

Se menționează faptul că toate lucrările publicate în literatura de specialitate de către autoarea prezentei teze de abilitare, se referă la încercări mecanice, modelări și simulări ale comportării mecanice în cazul structurilor mecanice sau a epruvetelor fabricate din materiale izotrope, anizotrope sau materiale compozite.

Realizările științifice și profesionale, precum și autonomia și vizibilitatea autoarei prezentei teze de abilitare, în domeniul *Ingineriei Mecanice*, în direcțiile de cercetare specifice mecanicii materialelor compozite și a structurilor din materiale compozite (prin modelarea, simularea și testarea acestora), sunt cuantificabile prin:

- *teza de doctorat finalizată în 2005 în domeniul Ingineriei Mecanice*, al cărui titlu a fost menționat la începutul secțiunii “*Introducere*”;
- *trei (3) granturi de cercetare câștigate prin competiție națională, pe care le-a coordonat în calitate de director*, având teme din domeniul mecanicii structurilor din materiale compozite;
- **13 lucrări indexate ISI** (Web of Science) din care **6 lucrări publicate în reviste ISI**;
- **20 lucrări indexate BDI** (indexate Scopus, EBSCO, Elsevier - sciencedirect, Index Copernicus, DOAJ, ULRICHSWEB, SCIPPIO, Academic Keys, Google Scholar, *fără cele indexate ISI Web of Science*);
- **62 lucrări publicate în volumele conferințelor din care: 49** sunt conferințe internaționale; **13** sunt conferințe naționale;
- **numărul total de 48 citări ale articolele publicate de autoarea prezentei teze de abilitare**, în reviste de specialitate cotate ISI sau în reviste / volume indexate ISI / BDI, din care: **16 citări în Reviste ISI cu factor de impact**, **7 citări în publicații ISI fără factor de impact** (**3** citări în reviste ISI, **4** citări în Proceeding-uri ISI), **25 citări în publicații indexate BDI** (**20** citări în reviste BDI; **5** citări în Proceeding-uri BDI);
- publicarea unei (**1**) *cereri de brevet de invenție în BOPI* 10/30.10.2012;
- *două (2) monografii de specialitate publicate în edituri naționale acreditate CNCISIS*: o (**1**) monografie prim-autor în domeniul efectului mediului agresiv asupra comportării mecanice a structurilor din materiale compozite; o (**1**) monografie în colaborare (a doua autoare) în domeniul metodei elementelor finite;
- *patru (4) cărți de specialitate de tip suporturi de curs în format tipărit sau electronic, ca singură autoare* (2 cărți din care 1 carte este pentru IFR – învățământ cu frecvență redusă) *sau ca prim-autor* (2 cărți), *publicate în edituri acreditate CNCISIS*, având următoarele tematici: rezistența materialelor (teorie și aplicații) scrisă în limba engleză; modelarea structurilor mecanice; noțiuni fundamentale despre materiale compozite; mecanica și

- rezistența materialelor compozite;
- **două (2) capitole în cărți publicate în edituri din străinătate:** 1 capitol ca singură autoare, publicat în carte tipărită și cu accesare directă pe internet (open-access) în *Editura SCIYO*, în domeniul materialelor compozite ranforsate cu țesături; 1 capitol realizat în colaborare, publicat în carte publicată în *Editura Cambridge Scholars*, în domeniul testării dinamice a materialelor compozite;
  - **șapte (7) cărți de specialitate de tip suporturi de curs în format tipărit sau electronic, în colaborare (nu prim-autor), publicate în edituri acreditate CNCSIS**, cu teme din rezistența materialelor.

Realizările din activitățile de cercetare, activitățile didactice precum și cele profesionale, prezentate mai sus, au condus la îndeplinirea criteriilor corespunzătoare standardelor minime pentru susținerea tezei de abilitare stabilite de CNATCU pentru *Comisia de specialitate “Inginerie mecanică, mecatronică și robotică” (Fișa pentru verificarea standardelor minime)*:

- **criteriul CDI “Activitate de cercetare științifică, dezvoltare tehnologică și inovare” - 44,247 puncte realizate** (minim de îndeplinit – 10 puncte) din care **27,887 puncte din criteriul CDI-ART** (minim de îndeplinit – 6 puncte);
- **criteriul DID “Activitate didactică și profesională” - 26,24 puncte realizate** (minim de îndeplinit – 10 puncte);
- **criteriul RIA “Recunoaștere și impactul activității” - 18,637 puncte realizate** (minim de îndeplinit – 10 puncte) din care **9,381 puncte în calitate de director de granturi de cercetare** (minim de îndeplinit – 6 puncte).

În continuare, se prezintă pe scurt, cele patru capitole ale prezentei teze de abilitare.

În *Capitolul 1* cu titlul “*Modelarea, testarea și optimizarea materialelor compozite ranforsate cu țesături din fibre de in*” se prezintă comparativ rezultatele cercetărilor teoretice (modelare analitică și analiză cu elemente finite) și rezultatele obținute prin încercări mecanice (încovoiere, tracțiune) în cazul a trei materiale compozite: un material compozit format din opt straturi din rășină epoxi ranforsată cu țesătură de in; două materiale compozite hibride (patru straturi ranforsate cu țesătură de in și patru straturi ranforsate cu țesătură de sticlă) care diferă prin poziția straturilor. Cercetările au ca scop: analiza comparativă a caracteristicilor mecanice ale celor trei tipuri de materiale compozite; comparația dintre proprietățile mecanice determinate pe direcțiile bătăturii și respectiv, a urzelii corespunzătoare țesăturii de in utilizate pentru ranforsare; validarea modelelor teoretice prin compararea cu rezultatele experimentale; optimizarea materialului compozit hibrid din punctul de vedere al poziționării straturilor cu ranforsare diferită, în vederea îmbunătățirii proprietăților elastice (modulul de elasticitate echivalent  $E_x$ ).

În *Capitolul 2* intitulat “*Cercetări experimentale privind comportarea mecanică a materialelor compozite ranforsate cu țesături din sticlă și fibre de lemn*”, autoarea tezei de abilitare se concentrează mai întâi, asupra cercetărilor referitoare la: efectele tipului de fibre de lemn asupra comportării mecanice a materialelor compozite ranforsate cu fibre de lemn; efectele tipului fibrelor de lemn asupra comportării mecanice după imersiune în apă a materialelor compozite ranforsate hibrid cu țesătură de sticlă și făină de lemn. Apoi, se menționează observațiile care au condus la identificare unei soluții de material compozit hibrid de tipul sticlă / făină de lemn / rășină îmbunătățită în ceea ce privește țesătura de sticlă utilizată pentru ranforsare, tipul de fibre de lemn și tipul de rășină pentru aplicații în mediu umed.

Tot în cadrul *capitolului 2* se analizează variația proprietăților mecanice de încovoiere (tensiunea maximă  $\sigma_{\max}$  și modulul de elasticitate  $E$ ) și a proprietăților de impact prin testul *Charpy* (energia de rupere  $U$  și rezistența la impact sau reziliența  $K$ ), în funcție de durata  $t$  de imersiune în apă, în cazul materialului compozit de tipul sticlă-E / făină de lemn de brad / epoxi. Datele obținute experimental se aproximează cu funcții polinomiale și se determină legile de variație a proprietăților mecanice în funcție de durata  $t$  de imersiune în apă. Se explică mecanismele de degradare a materialului compozit hibrid de tipul sticlă-E / făină de lemn de brad / epoxi din cauza absorbției de umiditate: umflarea fibrelor naturale, oxidarea rășinii, fisuri la interfața fibre-matrice, legături chimice între moleculele de apă și structura celulozică a fibrelor natural etc. La rândul ei, degradarea materialului este cauza reducerii proprietăților mecanice.

În *Capitolul 3*, intitulat “*Efectul tipului de fibre de lemn asupra coeficientului de contracție transversală în cazul materialelor compozite hibride de tipul sticlă-E / făină de lemn / epoxi*”, se prezintă rezultatele cercetărilor experimentale efectuate în vederea determinării efectelor tipului de fibre de lemn asupra coeficientului coeficientul lui *Poisson*  $\nu_{12}$  în planul de ranforsare, în cazul materialelor compozite hibride ranforsate atât cu țesături de sticlă-E cât și cu făină de lemn. S-au testat patru tipuri de materiale compozite: un material compozit ranforsat doar cu țesătură de sticlă; un material compozit ranforsat doar cu făină de lemn de stejar; două materiale compozite hibride ranforsate atât cu țesătură de sticlă cât și cu făină de lemn de stejar și respectiv, de brad. În scopul determinării coeficientului de contracție transversală  $\nu_{12}$ , s-a determinat variația deformației specifice transversale  $\varepsilon_t$  în funcție de deformația specifică longitudinală  $\varepsilon_l$  prin combinarea încercării de tracțiune cu metoda corelării digitale a imaginilor.

În *Capitolul 4* se prezintă cercetările efectuate de către autoarea prezentei teze de abilitare, privind stările de tensiuni și deformații în cazul componentei de șezut-spătar pentru scaun,

fabricată din material compozit hibrid de tipul sticlă-E / făină de lemn de brad / epoxi. Rezultatele teoretice s-au obținut prin analiza cu elemente finite a modelului de scaun utilizând trei scheme de încărcare. În cercetările experimentale s-a utilizat metoda tensometrică electrică rezistivă pentru determinarea deformațiilor specifice în diferite puncte ale componentei șezut-spătar fabricată din materialul compozit hibrid. S-au utilizat traductoare electrice rezistive de tip rozetă 0/45/90 recomandate pentru structuri din materiale compozite, cu care s-au determinat deformațiile specifice pe cele trei direcții corespunzătoare (Hoffman, 1989). Validarea modelului teoretic s-a făcut prin comparația rezultatelor teoretice referitoare la deformațiile specifice cu cele determinate experimental. Apoi, datele experimentale referitoare la reducerea modulului de elasticitate  $E$  după imersiune timp de 6572 ore în apă, se utilizează pentru a analiza efectele absorbției de apă asupra stării de deformație din componenta de șezut-spătar a scaunului analizat. În final, se prezintă concluziile finale referitoare la temele de cercetare abordate în cadrul tezei de abilitare și se evidențiază contribuțiile originale ale autoarei.

# Cap. 1

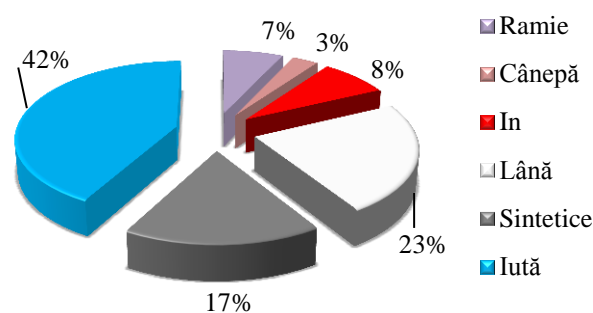
## 1. MODELAREA, TESTAREA ȘI OPTIMIZAREA STRUCTURILOR DIN MATERIALE COMPOZITE RANFORSATE CU ȚESĂTURI DIN FIBRE DE IN

### 1.1. Generalități privind materialele compozite ranforsate cu fibre naturale

În domeniul materialelor compozite, se utilizează mai multe tipuri de fibre naturale de proveniență vegetală: așchii de lemn, fibre textile vegetale (in, iută, cânepă, bumbac, ramie, kenaf etc.), deșeuri agricole (coji de semințe, sâmburi, reziduri de la ciorchinii de struguri, coceni de porumb etc.) (Müssig și Haag, 2015; Dhakal și Zhang, 2015; Khan *et al.*, 2015; Klyosov, 2007; Barbu, 1999; Coșereanu, 2015; Papanicolaou, 2012).

Inul este una din cele mai vechi plante cultivată încă din antichitate, cu scopul utilizării fibrelor de in pentru confecționarea obiectelor de îmbrăcăminte. În ceea ce privește utilizarea fibrelor de in ca inserții în alte materiale, la piramida *Dahshur* situată la 40 km de Cairo, s-au descoperit fire de in în cărămizile utilizate pentru construcția piramidei (Müssig și Haag, 2015).

Primele materiale compozite cu fibre textile vegetale (in, iută, cânepă, ramie etc.) au fost panourile din așchii de lemn presate la cald, care conțineau inserții textile în scopul îmbunătățirii proprietăților mecanice. În cazul utilizării inserțiilor textile din in, în funcție de numărul rețelelor de in utilizate, rezistența la încovoiere crește până la 50% iar modulul de elasticitate  $E$  la încovoiere crește cu 18÷50% (Barbu, 1999).



**Fig. 1.1.** Producția mondială de fibre textile (Barbu, 1999)

În figura 1.1 se prezintă câteva date statistice referitoare la producția mondială de fibre textile (Barbu, 1999). Fibrele de iută dețin supremația (42%), urmate de fibrele de in (8%) în ceea ce privește proporția din producția totală la nivel mondial, de fibre textile (Barbu, 1999).



Statisticile ultimilor ani arată că s-au recoltat la nivel mondial, 4.275.049 *ha* de culturi de in în perioada 2001-2011 (Müssig și Haag, 2015). Franța și Belarus dețin fiecare câte 26% din totalul suprafețelor cu culturi de in care au fost recoltate în 2011, în timp ce Federația Rusă și China dețin 20% și respectiv 14% din totalul suprafețelor cultivate (Müssig și Haag, 2015).

Literatura de specialitate arată preocupări continue ale cercetătorilor pentru fabricarea materialelor compozite pe bază de rășini ranforsate cu fibre naturale: in, cânepă, iută, fibre de lemn (Müssig și Haag, 2015; Dhakal și Zhang, 2015; Shahzad, 2012; Müssig, 2010; Carus, 2011; Klyosov, 2007). În primă fază, creșterea interesului pentru utilizarea fibrelor textile vegetale (in cânepă, iută etc.) ca material de ranforsare, s-a datorat dorinței de a “înlocui parțial lemnul care este o sursă de materie primă valoroasă și limitată”, cu materiale ușor regenerabile, în panourile din așchii de lemn (Barbu, 1999).

**Tabelul 1.1.**

Valorile densităților fibrelor naturale uzuale și cele corespunzătoare fibrelor clasice utilizate pentru ranforsarea materialelor compozite

Tipul fibrelor	Densitate $\rho$ ( $kg/dm^3$ )	Referințe bibliografice
Fibre de in	1,4-1,52	(Müssig și Haag, 2015; Müssig, 2010)
Fibre de cânepă	1,4-1,6	(Dhakal și Zhang, 2015)
Fibre de iută	1,3-1,5	(Müssig și Haag, 2015; Müssig, 2010)
Fibre de bumbac	1,5-1,6	(Müssig și Haag, 2015; Müssig, 2010)
Fibre de sticlă	2,16-2,54	(Alămoreanu și Chiriță, 1997)
Fibre de carbon	1,74-1,96	(Alămoreanu și Chiriță, 1997; Soler, 2014)
Fibre de Kevlar	1,45-1,47	(Soler, 2014)
Fibre de bor	2,7	(Soler, 2014)
Fibre de bananier	1,35	(Dhakal și Zhang, 2015)
Lemn		(Curtu și Ghelmeziu, 1984)
Brad	0,374	
Molid	0,4	
Stejar	0,7	
Fag	0,618	
Nuc	0,6	

Fibrele textile vegetale prezintă o serie de avantaje din care amintim:

- acestea reprezintă o sursă regenerabilă de materie primă utilizată pentru ranforsarea materialelor compozite (Carus, 2011);
- asigură greutate redusă acestor compozite datorită densităților lor reduse în comparație cu fibrele clasice utilizate pentru armare (fibre de sticlă, fibre de carbon, fibre de bor și fibre de Kevlar) așa cum se prezintă în tabelul 1.1;
- sunt mai ieftine în comparație cu fibrele de armare anorganice (de exemplu, prețul de cost al fibrelor lungi de in pe unitatea de *kg*, este mai mic de 2,14 ori, de 10,71 ori și de 14,28

ori decât cel corespunzător fibrelor de sticlă, fibrelor de aramidă și respectiv, fibrelor de bor) (Barbu, 1999);

- se pot recicla cu ușurință (Barbu, 1999).

Însă, fibrele vegetale au câteva dezavantaje majore în comparație cu fibrele anorganice (fibre de sticlă, de carbon, de kevlar):

- absorb o cantitate mai mare de umiditate în medii umede și se degradează în astfel de medii (Dhakal și Zhang, 2015; Klyosov, 2007; Assarar *et al.*, 2011; Yan *et al.*, 2015);
- proprietățile mecanice ale acestora se reduc sub acțiunea de lungă durată a razelor ultraviolete (UV) (Yan *et al.*, 2015);
- degajă o cantitate mare de fum atunci când ard (Müssig și Haag, 2015; Klyosov, 2007).

Apa absorbită (13,5% din masă) până la saturație de către materialul compozit in / epoxi a fost de 12,85 ori mai mare decât cantitatea de apă absorbită (1,05% din masă) de către materialul compozit sticlă / epoxi (Assarar *et al.*, 2011). În cazul materialelor compozite din rășină epoxi ranforsată cu țesătură de in, testele accelerate de mediu (condiții atmosferice cu raze UV) pentru 1500 ore prin cicluri de îmbătrânire (expunere la raze ultraviolete la 60°C și pulverizare cu apă) au condus la reducerea cu 29,9% și cu 34,9% a rezistenței la tracțiune și respectiv, a modulului de elasticitate longitudinal  $E$  la tracțiune (Yan *et al.*, 2015). După teste similare de condiții atmosferice, caracteristicile mecanice de încovoiere au înregistrat deasemenea o scădere: cu 10% în cazul modulului de elasticitate  $E$  la încovoiere; cu 10,2% în cazul rezistenței la încovoiere.

**Tabelul 1.2.**

Valorile proprietăților de încovoiere ale fibrelor naturale uzuale și cele corespunzătoare fibrelor clasice utilizate pentru ranforsarea materialelor compozite

Tipul fibrelor	Rezistența la tracțiune $\sigma_t$ (MPa)	Modulul de elasticitate $E$ la tracțiune (MPa)	Referințe bibliografice
Fibre de sticlă de tip $E$	2000÷3550	70000÷73000	(Barbu, 1999; Alămoreanu și Chiriță, 1997)
Fibre de in	700÷1100	40000÷70000	(Müssig și Haag, 2015; Barbu, 1999)
Fibrele de cânepă	690÷800	30000÷70000	(Dhakal și Zhang, 2015; Müssig și Haag, 2015)
Fibre de iută	320÷500	30000÷37000	(Müssig și Haag, 2015; Barbu, 1999)
Fibrele de bumbac	450	8000	(Müssig și Haag, 2015)

Cu toate că producția mondială de fibre de iută este mult mai mare decât cea corespunzătoare fibrelor de in (Fig. 1.1), autoarea prezentei teze de abilitare și-a concentrat cercetările asupra

comportării mecanice a materialelor compozite ranforsate cu fibre de in deoarece fibrele de in au proprietăți mecanice mai bune decât cele de iută (Tab. 1.2).

Aplicațiile materialelor compozite armate cu fibre de in includ: componente de interior pentru automobile (cum sunt panourile de design interior și fețele de interior ale portierelor); panouri pentru acoperișuri; panouri pentru pereți izolatori; corpuri de bărci; rachete de tenis; plăci de surfing; cutii de împachetare; componente de șezut-spătar pentru scaune și alte componente de mobilier; pale pentru turbine eoliene (Müssig și Haag, 2015; Shah *et al.*, 2013; Müssig, 2010).

Fibrele de in sunt recomandate pentru fabricarea materialelor compozite utilizate ca panouri de izolație termic, fonică etc. În acest sens, coeficientul de absorbție a sunetelor, determinat în cazul materialului compozit de tip in / Araldide este cu 21,42% mai mare decât valoarea corespunzătoare înregistrată în cazul materialului compozit sticlă-E / Araldide (Prabhakaran *et al.*, 2014).

Multe din aplicațiile materialelor compozite armate cu fibre de in se referă la: ranforsarea cu fibre tocate de in distribuite aleator; ranforsarea cu fibre continue de in prin utilizarea țesăturilor biaxiale; ranforsarea cu fibre unidireționale continue (Shah *et al.*, 2013; Assarar *et al.*, 2011; Yan *et al.*, 2015; Codispoti *et al.*, 2013).

O analiză comparativă a fost publicată în (Codispoti *et al.*, 2013), în ceea ce privește rezultatele obținute în cazul materialelor compozite pe bază de rășină epoxi ranforsată cu diverse tipuri de fibre naturale: in, iută, șisal, cânepă. S-a raportat că modulul de elasticitate  $E$  la tracțiune determinat pentru materialul compozit in / epoxi a fost mai mare cu 152,49%, cu 102,35%, cu 182,35% decât valorile corespunzătoare materialelor compozite ranforsate cu fibre de iută, fibre de sisal și respectiv, cu fibre de cânepă (Codispoti *et al.*, 2013).

Articole științifice recente au arătat câteva căi de a îmbunătăți proprietățile mecanice ale materialelor compozite ranforsate cu fibre de in (Daoshun și Hong, 2013; Arbelaiz *et al.*, 2005). De exemplu, s-a arătat că tratamentul chimic cu NaOH aplicat asupra fibrelor din in înainte de fabricarea compozitului, urmată de uscarea acestora, conduce la îmbunătățirea proprietăților mecanice ale materialelor compozite ranforsate cu astfel de tipuri de fibre (Xue și Hu, 2013). O altă lucrare a arătat că legătura la interfața dintre fibrele de in și matricea polimerică poate fi îmbunătățită prin tratamente chimice aplicate matricei, cu anhidridă maleică, vinil-trimetoxi silan, anhidridă maleică - copolimer polipropilenă (Arbelaiz *et al.*, 2005).

Într-o lucrare recentă s-a încercat să se înlocuiască complet fibrele de sticlă de tip E cu fibre de in în structuri din materiale compozite (Shah *et al.*, 2013). În acest scop, s-a studiat experimental comportarea mecanică a două variante de pale de rotor de la o turbină eoliană, având lungimea

de 3,5 m, fabricate din material compozit: una din pale a fost fabricată din material compozit de tip in / poliester iar cealaltă pală a fost fabricată din material compozit sticlă E / poliester. S-a remarcat că: pala din material compozit in / poliester a fost cu 10% mai ușoară decât pala din sticlă E / poliester; ambele variante au satisfăcut necesitățile de proiectare și condițiile de rezistență pentru turbine eoliene de 11kW în acord cu standardele specifice de certificare ale unor astfel de structuri. Însă, s-a constatat că pala fabricată din material compozit sticlă-E / poliester a fost mai rigidă deoarece valoarea maximă a deformației înregistrată în cazul acestei pale, a fost mai mare decât în cazul palei fabricate din material compozit de tipul in / poliester.

S-au efectuat de asemenea cercetări experimentale (teste de tracțiune și compresiune) pentru materiale compozite de tipul in / epoxi și de tipul sticlă / epoxi fabricate din același tip de matrice (SR 8200/SD 8205) pe bază de rășină epoxi și cu același raport volumic de 43% fibre (Liang *et al.*, 2015). S-a arătat că tensiunea limită la solicitarea de tracțiune  $\sigma_t$ , modulul de elasticitate  $E$  la tracțiune și tensiunea limită la compresiune  $\sigma_c$ , corespunzătoare materialului compozit sticlă / epoxi, sunt mai mari cu 123,53%, cu 50,03% și respectiv cu 76% decât valorile corespunzătoare determinate pentru materialul compozit de tipul in / epoxi (Liang *et al.*, 2015).

Literatura de specialitate este săracă în ceea ce privește rezultatele obținute pe materiale compozite hibride ranforsate atât cu țesătură de in cât și cu țesătură de sticlă. Din acest motiv, în acest capitol se propune o soluție hibridă de material compozit ranforsat atât cu țesătură de in cât și cu țesătură de sticlă. Noul material compozit hibrid combină avantajele fibrelor de in cu cele ale fibrelor de sticlă. Avantajele fibrelor de in au fost menționate mai înainte. În ceea ce privește avantajele fibrelor de sticlă se pot aminti: caracteristici elastice și mecanice superioare în comparație cu fibrele de in (Tab. 1.2); preț de cost relativ redus comparativ cu fibrele de carbon sau cu cele de *Kevlar*; fibrele de sticlă nu sunt hidrofile și sunt rezistente la medii alcaline (Alămoreanu și Chiriță, 1997).

Obiectivul principal pe care și l-a impus autoarea prezentei teze de abilitare a fost de a optimiza materialul compozit hibrid ranforsat atât cu straturi din țesătură de in cât și cu straturi din țesătură de sticlă, în ceea ce privește modul de dispunere a straturilor, în vederea obținerii unor caracteristici superioare de rezistență și rigiditate.

În acest scop, s-a analizat comparativ comportarea mecanică a trei tipuri de materiale compozite: *materialul compozit ranforsat doar cu țesătură de in*; două materiale compozite hibride de tipul *sticlă / in / epoxi care diferă prin modul de dispunere al straturilor ranforsate cu țesături diferite*.

S-au analizat comparativ atât rezultatele teoretice (model analitic și model cu elemente finite) cât

și rezultatele obținute prin încercări mecanice (tracțiune, încovoiere prin metoda celor trei puncte).

Se abordează modelul teoretic al grinzii din material compozit stratificat și se particularizează acest model de calcul analitic pentru cele trei tipuri de materiale compozite implicate în studiu. Se prezintă teoria de grindă utilizată în cazul materialelor compozite stratificate ținând cont de modelele de calcul din literatura de specialitate din domeniu, pentru a calcula atât modulul de elasticitate echivalent  $E_x$  al grinzii compozite cât și valoarea maximă a deplasării  $w_{0\max}$  a secțiunii de la mijlocul grinzii (Berthelot, 2007; Wang *et al.*, 2014; Cerbu și Curtu, 2009).

Apoi, relația modulului de elasticitate echivalent  $E_x$  al grinzii compozite este particularizată pentru cazurile corespunzătoare epruvetelor fabricate din materialele compozite in / epoxi sau sticlă / in / epoxi, solicitate la încovoiere prin metoda celor trei puncte.

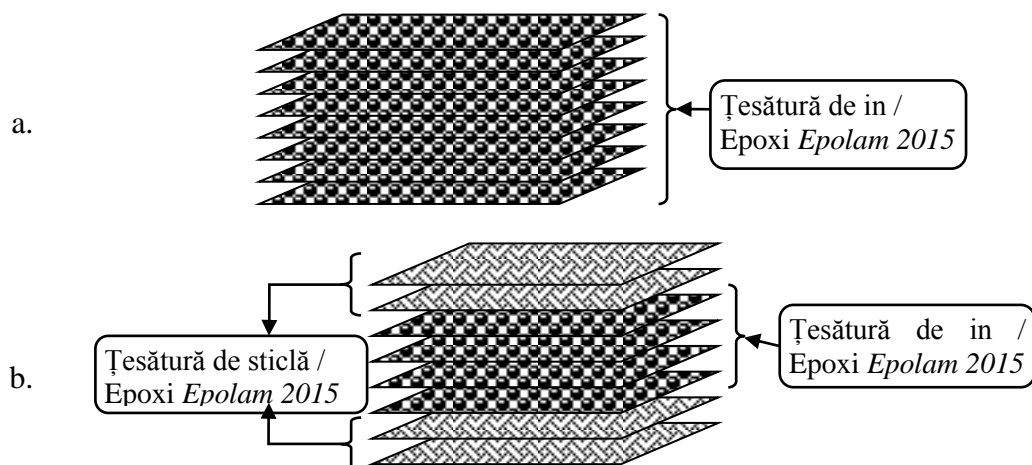
Comparația dintre comportarea mecanică a epruvetelor fabricate din cele două variante de materiale compozite hibride, diferite prin modul de dispunere al straturilor, s-a făcut doar la nivel teoretic (model analitic și model cu elemente finite).

Pentru a convinge în ceea ce privește soluția propusă în cadrul capitolului de față, proprietățile mecanice ale materialului compozit hibrid optimizat s-au comparat cu cele corespunzătoare materialului compozit ranforsat doar cu fibre de in, atât în ceea ce privește rezultatele teoretice cât și în ceea ce privește rezultatele experimentale.

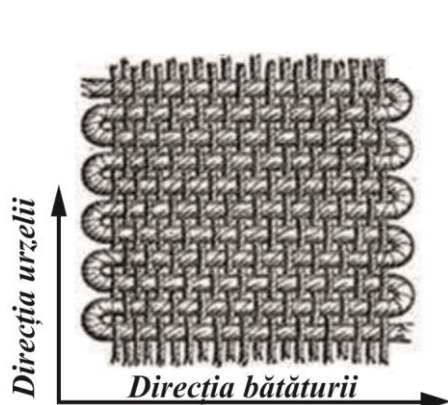
## **1.2. Materiale testate și metoda de lucru**

### ***1.2.1. Structura materialului compozit testat***

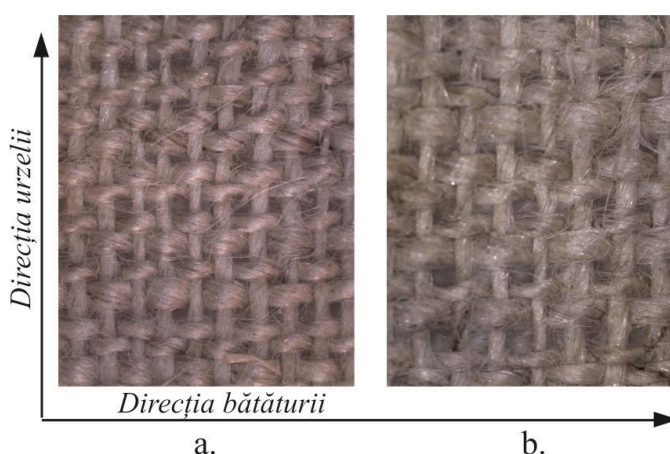
S-au testat două tipuri de materiale compozite. Primul material compozit conține opt straturi fabricate din rășină epoxi de tip Epolam 2015 ranforsată cu țesătură de in. Cel de-al doilea material compozit care a fost analizat este hibrid și este format din același număr de straturi (opt straturi). Patru straturi sunt armate cu țesătură din fibre de sticlă iar celelalte patru straturi sunt armate cu țesătură de in. În figura 1.2 se prezintă modul de dispunere al straturilor în cazul ambelor materiale compozite testate: *in / epoxi Epolam 2015* (Fig. 1.2, a); *Hibrid 1 sticlă-E / in / epoxi Epolam 2015* (Fig. 1.2,b). Conținutul de fibre a fost de 40% în procente de masă pentru fiecare strat.



**Fig. 1.2.** Structura materialelor compozite testate:  
a. Material compozit in / epoxi; b. Material compozit *Hibrid 1* sticlă / in / epoxi



**Fig. 1.3.** Direcțiile țesăturii plane bidirecționale (Cristaldi et al., 2010)



**Fig. 1.4.** Fotografii achiziționate cu microscopul ale țesăturii de in utilizată ca material de ranforsare:  
a. Zoom 100x; b. Zoom 150x

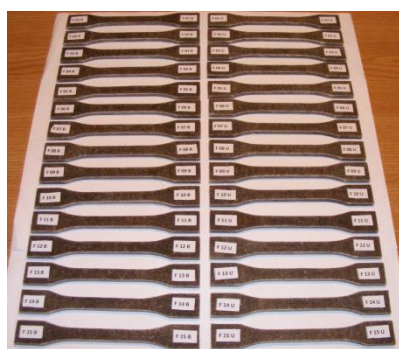
Densitățile pe unitatea de suprafață ale țesăturilor utilizate pentru armare, sunt:  $\rho = 280 \text{ g/m}^2$  în cazul țesăturii din fibre de in (Fișa tehnică, 2011);  $\rho = 200 \text{ g/m}^2$  în cazul țesăturii din fibre de sticlă (Fișa tehnică, *Aeroglass*, 2009). Se cunoaște faptul că țesătura de in este fabricată din tipuri diferite de fibre de in pe direcția bătăturii față de direcția urzelii (Fișa tehnică a țesăturii de in, 2011). S-a ținut cont de acest aspect când s-au fabricat epruvetele. Astfel, în toate straturile armate cu țesătură din fibre de in, țesătura a fost așezată pe aceeași direcție.

În figura 1.3 se prezintă schematic atât direcția bătăturii cât și direcția urzelii, corespunzătoare unei țesături plane bidirecționale. În figura 1.4 se prezintă fotografiile ale țesăturii de in utilizată ca material de ranforsare, achiziționate cu ajutorul unui microscop digital. Se observă că firul din in utilizat în direcția bătăturii diferă de firul de in utilizat în direcția urzelii, primul fiind mai gros (Fig. 1.4). Ca urmare, se preconizează că rezultatele referitoare la proprietățile de material, măsurate în cazul solicitării în direcția bătăturii țesăturii de in, să fie mai bune decât cele

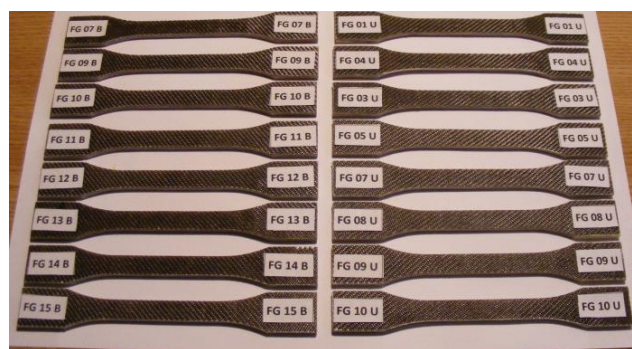
determinate în cazul solicitării în direcția urzelii.

Conform Fișei tehnice a țesăturii de sticlă de tip *E* (2009) care a fost utilizată pentru ranforsare, această țesătură bidirecțională este fabricată din același tip de fibre pe ambele direcții, direcția bătăturii și direcția urzelii.

S-a fabricat câte o placă dreptunghiulară având dimensiunile  $600\text{ mm} \times 350\text{ mm}$ , din fiecare tip de material compozit prin tehnologia manuală de așezare a straturilor (numită în literatura de specialitate *hand lay-up technology*). Grosimea panoului din material compozit de tip in / epoxi *Epolam 2015* a fost egală cu  $5,4 \pm 0,1\text{ mm}$  iar grosimea panoului din material compozit de tip in / sticlă-E / epoxi *Epolam 2015* a fost egală cu  $3,9 \pm 0,1\text{ mm}$ . Timpul de condiționare a fost de o săptămână la temperatura camerei în cazul ambelor plăci din material compozit.



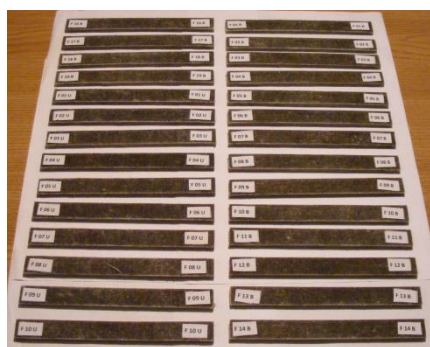
a.



b.

**Fig. 1.5.** Epruvetele pentru încercarea de tracțiune fabricate din material compozit:

a. In / rășină epoxi; b. Sticlă-E / in / rășină epoxi



a.



b.

**Fig. 1.6.** Epruvete pentru încercarea de încovoiere fabricate din material compozit:

b. In / rășină epoxi; b. Sticlă-E / in / rășină epoxi

Din plăci s-au obținut prin tăiere pe mașină cu conducere numerică, epruvete de tracțiune (Fig. 1.5) conform (SR EN ISO 527-4, 2000) și epruvete dreptunghiulare (Fig. 1.6) având dimensiunea  $15\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  pentru încercarea de încovoiere conform (SR EN ISO 14125, 2000).

S-au fabricat câte două seturi de epruvete pentru fiecare încercare mecanică (tracțiune și încovoiere). și pentru fiecare material compozit testat: un set de epruvete a căror lungime este

paralelă cu direcția bătăturii (litera „B” este ultima cifră a codului epruvetei în Fig. 1.5, 1.6) corespunzătoare țesăturii din fibre de in; un al doilea set de epruvete care conține epruvete având direcția lungimii epruvetei paralelă cu direcția urzelii (litera „U” este ultima cifră a codului epruvetei în Fig. 1.5, 1.6) corespunzătoare țesăturii din fibre de in. În total s-au obținut opt seturi a câte zece epruvete: patru seturi de epruvete de tracțiune, câte două din fiecare material; 4 seturi de epruvete de încovoiere, câte două din fiecare material. Fabricarea a două seturi diferite din fiecare material compozit, unul pe direcția bătăturii și celălalt pe direcția urzelii, s-a făcut ținând cont de faptul că firele țesăturii de in utilizate la fabricare pe cele două direcții, bătătură și urzeală, sunt diferite (Fișa tehnică a țesăturii de in de tip Roberta, 2011). Această caracteristică conduce la proprietăți diferite pentru materialul compozit, proprietăți care se vor prezenta în secțiunile următoare ca rezultat al încercărilor mecanice pe cele două direcții.

### **1.2.2. Testarea mecanică**

Echipamentul de testare de tip LR5K Plus este fabricată de LLOYD Instruments și a fost utilizat atât pentru încercarea de tracțiune cât și pentru încercarea de încovoiere. Acesta are acționare hidraulică iar forța maximă este egală cu  $\pm 15 \text{ kN}$ . Viteza de încărcare a fost de  $1 \text{ mm/min}$ . în cazul încercării de tracțiune și de  $1,5 \text{ mm/min}$ . în cazul încercării de încovoiere. Încercarea de încovoiere s-a efectuat prin metoda cunoscută în literatură de specialitate ca “*metoda de încovoiere prin trei puncte*” (epruveta este rezemată la capete iar forța se aplică la mijlocul epruvetei).

Înainte de fiecare încercare mecanică, s-au măsurat cu acuratețe (precizie 0,01) dimensiunile secțiunii fiecărei epruvete. Aceste dimensiuni au constituit date de intrare în soft-ul mașinii de încercare.

Echipamentul de testare permite înregistrarea perechilor de valori sub formă de fișiere text având 200-500 linii în funcție de viteza de achiziție a datelor. De exemplu, în cazul tracțiunii, perechile de valori sunt: forța de tracțiune  $F$  și lungirea  $\Delta l$  a epruvetei; tensiune normală  $\sigma$  și deformație specifică normală  $\varepsilon$ . În cazul încovoierii, se înregistrează forța de încovoiere  $F$  și deplasarea verticală  $w$  la mijlocul epruvetei, în direcția axei  $Oz$  (perpendiculară pe planul  $xOy$  al epruvetei). Datele experimentale au fost prelucrate statistic. Se menționează faptul că modulele de elasticitate  $E$  la tracțiune și la încovoiere au fost determinate pe porțiunea liniară a curbei de încărcare. Astfel, s-au putut calcula cu precizie valorile medii ale următoarelor mărimi în cazul încercării de tracțiune a fiecărui set de epruvete: modulul de elasticitate longitudinal  $E$  (modulul lui Young) la tracțiune; tensiunea normală maximă  $\sigma_{\max}$ ; lungirea epruvetei  $\Delta l$  la forța maximă



$F_{\max}$ ; deformația specifică  $\varepsilon$  la forța maximă  $F_{\max}$ ; energia de deformație  $U$  până la forța maximă  $F_{\max}$ .

Valorile medii determinate prin încercarea de încovoiere se referă la: modulul de elasticitate longitudinal  $E$  la încovoiere; modulul de rigiditate  $EI_z$  la încovoiere; tensiunea normală maximă  $\sigma_{\max}$  la încovoiere la forța maximă  $F_{\max}$ ; energia de deformație  $U$  până la forța maximă  $F_{\max}$ .

### 1.3. Abordări teoretice

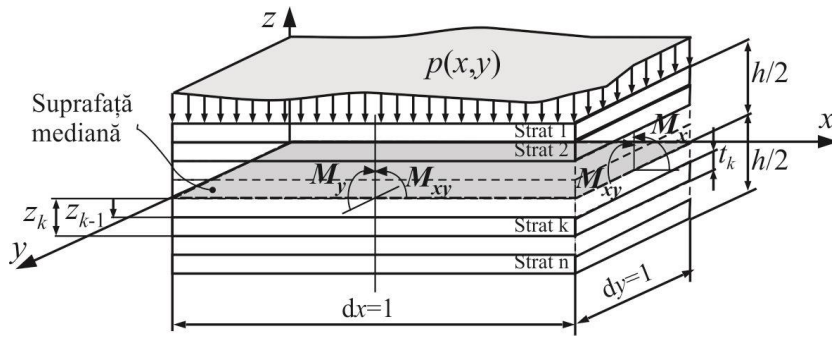
#### 1.3.1. Teoria de grindă din material compozit stratificat

Se remarcă faptul că toate straturile materialelor compozite analizate sunt armate cu țesături bidirecționale fabricate fie din fibre de in, fie din fibre de sticlă de tip  $E$ . Mai mult, straturile fabricate din același material, având aceeași grosime, sunt așezate simetric față de suprafața mediană a materialului compozit. În consecință, ambele materiale compozite testate (in / epoxi și in / sticlă-E / epoxi) prezentate în secțiunea 1.1.1, sunt materiale compozite stratificate simetrice special ortotrope. Se consideră că sunt special ortotrope datorită faptului că sunt armate cu țesături bidirecționale și deci toate fibrele sunt orientate la unghiuri de  $0^\circ$  și  $90^\circ$ .

Din literatura de specialitate (Barbero, 1998; Berthelot, 2007; Alămoreanu și Constantinescu, 2005; Cerbu și Curtu, 2009 etc.) se cunoaște forma generală a ecuației constitutive a elementului de placă din material compozit stratificat care este o relație între vectorul eforturilor secționale  $\{N_x \ N_y \ N_{xy} \ M_x \ M_y \ M_{xy}\}^T$  și vectorul deplasărilor specifice  $\{\varepsilon_x^0 \ \varepsilon_y^0 \ \gamma_{xy}^0\}^T$  și cel al curburilor  $\{\kappa_x^0 \ \kappa_y^0 \ \kappa_{xy}^0\}^T$  din suprafața mediană a plăcii:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x^0 \\ \kappa_y^0 \\ \kappa_{xy}^0 \end{Bmatrix}, \quad (1.1)$$

unde  $[A]$  reprezintă matricea de rigiditate în plan;  $[B]$  este matricea de cuplare încovoiere-întindere;  $[D]$ - matricea de rigiditate la încovoiere.



**Fig. 1.7.** Eforturile secționale care se dezvoltă la nivelul suprafeței mediane a elementului de placă fabricată din material compozit stratificat care nu este solicitat în planul suprafeței mediane. În cazul unui element de placă din material compozit stratificat simetric special ortotrop (Fig. 1.7) care nu este solicitat în planul suprafeței mediane ( $N_x = N_y = N_{xy} = 0$ ) și care este solicitat doar la încovoiere ( $M_x \neq 0; M_y \neq 0$ ) și torsiune ( $M_{xy} \neq 0$ ), ecuația (1.1) se reduce la:

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa_x^0 \\ \kappa_y^0 \\ \kappa_{xy}^0 \end{Bmatrix} \quad (1.2)$$

deoarece  $B_{ij} = 0 (i, j = 1, 2, 6)$  în cazul materialului compozit stratificat simetric și  $D_{16} = D_{26}$  în cazul materialelor compozite stratificate special ortotrope.

În ecuația (1.2), curburile se calculează utilizând următoarele relații (Barbero, 1998):

$$\kappa_x^0(x, y) = -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}; \quad \kappa_y^0(x, y) = -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}; \quad \kappa_{xy}^0(x, y) = -2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}, \quad (1.3)$$

unde  $w_0$  este deplasarea pe direcția axei  $Oz$  perpendicular pe placă, a punctului arbitrar din elementul de placă, având coordonatele  $(x, y, z)$ .

Termenii matricei de rigiditate  $[D]$  din ecuația (1.2), se calculează utilizând următoarea relație (Barbero, 1998):

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\overline{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3), \quad i, j = 1, 2, 6; \quad (1.4)$$

unde  $(\overline{Q}_{ij})_k$  sunt termenii matricei de rigiditate  $[\overline{Q}]_k$  numită *matrice modul de elasticitate generalizată redusă transformată corespunzătoare stratului  $k (k = \overline{1, N})$* , față de sistemul de coordonate global  $xOyz$ ;  $N$  – numărul total de straturi din care este format materialul compozit.

Matricea modul de elasticitate generalizată  $[\bar{Q}]_k$  face legătura între vectorul tensiunilor  $\{\sigma\}_k$  calculat la nivelul punctului arbitrar din stratul  $k$  și vectorul deformațiilor specifice  $\{\varepsilon\}_k$  calculat pentru același punct, față de sistemul de coordonate global  $xOyz$ , respectiv:

$$\{\sigma\}_k = [\bar{Q}]_k \cdot \{\varepsilon\}_k. \quad (1.5)$$

Întrucât unghiul de orientare corespunzător ambelor țesături, de fibre de in și de fibre de sticlă, este același ( $0^\circ$ ) în toate straturile materialelor compozite testate, matricea modul de elasticitate generalizată redusă transformată  $[\bar{Q}]_k$  a stratului  $k$  față de sistemul de coordonate global  $xOyz$ , este aceeași cu matricea modul de elasticitate generalizată redusă  $[Q]_k$  calculată față de sistemul de coordonate local numit și sistem de coordonate de material a cărui axe 1 și 2 sunt paralele cu direcția bătăturii și respectiv, cu direcția urzelii țesăturii:

$$[\bar{Q}]_k = [Q]_k = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{\Delta} & \frac{\nu_{12}E_2}{\Delta} & 0 \\ \frac{\nu_{12}E_2}{\Delta} & \frac{E_2}{\Delta} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix}, \quad (1.6)$$

unde  $\Delta = 1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}$ . Coeficientul lui *Poisson*  $\nu_{21}$  poate fi calculat utilizând următoarea relație (Barbero, 1998; Berthelot, 2007; Alămoreanu și Chiriță, 1997; Cerbu și Curtu, 2009) dintre constantele elaseice:

$$\frac{\nu_{21}}{E_2} = \frac{\nu_{12}}{E_1}. \quad (1.7)$$

Ecuția (1.2) poate fi rescrisă sub următoarea formă:

$$\begin{Bmatrix} \kappa_x^0 \\ \kappa_y^0 \\ \kappa_{xy}^0 \end{Bmatrix} = [D]^{-1} \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & 0 \\ \delta_{12} & \delta_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \delta_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (1.8)$$

unde  $\delta_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 6$ ) sunt componentele inversei matricei de rigiditate la încovoiere  $[D]$ .

În relația (1.8) termenii  $D_{16} = D_{26} = 0$  ai matricei de rigiditate la încovoiere  $[D]$  în cazul particular al materialului compozit stratificat special ortotrop.

În cazul în care elementul de placă este solicitat doar la încovoiere, vectorul de deformații

într-un punct oarecare situat la distanța  $z$  față de suprafața mediană a plăcii, se calculează cu următoarea relație (Barbero, 1998; Berthelot, 2007; Alămoreanu și Chiriță, 1997; Cerbu și Curtu, 2009 etc.):

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \kappa_x^0 \\ \kappa_y^0 \\ \kappa_{xy}^0 \end{Bmatrix} = z \begin{Bmatrix} \kappa_x^0 \\ \kappa_y^0 \\ \kappa_{xy}^0 \end{Bmatrix}. \quad (1.9)$$

Relația dintre vectorul momentelor  $\{M_x \ M_y \ M_{xy}\}^T$  (Fig. 1.7) care se dezvoltă la nivelul suprafeței mediane a elementului de placă din material compozit stratificat și vectorul tensiunilor  $\{\sigma_x \ \sigma_y \ \tau_{xy}\}^T$  care se dezvoltă la nivelul unui punct oarecare din elementul de placă situat la distanța  $z$  față de suprafața mediană a plăcii, se scrie sub forma (Barbero, 1998):

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \cdot z \, dz. \quad (1.10)$$

unde  $h$  este grosimea plăcii din material compozit (Fig. 1.7).

În sistemul de coordonate  $xOy$ , relația dintre vectorul deformațiilor  $\{\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \gamma_{xy}\}^T$  și vectorul tensiunilor  $\{\sigma_x \ \sigma_y \ \tau_{xy}\}^T$  corespunzător unui punct oarecare dintr-o placă ortotropă echivalentă cu placa din material compozit stratificat simetric special-ortotrop, are forma:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (1.11)$$

în care  $E_x, E_y, G_{xy}, \nu_{xy}$  sunt caracteristicile elastice ale materialului ortotrop fictiv, echivalent cu materialul compozit având structură de stratificat simetric special-ortotropă.

Relația inversă relației (1.11) este:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}. \quad (1.12)$$

Înlocuirea relațiilor (1.12) și (1.9) în relația (1.10), conduce la:

$$\left. \begin{aligned} \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} &= \int_{-h/2}^{+h/2} \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot z \cdot \begin{Bmatrix} \kappa_x^0 \\ \kappa_y^0 \\ \kappa_{xy}^0 \end{Bmatrix} \cdot z \, dz = \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} \kappa_x^0 \\ \kappa_y^0 \\ \kappa_{xy}^0 \end{Bmatrix} \int_{-h/2}^{+h/2} z^2 \, dz = \frac{h^3}{12} \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} \kappa_x^0 \\ \kappa_y^0 \\ \kappa_{xy}^0 \end{Bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

Relația (1.13) se poate scrie sub forma:

$$\begin{Bmatrix} \kappa_x^0 \\ \kappa_y^0 \\ \kappa_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \frac{12}{h^3} \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1.14)$$

Prin compararea relațiilor (1.8) și (1.14), se pot identifica termenii matricei  $[\delta]$  care este inversa matricei de rigiditate la încovoiere notată cu  $[D]$ :

$$\left. \begin{aligned} \delta_{11} &= \frac{12}{h^3 E_{xi}}; \\ \delta_{22} &= \frac{12}{h^3 E_{yi}}; \\ \delta_{12} &= -\frac{12\nu_{xy} i}{h^3 E_{xi}}; \\ \delta_{66} &= \frac{12}{h^3 G_{xy}}. \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

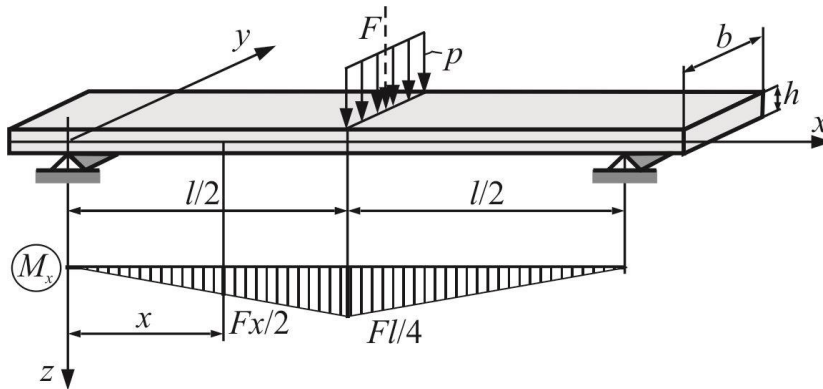
În final, din relația (1.15), după înlocuirea termenilor matricei  $[\delta]$ , se calculează *caracteristicile elastice*  $E_x, E_y, G_{xy}, \nu_{xy}$  ale plăcii fictive din material ortotrop, echivalentă cu materialul compozit cu structură de stratificat simetric, special-ortotrop, sollicitată doar la încovoiere (Barbero, 2008; Berthelot, 2007):

$$\left. \begin{aligned} E_{xi} &= \frac{12}{h^3 \delta_{11}} = \frac{12(D_{11}D_{22} - D_{12}^2)}{h^3 D_{22}}, \\ E_{yi} &= \frac{12}{h^3 \delta_{22}} = \frac{12(D_{11}D_{22} - D_{12}^2)}{h^3 D_{11}}, \\ G_{xyi} &= \frac{12}{h^3 \delta_{66}} = \frac{12D_{66}}{h^3}, \\ \nu_{xyi} &= -\frac{h^3 \delta_{12} E_{xi}}{12} = -\frac{\delta_{12}}{\delta_{11}} = \frac{D_{12}}{D_{22}}, \end{aligned} \right\} \quad (1.16)$$

în care indicele  $i$  indică faptul că, relațiile de echivalență de mai sus sunt valabile doar în cazul *solicitării de încovoiere*. În cazul în care stratificatul are termenii matricei de rigiditate  $D_{16} \neq 0$ ,  $D_{26} \neq 0$ , atunci relațiile (1.16) vor conduce la un calcul aproximativ.

În cazul teoriei de grindă (Berthelot, 2007) se presupune că atât momentul de încovoiere  $M_y$  cât și momentul de torsiune  $M_{xy}$  sunt egale cu zero (Fig. 1.8):

$$M_y = 0; \quad M_{xy} = 0. \quad (1.17)$$



**Fig. 1.8.** Grindă din material compozit solicitată la încovoiere prin metoda celor trei puncte

Astfel, utilizând prima relație din (1.3), relația (1.8) conduce la:

$$\kappa_x = -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} = \delta_{11} M_x. \quad (1.18)$$

iar prima relație din (1.16) se reduce la:

$$E_x = \frac{12}{h^3 \delta_{11}} = \frac{12(D_{11}D_{22} - D_{12}^2)}{h^3 D_{22}}. \quad (1.19)$$

Utilizând relația (1.19), relația (1.18) se scrie sub forma următoare:

$$\frac{d^2 w_0}{dx^2} = -\frac{M}{E_x I}, \quad (1.20)$$

unde  $M = b \cdot M_x$  reprezintă momentul de încovoiere care se dezvoltă la nivelul secțiunii arbitrare a grinzii;  $I = bh^3/12$  - momentul de inerție axial al secțiunii grinzii față de axa  $Oy$  (Fig. 1.8).

Considerând că grinda din figura 1.8 este solicitată la încovoiere prin metoda celor trei puncte, ecuația diferențială (1.20) a fibrei medii deformată a grinzii poate fi scrisă sub forma următoare:

$$\frac{d^2 w_0}{dx^2} = -\frac{M_i(x)}{E_x I} = -\frac{Fx}{2E_x I}, \quad (1.21)$$

unde  $M_i(x) = -Fx/2$  este momentul de încovoiere care se dezvoltă la nivelul secțiunii oarecare aflată la distanța  $x$  față de reazemul din capătul grinzii (Fig. 1.8).

Se cunoaște faptul că deplasarea maximă  $w_{0\max}$  a secțiunii aflate la mijlocul grinzii ( $x = l/2$ ) se calculează utilizând următoarea relație:

$$w_{0\max} = \frac{Fl^3}{48E_x I}, \quad (1.22)$$

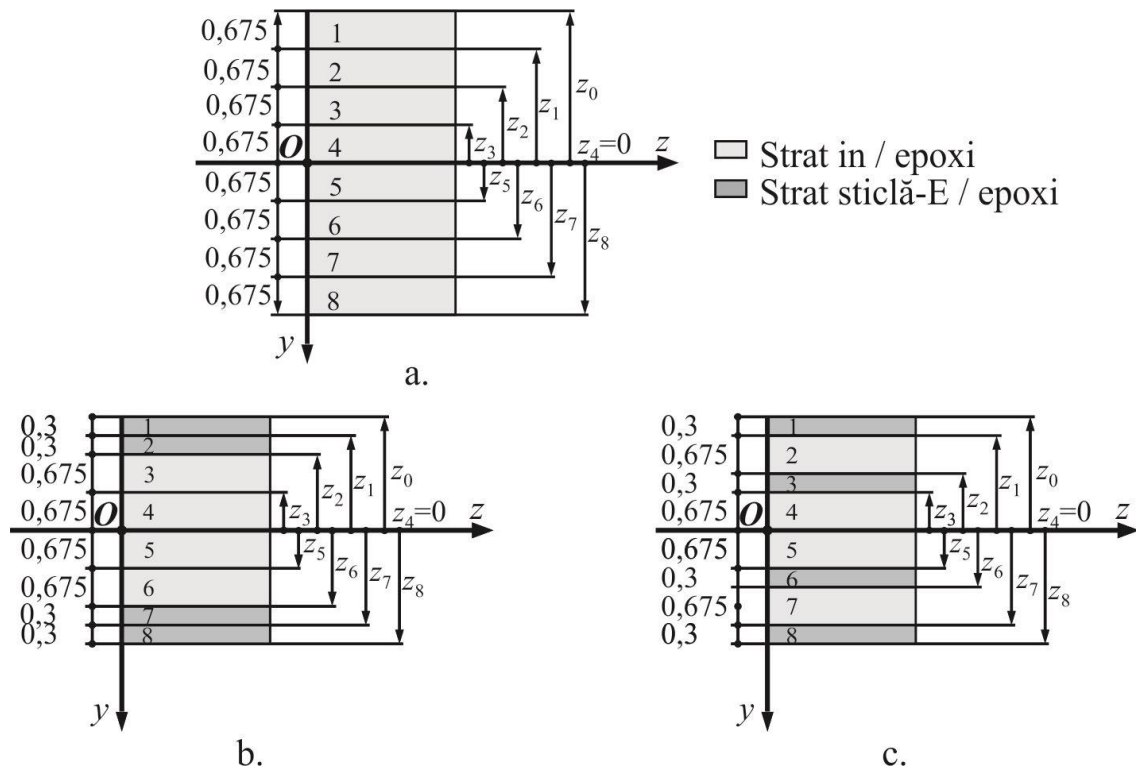
unde  $E_x = 12/(h^3 \delta_{11})$  conform relației (1.16).

### 1.3.2. Cazuri particulare

În această secțiune, se calculează componentele matricei de rigiditate la încovoiere  $[D]$  corespunzătoare fiecărui material compozit implicat în studiul teoretic din această secțiune, pentru a le înlocui în relația (1.19) care reprezintă relația valorii teoretice a modulului de elasticitate  $E_x$  corespunzător epruvetei solicitată la încovoiere.

În acest scop, în figura 1.9 se prezintă așezările straturilor pentru cele trei materiale compozite care se vor analiza teoretic din punctul de vedere al comportării la încovoiere: materialul compozit format din opt straturi *in / epoxi* (Fig. 1.9,a); materialul compozit *Hibrid 1 sticlă-E / in*

/epoxi format din patru straturi de miez din in/epoxi și patru straturi sticlă-E/epoxi așezate ca în figura 1.9,b; materialul compozit *Hibrid 2 sticlă-E / in / epoxi* format din patru straturi din in/epoxi și patru straturi sticlă-E /epoxi așezate alternativ ca în figura 1.9,c. Se reprezintă de asemenea (Fig. 1.9) grosimea fiecărui strat  $k$  ( $k = \overline{1,8}$ ) și coordonatele fiecărui strat (distanțele  $z_{k-1}$ ,  $z_k$  de la suprafața mediană a plăcii la suprafața superioară și respectiv, inferioară a stratului  $k$ ).



**Fig. 1.9.** Grosimea și coordonatele straturilor în cazul materialelor compozite analizate: material a. Compozit in / epoxi; b. Material compozit *Hibrid 1* sticlă-E / in / epoxi; c. Material compozit *Hibrid 2* sticlă-E / in / epoxi (cu straturi alternative)

Componentele matricei de rigiditate la încovoiere  $[D']$  corespunzătoare materialului compozit in / epoxi (Fig. 1.9,a), se calculează utilizând relația (1.4):

$$D'_{11} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^8 (\overline{Q_{11}})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) = \frac{1}{3} \overline{Q_{11}}' \left\{ (-2,025)^3 - (-2,7)^3 \right\} + \left\{ (-1,35)^3 - (-2,025)^3 \right\} + \left\{ (-0,675)^3 - (-1,35)^3 \right\} + \left\{ 0^3 - (-0,675)^3 \right\} + \left\{ 0,675^3 - 0^3 \right\} + \left\{ 1,35^3 - 0,675^3 \right\} + \left\{ 2,025^3 - 1,35^3 \right\} + \left\{ 2,7^3 - 2,025^3 \right\} = 13,122 \overline{Q_{11}}'; \quad (1.23,a)$$

$$D'_{22} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^8 (\overline{Q_{22}})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) = 13,122 \overline{Q_{22}}'; \quad (1.23,b)$$



$$D'_{12} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^8 (\overline{Q}_{12})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) = 13,122 \overline{Q}_{12}', \quad (1.23,c)$$

unde  $\overline{Q}_{ij}'$  sunt termenii matricei modul de elasticitate generalizată redusă transformată, notată cu  $[\overline{Q}']$ , corespunzătoare stratului din material compozit in / epoxi față de sistemul de coordonate global  $xOyz$ .

Relațiile (1.25) sunt înlocuite în relația (1.19) pentru a obține relația teoretică a modului de elasticitate  $E'_x$  corespunzătoare epruvetei de încovoiere fabricate din material compozit in / epoxi, după cum urmează:

$$\begin{aligned} E'_x &= \frac{12(D_{11}D_{22} - D_{12}^2)}{h^3 D_{22}} = \frac{12 \left[ 13,122^2 \overline{Q}_{11}' \cdot \overline{Q}_{22}' - \left( 13,122 \overline{Q}_{12}' \right)^2 \right]}{5,4^3 \cdot 13,122 \overline{Q}_{22}'} = \\ &= \frac{\overline{Q}_{11}' \cdot \overline{Q}_{22}' - \overline{Q}_{12}'^2}{\overline{Q}_{22}'} \end{aligned} \quad (1.24)$$

unde  $h = 5,4 \text{ mm}$  (Fig. 1.9, a) reprezintă grosimea totală a stratificatului din material compozit in / epoxi.

În aceeași manieră, se calculează componentele matricei modul de elasticitate generalizată redusă transformată  $[D'']$  corespunzătoare materialului compozit *Hibrid 1 sticlă-E / in / epoxi* prin utilizarea relației (1.4):

$$\begin{aligned} D''_{11} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^8 (\overline{Q}_{11})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) = \frac{1}{3} \left\{ \overline{Q}_{11}'' [(-1,65)^3 - (-1,95)^3] + \overline{Q}_{11}'' [(-1,35)^3 - (-1,65)^3] + \right. \\ &+ \overline{Q}_{11}' [(-0,675)^3 - (-1,35)^3] + \overline{Q}_{11}' [0^3 - (-0,675)^3] + \overline{Q}_{11}' (0,675^3 - 0^3) + \\ &+ \overline{Q}_{11}' (1,35^3 - 0,675^3) + \overline{Q}_{11}'' (1,65^3 - 1,35^3) + \overline{Q}_{11}'' (1,95^3 - 1,65^3) \left. \right\} = \\ &= 3,303 \overline{Q}_{11}'' + 1,64025 \overline{Q}_{11}'; \end{aligned} \quad (1.25,a)$$

$$D''_{22} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^8 (\overline{Q}_{22})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) = 3,303 \overline{Q}_{22}'' + 1,64025 \overline{Q}_{22}'; \quad (1.25,b)$$

$$D''_{12} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^8 (\overline{Q}_{12})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) = 3,303 \overline{Q}_{12}'' + 1,64025 \overline{Q}_{12}', \quad (1.25,c)$$

unde  $\overline{Q_{ij}'}$  și  $\overline{Q_{ij}''}$  ( $i, j = 1, 2$ ) sunt termenii matricelor modul de elasticitate generalizată redusă transformată  $\left[ \overline{Q}' \right]$ ,  $\left[ \overline{Q}'' \right]$  față de sistemul de coordonate global  $xOyz$ , corespunzătoare stratului din material compozit in / epoxi și respectiv, stratului din material compozit sticlă-E / epoxi.

Relațiile (1.25) sunt înlocuite în relația (1.19) pentru a obține relația de calcul a modului de elasticitate  $E_x''$  corespunzător epruvetei de încovoiere fabricată din material compozit *Hibrid 1 sticlă-E / in / epoxi*, după cum urmează:

$$E_x'' = \frac{12 \left[ \left( 3,303 \overline{Q_{11}''} + 1,64025 \overline{Q_{11}'} \right) \left( 3,303 \overline{Q_{22}''} + 1,64025 \overline{Q_{22}'} \right) - \left( 3,303 \overline{Q_{12}''} + 1,64025 \overline{Q_{12}'} \right)^2 \right]}{3,9^3 \cdot \left( 3,303 \overline{Q_{22}''} + 1,64025 \overline{Q_{22}'} \right)}, \quad (1.26)$$

unde  $h = 3,9mm$  (Fig. 1.9,b) reprezintă grosimea totală a stratificatului din material compozit *Hibrid 1 sticlă-E / in / epoxi*.

În continuare, se calculează componentele matricii modul de elasticitate generalizată redusă transformată  $\left[ D''' \right]$  corespunzătoare materialului compozit *Hibrid 2 de tip sticlă-E / in / epoxi*, cu straturi alternative, prin utilizarea relației (1.4):

$$\begin{aligned} D_{11}''' &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^8 \left( \overline{Q_{11}} \right)_k \left( z_k^3 - z_{k-1}^3 \right) = \frac{1}{3} \left\{ \overline{Q_{11}''} \left[ (-1,65)^3 - (-1,95)^3 \right] + \overline{Q_{11}'} \left[ (-0,975)^3 - (-1,65)^3 \right] + \right. \\ &+ \overline{Q_{11}''} \left[ (-0,675)^3 - (-0,975)^3 \right] + \overline{Q_{11}'} \left[ 0^3 - (-0,675)^3 \right] + \overline{Q_{11}''} \left( 0,675^3 - 0^3 \right) + \\ &+ \overline{Q_{11}'} \left( 0,975^3 - 0,675^3 \right) + \overline{Q_{11}''} \left( 1,65^3 - 0,975^3 \right) + \overline{Q_{11}'} \left( 1,95^3 - 1,65^3 \right) \left. \right\} = \\ &= 2,361375 \overline{Q_{11}''} + 2,581875 \overline{Q_{11}'}; \end{aligned} \quad (1.27,a)$$

$$D_{22}''' = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^8 \left( \overline{Q_{22}} \right)_k \left( z_k^3 - z_{k-1}^3 \right) = 2,361375 \overline{Q_{22}''} + 2,581875 \overline{Q_{22}'}; \quad (1.27,b)$$

$$D_{12}''' = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^8 \left( \overline{Q_{12}} \right)_k \left( z_k^3 - z_{k-1}^3 \right) = 2,361375 \overline{Q_{12}''} + 2,581875 \overline{Q_{12}'}; \quad (1.27,c)$$

Relațiile (1.27) sunt înlocuite în relația (1.19) pentru a obține relația de calcul a modului de elasticitate  $E_x'''$  corespunzător epruvetei de încovoiere fabricată din material compozit *Hibrid 2 sticlă-E / in / epoxi*, cu straturi alternative, după cum urmează:

$$E_x''' = \frac{12 \left[ \left( 2,3614 \overline{Q_{11}''} + 2,5819 \overline{Q_{11}'} \right) \left( 2,3614 \overline{Q_{22}''} + 2,5819 \overline{Q_{22}'} \right) - \left( 2,3614 \overline{Q_{12}''} + 2,5819 \overline{Q_{12}'} \right)^2 \right]}{3,9^3 \cdot \left( 2,3614 \overline{Q_{22}''} + 2,5819 \overline{Q_{22}'} \right)}, \quad (1.28)$$

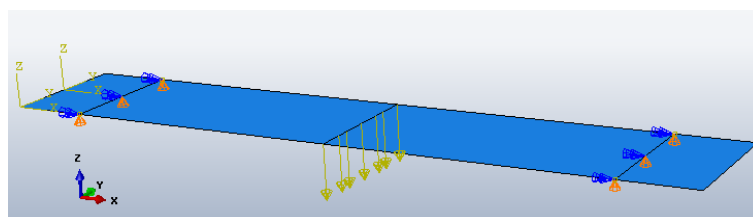
unde  $h = 3,9mm$  (Fig. 1.9,c) reprezintă grosimea totală a stratificatului din material compozit *Hibrid 2 sticlă-E / in / epoxi*.

În final, valorile teoretice calculate cu relațiile (1.24), (1.26) și (1.28) vor fi comparate cu rezultatele experimentale pentru a valida modelele teoretice de grindă stratificată corespunzătoare celor două materiale compozite implicate în acest studiu.

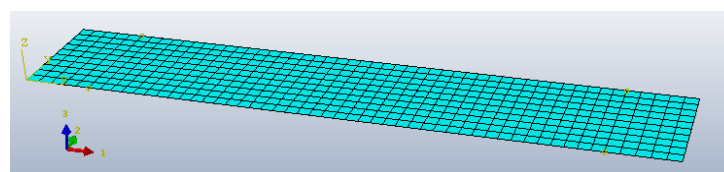
### 1.3.3. Analiza cu metoda elementelor finite

În această secțiune se prezintă modelul cu elemente finite utilizat pentru modelarea epruvetei din material compozit stratificat, epruvetă care este solicitată la încovoiere. Modelarea cu elemente finite s-a făcut doar pe domeniul elastic deoarece se urmărește compararea rezultatelor cu cele obținute cu modelul analitic. Modelul analitic prezentat în secțiunea 1.3.1 este valabil doar pe domeniul elastic pentru care tensiunile variază liniar cu deformațiile specifice fiind valabilă legea lui *Hooke*.

Modelarea cu elemente finite s-a făcut utilizând soft-ul *Abaqus*, licența Student. Deoarece în *Abaqus*, structura de stratificat (numită *CompositeLayup*) se poate asocia doar part-urilor (pieselor) de tip shell, s-a definit un shell având dimensiunile  $15mm \times 80mm$ . Schema de încărcare se prezintă în figura 1.10 iar distanța între reazeme a fost considerată aceeași valoare cu cea din încercările experimentale.



**Fig. 1.10.** Schema de încărcare utilizată în modelul cu elemente finite pentru simularea comportării la încovoiere a epruvetelor fabricate din materialele compozite implicate în studiu



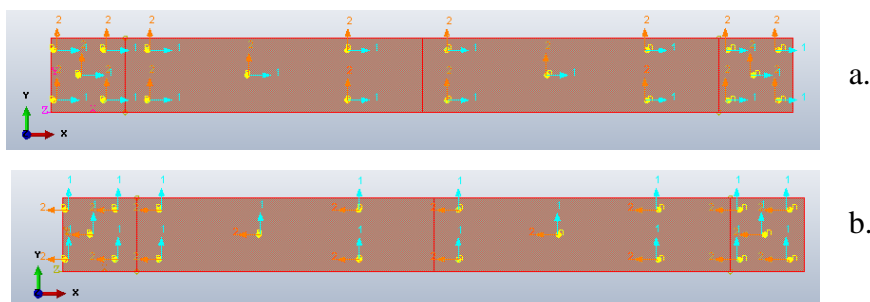
**Fig. 1.11.** Modelul cu elemente finite utilizat pentru simularea comportării mecanice

Modelul cu elemente finite (Fig. 1.11) utilizează elemente de tip Shell S4R care se pot utiliza pentru plăci subțiri sau groase. Modelul cu elemente finite conține 520 elemente ShellS4R.

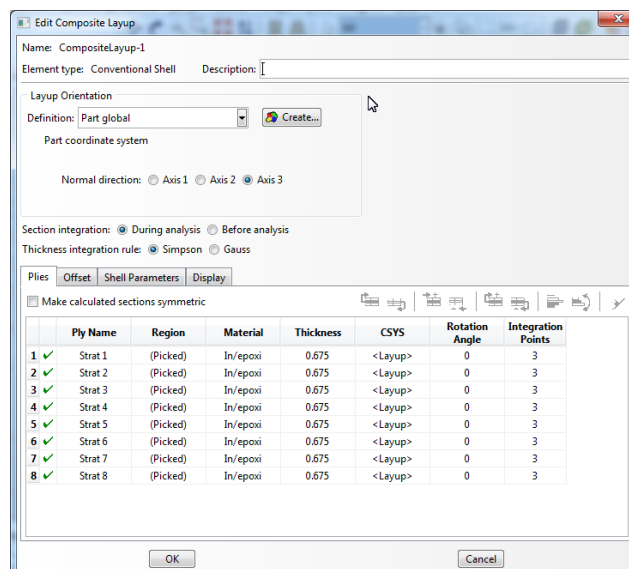
S-au definit în soft, două tipuri de materiale compozite specifice straturilor: materialul compozit in / epoxi; materialul compozit sticlă / epoxi. Aceste materiale s-au definit de tip lamina care apoi, au fost asociate straturilor subțiri care alcătuiesc structura de stratificat specifice fiecărui material compozit implicat în studiu. Proprietățile materialelor compozite analizate sunt diferite pe direcția bătăturii față de cele determinate pe direcția urzelii corespunzătoare țesăturii de in. Din acest motiv, pentru fiecare tip de structură de material compozit s-au considerat două cazuri:

- *cazul 1* - axa 1 a materialului (direcția bătăturii corespunzătoare țesăturii de in) este paralelă cu direcția lungimii epruvetei;
- *cazul 2* - axa 2 a materialului (direcția urzelii corespunzătoare țesăturii de in) este paralelă cu direcția lungimii epruvetei.

Acest lucru se definește în soft prin utilizarea comenzii numite *Assign material orientation* prin care se asociază direcțiile sistemului de axe al materialului (Fig. 1.12).



**Fig. 1.12.** Definierea sistemului de coordonate asociat materialului compozit stratificat  
a. Axa 1 a materialului (direcția bătăturii) este paralelă cu direcția lungimii epruvetei; b. Axa 2 a materialului (direcția urzelii) este paralelă cu direcția lungimii epruvetei



**Fig. 1.13.** Definierea structurii de stratificat pentru materialul compozit in / epoxi

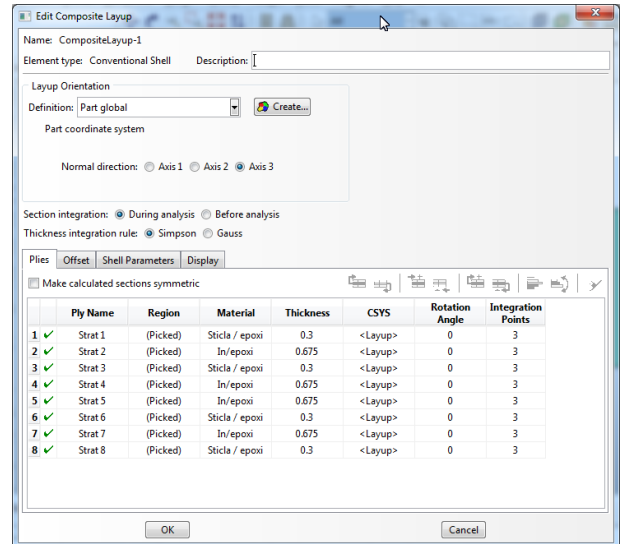
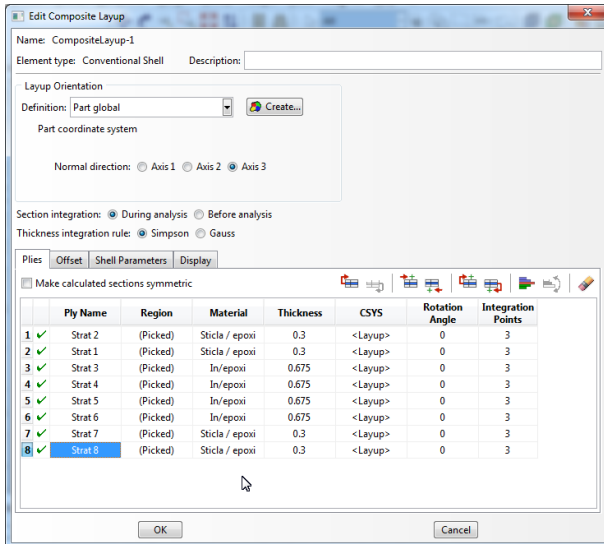
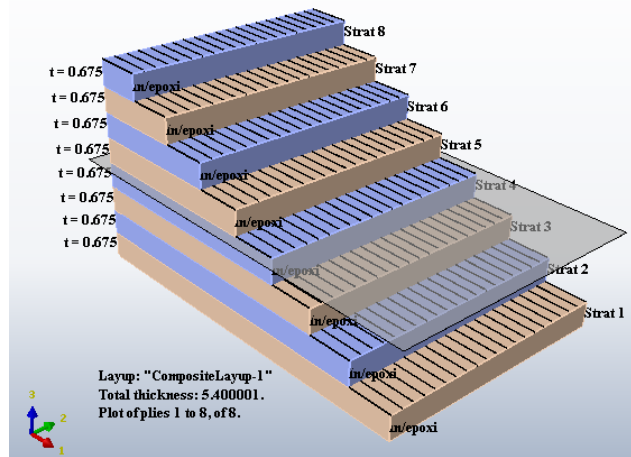
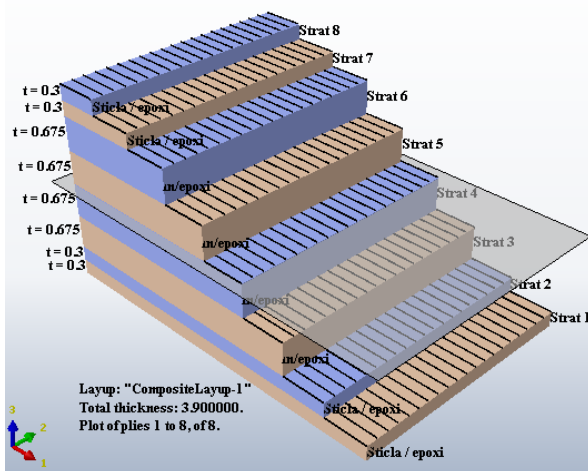


Fig. 1.14. Definirea structurii de stratificat pentru compozitul *Hibrid 1* sticlă / in / epoxi

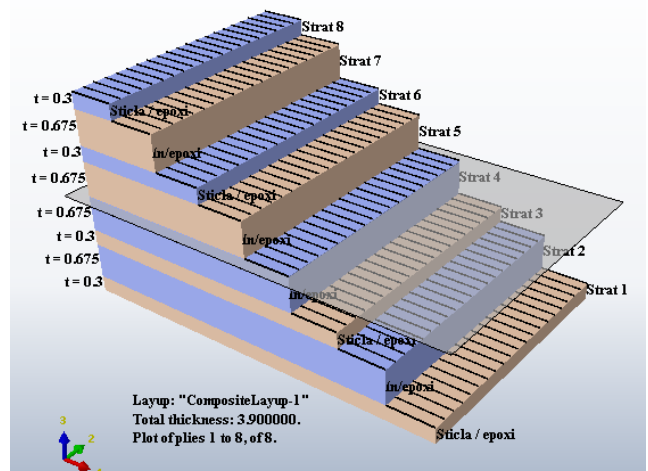
Fig. 1.15. Definirea structurii de stratificat pentru compozitul *Hibrid 2* sticlă / in / epoxi



a.



b.



c.

Fig. 1.16. Modelarea materialelor compozite stratificate analizate cu elemente finite în cazul: a. In /epoxi; b. *Hibrid 1* sticlă / in / epoxi; c. *Hibrid 2* sticlă / in / epoxi

Utilizând comanda *CompositeLayup* se definesc pozițiile straturilor (modul de dispunere) în cazul celor trei tipuri de materiale compozite analizate: *material compozit in / epoxi* (Fig. 1.13); *material compozit Hibrid 1 sticlă-E / in / epoxi* (Fig. 1.14); *material compozit Hibrid 2 sticlă-E / in / epoxi* (Fig. 1.15).

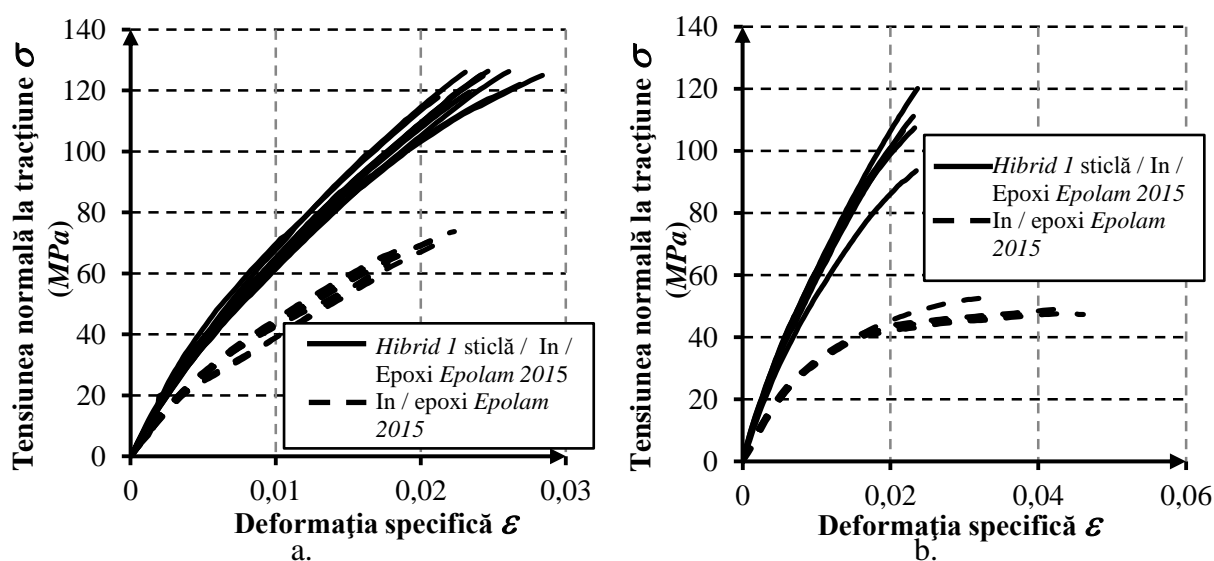
Straturile ranforsate cu in au grosimea 0,675 mm (Fig. 1.13...1.15) iar straturile ranforsate cu sticlă au grosimea 0,3 mm (Fig. 1.13 și 1.14). Se observă în ferestrele de definire a stratificatelor (Fig. 1.13...1.15) că în ultima coloană, se pot defini maxim trei puncte de integrare (integration points) pentru fiecare strat. Acest lucru înseamnă că soft-ul raportează datele de ieșire (tensiuni și deformații) pentru trei puncte ale fiecărui strat: punctul situat la suprafața superioară a stratului; punctul situat în suprafața mediană a stratului; punctul situat la suprafața inferioară a stratului. Acest lucru se va vedea în secțiunea 1.4.3 când se vor analiza rezultatele obținute cu metoda elementelor finite.

În figurile 1.16 se prezintă rezultatul definirii în soft al celor trei structuri de material compozite implicate în studiu, conform cu datele introduse (Fig. 1.13...1.15).

## 1.4. Rezultate și discuții

### 1.4.1. Rezultate experimentale

În figura 1.17 se prezintă curbele caracteristice tensiune – deformație ( $\sigma - \varepsilon$ ) înregistrate în timp real la încercarea de tracțiune în cazul ambelor tipuri de materiale compozite implicate în studiul experimental: materialul compozit *in / epoxi* și materialul compozit *Hibrid 1 sticlă / in / epoxi*.

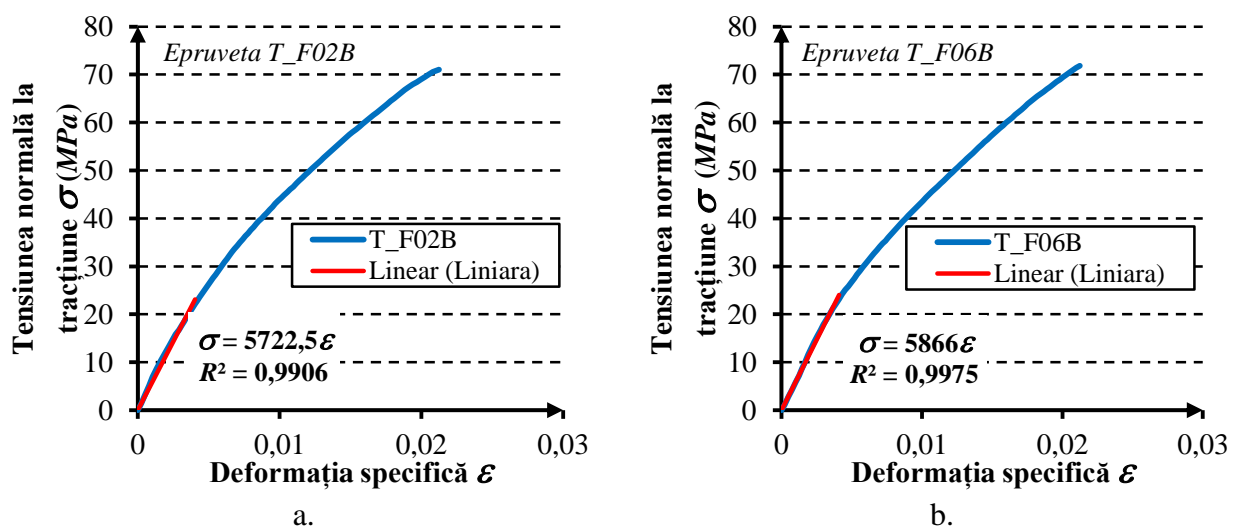


**Fig. 1.17.** Curbele tensiune-deformație ( $\sigma - \varepsilon$ ) determinate în cazul solicitării de tracțiune în: a. Direcția bătăturii țesăturii de in; b. Direcția urzelii țesăturii de in

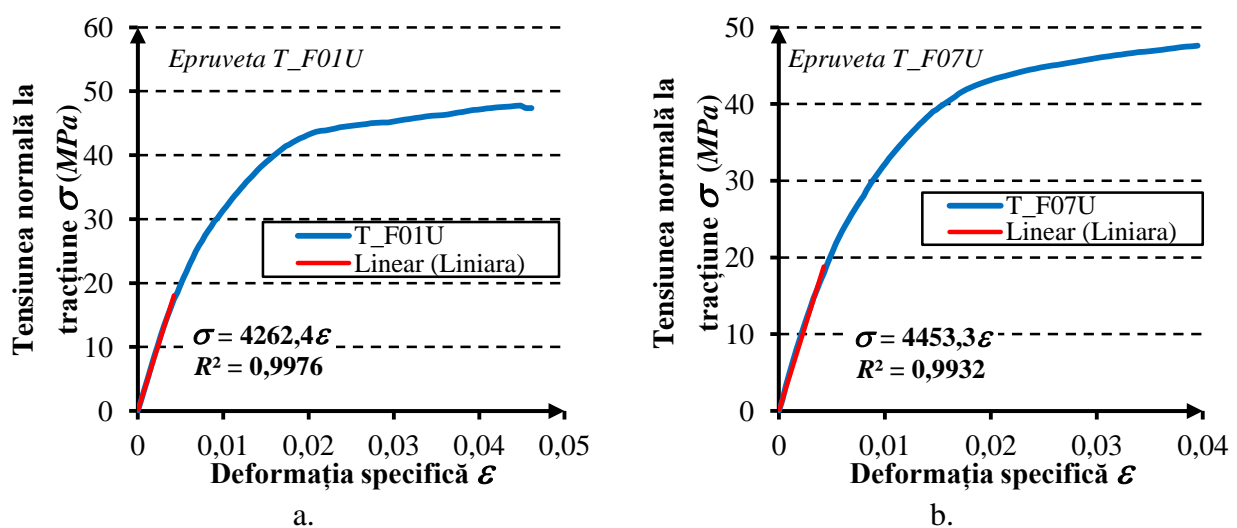
În figura 1.17,a se prezintă curbele caracteristice tensiune – deformație ( $\sigma - \varepsilon$ ) corespunzătoare cazului în care forța de tracțiune care soliciță epruveta, este paralelă cu direcția bățaturii țesăturii de in utilizate pentru armare (lungimea epruvetei de tracțiune este paralelă cu direcția bățaturii).

În figura 1.17,b prezintă comparativ curbele caracteristice tensiune-deformație ( $\sigma - \varepsilon$ ) înregistrate în cazul aplicării forței pe direcția urzelii corespunzătoare țesăturii de in.

În ambele cazuri de solicitare la tracțiune (pe direcția bățaturii și respectiv, pe direcția urzelii țesăturii de in), curbele corespunzătoare materialului compozit in / epoxi sunt localizate sub cele înregistrate în cazul compozitului *Hibrid 1* sticlă / in / epoxy (Fig. 1.17).



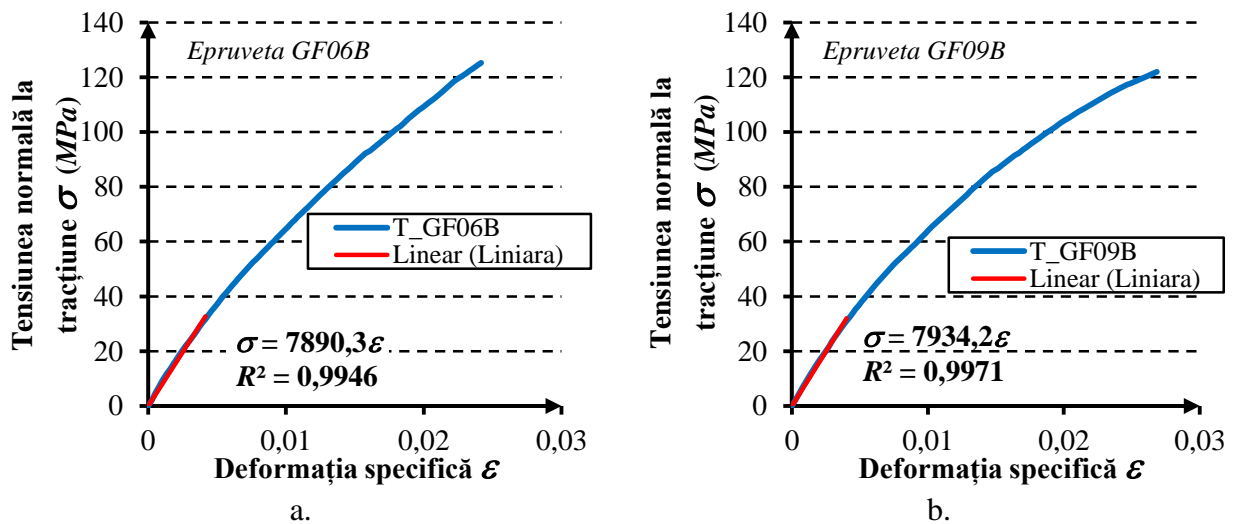
**Fig. 1.18.** Aproximarea datelor experimentale pe porțiunea liniară în vederea determinării modului de elasticitate  $E$  în cazul materialului compozit in / epoxi în direcția bățaturii pentru: a.Epruveta 2 de tracțiune; b. Epruveta 6 de tracțiune



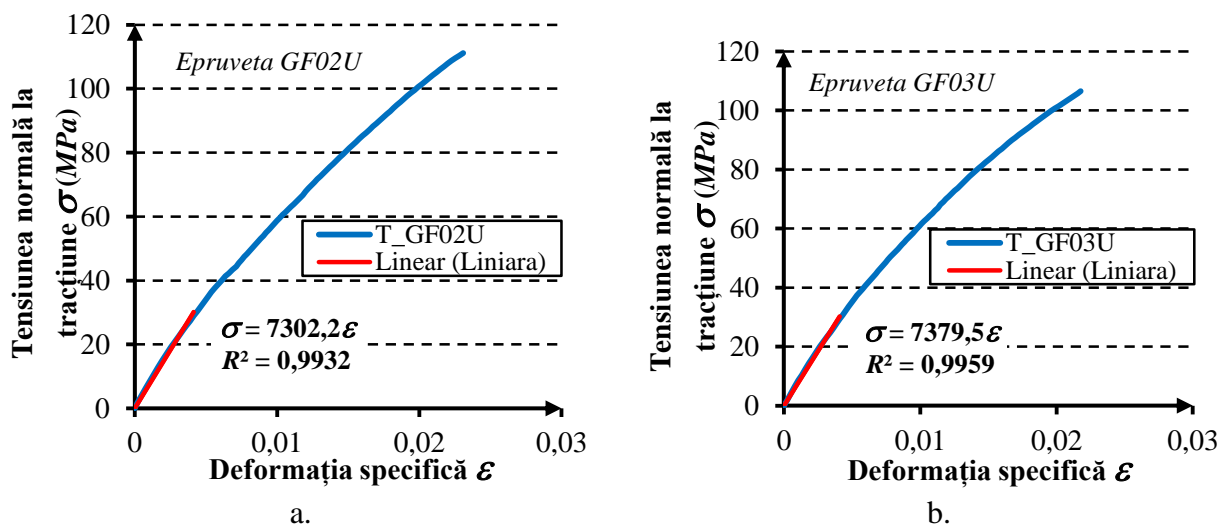
**Fig. 1.19.** Aproximarea datelor experimentale pe porțiunea liniară în vederea determinării modului de elasticitate  $E$  în cazul materialului compozit in / epoxi în direcția urzelii: a.Epruveta 1 de tracțiune; b. Epruveta 7 de tracțiune

Aceasta înseamnă că, modulul de elasticitate  $E$  corespunzător materialului compozit *Hibrid 1* este mai mare decât modulul de elasticitate corespunzător materialului compozit ranforsat doar cu țesătură de in.

Modulul de elasticitate  $E$  la tracțiune s-a determinat prin aproximarea datelor experimentale de pe porțiunea liniară a curbelor tensiune-deformație specifică ( $\sigma - \varepsilon$ ), prin utilizarea metodei celor mai mici pătrate.



**Fig. 1.20.** Aproximarea datelor experimentale pe porțiunea liniară în vederea determinării modulului de elasticitate  $E$  în cazul materialului compozit *Hibrid 1* sticlă-E / in / epoxi în direcția bătăturii: a.Epruveta 6 de tracțiune; b. Epruveta 9 de tracțiune



**Fig. 1.21.** Aproximarea datelor experimentale pe porțiunea liniară în vederea determinării modulului de elasticitate  $E$  în cazul materialului compozit *Hibrid 1* sticlă-E / in / epoxi în direcția urzelii: a.Epruveta 2 de tracțiune; b. Epruveta 3 de tracțiune

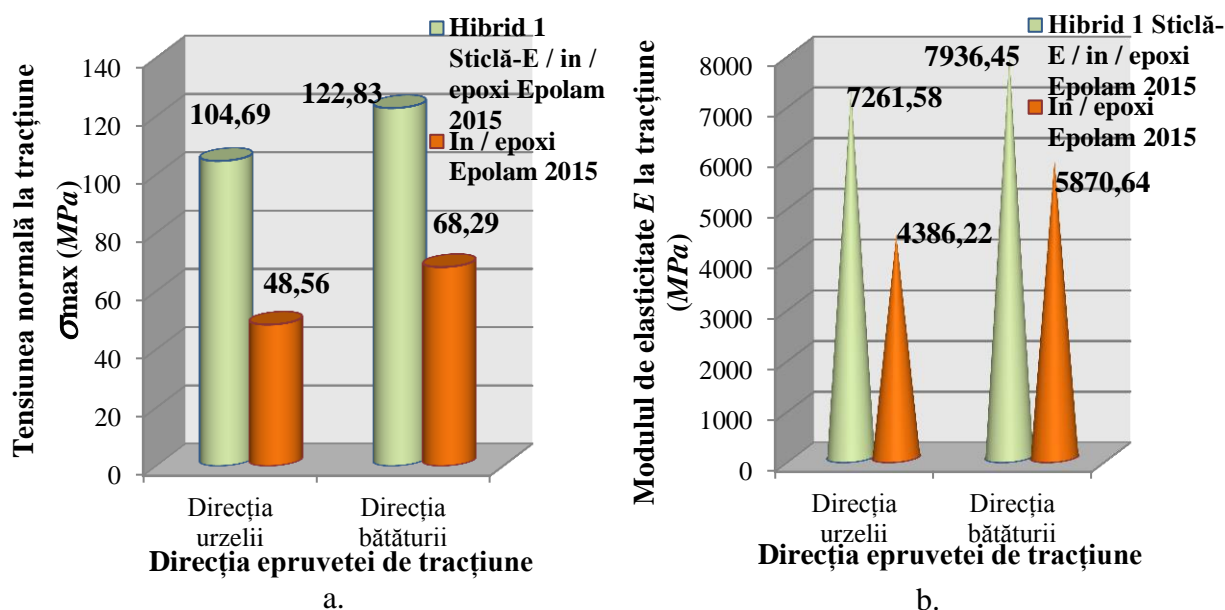
Figurile 1.18...1.21 prezintă ca exemplu, aproximarea datelor experimentale pentru două epruvete din fiecare din cele patru variante de epruvete testate. Panta dreptei care aproximează datele experimentale și trece prin origine, reprezintă modulul de elasticitate  $E$  la tracțiune (Fig. 1.18...1.21). Se menționează faptul că pentru toate epruvetele testate, datele experimentale s-au



aproximat pentru  $\varepsilon = 0 \div 0,004$  ( $\varepsilon = 0 \div 0,4\%$ ).

În figurile 1.18 și 1.19 se prezintă aproximarea datelor experimentale pe porțiunea liniară în cazul materialului compozit *in / epoxi* solicitat la tracțiune pe direcția paralelă cu direcția bătăturii țesăturii de in (Fig. 1.18) și respectiv, cu direcția urzelii țesăturii de in (Fig. 1.19).

În aceeași manieră, figurile 1.20 și 1.21 prezintă aproximarea datelor experimentale în scopul determinării modulului de elasticitate  $E$  la tracțiune în cazul materialului compozit *Hibrid 1 sticlă-E / in / epoxi* pe direcția bătăturii (Fig. 1.20) și respectiv, pe direcția urzelii (Fig. 1.21).



**Fig. 1.22.** Comparația proprietăților de tracțiune în cazul materialelor compozite testate: a. Tensiunea normală maximă  $\sigma_{max}$ ; b. Modulul de elasticitate  $E$

În figura 1.22 se prezintă în mod comparativ diferența în ceea ce privește comportarea mecanică la tracțiune în cazul celor două materiale compozite analizate, în termenii rezistenței la tracțiune (Fig. 1.22, a) și a modulului lui *Young*  $E$  la tracțiune (Fig. 1.22, b).

În ceea ce privește materialul compozit *in / epoxi*, se poate observa că: valoarea maximă a tensiunii la tracțiune  $\sigma_{max}$  este mai mare cu 40,63% (Fig. 1.22, a) pe direcția bătăturii (68,29 MPa) decât valoarea corespunzătoare pe direcția urzelii (48,56 MPa); modulul de elasticitate al lui *Young*  $E$  înregistrat la încercarea de tracțiune este mai mare cu 33,84% (Fig. 1.22, b) pe direcția bătăturii (5870,64 MPa) decât valoarea înregistrată pe direcția urzelii (4386,22 MPa).

În aceeași manieră, rezultatele obținute în cazul materialului compozit *Hibrid 1 sticlă-E / in / epoxi* conduc la următoarele aspecte: valoarea maximă a tensiunii la tracțiune  $\sigma_{max}$  este mai

mare cu 17,32% (Fig. 1.22, a) pe direcția bătăturii (122,83 MPa) decât valoarea corespunzătoare pe direcția urzelii (104,69 MPa); valoarea modulului de elasticitate  $E$  înregistrat la solicitarea de tracțiune este mai mare cu 9,29% (Fig. 1.22, b) pe direcția bătăturii (7936,45 MPa) decât cea înregistrată pe direcția urzelii (7261,58 MPa).

Se poate observa de asemenea că proprietățile de tracțiune măsurate pe direcția bătăturii cresc în cazul materialului compozit *Hibrid 1* față de cele corespunzătoare materialului compozit in / epoxi, după cum urmează: cu 35,19% în cazul modulului lui *Young E*; cu 79,86% pentru valoarea maxima a tensiunii normale la tracțiune  $\sigma_{\max}$ . Proprietățile de tracțiune măsurate pe direcția urzelii materialului compozit *Hibrid 1*, sunt de asemenea îmbunătățite: modulul de elasticitate a lui *Young E* crește cu 65,55%; valoarea maximă a tensiunii la tracțiune  $\sigma_{\max}$  crește cu 115,58%.

În tabelul 1.3, se prezintă alte proprietăți de tracțiune ale celor două tipuri de materiale compozite testate.

**Tabelul 1.3**  
Valorile medii ale caracteristicilor mecanice determinate prin încercarea de tracțiune

Materialul compozit	Direcția forței de tracțiune	$F_{\max}$ (kN)	Lungirea $\Delta l$ la $F_{\max}$ (mm)	Deformația specifică $\varepsilon$ la $F_{\max}$	Energia de deformație $U$ până la $F_{\max}$ ( $\times 10^{-3} J$ )
<i>Hibrid 1</i> Sticlă E / in / epoxi <i>Epolam</i> 2015	Direcția urzelii	4,104	1,141	0,0229	2727,88
	Direcția bătăturii	4,607	1,221	0,0244	2894,77
In / epoxi <i>Epolam</i> 2015	Direcția urzelii	2,561	1,96	0,0400	4778,47
	Direcția bătăturii	3,715	0,99	0,0200	3541,46

În figura 1.23 se prezintă curbele forță – deplasare ( $F-w$ ) la mijlocul epruvetei de încovoiere, înregistrate în timp real în încercarea la încovoiere în cazul ambelor tipuri de materiale compozite testate. În aceeași manieră, curbele forță – deplasare ( $F-w$ ) corespunzătoare epruvetelor de încovoiere a căror lungime este paralelă cu direcția bătăturii țesăturii de in utilizată ca material de armare, sunt localizate deasupra curbelor corespunzătoare epruvetelor a căror lungime este paralelă cu direcția urzelii. Această remarcă conduce la concluzia că epruvetele debitate paralel cu direcția bătăturii corespunzătoare țesăturii de in, sunt mai rigide decât cele debitate paralel cu direcția urzelii.

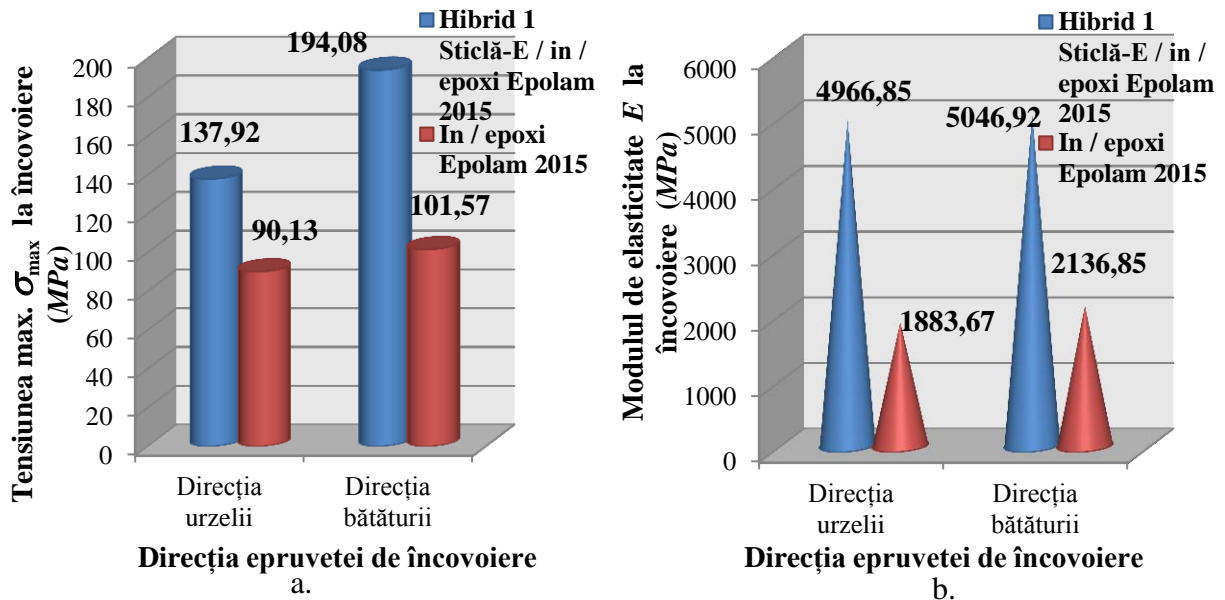
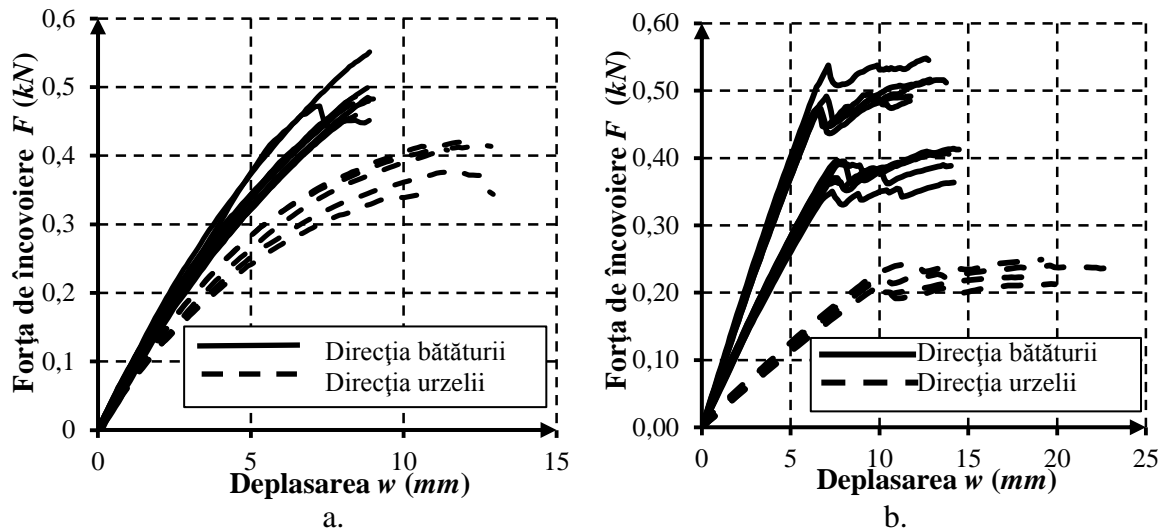


Fig. 1.24. Comparația proprietăților determinate prin încercarea de încovoiere în cazul materialelor compozite testate: a. Tensiunea normală max.  $\sigma_{\max}$ ; b. Modulul de elasticitate  $E$  la încovoiere

În figura 1.24 se prezintă în mod comparativ proprietățile mecanice determinate prin încercarea de încovoiere prin metoda celor trei puncte, în valorile tensiunii normale maxime  $\sigma_{\max}$  de încovoiere (Fig. 1.24, a) și în valorile modulului de elasticitate  $E$  la încovoiere (Fig. 1.24, b).

În ceea ce privește materialul compozit *in / epoxi*, s-a înregistrat o creștere a proprietăților mecanice corespunzătoare direcției bătăturii față de cele corespunzătoare direcției urzelii: cu 12,69% în cazul tensiunii normale maxime  $\sigma_{\max}$  la încovoiere; cu 13,44% în cazul modulului de elasticitate a lui *Young E* la încovoiere.

În cazul materialului compozit *Hibrid 1*, valoarea medie a tensiunii normale maxime  $\sigma_{\max}$  la încovoiere (Fig. 1.24, a) este mai mare cu 40,72% când lungimea epruvetelor de încovoiere este paralelă cu direcția bătăturii față de valoarea corespunzătoare epruvetelor tăiate paralel cu direcția urzelii. În schimb, valoarea medie a modulului lui *Young E* la încovoiere pe direcția bătăturii este mai mare doar cu 1,61% față de valoarea medie înregistrată pe direcția urzelii. Cele două valori medii înregistrate pentru modulul lui *Young E* la încovoiere, diferă într-adevăr foarte puțin. Explicația ar putea fi că straturile armate cu țesătură de in sunt straturi de miez în cazul materialului compozit *Hibrid 1*. Este bine-cunoscut faptul că la solicitarea de încovoiere, deformația specifică  $\varepsilon$  este distribuită liniar pe grosimea materialului compozit stratificat în timp ce tensiunea normală  $\sigma$  variază liniar pe grosimea fiecărui strat iar la interfața dintre două straturi diferite, tensiunea normală  $\sigma$  are un salt (valori diferite în punctele de la interfața a două straturi adiacente). Astfel, se constată că direcția de tăiere a epruvetelor de încovoiere din material compozit *Hibrid 1*, pe direcția bătăturii sau pe direcția urzelii țesăturii de in, nu afectează atât de mult modulul lui *Young E* la încovoiere deoarece straturile armate cu țesătură de in sunt straturi de miez.

În cazul materialului compozit *Hibrid 1*, se poate de asemenea observa că proprietățile de încovoiere măsurate pe direcția bătăturii cresc față de cele corespunzătoare materialului compozit in / epoxi după cum urmează: cu 91,08% pentru valoarea maximă a tensiunii normale  $\sigma_{\max}$  la încovoiere; cu 136,17% în cazul modulului lui *Young E* la încovoiere. S-au înregistrat de asemenea valori mai mari ale valorilor proprietăților de încovoiere pe direcția urzelii: cu 53,02% pentru valoarea medie a tensiunii normale maxime  $\sigma_{\max}$  la încovoiere; cu 163,68% în cazul modulului lui *Young E*.

În tabelul 1.4 se prezintă alte valori medii ale proprietăților de încovoiere ale materialelor compozite testate.

**Tabelul 1.4**

Valorile medii ale caracteristicilor mecanice măsurate prin încercarea de încovoiere			
Materialul compozit	Direcția lungimii epruvetei	Forța maximă $F_{\max}$ (N)	Energia de deformație $U$ până la $F_{\max}$ ( $\times 10^{-3} J$ )
In / epoxi <i>Epolam 2015</i>	Direcția urzelii	391,5	3226,8
	Direcția bătăturii	481,3	2340,8
<i>Hibrid 1</i> Sticlă-E / in / epoxi <i>Epolam 2015</i>	Direcția urzelii*	231,65	3489
	Direcția bătăturii	454,86	4354

\*Lățimea epruvetelor a fost  $b=10$  mm în cazul epruvetelor tăiate pe direcția urzelii.

### 1.4.2. Rezultate obținute cu modelul analitic

Pentru a calcula toți termenii matricei modul de elasticitate generalizată redusă transformată notată cu  $\overline{Q}'$  corespunzătoare stratului din material compozit în / epoxi, se utilizează rezultatele

experimentale obținute în cazul epruvetelor a căror lungime este paralelă cu direcția bătăturii:

$E_1' = 2136,85 \text{ MPa}$ ;  $E_2' = 1883,67 \text{ MPa}$ . Coeficientul lui Poisson  $\nu_{12}' = 0,337$  a fost determinat experimental prin metoda corelării digitale a imaginilor (prezentată în Capitolul 3) la Universitatea Politehnică București (Catedra de Rezistența Materialelor) în 2011, iar rezultatele au fost publicate în colectiv de autori în lucrarea (Terciu, Curtu și Cerbu, 2012). Celălalt coeficient de contracție transversală  $\nu_{21}' = 0,297$  s-a calculat utilizând relația (1.7) dintre constantele elastice ale unui strat. Coeficientul  $\Delta'$  se calculează cu relația  $\Delta' = 1 - \nu_{12}' \cdot \nu_{21}' = 0,8999 \cong 0,9$ .

Cu datele prezentate, se calculează componentele matricei  $\overline{Q}'$  corespunzătoare stratului din material compozit în / epoxi prin utilizarea relației (1.6):

$$\overline{Q}_{11}' = 2374,278 \text{ MPa}; \quad \overline{Q}_{22}' = 2092,967 \text{ MPa}; \quad \overline{Q}_{12}' = 705,33 \text{ MPa}. \quad (1.29)$$

Înlocuind rezultatele (1.29) în relația (1.24), se obține valoarea teoretică a modulului de elasticitate  $E$  la încovoiere corespunzător grinzii stratificate din material compozit în / epoxi, pe direcția bătăturii țesăturii de in utilizată ca material de ranforsare:

$$(E_x)_{\text{flax/epoxy}} = 2136,58 \text{ MPa}. \quad (1.30)$$

Pentru a calcula modulul de elasticitate  $E_x''$  la încovoiere, corespunzător grinzii fabricate din material compozit Hibrid 1 sticlă-E / in / epoxi, este necesar să se calculeze termenii  $\overline{Q}_{ij}''$  ( $i, j = 1, 2$ ) ai matricei  $\overline{Q}''$  corespunzătoare stratului din material compozit sticlă-E / epoxi.

În acest scop, se utilizează rezultatele obținute în cazul încovoierii epruvetelor fabricate din material compozit sticlă-E / epoxi publicate în lucrarea (Cerbu *et al.*, 2011):

$E_1'' = E_2'' = 6155 \text{ MPa}$ . Se re-amintește că modulelele de elasticitate  $E_1''$  și  $E_2''$  corespunzătoare direcției bătăturii și respectiv, direcției urzelii țesăturii de sticlă, au aceeași valoare datorită particularității de fabricare a țesăturii de sticlă utilizată pentru armare (subcapitolul 1.1).

Coeficientul lui Poisson  $\nu_{21}'' = 0,15$  a fost calculat prin înlocuirea egalității  $E_1'' = E_2''$  în relația (1.7). În acest caz, coeficientul  $\Delta''$  se calculează cu relația  $\Delta'' = 1 - \nu_{12}'' \cdot \nu_{21}'' = 0,9775$ .

Componentele matricei  $\left[ \overline{Q}'' \right]$  corespunzătoare stratului din sticlă-E / epoxi se calculează utilizând relația (1.6):

$$\overline{Q_{11}}'' = \overline{Q_{22}}'' = 6296,6752 \text{ MPa}; \quad \overline{Q_{12}}'' = 944,5013 \text{ MPa}. \quad (1.31)$$

Înlocuind rezultatele (1.29) și (1.31) în relația (1.26), se calculează valoarea teoretică a modulului de elasticitate  $(E_x)_{\text{Hibrid1}}$  corespunzător grinzii stratificate din material compozit *Hibrid 1* sticlă-E / in / epoxi pe direcția bătăturii țesăturii de in:

$$(E_x)_{\text{Hibrid1}} = 4842,47 \text{ MPa}. \quad (1.32)$$

Înlocuind rezultatele (1.29) și (1.31) în relația (1.28), se calculează valoarea teoretică a modulului de elasticitate  $(E_x)_{\text{Hibrid2}}$  corespunzător grinzii stratificate din material compozit *Hibrid 2* sticlă-E / in / epoxi pe direcția bătăturii țesăturii de in:

$$(E_x)_{\text{Hibrid2}} = 4842,47 \text{ MPa}. \quad (1.33)$$

Toate datele referitoare la proprietățile elastice  $(E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{21})$  ale straturilor ranforsate cu țesătură de in sau cu țesătură de sticlă, precum și componentele matricelor  $\left[ \overline{Q} \right]$ , se sintetizează în tabelul 1.5.

**Tabelul 1.5**

Proprietățile elastic ale straturilor și componentele matricelor  $\left[ \overline{Q} \right]$  corespunzătoare fiecărui strat în coordonate de material cu axa *I* paralelă cu direcția bătăturii sau cu direcția urzelii

Tip strat	Direcția	$E_1$	$E_2$	$\nu_{12}$	$\nu_{21}$	$\Delta$	$\overline{Q}_{11}$	$\overline{Q}_{12}$	$\overline{Q}_{22}$
Strat in / epoxi	Bătătură	2136,85	1883,67	0,337	0,297	0,9	2374,278	705,330	2092,967
	Urzeală	1883,67	2136,85	0,297	0,337	0,9	2092,967	705,161	2374,278
Strat sticlă / epoxi	Bătătură sau urzeală	6155	6155	0,15	0,15	0,9775	6296,6752	944,5013	6296,6752

**Tabelul 1.6**

Componentele matricei de rigiditate de încovoiere  $[D]$  corespunzătoare materialelor compozite testate la încovoiere, pe direcția bătăturii și respectiv, pe direcția urzelii de in

Tipul materialului compozit	Direcția epruvetei de încovoiere	$D_{11}$	$D_{12}$	$D_{22}$	Modul de elasticitate echivalent $E_x$ (MPa)
Material compozit in / epoxi (8 straturi)	Bătătură	31155,275916	9255,340260	27463,912974	2136,58
	Urzeală	27463,912974	9253,122642	31155,275916	1883,53
<i>Hibrid 1</i> Sticlă-E / in / epoxi (8 straturi)	Bătătură	24692,327675	4276,605326	24230,907307	4842,47
	Urzeală	24230,907307	4276,328124	24692,327675	4752,00
<i>Hibrid 2</i> Sticlă-E / in / epoxi (8 straturi alternative)	Bătătură	20998,900412	4051,395651	20272,590574	4084,20
	Urzeala	20272,590574	4050,959314	20998,900412	3942,97

S-a realizat un program în MATLAB ce permite calculul componentelor matricei de rigiditate la încovoiere notată cu  $[D]$  cunoscând proprietățile elastice ale fiecărui strat din tabelul 1.5. Apoi, cu relația (1.19) se calculează modul de elasticitate echivalent  $E_x$  corespunzător fiecărui tip de material compozit studiat, atât pe direcția corespunzătoare bătăturii țesăturii de in cât și pe direcția urzelii. În tabelul 1.6 se prezintă toate rezultatele obținute cu programul Matlab pentru componentele matricei  $[D]$  care intervin în relația (1.19), precum și rezultatele pentru modulul de elasticitate echivalent  $E_x$ .

Se observă că pe direcția bătăturii s-au obținut aceleași rezultate cu (1.30), (1.32), (1.33) pentru care s-au utilizat relațiile (1.24), (1.26) și respectiv (1.28), care au particularizat relația (1.19) a modulului de elasticitate echivalent  $E_x$  pentru fiecare material compozit analizat (vezi secțiunea 1.3.2. Cazuri particulare).

#### **1.4.3. Rezultate obținute prin modelarea cu elemente finite**

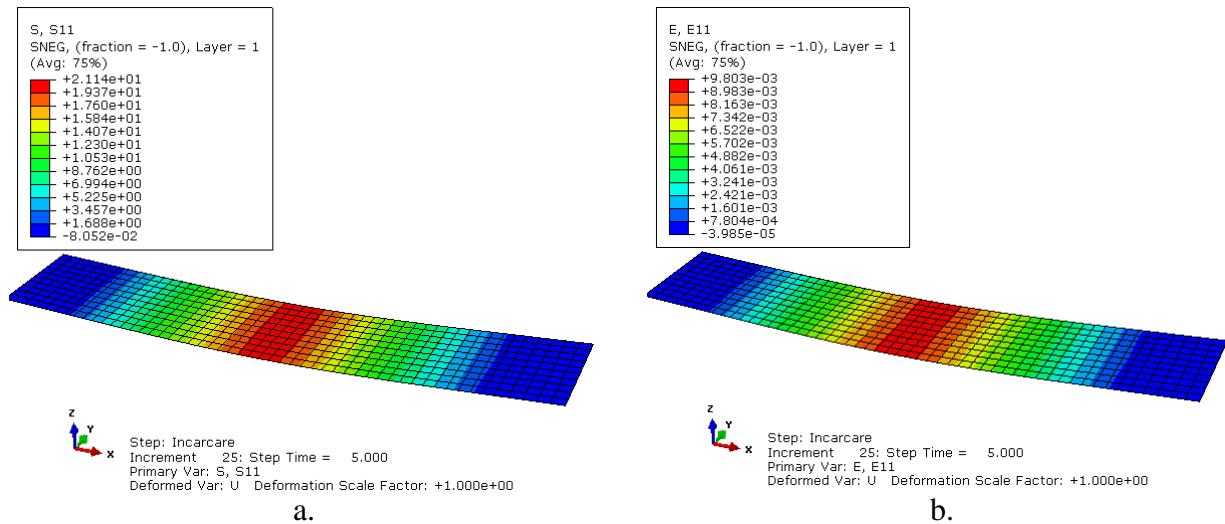
a) Distribuția tensiunii normale  $\sigma_x$ , a deformației specifice  $\varepsilon_x$ , deplasării verticale  $w$  (pe direcția axei Oz)

În cele ce urmează, se prezintă rezultatele obținute prin analiza cu elemente finite în cazul **materialului compozit in / epoxi** pentru:

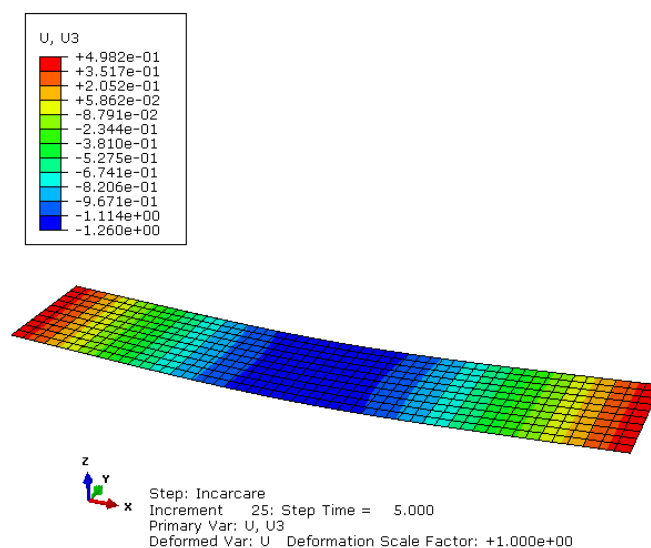
- cazul epruvetei având lungimea paralelă cu direcția bătăturii țesăturii de in ( $F = 100 N$ ):

distribuția tensiunii normale  $\sigma_x$  (Fig. 1.25,a); distribuția deformației specifice normale  $\varepsilon_x$  (Fig. 1.25,b); distribuția deplasării verticale  $w$  (Fig. 1.26);

- cazul epruvetei având lungimea paralelă cu direcția urzelii țesăturii de in ( $F = 100 N$ ): distribuția tensiunii normale  $\sigma_x$  (Fig. 1.27,a); distribuția deformației specifice normale  $\varepsilon_x$  (Fig. 1.27,b); distribuția deplasării verticale  $w$  (Fig. 1.28).

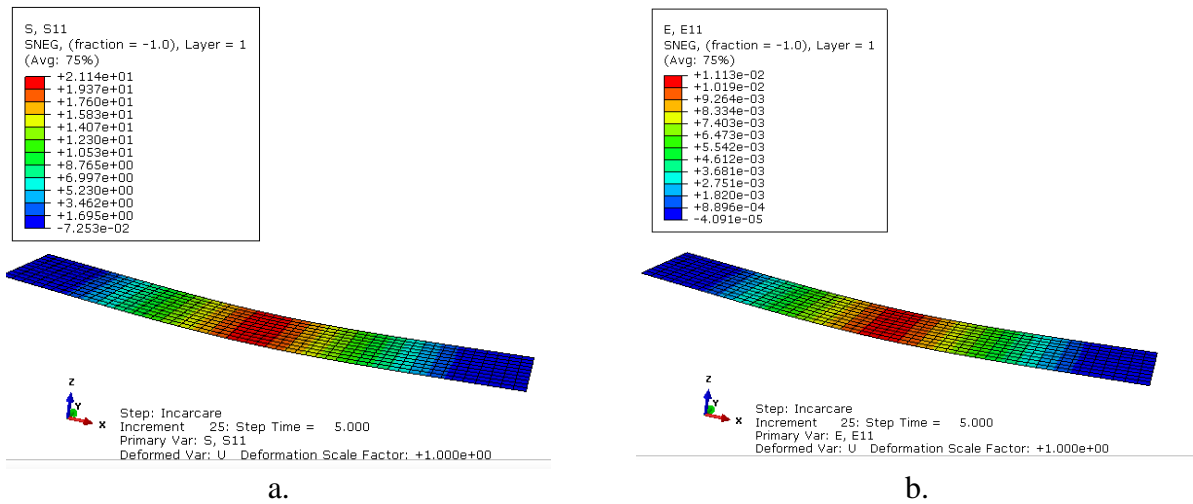


**Fig. 1.25.** Materialul compozit in / epoxi, lungimea epruvetei este paralelă cu direcția bătăturii țesăturii de in ( $F = 100 N$ ): a. Distribuția tensiunii normale  $\sigma_x$ ; b. Distribuția deformației specifice  $\varepsilon_x$

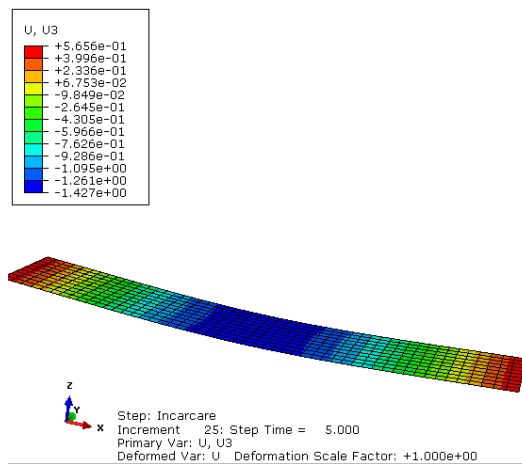


**Fig. 1.26.** Distribuția deplasării verticale  $w$  în direcția axei  $Oz$ , în cazul compozitului in / epoxi pentru cazul în care epruveta este paralelă cu direcția bătăturii țesăturii de in ( $F = 100 N$ )





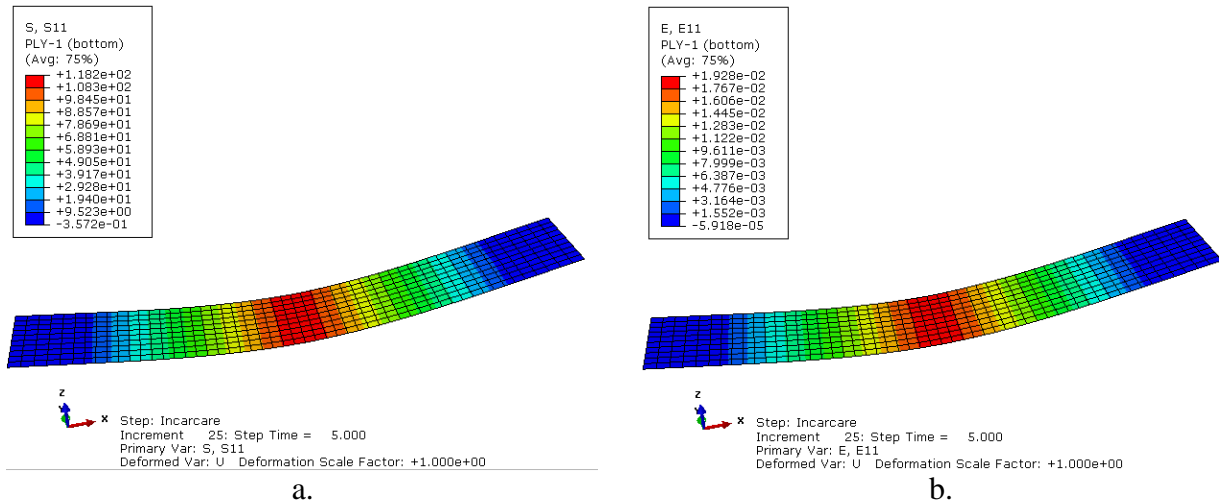
**Fig. 1.27.** Materialul compozit in / epoxi, lungimea epruvetei este paralelă cu direcția urzelii țesăturii de in ( $F = 100\text{ N}$ ). a. Distribuția tensiunii normale  $\sigma_x$ ; b. Distribuția deformației specifice  $\epsilon_x$



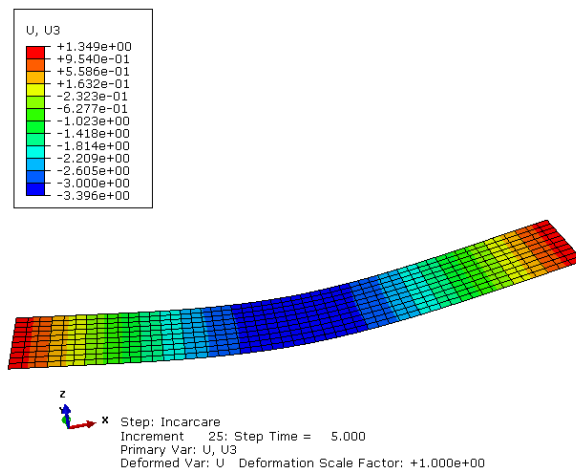
**Fig. 1.28.** Distribuția deplasării verticale  $w$  în direcția axei  $Oz$ , în cazul materialului compozit in / epoxi, pentru cazul în care epruveta este paralelă cu direcția urzelii țesăturii de in ( $F = 100\text{ N}$ )

Se prezintă rezultatele obținute prin analiza cu elemente finite în cazul *materialului compozit Hibrid 1 sticlă-E /in / epoxi* pentru:

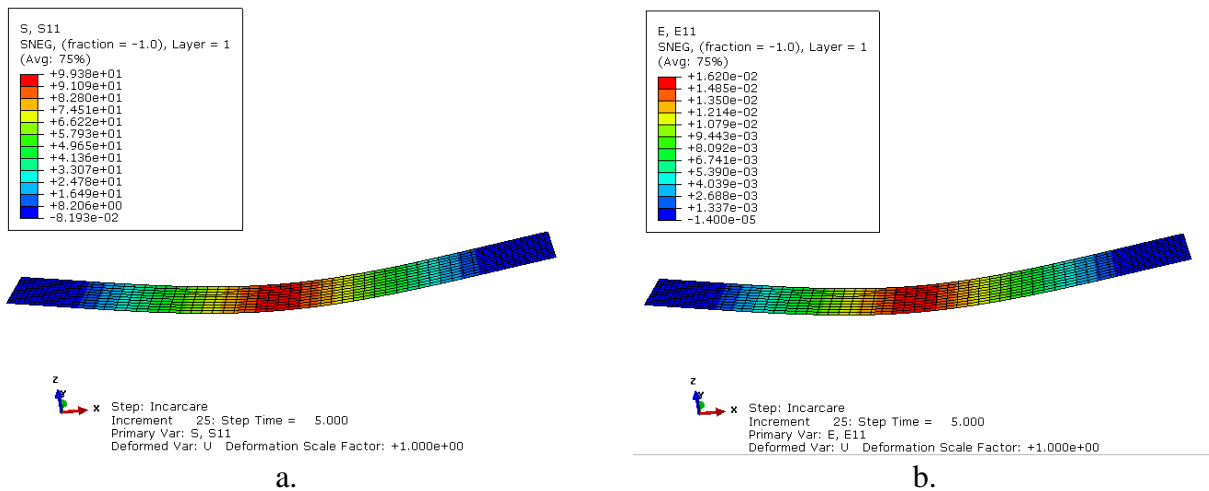
- cazul epruvetei având lungimea paralelă cu direcția bătăturii țesăturii de in ( $F = 230\text{ N}$ ): distribuția tensiunii normale  $\sigma_x$  (Fig. 1.29,a); distribuția deformației specifice normale  $\epsilon_x$  (Fig. 1.29,b); distribuția deplasării verticale  $w$  (Fig. 1.30);
- cazul epruvetei având lungimea paralelă cu direcția urzelii țesăturii de in ( $F = 100\text{ N}$ ): distribuția tensiunii normale  $\sigma_x$  (Fig. 1.31,a); distribuția deformației specifice normale  $\epsilon_x$  (Fig. 1.31,b); distribuția deplasării verticale  $w$  (Fig. 1.32).



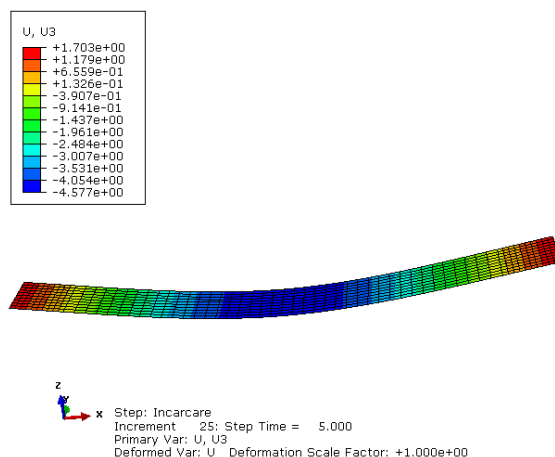
**Fig. 1.29.** Materialul compozit *Hibrid 1* sticlă /in / epoxi, lungimea epruvetei este paralelă cu direcția bătăturii țesăturii de in ( $F = 230\text{ N}$ ): a. Distribuția tensiunii normale  $\sigma_x$ ; b. Distribuția deformației specifice  $\epsilon_x$



**Fig. 1.30.** Distribuția deplasării verticale  $w$  în direcția axei  $Oz$  în cazul compozitului *Hibrid 1* sticlă /in / epoxi, pentru cazul în care epruveta este paralelă cu direcția bătăturii țesăturii de in ( $F = 230\text{ N}$ )



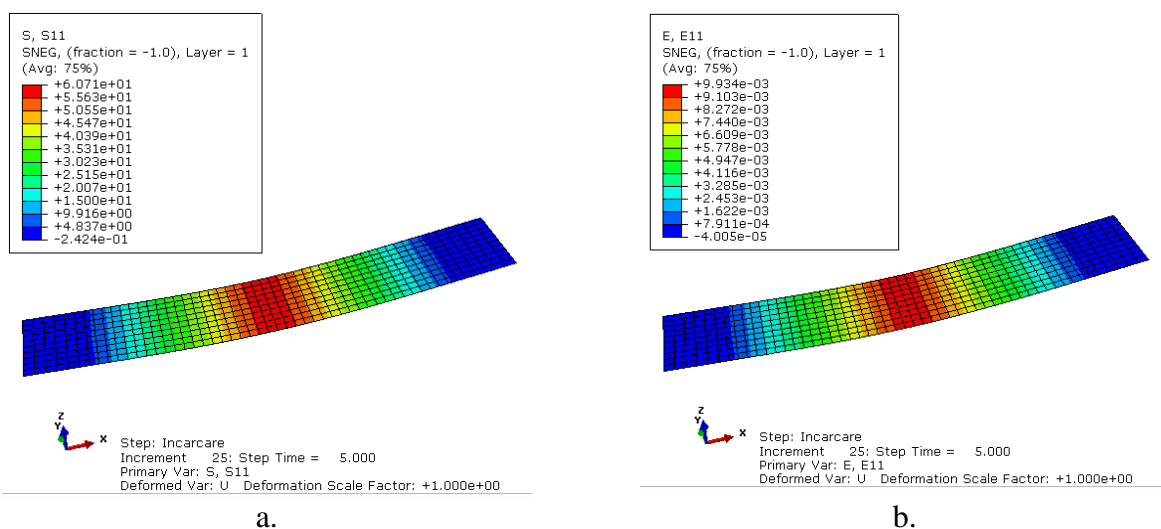
**Fig. 1.31.** Material compozit *Hibrid 1* sticlă /in / epoxi, lungimea epruvetei este paralelă cu direcția urzelii țesăturii de in ( $F = 100\text{ N}$ ): a. Distribuția tensiunii normale  $\sigma_x$ ; b. Distribuția deformației specifice  $\epsilon_x$



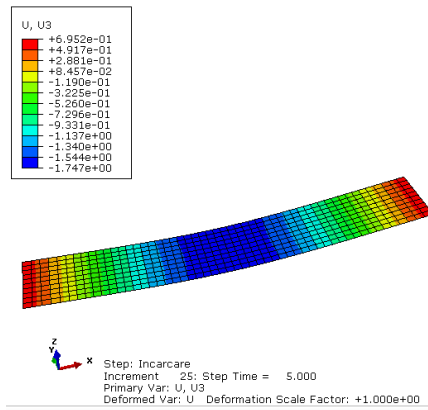
**Fig. 1.32.** Distribuția deplasării verticale  $w$  în direcția axei  $Oz$ , în cazul materialului compozit *Hibrid 1* sticlă /in / epoxi, pentru cazul în care epruveta este paralelă cu direcția urzelii țesăturii de in ( $F = 100\text{ N}$ )

Se prezintă rezultatele obținute prin analiza cu elemente finite în cazul *materialului compozit Hibrid 2 sticlă-E /in / epoxi* (cu straturi alternative) pentru:

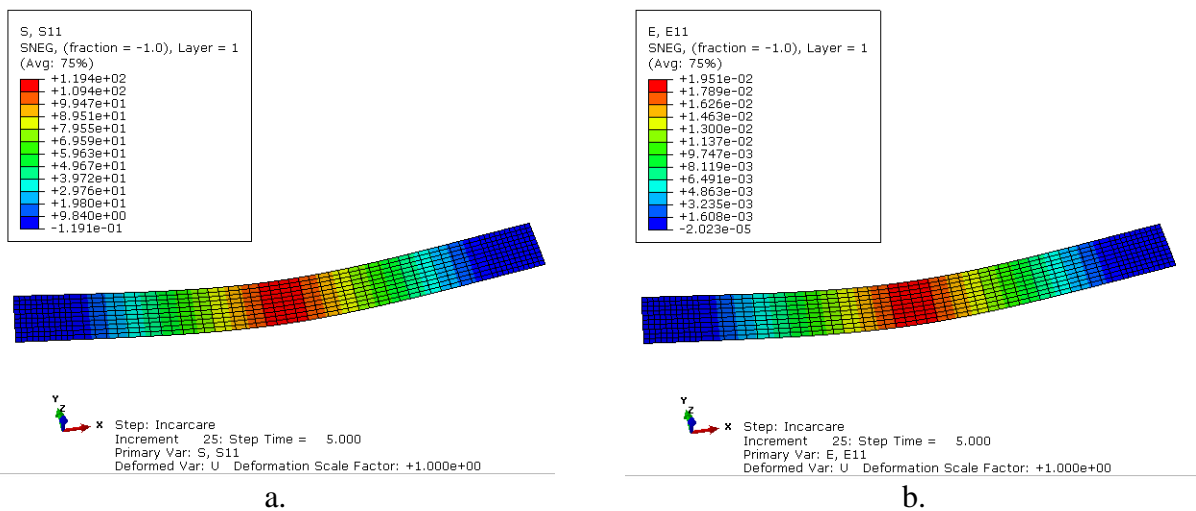
- cazul epruvetei având lungimea paralelă cu direcția bătăturii țesăturii de in ( $F = 100\text{ N}$ ): distribuția tensiunii normale  $\sigma_x$  (Fig. 1.33,a); distribuția deformației specifice normale  $\varepsilon_x$  (Fig. 1.33,b); distribuția deplasării verticale  $w$  (Fig. 1.34);
- cazul epruvetei având lungimea paralelă cu direcția urzelii țesăturii de in ( $F = 100\text{ N}$ ): distribuția tensiunii normale  $\sigma_x$  (Fig. 1.35,a); distribuția deformației specifice normale  $\varepsilon_x$  (Fig. 1.35,b); distribuția deplasării verticale  $w$  (Fig. 1.36).



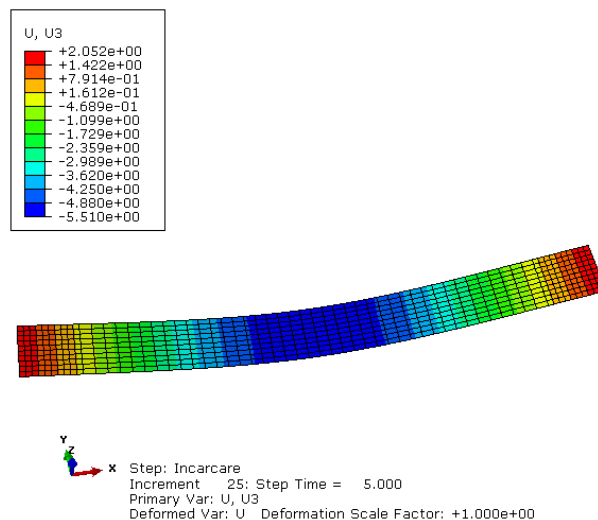
**Fig. 1.33.** Materialul compozit *Hibrid 2* sticlă /in / epoxi (straturi alternative), lungimea epruvetei este paralelă cu direcția bătăturii țesăturii de in ( $F = 100\text{ N}$ ): a. Distribuția tensiunii normale  $\sigma_x$ ; b. Distribuția deformației specifice  $\varepsilon_x$



**Fig. 1.34.** Distribuția deplasării verticale  $w$  în direcția axei  $Oz$ , în cazul materialului compozit *Hibrid 2* sticlă /in / epoxi (straturi alternative), pentru cazul în care epruveta este paralelă cu direcția bățăturii țesăturii de in ( $F = 100 N$ )



**Fig. 1.35.** Material compozit *Hibrid 2* sticlă /in / epoxi (straturi alternative), lungimea epruvetei este paralelă cu direcția urzelii țesăturii de in ( $F = 100 N$ ): a. Distribuția tensiunii normale  $\sigma_x$ ; b. Distribuția deformației specifice  $\varepsilon_x$



**Fig. 1.36.** Distribuția deplasării verticale  $w$  în direcția axei  $Oz$ , în cazul materialului compozit *Hibrid 2* sticlă /in / epoxi (straturi alternative), pentru cazul în care epruveta este paralelă cu direcția urzelii țesăturii de in ( $F = 100 N$ )

b) Distribuția tensiunilor pe grosimea elementului cel mai sollicitat situat la mijlocul grinzii

Utilizând soft-ul *Abaqus*, licența *Student*, s-au reprezentat grafic distribuțiile tensiunilor pe grosimea elementului cel mai sollicitat situat la mijlocul grinzii în cazul fiecărui material compozit studiat. În continuare, se vor prezenta aceste grafice.

- În figura 1.37 se prezintă distribuția tensiunilor pe grosimea elementului cel mai sollicitat situat la mijlocul grinzii din material compozit in / epoxi, în cazul în care lungimea epruvetei este paralelă cu direcția bătăturii corespunzătoare țesăturii de in. Datele asociate graficului din figura 1.37, sunt prezentate în tabelul 1.7.

**Tabelul 1.7**

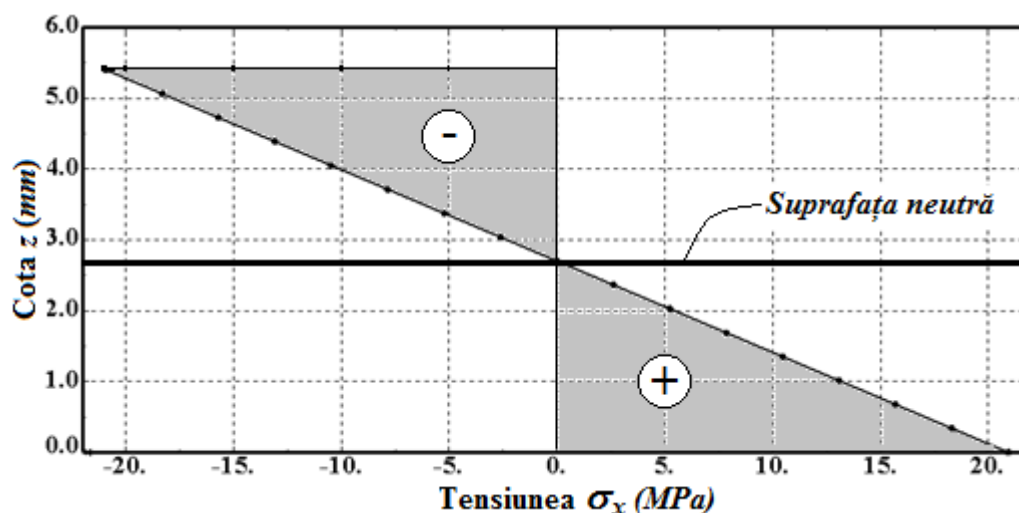
Valorile tensiunii  $\sigma_x$  ( $F = 100 N$ ) pe grosimea compozitului in / epoxi în secțiunea critică (epruveta este paralelă cu direcția bătăturii)

Cota z (mm)	Tensiunea normală $\sigma_x$ (MPa)
0	20,9217
0,3375	18,3065
0,675	15,6913
0,675	15,6913
1,0125	13,0761
1,35	10,4609
1,35	10,4609
1,6875	7,84565
2,025	5,23044
2,025	5,23044
2,3625	2,61522
2,7	0
3,0375	-2,61522
3,375	-5,23044
3,375	-5,23044
3,7125	-7,84565
4,05	-10,4609
4,05	-10,4609
4,3875	-13,0761
4,725	-15,6913
4,725	-15,6913
5,0625	-18,3065
5,4	-20,9217

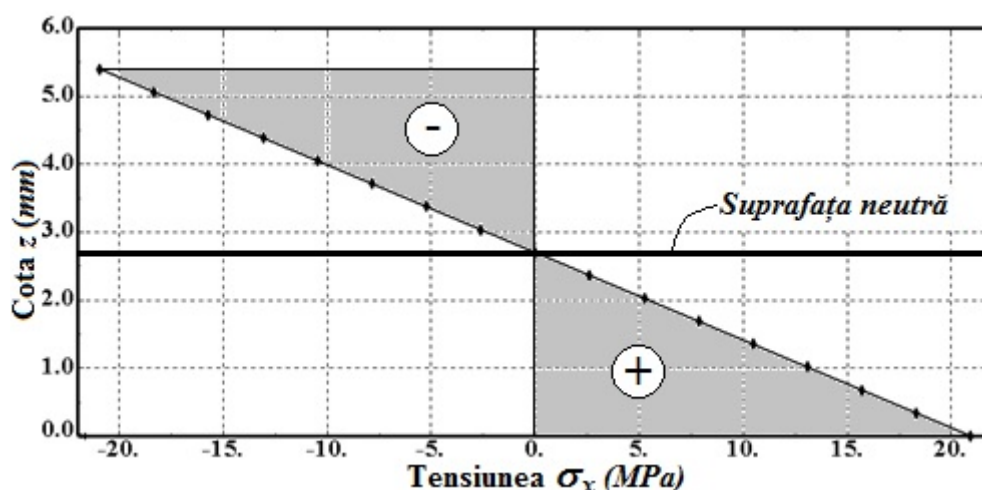
**Tabelul 1.8**

Valorile tensiunii  $\sigma_x$  ( $F = 100 N$ ) pe grosimea compozitului in / epoxi în secțiunea critică (epruveta este paralelă cu direcția urzelii)

Cota z (mm)	Tensiunea normală $\sigma_x$ (MPa)
0	20,9341
0,3375	18,3174
0,675	15,7006
0,675	15,7006
1,0125	13,0838
1,35	10,4671
1,35	10,4671
1,6875	7,8503
2,025	5,23353
2,025	5,23353
2,3625	2,61677
2,7	0
3,0375	-2,61677
3,375	-5,23353
3,375	-5,23353
3,7125	-7,8503
4,05	-10,4671
4,05	-10,4671
4,3875	-13,0838
4,725	-15,7006
4,725	-15,7006
5,0625	-18,3174
5,4	-20,9341

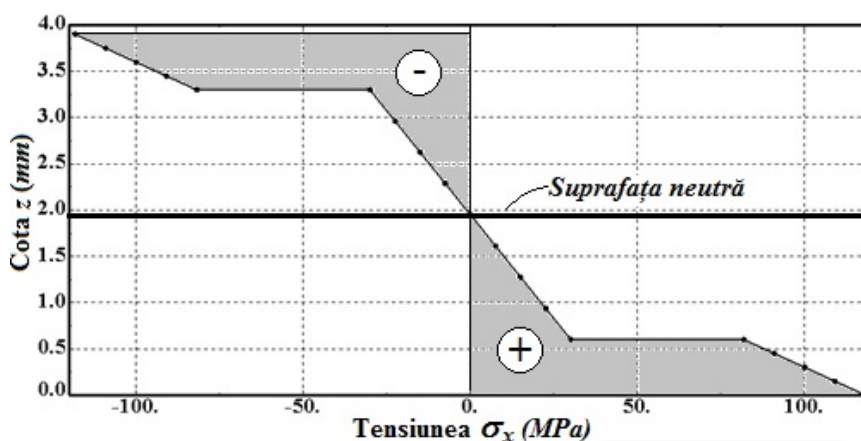


**Fig. 1.37.** Distribuția tensiunii  $\sigma_x$  ( $F = 100 N$ ) pe grosimea materialului compozit in / epoxi în secțiunea critică (epruveta este paralelă cu direcția bătăturii)



**Fig. 1.38.** Distribuția tensiunii  $\sigma_x$  ( $F = 100 N$ ) pe grosimea materialului compozit in / epoxi în secțiunea critică (epruveta este paralelă cu direcția urzelii)

- În figura 1.38 se prezintă distribuția tensiunilor pe grosimea elementului cel mai solicitat situat la mijlocul grinzii din material compozit in / epoxi, în cazul în care lungimea epruvetei este paralelă cu direcția urzelii corespunzătoare țesăturii de in. Datele asociate graficului din figura 1.38, sunt prezentate în tabelul 1.8.
- În figurile 1.39 și 1.40 se prezintă distribuția tensiunilor pe grosimea elementului cel mai solicitat situat la mijlocul grinzii din material compozit *Hibrid 1* sticlă-E / in / epoxi, în cazul în care lungimea epruvetei este paralelă cu direcția bătăturii corespunzătoare țesăturii de in pentru  $F = 230 N$  și respectiv,  $F = 100 N$ . Datele asociate graficelor sunt prezentate în tabelul 1.9 și respectiv, în tabelul 1.10.



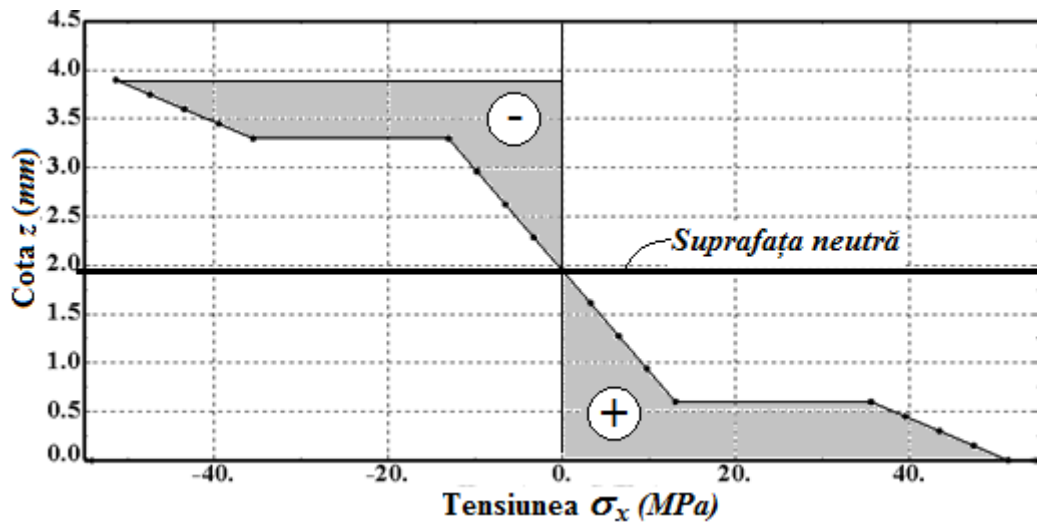
**Fig. 1.39.** Distribuția tensiunii  $\sigma_x$  ( $F = 230 N$ ) pe grosimea materialului compozit *Hibrid 1* sticlă / in / epoxi în secțiunea critică (epruveta este paralelă cu direcția bătăturii)

**Tabelul 1.9**

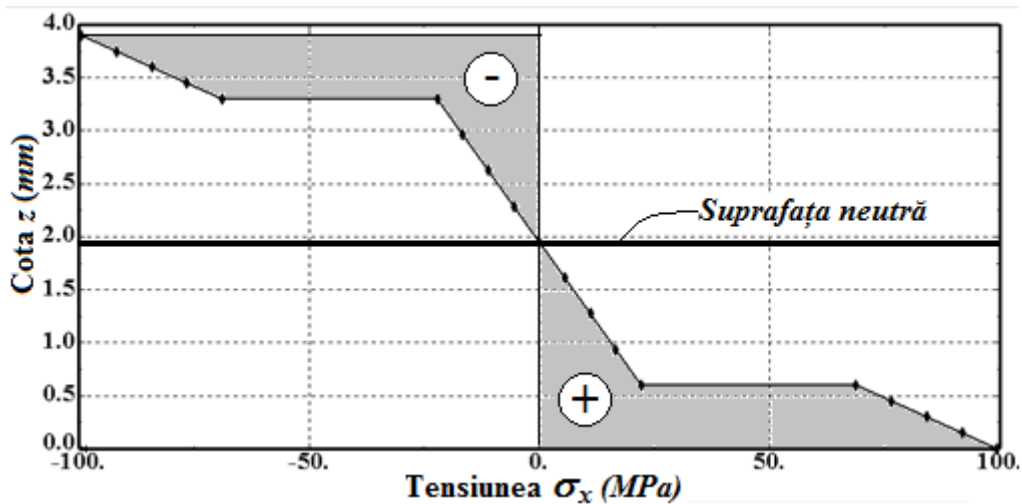
Valorile tensiunii  $\sigma_x$  ( $F = 230 N$ ) pe grosimea materialului compozit *Hibrid 1* sticlă / in / epoxi în secțiunea critică (epruveta este paralelă cu direcția bătăturii)

Cota $z$ (mm)	Tensiunea normala $\sigma_x$ (MPa)
0	118,117
0,15	109,031
0,30	99,9448
0,30	99,9448
0,45	90,8589
0,60	81,773
0,60	30,009
0,9375	22,5068
1,275	15,0045
1,275	15,0045
1,6125	7,50225
1,95	0
2,2875	-7,50225
2,625	-15,0045
2,625	-15,0045
2,9625	-22,5068
3,3	-30,009
3,3	-81,773
3,45	-90,8589
3,6	-99,9448
3,6	-99,9448
3,75	-109,031
3,9	-118,117

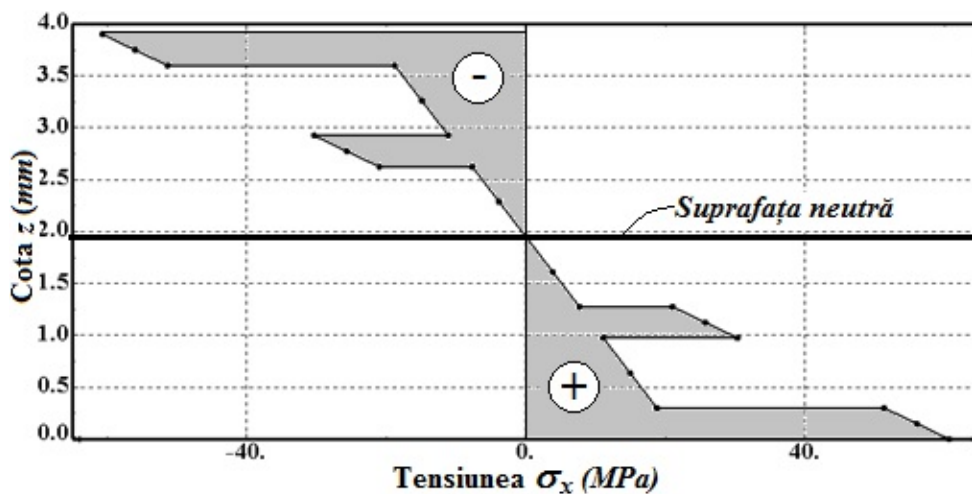
- În figura 1.41 se prezintă distribuția tensiunilor pe grosimea elementului cel mai solicitat situat la mijlocul grinzii din material compozit *Hibrid 1* sticlă-E / in / epoxi, în cazul în care lungimea epruvetei este paralelă cu direcția urzelii corespunzătoare țesăturii de in. Datele asociate graficului sunt prezentate în tabelul 1.11.



**Fig. 1.40.** Distribuția tensiunii  $\sigma_x$  ( $F = 100 N$ ) pe grosimea materialului compozit *Hibrid 1* sticlă / in / epoxi în secțiunea critică (epruveta este paralelă cu direcția bățăturii)



**Fig. 1.41.** Distribuția tensiunii  $\sigma_x$  ( $F = 100 N$ ) pe grosimea materialului compozit *Hibrid 1* sticlă / in / epoxi în secțiunea critică (epruveta este paralelă cu direcția urzelii)



**Fig. 1.42.** Distribuția tensiunii  $\sigma_x$  ( $F = 100 N$ ) pe grosimea materialului compozit *Hibrid 2* sticlă / in / epoxi (straturi alternative) în secțiunea critică (epruveta pe direcția bățăturii)



**Tabelul 1.10**

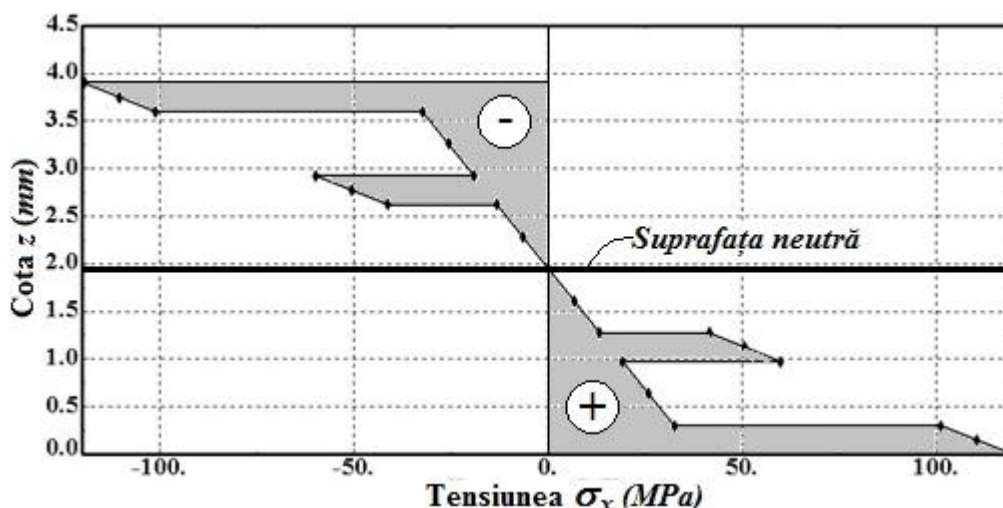
Valorile tensiunii  $\sigma_x$  ( $F = 100 N$ ) pe grosimea compozitului *Hibrid 1* sticlă / in / epoxi în secțiunea critică (epruveta pe direcția bătăturii)

Cota z (mm)	Tensiunea normală $\sigma_x$ (MPa)
0	51,355
0,15	47,4046
0,3	43,4542
0,45	39,5038
0,60	35,5535
0,60	13,0474
0,9375	9,78554
1,275	6,5237
1,6125	3,26185
1,95	0
2,2875	-3,26185
2,625	-6,5237
2,9625	-9,78554
3,3	-13,0474
3,3	-35,5535
3,45	-39,5038
3,6	-43,4542
3,75	-47,4046
3,9	-51,355

**Tabelul 1.11**

Valorile tensiunii  $\sigma_x$  ( $F = 100 N$ ) pe grosimea compozitului *Hibrid 1* sticlă / in / epoxi în secțiunea critică (epruveta pe direcția urzelii)

Cota z (mm)	Tensiunea normală $\sigma_x$ (MPa)
0	99,4158
0,15	91,7684
0,3	84,1211
0,45	76,4737
0,60	68,8263
0,60	22,1205
0,9375	16,5904
1,275	11,0603
1,6125	5,53013
1,95	0
2,2875	-5,53013
2,625	-11,0603
2,9625	-16,5904
3,3	-22,1205
3,3	-68,8263
3,45	-76,4737
3,6	-84,1211
3,75	-91,7684
3,9	-99,4158



**Fig. 1.43.** Distribuția tensiunii  $\sigma_x$  ( $F = 100 N$ ) pe grosimea materialului compozit *Hibrid 2* sticlă / in / epoxi (straturi alternative) în secțiunea critică (epruveta pe direcția urzelii)

- În figura 1.42 se prezintă distribuția tensiunilor pe grosimea elementului cel mai solicitat situat la mijlocul grinzii din material compozit *Hibrid 2* sticlă-E / in / epoxi, în cazul în care lungimea epruvetei este paralelă cu direcția bătăturii corespunzătoare

șesăturii de in. Datele asociate graficului sunt prezentate în tabelul 1.12.

- În figura 1.43 se prezintă distribuția tensiunilor pe grosimea elementului cel mai solicitat situat la mijlocul grinzii din material compozit *Hibrid 2* sticlă-E / in / epoxi, în cazul în care lungimea epruvetei este paralelă cu direcția urzelii corespunzătoare țesăturii de in. Datele asociate graficului sunt prezentate în tabelul 1.13.

**Tabelul 1.12**

Valorile tensiunii  $\sigma_x$  ( $F = 100 N$ ) pe grosimea compozitului *Hibrid 2* sticlă / in / epoxi în secțiunea critică (epruveta este paralelă cu direcția bătăturii)

Cota $z$ (mm)	Tensiunea normală $\sigma_x$ (MPa)
0	60,6632
0,15	55,9968
0,3	51,3304
0,3	18,7699
0,6375	14,9306
0,975	11,0913
0,975	30,3316
1,125	25,6652
1,275	20,9988
1,275	7,67861
1,6125	3,83931
1,95	0
2,2875	-3,83931
2,625	-7,67861
2,625	-20,9988
2,775	-25,6652
2,925	-30,3316
2,925	-11,0913
3,2625	-14,9306
3,6	-18,7699
3,6	-51,3304
3,75	-55,9968
3,9	-60,6632

**Tabelul 1.13**

Valorile tensiunii  $\sigma_x$  ( $F = 100 N$ ) pe grosimea compozitului *Hibrid 2* sticlă / in / epoxi în secțiunea critică (epruveta este paralelă cu direcția urzelii)

Cota $z$ (mm)	Tensiunea normală $\sigma_x$ (MPa)
0	119,443
0,15	110,255
0,3	101,067
0,3	32,36
0,6375	25,7409
0,975	19,1218
0,975	59,7216
1,125	50,5337
1,275	41,3458
1,275	13,2382
1,6125	6,61908
1,95	0
2,2875	-6,61908
2,625	-13,2382
2,625	-41,3458
2,775	-50,5337
2,925	-59,7216
2,925	-19,1218
3,2625	-25,7409
3,6	-32,36
3,6	-101,067
3,75	-110,255
3,9	-119,443

## 1.5. Comparația rezultatelor

### 1.5.1. Comparația între rezultatele obținute cu modelul analitic și cele obținute cu FEA

Valorile modului de elasticitate echivalent  $E_x$ , obținute cu modelul analitic al grinzii compozite și cele obținute prin analiza cu elemente finite sunt sintetizate în tabelul 1.14.

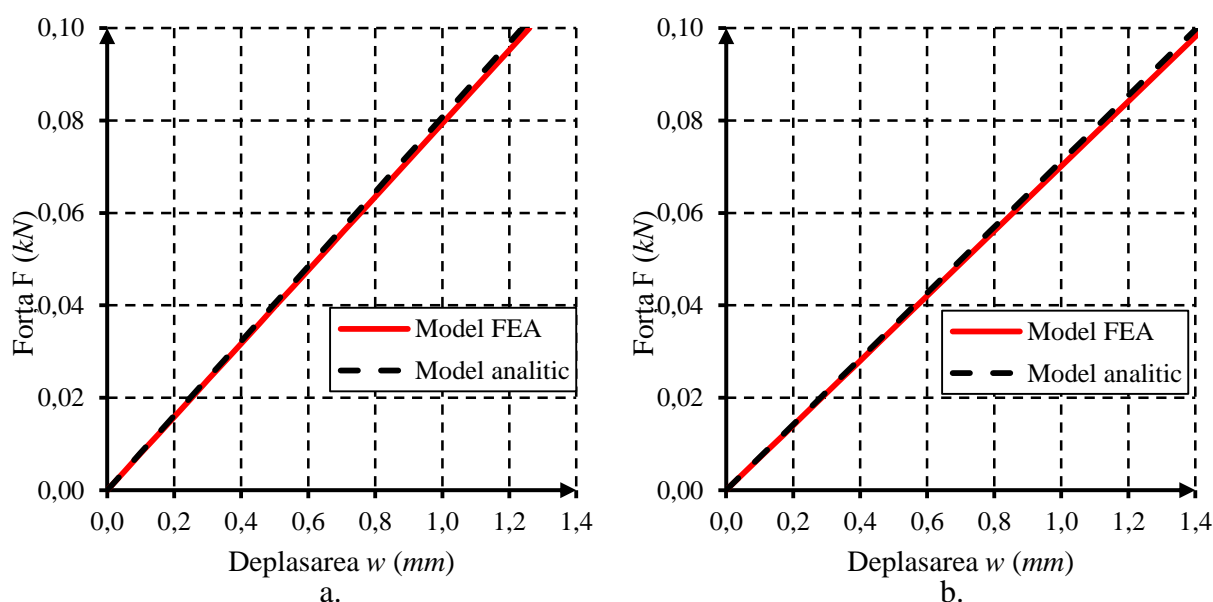
**Tabelul 1.14**

Comparația între rezultatele obținute cu modelul analitic și cele obținute cu modelul FEA în ceea ce privește modulul de elasticitate echivalent  $E_x$  în funcție de direcția epruvetei

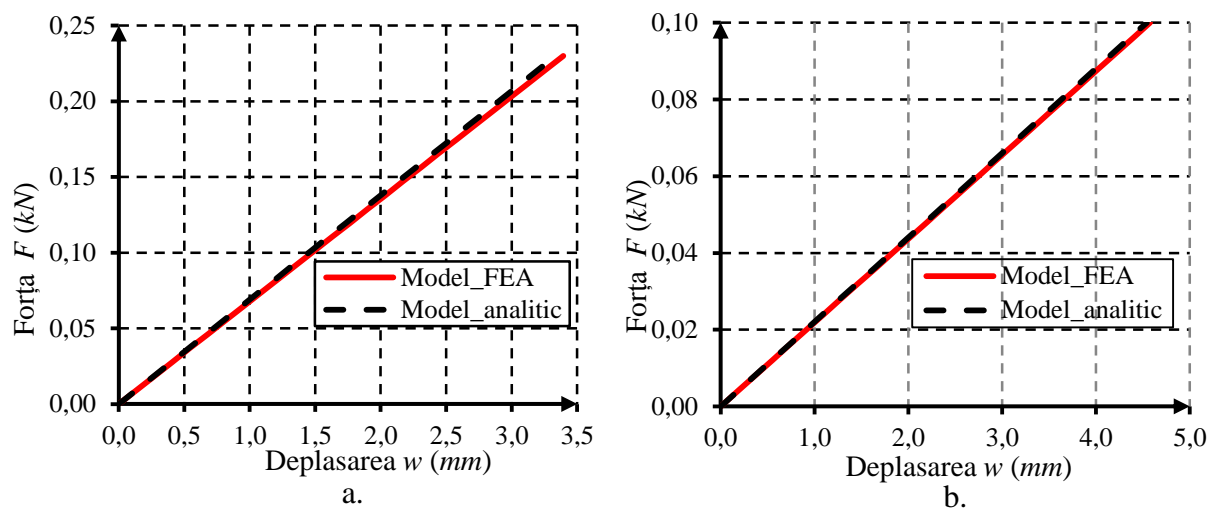
Tipul materialului compozit	Direcția epruvetei de încovoiere	Modulul de elasticitate echivalent $E_x$ (MPa)		Eroarea FEA versus model analitic (%)
		Model analitic	Model FEA	
Material compozit in / epoxi (8 straturi)	Bătătură	2136,58	2101,40	1,647
	Urzeala	1883,53	1855,27	1,501
<i>Hibrid 1</i> Sticlă-E / in / epoxi (8 straturi)	Bătătură	4842,47	4756,26	1,780
	Urzeală	4752,00	4704,06	1,009
<i>Hibrid 2</i> Sticlă-E / in / epoxi (8 straturi alternative)	Bătătură	4084,20	4018,58	1,607
	Urzeală	3942,97	3905,66	0,946

Pentru a compara rezultatele obținute prin utilizarea modelului analitic al grinzii compozite cu cele obținute prin analiza cu elemente finite (FEA), ultima coloană a tabelului 1.14 arată valorile erorilor calculate utilizând următoarea relație de calcul:

$$Eroarea = \frac{|E_{x\text{FEA}} - E_{x\text{analitic}}|}{E_{x\text{analitic}}} \cdot 100 [\%] \quad (1.34)$$



**Fig. 1.44.** Comparația între rezultatele obținute cu modelul analitic și cele obținute cu modelul FEA în ceea ce privește curba forță – deplasare ( $F-w$ ) în cazul materialului compozit in / epoxi: a. Epruveta paralelă cu direcția bătăturii; b. Epruveta paralelă cu direcția urzelii



**Fig. 1.45.** Comparația între rezultatele obținute cu modelul analitic și cele obținute cu modelul FEA în ceea ce privește curba forță – deplasare ( $F-w$ ) în cazul materialului compozit *Hibrid I* sticlă-E / in / epoxi: a. Direcția bătăturii; b. Direcția urzelii

**Tabelul 1.15**

Valorile deplasărilor  $w_{\max}$  în direcția axei  $Oz$ , calculate cu modelul analitic și cu modelul FEA în cazul materialului compozit in / epoxi pe porțiunea liniară

Forța $F$ (N)	Deplasarea maximă $w_{\max}$ (mm)			
	Direcția bătăturii		Direcția urzelii	
	Model FEA	Model analitic	Model FEA	Model analitic
0,000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
4,000	0,050408	0,049548	0,057067	0,05620
8,000	0,100816	0,099096	0,114133	0,11240
12,000	0,151224	0,148644	0,171200	0,16860
16,000	0,201632	0,198193	0,228266	0,22480
20,000	0,252040	0,247740	0,285333	0,28100
24,000	0,302448	0,297288	0,342400	0,33720
28,000	0,352856	0,346835	0,399466	0,39340
32,000	0,403264	0,396384	0,456533	0,44960
36,000	0,453671	0,445932	0,513599	0,50580
40,000	0,504079	0,495480	0,570666	0,56200
44,000	0,554487	0,545028	0,627733	0,61820
48,000	0,604895	0,594576	0,684799	0,67440
52,000	0,655303	0,644124	0,741866	0,73060
56,000	0,705711	0,693672	0,798932	0,78680
60,000	0,756119	0,743221	0,855999	0,84300
64,000	0,806527	0,792768	0,913066	0,89920
68,000	0,856935	0,842316	0,970132	0,95540
72,000	0,907343	0,891863	1,027200	1,01160
76,000	0,957751	0,941412	1,084270	1,06780
80,000	1,008160	0,990960	1,141330	1,12400
84,000	1,058570	1,040508	1,198400	1,18020
88,000	1,108970	1,090056	1,255470	1,23640
92,000	1,159380	1,139604	1,312530	1,29260
96,000	1,209790	1,189152	1,369600	1,34880
100,000	1,260200	1,238700	1,426670	1,40500

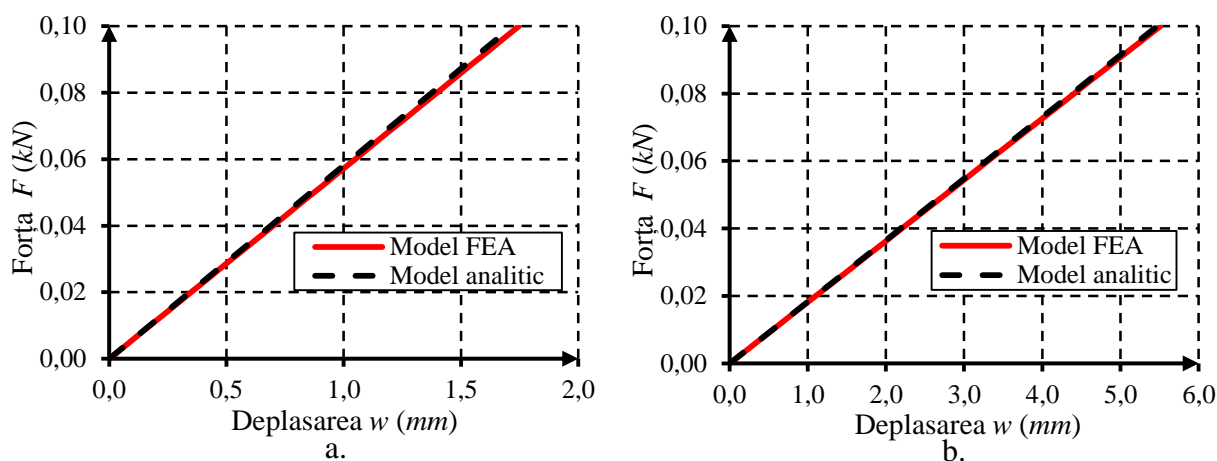
Se prezintă comparația a curbelor forță-deplasare ( $F - w$ ) la încovoiere, pe domeniul elastic, obținute cu modelul analitic și prin analiză cu elemente finite (FEA) în cazul epruvetelor fabricate din materialele compozite studiate, după se prezintă în continuare.

- În figura 1.44 se prezintă comparația pentru epruvetele din *material compozit in / epoxi* cu lungimea paralelă cu direcția bătăturii (Fig. 1.44,a) și respectiv, paralelă cu direcția urzelii (Fig. 1.44,b);
- În figura 1.45 se prezintă comparația pentru epruvete din material compozit *Hibrid 1 sticlă / in / epoxi* cu lungimea paralelă cu direcția bătăturii (Fig. 1.45,a) și respectiv, paralelă cu direcția urzelii (Fig. 1.45,b);

**Tabelul 1.16**

Valorile s deplasărilor  $w_{\max}$  în direcția axei  $Oz$ , calculate cu modelul analitic și cu modelul FEA în cazul materialului compozit *Hibrid 1 sticlă-E / in / epoxi*

Forța $F$ (N)	Direcția bătăturii - $w_{\max}$ (mm)		Forța $F$ (N)	Direcția urzelii - $w_{\max}$ (mm)	
	Model FEA	Model analitic		Model FEA	Model analitic
0,0	0	0,00000	0	0,0000	0,0000
9,2	0,1358	0,13350	4	0,1831	0,1816
18,4	0,2716	0,0000	8	0,3662	0,3633
27,6	0,4075	0,1335	12	0,5493	0,5449
36,8	0,5433	0,2669	16	0,7324	0,7265
46,0	0,6791	0,4004	20	0,9155	0,9082
55,2	0,8149	0,5339	24	1,0986	1,0898
64,4	0,9508	0,6674	28	1,2817	1,2714
73,6	1,0866	0,8008	32	1,4648	1,4531
82,8	1,2224	0,9343	36	1,6479	1,6347
92,0	1,3582	1,0678	40	1,8309	1,8164
101,2	1,4940	1,2013	44	2,0140	1,9980
110,4	1,6299	1,3347	48	2,1971	2,1796
119,6	1,7657	1,4682	52	2,3802	2,3613
128,8	1,9015	1,6017	56	2,5633	2,5429
138,0	2,0373	1,7352	60	2,7464	2,7245
147,2	2,1732	1,8686	64	2,9295	2,9062
156,4	2,3090	2,0021	68	3,1126	3,0878
165,6	2,4448	2,1356	72	3,2957	3,2694
174,8	2,5806	2,2691	76	3,4788	3,4511
184,0	2,7164	2,4025	80	3,6619	3,6327
193,2	2,8523	2,5360	84	3,8450	3,8144
202,4	2,9881	2,6695	88	4,0281	3,9960
211,6	3,1239	2,8029	92	4,2112	4,1776
220,8	3,2597	2,9364	96	4,3943	4,3593
230,0	3,3955	3,0699	100	4,5774	4,5409



**Fig. 1.46.** Comparația între rezultatele obținute cu modelul analitic și cele obținute cu modelul FEA în ceea ce privește curba forță – deplasare ( $F-w$ ) în cazul materialului compozit *Hibrid 2* sticlă-E / in / epoxi: a. Direcția bătăturii; b. Direcția urzelii

**Tabelul 1.17**

Valorile eplasărilor  $w_{\max}$  în direcția axei  $Oz$ , calculate cu modelul analitic și cu modelul FEA în cazul materialului compozit *Hibrid 1* sticlă-E / in / epoxi

Forța $F$ (N)	Direcția bătăturii $w_{\max}$ (mm)		Forța $F$ (N)	Direcția urzelii $w_{\max}$ (mm)	
	Model FEA	Model analitic		Model FEA	Model analitic
0	0,0000	0,0000	0	0,0000	0,0000
4	0,0699	0,0688	4	0,2204	0,2189
8	0,1398	0,1376	8	0,4408	0,4378
12	0,2097	0,2064	12	0,6612	0,6567
16	0,2796	0,2752	16	0,8816	0,8756
20	0,3495	0,3440	20	1,1020	1,0945
24	0,4193	0,4128	24	1,3224	1,3134
28	0,4892	0,4817	28	1,5428	1,5323
32	0,5591	0,5505	32	1,7632	1,7512
36	0,6290	0,6193	36	1,9836	1,9701
40	0,6989	0,6881	40	2,2040	2,1890
44	0,7688	0,7569	44	2,4244	2,4079
48	0,8387	0,8257	48	2,6448	2,6269
52	0,9086	0,8945	52	2,8652	2,8458
56	0,9785	0,9633	56	3,0856	3,0647
60	1,0484	1,0321	60	3,3060	3,2836
64	1,1183	1,1009	64	3,5264	3,5025
68	1,1882	1,1697	68	3,7468	3,7214
72	1,2581	1,2385	72	3,9672	3,9403
76	1,3279	1,3074	76	4,1876	4,1592
80	1,3978	1,3762	80	4,4080	4,3781
84	1,4677	1,4450	84	4,6284	4,5970
88	1,5376	1,5138	88	4,8488	4,8159
92	1,6075	1,5826	92	5,0692	5,0348
96	1,6774	1,6514	96	5,2896	5,2537
100	1,7473	1,7202	100	5,5100	5,4726

- În figura 1.46 se prezintă comparația pentru epruvete din material compozit *Hibrid 2* sticlă / in / epoxi cu lungimea paralelă cu direcția bătăturii (Fig. 1.46,a) și respectiv, paralelă cu direcția urzelii (Fig. 1.46,b);

Rezultatele asociate graficelor din figurile 1.44...1.46 sunt prezentate în continuare, în tabelele 1.15...1.17.

### 1.5.2. Comparația între rezultatele experimentale și cele obținute cu modelul analitic

În tabelul 1.18 sunt analizate comparativ rezultatele obținute pentru modulul de elasticitate echivalent  $E_x$  prin utilizarea modelului analitic al grinzii din material compozit și rezultatele obținute prin încercări experimentale.

Pentru a compara rezultatele obținute experimental cu cele obținute prin utilizarea modelului analitic al grinzii compozite, ultima coloană a tabelului 1.18 arată valorile erorilor calculate utilizând următoarea relație de calcul:

$$Eroarea = \frac{|E_{x\text{exp}} - E_{x\text{analitic}}|}{E_{x\text{analitic}}} \cdot 100 [\%] \quad (1.35)$$

**Tabelul 1.18**

Comparația între rezultatele experimentale și cele obținute cu modelul analitic referitoare la modulul de elasticitate echivalent  $E_x$  la încovoiere în funcție de direcția epruvetei

Tipul materialului compozit	Direcția epruvetei de încovoiere	Modulul de elasticitate echivalent $E_x$ la încovoiere (MPa)		Eroarea exp. versus model analitic (%)
		Model analitic	Experimental	
Material compozit in / epoxi (8 straturi)	Bătătură	2136,58	2136,85	0,013
	Urzeală	1883,53	1883,67	0,007
<i>Hibrid 1</i> Sticlă-E / in / epoxi (8 straturi)	Bătătură	4842,47	5046,92	4,222
	Urzeală	4752,00	4966,85	4,521

Analizând datele din tabelul 1.18 se observă că în cazul *materialului compozit in / epoxi*, erorile dintre valorile medii ale modulelor de elasticitate echivalente  $E_x$  determinate experimental, corespunzătoare epruvetelor tăiate pe direcția bătăturii și a urzelii țesăturii de in, sunt mici (0,013% și 0,007%) în comparație cu valorile calculate cu relația corespunzătoare modelului analitic.

În cazul materialului compozit *Hibrid 1 sticlă-E / in / epoxi*, erorile sunt puțin mai mari (4,222%

și 4,521%) dar nu depășesc pragul de 5%.

Cauzele erorilor sunt generate de: neuniformitatea grosimii straturilor; fibrele nu sunt perfect paralele unele cu altele; fibrele prezintă micro-ondulații; prezența golurilor; neuniformități ale țesăturilor de ranforsare etc.

Însă, ținând cont de tehnologia manuală utilizată pentru formarea straturilor din material compozit, erorile se înscriu în limitele acceptabile.

### 1.5.3. Comparația între rezultatele experimentale și cele obținute cu modelul FEA

În tabelul 1.19 sunt prezentate comparativ rezultatele obținute pentru modulul de elasticitate echivalent  $E_x$  prin încercări experimentale și rezultatele obținute prin utilizarea modelului cu elemente finite (FEA). În acest scop, ultima coloană a tabelului 1.19 arată valorile erorilor calculate utilizând următoarea relație de calcul:

$$Eroarea = \frac{|E_{x\text{FEA}} - E_{x\text{exp.}}|}{E_{x\text{FEA}}} \cdot 100 [\%] \quad (1.36)$$

**Tabelul 1.19**

Comparația între rezultatele experimentale și cele obținute cu modelul FEA referitoare la modulul de elasticitate echivalent  $E_x$  la încovoiere în funcție de direcția epruvetei

Tipul materialului compozit	Directia	Modulul de elasticitate echivalent $E_x$ la încovoiere (MPa)		Eroare Exp. versus FEA (%)
		Model FEA	Experimental	
Material compozit in / epoxi (8 straturi)	Bătătură	2101,40	2136,85	1,687
	Urzeală	1855,27	1883,67	1,531
Hibrid 1 Sticlă-E / in / epoxi (8 straturi)	Bătătură	4756,26	5046,92	6,111
	Urzeală	4704,06	4966,85	5,586

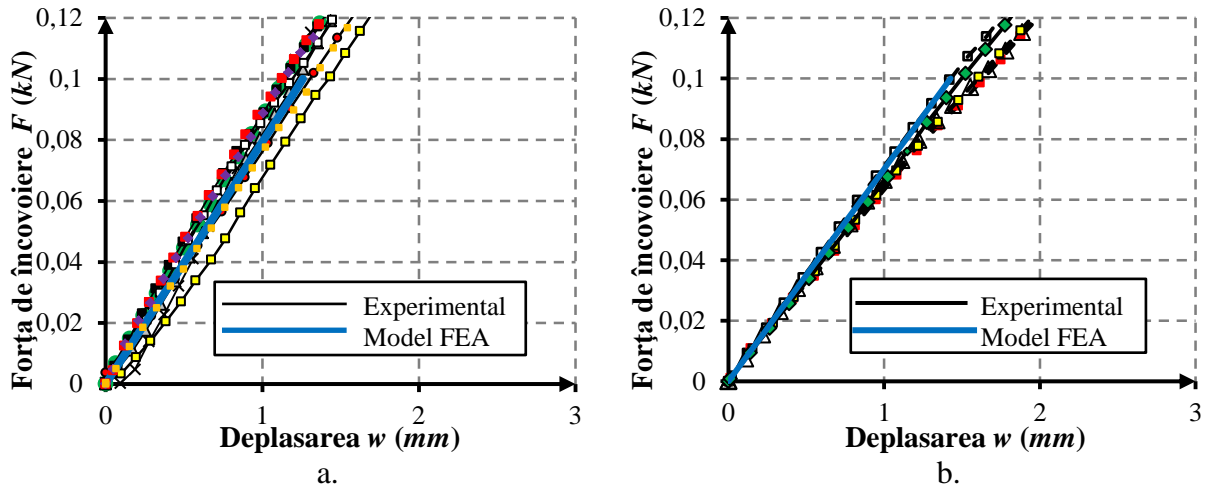
Analizând datele din tabelul 1.19 se observă că în cazul *materialului compozit in / epoxi*, erorile dintre valorile medii ale modulelor de elasticitate echivalente  $E_x$  determinate experimental, corespunzătoare epruvetelor tăiate pe direcția bătăturii și a urzelii țesăturii de in, sunt egale cu 1,687% și respectiv 1,531%, în comparație cu valorile obținute prin analiza cu elemente finite (model FEA).

În cazul materialului compozit *Hibrid 1 sticlă-E / in / epoxi*, erorile sunt egale cu 6,111% și 5,586%) dar nu depășesc pragul de 6%.

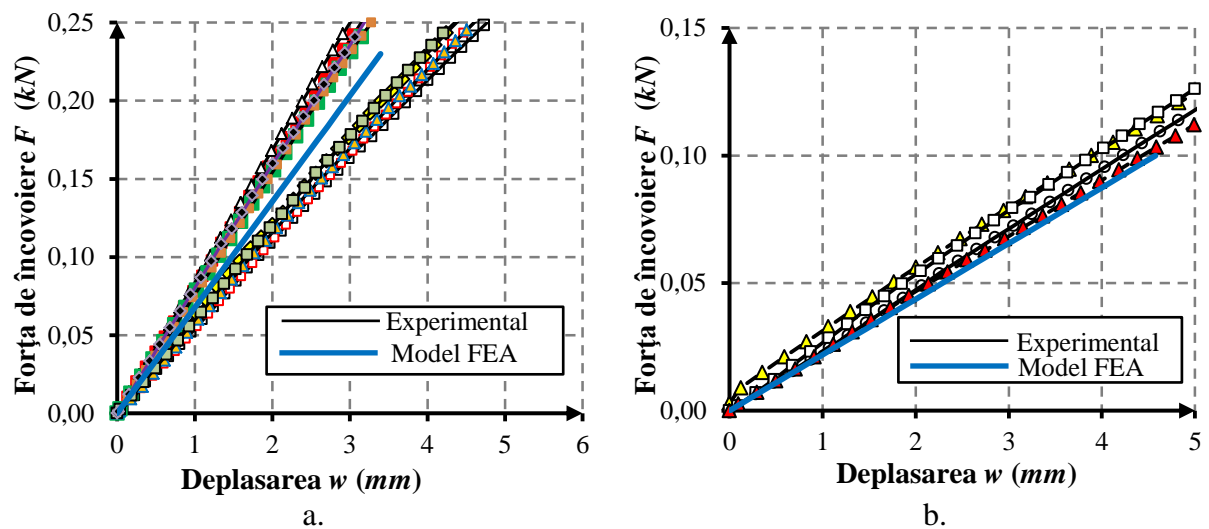


Cauzele erorilor înregistrate sunt aceleași ca cele menționate mai înainte când s-au comparat rezultatele experimentale cu cele obținute cu modelul analitic de grindă din material compozit stratificat.

Din nou, se remarcă faptul că erorile calculate se înscriu în limite acceptabile ținând cont de tehnologia de formare a plăcilor din materiale compozite din care s-au tăiat epruvetele.



**Fig. 1.47.** Comparația între rezultatele obținute experimental și cele obținute cu modelul FEA în ceea ce privește curba forță – deplasare ( $F-w$ ) în cazul materialului compozit in / epoxy: a) Direcția epruvetei paralelă cu direcția bătăturii; b) Direcția epruvetei paralelă cu direcția urzelii



**Fig. 1.48.** Comparația între rezultatele obținute experimental și cele obținute cu modelul FEA în ceea ce privește curba forță – deplasare ( $F-w$ ) în cazul materialului compozit in / epoxy: a) Direcția epruvetei paralelă cu direcția bătăturii; b) Direcția epruvetei paralelă cu direcția urzelii

În figura 1.47 se prezintă comparativ curba  $F-w$  (forța în funcție de deplasarea  $w$  a mijlocului epruvetei) obținută cu modelul cu elemente finite (culoarea albastră) și curbele obținute experimental (culoarea neagră) în încercarea la încovoiere a epruvetelor din material compozit in / epoxy în cele două cazuri: lungimea epruvetei paralelă cu direcția bătăturii țesăturii de in (Fig.

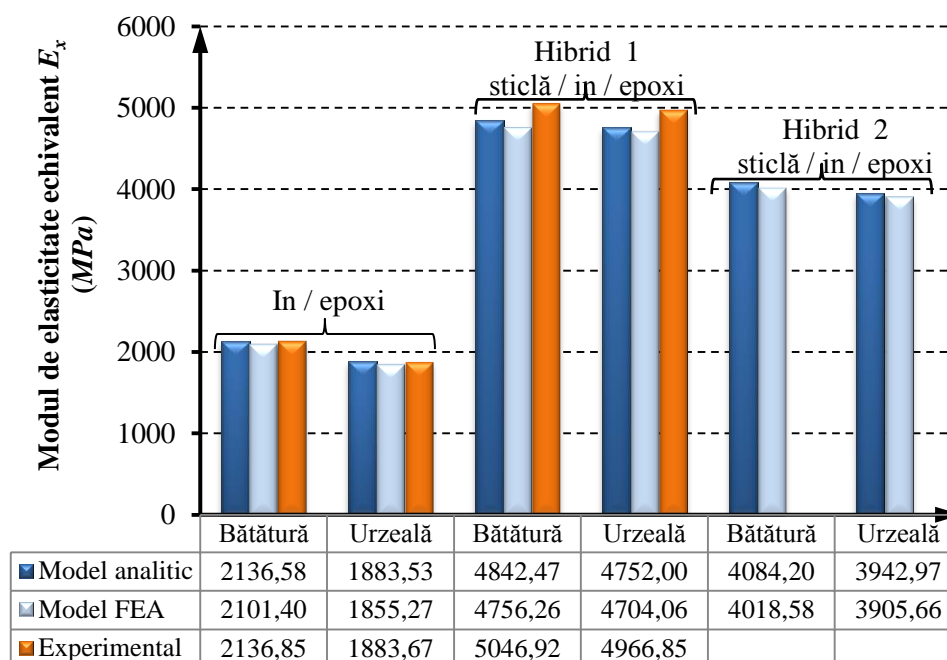
1.47,a); lungimea epruvetei paralelă cu direcția urzelii țesăturii de in (Fig. 1.47,b). Curbele forță-deplasare ( $F-w$ ) sunt comparate doar pe domeniul elastic.

În mod similar, în figura 1.48 se prezintă comparativ curbele forță-deplasare ( $F-w$ ) obținute prin analiza cu elemente finite (FEA) cu curbele forță-deplasare ( $F-w$ ) obținute experimental prin încercarea la încovoiere a epruvetelor din material compozit *Hibrid 1* sticlă-E / in / epoxi în cele două cazuri: lungimea epruvetei paralelă cu direcția bătăturii țesăturii de in (Fig. 1.48, a); lungimea epruvetei paralelă cu direcția urzelii țesăturii de in (Fig. 1.48, b).

## 1.6. Concluzii

În acest capitol, analiza comparativă a rezultatelor teoretice (obținute cu modelul analitic și cu modelul cu elemente finite) și a celor experimentale conduce la propunerea unei soluții de îmbunătățire a comportării mecanice a materialelor compozite ranforsate cu fibre de in prin armarea cu țesătură de sticlă a patru straturi extreme: primele două straturi de sus și ultimele două straturi de jos.

Figura 1.49 prezintă comparativ rezultatele teoretice (model analitic și model FEA) și cele obținute experimental în cazul materialelor compozite analizate în cadrul acestui capitol.



**Fig. 1.49.** Comparația rezultatelor teoretice cu cele obținute experimental referitoare la modulul de elasticitate echivalent  $E_x$  la încovoiere pe direcția bătăturii și respectiv, pe direcția urzelii

În continuare, se prezintă principalele concluzii referitoare la rezultatele prezentate în cadrul acestui capitol.

- *Așezarea alternativă a straturilor ranforsate cu țesătură de in și a celor ranforsate cu țesătură de sticlă ca în cazul materialului compozit Hibrid 2 sticlă / in / epoxi, nu este o soluție optimă din punctul de vedere al valorii modul de elasticitate echivalent  $E_x$  la încovoiere așa cum se poate observa din datele prezentate în figura 1.49. Se observă că valoarea calculată  $E_x = 4842,47 \text{ MPa}$  pentru modelul analitic corespunzător materialului compozit Hibrid 1 pe direcția bătăturii este mai mare cu 18,56% decât valoarea  $E_x = 4084,22 \text{ MPa}$  calculată pentru modelul analitic corespunzător compozitului Hibrid 2 pe aceeași direcție (Tab. 1.14 și Fig. 1.49). De asemenea, modulul de elasticitate echivalent  $E_x = 4752,0 \text{ MPa}$  corespunzătoare materialului compozit Hibrid 1 pe direcția urzelii este de asemenea mai mare cu 20,52% decât valoarea  $E_x = 3942,97 \text{ MPa}$  calculată pentru materialul compozit Hibrid 2 pe direcția urzelii (Tab. 1.14 și Fig. 1.49).*
- *În ceea ce privește comportarea mecanică a materialelor compozite hibride, s-a arătat că îmbunătățirile proprietăților mecanice sunt semnificative în ceea ce privește comportarea la tracțiune iar creșterea proprietăților de încovoiere este într-adevăr foarte mare.*
- *În ceea ce privește caracteristicile de tracțiune (Fig. 1.22), se observă că valorile cele mai mari corespund cazurilor în care lungimea epruvetele de încovoiere a fost paralelă cu direcția bătăturii corespunzătoare țesăturii de in, atât în cazul materialului compozit in / epoxi cât și în cazul materialului compozit Hibrid 1 sticlă-E / in / epoxi.*
- *În cazul materialului compozit Hibrid 1 sticlă-E / in / epoxi, rezultatele prezentate în figura 1.22 conduc la următoarele remarci: valoarea maximă a tensiunii la tracțiune  $\sigma_{\max}$  este mai mare cu 17,32% (Fig. 1.22, a) pe direcția bătăturii (122,83 MPa) decât valoarea corespunzătoare pe direcția urzelii (104,69 MPa); modulul de elasticitate  $E$  înregistrat la solicitarea de tracțiune este mai mare cu 9,29% (Fig. 1.22, b) pe direcția bătăturii (7936,45 MPa) decât cea înregistrată pe direcția urzelii (7261,58 MPa).*
- *Proprietățile de tracțiune măsurate pe direcția bătăturii cresc în cazul materialului compozit Hibrid 1 față de cele corespunzătoare materialului compozit in / epoxi, după cum urmează: cu 35,19% în cazul modulului lui Young  $E$ ; cu 79,86% pentru valoarea maximă a tensiunii normale la tracțiune  $\sigma_{\max}$ .*
- *În cazul materialului compozit Hibrid 1 sticlă-E / in / epoxi, valoarea maximă a tensiunii normale  $\sigma_{\max}$  la încovoiere înregistrată pe direcția bătăturii țesăturii de in, este aproape*

dublă (91,08%) față de cea determinate în cazul materialului compozit in / epoxi pe direcția bătăturii (Fig. 1.24). Modulul lui Young  $E$  la încovoiere determinat în cazul epruvetelor din compozit Hibrid 1 pe direcția bătăturii, a crescut cu 136,17% față de valoarea corespunzătoare epruvetelor din material compozit in / epoxi cu lungimea paralelă cu direcția bătăturii țesăturii de in.

- Analizând datele din tabelul 1.18 se observă că valorile teoretice ale modulului de elasticitate  $E_x$  sunt apropiate de cele determinate experimental în cazul materialului compozit in / epoxi deoarece erorile au fost egale cu 0,013% și 0,007%. În cazul materialului compozit Hibrid 1 sticlă-E / in / epoxi, erorile au fost egale cu 4,22% și 4,52% pe direcția bătăturii și respectiv, pe direcția urzelii corespunzătoare țesăturii de in.
- Valorile mici ale erorilor (0,007÷4,521%), care estimează abaterile rezultatelor experimentale în ceea ce privește modulul de elasticitate echivalent  $E_x$ , față de valorile calculate cu modelele analitice de grinzi din material compozit stratificat, validează modelele de grindă propuse în acest capitol în cazul ambelor materiale compozite testate experimental (in / epoxi și Hibrid 1).
- Relațiile corespunzătoare modelelor de grindă solicitate la încovoiere prezentate în cadrul acestui capitol, se pot utiliza în cazul oricărei grinzi solicitate la încovoiere fabricate din același tip de material compozit, unul dintre cele analizate.
- S-a arătat importanța înlocuirii cu țesătură de sticlă a materialului de ranforsare din straturile extreme deoarece modulul de elasticitate  $E_x$  crește în cazul materialului compozit Hibrid 1 sticlă-E / in / epoxi. Mai mult, este bine-cunoscut faptul că, tensiunile maxime  $\sigma_{x\max}$  se dezvoltă la nivelul acestor straturi extreme în timpul încovoierii iar rezistența la încovoiere a stratului din material compozit sticlă / epoxi este mai bună decât cea corespunzătoare stratului din material compozit in / epoxi.

\*\*\*

Rezultatele experimentale prezentate în cadrul acestui capitol s-au comparat cu rezultatele experimentale publicate în alte articole referitoare la materiale compozite ranforsate cu țesătură de in având structuri similare (Petrucci *et al.*, 2013). Mai întâi, în tabelul 1.20 se prezintă structura materialelor compozite ale căror proprietăți mecanice au fost utilizate pentru comparație.

În figurile 1.50 și 1.51 se prezintă comparativ rezultatele experimentale proprii obținute în cazul materialului compozit in / epoxi Epolam 2015 și cele obținute în cazul unui material compozit

similar de tip *in / epoxi EC360* (Tab. 1.20) prin încercările de tracțiune și încovoiere prin metoda celor trei puncte.

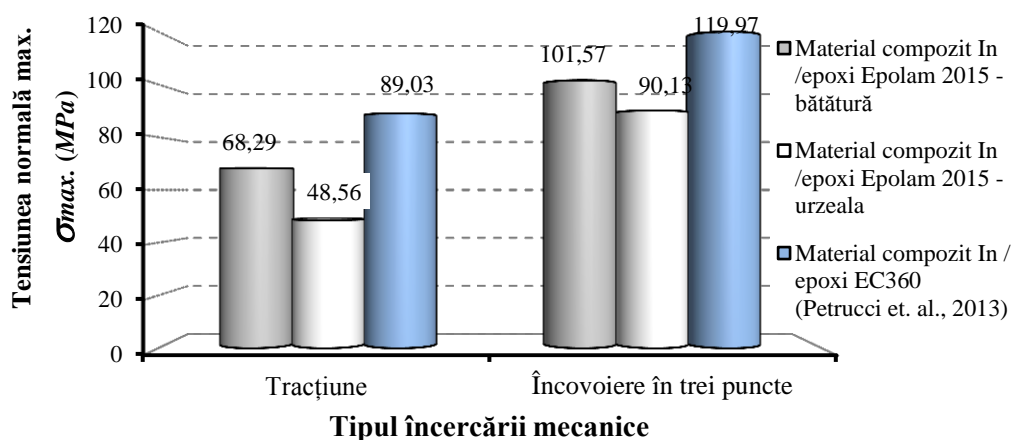
**Tabelul 1.20**

Structura materialelor compozite analizate în lucrarea (Petrucci *et al.*, 2013)

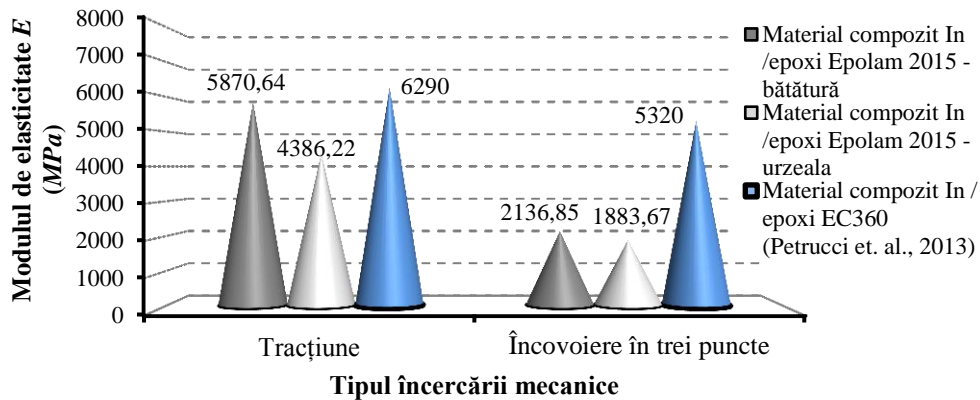
Tipul materialului compozit	Tipul țesăturilor de ranforsare	Tip stratificat	Nr. straturi	Raportul volumic de fibre $V_f$ (%)
Material compozit <i>In / epoxi EC360</i>	Țesătură din <i>in</i> bidirecțională ( $\rho = 292 \text{ g/m}^2$ )	[0/90] <sub>2s</sub>	4	24,82
Material compozit hibrid Sticlă / <i>In</i> / Bazalt* /epoxi EC360	Țesătură mat sticlă ( $\rho = 100 \text{ g/m}^2$ ) Țesătură <i>in</i> bidirecțională ( $\rho = 292 \text{ g/m}^2$ ) Țesătură bazalt bidirecțională ( $\rho = 300 \text{ g/m}^2$ )	[Sticlă/ <i>In</i> /Bazalt] <sub>s</sub>	6	21,18 din care: - <i>in</i> 11,72%, - bazalt 7,16%, - sticla 2,30%.

\*Bazalt = Material ceramic artificial, obținut dintr-o materie primă (argilă, masă ceramică) cu temperatură joasă de vitrifiere și utilizat la fabricarea tuburilor de canalizare, a recipientelor pentru lichide agresive, a cărămizilor pentru trotuare (<http://dexonline.ro/definitie/bazalt>, accesat 3.06.2015). În acest caz, se utilizează sub formă de țesătură de bazalt.

Se remarcă că tensiunea normală maximă  $\sigma_{\max} = 101,57 \text{ MPa}$  determinată prin încercarea de încovoiere a epruvetelor din *in / epoxi Epolam 2015* a căror direcție este paralelă cu direcția bătăturii este apropiată de valoarea  $\sigma_{\max} = 119,97 \text{ MPa}$  (Fig. 1.50) corespunzătoare materialului compozit *in / epoxi EC360* (Petrucci *et al.*, 2013). În figura 1.51 se prezintă valori apropiate obținute în cazul modulului de elasticitate  $E$  corespunzător direcției bătăturii în cazul materialului compozit *in / epoxi Epolam 2015* comparativ cu valoarea corespunzătoare materialului compozit *in / epoxi EC360* (Petrucci *et al.*, 2013).



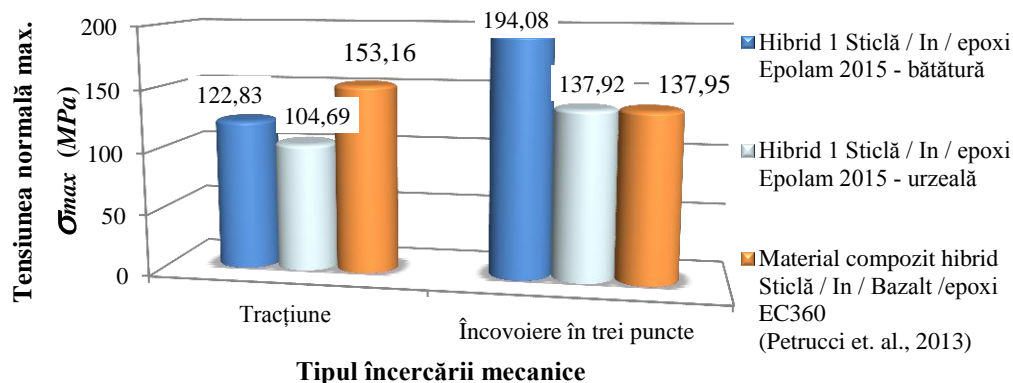
**Fig. 1.50.** Comparația rezultatelor experimentale obținute pentru tensiunea  $\sigma_{\max}$  la tracțiune și încovoiere în cazul compozitului *In / epoxi* cu cele publicate în lucrarea (Petrucci *et al.*, 2013)



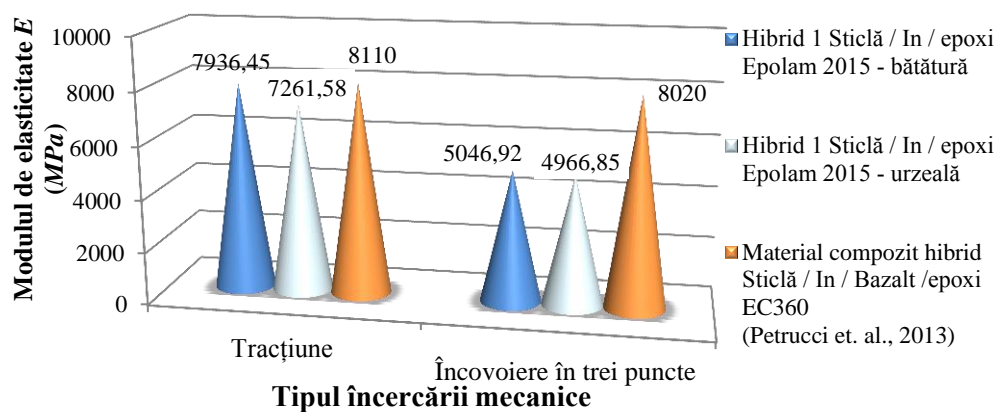
**Fig. 1.51.** Comparația rezultatelor experimentale obținute pentru modulul de elasticitate  $E$  la tracțiune / încovoiere în cazul compozitului In / epoxi cu cele publicate în (Petrucci *et al.*, 2013)

În figurile 1.52 și 1.53 se prezintă comparativ rezultatele experimentale proprii obținute în cazul materialului compozit *Hibrid 1 Sticlă / in / epoxi Epolam 2015* și cele obținute în cazul unui material compozit hibrid *Sticlă / In / Bazalt /epoxi EC360* (Tab. 1.20) prin încercările de tracțiune și încovoiere prin metoda celor trei puncte. În subsolul tabelului 1.20 se prezintă explicațiile referitoare la materialul bazalt care se utilizează sub formă de țesătură de ranforsare împreună cu țesătura de sticlă și de cea de in.

Se remarcă că modulul de elasticitate la tracțiune  $E = 7936,45 \text{ MPa}$  determinat prin încercarea de tracțiune pe direcția bătăturii țesăturii de in în cazul epruvetelor din *Sticlă / in / epoxi Epolam 2015* este apropiată de valoarea  $E = 8110 \text{ MPa}$  (Fig. 1.53) corespunzătoare materialului compozit hibrid *Sticlă / In / Bazalt /epoxi EC360* (Petrucci *et al.*, 2013).



**Fig. 1.52.** Comparația rezultatelor experimentale obținute pentru tensiunea  $\sigma_{max}$  la tracțiune / încovoiere în cazul *Hibrid 1 Sticlă / in / epoxi* cu cele publicate în (Petrucci *et al.*, 2013)



**Fig. 1.53.** Comparația rezultatelor experimentale obținute pentru modulul de elasticitate  $E$  la tracțiune / încovoiere în cazul materialului *Hibrid 1 Sticlă / in / epoxi* cu cele publicate în (Petrucci *et al.*, 2013)

\*\*\*

Rezultatele cercetărilor prezentate în acest capitol, au fost diseminate parțial în articole prezentate la conferințe internaționale: *The 8th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2014*, 9-10 October 2014, Tirgu-Mures, Romania (Cerbu, 2015); *The 5th International Conference “Advanced Composite Materials Engineering” COMAT 2014* prin articolul (Cerbu, 2014).

O parte din rezultate au fost publicate în lucrarea (Cerbu, 2015) în revista “Advances in Mechanical Engineering” care face parte din colecția de jurnale SAGE Journals.

# Cap. 2

## 2. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND COMPORTAREA MECANICĂ A MATERIALELOR COMPOZITE RANFORSATE CU ȚESĂTURI DIN STICLĂ ȘI FIBRE DE LEMN

### 2.1. Generalități privind materialele compozite pe bază de fibre de lemn

Lucrările publicate în ultimii ani în domeniul materialelor compozite arată că există un mare interes la nivel global pentru fabricarea materialelor compozite ranforsate cu diferite fibre naturale sau materiale reciclate din deșeuri (Al-Maadeed *et al.*, 2014; Najafi *et al.*, 2011; Abdul Khalil *et al.*, 2011; Avila *et al.*, 2003; Bartl *et al.*, 2005; Kamdem *et al.*, 2004). S-au efectuat diverse studii referitoare la fabricarea unor noi materiale compozite prin utilizarea ca material de ranforsare sau ca material pentru matrice, a următoarelor materiale: polietilenă de densitate ridicată reciclabilă (HDPE) și plasticul reciclat din sticlele de tip PET; deșeuri de lemn; alte materiale fibroase cum sunt textilele, materialele compozite reciclate și așa mai departe (Al-Maadeed *et al.*, 2014; Klyosov, 2007; Bartl *et al.*, 2005; Avila și Duarte, 2003). Într-o lucrare publicată în ultimii ani s-au prezentat rezultatele încercărilor mecanice în cazul unui material compozit fabricat din rășină poliestică ranforsată cu așchii obținute prin măcinarea discurilor de tip CD / DVDs în scopul propunerii unei modalități de re-utilizare a unor astfel de deșeuri (Cerbu, 2009).

Materialele reciclabile reprezintă o sursă durabilă (sustenabilă) de materie primă pentru fabricarea materialelor compozite deoarece acestea pot fi utilizate ca: materiale de ranforsare (țesături reciclate, cauciuc); matrice (HDPE reciclabil, aluminiu reciclat din ambalaje) sau ca materiale de umplură ca de exemplu, așchiile de lemn (Al-Maadeed *et al.*, 2014).

Referitor la materialele compozite ranforsate cu fibre naturale, câteva lucrări au raportat faptul că raportul volumic al fibrelor (volumul de fibre raportat la volumul materialului compozit) joacă un rol important în ceea ce privește comportarea mecanică a acestor materiale compozite după imersiune în apă (Dhakal *et al.*, 2007; Ayensu, 2000). Astfel, s-a arătat că ranforsarea cu un raport volumic de 26% de fibre de cânepă este optim în cazul materialului compozit de tip



câneapă / polimer deoarece asigură creșterea rezistenței la tracțiune cu 20% după 30 ore de imersiune în apă (Dhakal *et al.*, 2007). În cazul materialelor compozite polimerice ranforsate cu fibre de iută, s-au publicat rezultate care dovedesc că rezistența la încovoiere crește cu 45% după 72 ore de imersiune în apă (Ayensu, 2000).

Fibrele lungi de lemn sunt cunoscute sub denumirea de așchii sau rumeguș iar fibrele foarte fine (sub 1 mm și de ordinul  $\mu m$ ) sunt utilizate sub denumirea de făină de lemn (Barbu, 1999). Fibrele de lemn pot fi obținute fie din diferite etape de prelucrare a lemnului, fie prin reciclarea deșeurilor din lemn (Barbu, 1999).

Materialele compozite pe bază de lemn (notate notate cu WPC în literatura de specialitate, de la “wood plastic composites” -în limba engleză) sunt utilizate pe scară largă deoarece adăugarea de făină de lemn la materialele plastice conduce la reducerea semnificativă a costurilor de materiale în timp ce caracteristicile mecanice sunt îmbunătățite față de materialele plastice fără ranforsare (Klyosov, 2007).

Unele lucrări au analizat modalitățile de utilizare a fibrelor de lemn scurte sau lungi, ca materiale de armare sau de umplutură în materialele compozite cu matrice din rășină (Kamdem *et al.*, 2004; Klyosov, 2007).

S-a arătat că atât mărimea fibrelor de lemn cât și conținutul de fibre de lemn (exprimat în raport de masă sau raport volumic) sunt factori interni care influențează proprietățile mecanice ale materialelor compozite fabricate din polietilenă cu densitate ridicată (HDPE) reciclabilă și făină de lemn (Cui *et al.*, 2008). Astfel, s-a dovedit că cu cât mărimea fibrelor de lemn din făina de lemn este mai mică, cu atât proprietățile mecanice sunt mai bune.

Referitor la materialele compozite fabricate din rășină epoxi ranforsată cu fibrele rezultate prin măcinarea sămburilor de măslină, într-o altă lucrare s-au analizat efectele raportului volumic al fibrelor și al ciclurilor termice asupra caracteristicilor mecanice de încovoiere (Papanicolaou *et al.*, 2012). S-au obținut creșteri de 48% ale modulului de elasticitate  $E$  la încovoiere. În schimb, rezistența la încovoiere este influențată în mică măsură (sub 5%) de către acești factori.

Într-o serie de lucrări se prezintă cercetări referitoare la absorbția de apă în interiorul materialului compozit precum și la efectele apei și ale mediului marin asupra materialelor compozite polimerice (Pomiès *et al.*, 1995; Maggana și Pissis 1999; Cerbu *et al.*, 2009). Boualem și Sereir (2010) au propus un model de variație pe grosime a straturilor dintr-un material compozit polimeric hibrid ranforsat cu fibre în scopul reducerii tensiunilor hidrotermice cauzate de condițiile ciclice de mediu (temperatură și umiditate).

În ceea ce privește tipul fibrelor de lemn, există diferite tipuri de specii de arbori și pomi

fructiferi în lumea întreagă, în funcție de zona geografică. De exemplu, în zona cu climă temperată, printre speciile specifice se pot aminti: bradul; stejarul; fagul; carpenul; plopul; salcia; arțar, castanul; pomii fructiferi cum ar fi cireșul, nucul și așa mai departe. Înseamnă că practic există mai multe tipuri de fibre de lemn având structură diferită, care pot fi utilizate ca material de armare sau umplutură pentru materialele compozite pe bază de rășină polimerică.

Utilizarea făinii de lemn ca material de umplutură sau armare în materialele compozite plastice are câteva avantaje față de materialele de umplutură anorganice (fibre de sticlă, carbon etc.): conduce la reducerea greutateii deoarece densitatea fibrelor de lemn este mai mică comparativ cu cea a fibrelor de carbon sau sticlă (Tab. 1.1); fibrele de lemn asigură un aspect plăcut materialului compozit în culori naturale specifice tipului de specie de lemn din care provin fibrele (Soler, 2014; Müssig și Haag 2015).

Însă, natura hidrofilică a lemnului are un efect negativ asupra materialelor compozite plastice pe bază de lemn (Klyosov, 2007). Pe de altă parte, este bine-cunoscut faptul că lemnul conține tanini care “formează complecși de culoare închisă cu sărurile de fier deoarece taninii sunt compuși fenolici și poli-fenolici solubili în apă” (Klyosov, 2007). Se cunoaște faptul că lemnul de brad are un conținut mai scăzut de tanini comparativ cu alte specii, de exemplu comparativ cu lemnul de stejar (Klyosov, 2007). Această proprietate a lemnului de brad poate fi valorificată în cazul materialelor compozite pe bază de făină de lemn care sunt utilizate în medii cu umiditate ridicată.

În industria construcțiilor există un mare necesar de componente fabricate din materiale compozite plastice pe bază de fibre de lemn deoarece există aplicații ale acestora ca panouri de izolație fonică sau termică (Thompson *et al.*, 2010). Materiale compozite pe bază de fibre de lemn și variantele hibride ale acestora, ranforsate atât cu fibre de lemn cât și cu fibre scurte de sticlă, sunt utilizate în diverse domenii cum ar fi industria auto sau industria mobilei sub formă de componente, datorită avantajelor în ceea ce privește tehnologia de obținere a unor piese cu geometrie complexă și design modern, cu greutate redusă și cu suprafețe având culori naturale datorită fibrelor de lemn (Julian *et al.*, 2012). De obicei aceste tipuri de componente se obțin prin injectare în matriță, a unui amestec format din rășină termoplastică sub formă de granule și fibre de lemn (Al-Maadeed *et al.*, 2014; Adhikary *et al.*, 2008; Cui *et al.*, 2008).

Alte lucrări fac referire la cercetări efectuate asupra panourilor din fibre de lemn care conțin inserții din țesături din fibre naturale (in, iută) sau din fibre anorganice (fibre de sticlă sau de carbon), obținute prin presare la cald (Barbu, 1999). Combinarea fibrelor de lemn cu țesăturile din fibre naturale prezintă avantajul compatibilității dintre cele două componente ținând cont de faptul că acestea conțin în diverse procente: celuloză; hemiceluloză; lignină; pectină etc.

(Cristaldi *et al.*, 2010; Barbu, 1999). Utilizarea inserțiilor din țesături din fibre naturale are următoarele avantaje: asigură îmbunătățirea rezistenței și rigidității panourilor din fibre de lemn; fibrele naturale reprezintă o sursă regenerabilă de materie primă. În plus, fibrele lungi de in sunt la jumătate de preț comparativ cu fibrele de sticlă și sunt mai ieftine de cca. 14-15 ori decât fibrele de carbon (Barbu, 1999).

Însă, țesăturile din fibre naturale (in, cânepă, iută, bumbac etc.) au câteva dezavantaje: absorb umiditate și se degradează în mediu umed ceea ce conduce la degradarea proprietăților mecanice ale acestora; se degradează sub acțiunea razelor ultraviolete și necesită tratamente speciale; au proprietăți mecanice limitate (rezistențele la tracțiune sunt de  $\cong 1100 \text{ MPa}$  și  $\cong 320 \text{ MPa}$  în cazul fibrelor de in și iută, comparativ cu  $\cong 3400 \text{ MPa}$  în cazul fibrelor de sticlă) (Cristaldi *et al.*, 2010; Barbu, 1999).

Panourile din fibre de lemn și inserții din fibre naturale sau sintetice conțin adezivi pe bază de formaldehidă și / sau rășini termoplastice sub formă de granule fabricate prin presare la cald la cca. 180-200 °C (Barbu, 1999; Adhikary *et al.*, 2008; Cui *et al.*, 2008). Astfel, procedeul tehnologic presupune investiții în echipament de presare iar mărimea panoului sau a piesei este limitată.

Ținând cont de avantajele și dezavantajelor plăcilor formate prin presare la cald, din aşchii de lemn cu inserții textile, autoarea prezentei teze de abilitare a studiat comportarea mecanică a materialelor compozite stratificate pe bază de rășini termorigide ranforsate hibrid cu țesătură de sticlă și făină de lemn (Cerbu *et al.*, 2009-2011). Rășinile termorigide utilizate sunt sub formă de lichide vâscoase în starea inițială și în combinație cu întăritorul compatibil, polimerizează (se întăresc) după menținere la temperatura camerei astfel încât permite formarea manuală a straturilor succesive. De obicei, după turnarea tuturor straturilor, se utilizează un echipament de vidare pentru eliminarea golurilor de aer. Această tehnologie are următoarele avantaje: nu necesită investiție mare în echipamente; se pot fabrica piese de dimensiuni mari cu geometrii complexe.

În ultimii ani, s-a pus accent pe utilizarea deșeurilor de lemn sub formă reciclată ca făină de lemn, pentru a ranforșa astfel de materiale compozite polimerice hibride cu inserții de țesături din fibre de sticlă (Cerbu *et al.*, 2009-2011) sau cu țesături din fibre de ramie (Kishi și Fujita, 2008). Scopul a fost de a reduce costurile legate de materia primă, de a reduce greutatea și de a îmbunătăți rigiditatea și aspectul suprafeței pieselor fabricate din astfel de materiale compozite hibride.

Materialul compozit hibrid sticlă / făină de lemn / rășină combină avantajele fibrelor de lemn (Klyosov, 2007) cu cele ale fibrelor de sticlă. Câteva dintre avantajele și dezavantajele fibrelor

de lemn au fost menționate mai sus. În ceea ce privește avantajele fibrelor de sticlă comparativ cu cele de lemn, se menționează: raport ridicat între rezistență și greutate; raport ridicat între rigiditate și greutate. De exemplu, proprietățile fibrelor de sticlă de tip  $E$  sunt aproximativ următoarele: densitatea  $\rho = 2,6 \text{ g/cm}^3$ ; rezistența la tracțiune  $\sigma_r = 3400 \div 3500 \text{ MPa}$ ; modulul de elasticitate  $E = (73 \div 74) \cdot 10^3 \text{ MPa}$  la tracțiune (Alămoreanu și Chiriță, 1997; Barbu, 1999).

Materialele compozite plastice cu fibre de lemn precum și materialele compozite hibride ranforsate atât cu țesături (de sticlă sau țesături naturale) cât și cu fibre de lemn sunt utilizate pentru fabricarea de: panouri ca elemente de design interior în construcții; panouri pentru protecția acustică a habitatelor umane situate în vecinătatea autostrăzilor sau a drumurilor expres; panouri de izolație termică; componente de mobilier de interior sau mobilier pentru grădiniță (Cerbu, 2012). Panourile pentru construcții precum și cele de protecție acustică sunt expuse efectelor de mediu (umiditate, temperatură, cicluri termice etc.). În plus, aceste panouri sunt adesea supuse deteriorărilor cauzate de impactul cu pietre. Astfel, este foarte important ca aceste panouri să reziste la impact.

Având în vedere factorii interni (tipul fibrelor de lemn, tipul țesăturii de sticlă, tipul rășinii) și factorii de mediu externi (umiditate, solicitări mecanice, temperaturi, raze ultraviolete etc.) s-au stabilit câteva obiective de cercetare privind materialele compozite pe bază de rășini termorigide ranforsate hibrid cu țesătură de sticlă și făină de lemn, după cum urmează:

- *studiul privind efectul tipului de fibre de lemn asupra comportării mecanice a materialelor compozite ranforsate cu fibre de lemn;*
- *efectul tipului fibrelor de lemn asupra comportării mecanice după imersiune în apă a materialelor compozite ranforsate cu țesătură de sticlă și făină de lemn;*
- *identificarea tipului de fibre de lemn recomandabile pentru fabricarea materialelor compozite care sunt solicitate mecanic în mediu umed;*
- *identificarea unei soluții de material compozit hibrid sticlă / făină de lemn / rășină îmbunătățită în ceea ce privește țesătura de sticlă utilizată pentru ranforsare și tipul de rășină pentru aplicații în mediu umed;*
- *comportarea mecanică în timp a materialului compozit de tip sticlă-E / făină de lemn de brad / epoxi sub acțiunea umidității.*

## 2.2. Cercetări privind efectul tipului de fibre de lemn asupra comportării mecanice a materialelor compozite

Obiectivul principal al acestui subcapitol este de a prezenta câteva rezultate preliminare obținute de autoarea tezei de abilitare în vederea analizei efectului fibrelor de lemn asupra comportării mecanice în încercarea de încovoiere. În acest scop, se prezintă rezultatele obținute prin încercarea de încovoiere în cazul a trei tipuri de materiale compozite pe bază de rășină ureo-formaldehidică de tip *Urelit®R* ranforsată cu trei tipuri de fibre de lemn: fibre de lemn de brad; fibre de lemn de fag; fibre de lemn de carpen.

### 2.2.1. Materiale testate și metoda de lucru

Mai întâi s-au fabricat cele trei tipuri de panouri din materiale compozite pe bază de rășină ureo-formaldehidică de tip *Urelit®R*, ranforsate cu fibre de lemn (de brad, fag, carpen), fiecare având grosimea de 4 mm. Raportul masic de fibre de lemn a fost de 20%. Fibrele de lemn au fost separate cu ajutorul unui sistem de sitare pe categorii și s-au utilizat fibre având mărimea mai mică decât 500 μm.

*Urelit®R* este o rășină ureo-formaldehidică care este recomandată ca adeziv pentru fibrele de lemn la fabricarea panourilor prin presare la rece. Se utilizează de asemenea pentru încheieri de elemente masive la bordurarea panourilor din PAL conform *Fișei tehnice*. În tabelul 2.1 se prezintă caracteristicile mecanice ale rășinii ureo - formaldehidică de tip *Urelit®R*.

Apoi, din panouri s-au debitat epruvete având dimensiunile 80 mm x 15 mm pentru încercarea de încovoiere prin metoda celor trei puncte, conform cu EN ISO 14125 (2000).

**Tabel 2.1**

Caracteristici fizice și mecanice ale rășinii ureo - formaldehidică de tip *Urelit®R* (conform *Fișei tehnice*)

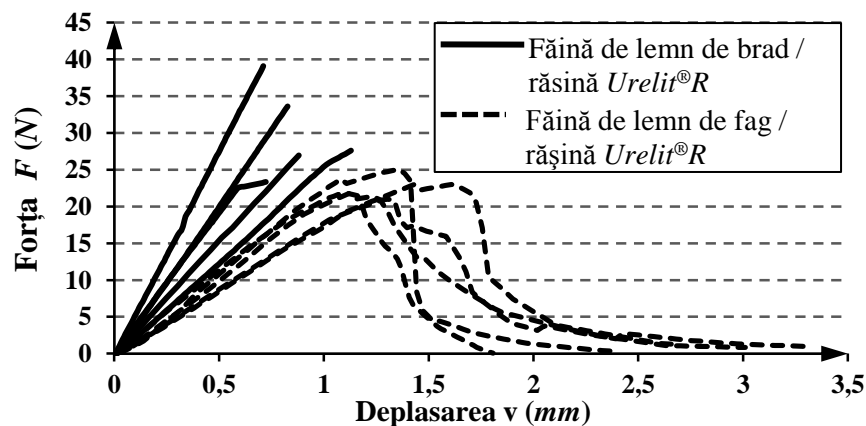
Denumirea proprietății	Unitate de măsură	Valoarea proprietății	Metoda de încercare
Densitate	( $g/cm^3$ )	1,33 ± 0,03	STAS 35-1981
Vâscozitate dinamică la 20 °C	( $mPa \cdot s$ )	1000 - 3000	STAS 117-1987
Substanță solidă, 2h la 120 °C	(%)	70 ± 2	SR 6643-1996
pH	-	7,5 ± 0,5	SR 6643-1996
Formaldehidă liberă, max.	(%)	3,50	SR 6643-1996
Rezistența încheierii la forfecare, în stare uscată, min.	( $N/mm^2$ )	8	SR 6643-1996
Timp de gelifiere la 20 °C, max.	(minute)	45	SR 6643-1996

Înainte de testarea fiecărei epruvete, s-au măsurat cu precizie dimensiunile secțiunii transversale ale epruvetei și apoi, aceste dimensiuni s-au introdus ca date de intrare în soft-ul mașinii de încercare *LR5K Plus* fabricată de *LLOYD Instruments*, care preia datele experimentale de la mașina de încercat și le prelucrează statistic.

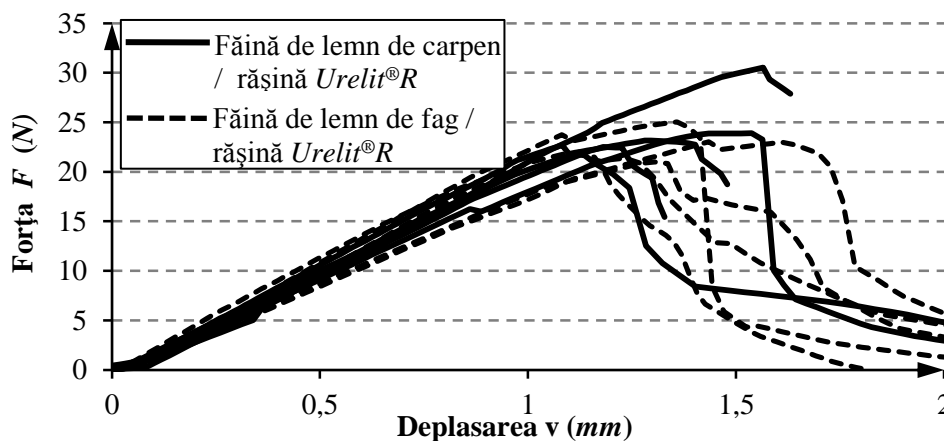
Viteza de încărcare a epruvetei a fost de  $1,5 \text{ mm/min}$  în cazul testului de încovoiere, așa cum recomandă EN ISO 14125 (2000).

### 2.2.2. Rezultate privind încercarea la încovoiere. Discuții.

În figura 2.1 se prezintă comparativ curbele forță – deplasare ( $F - v$ ) înregistrate în cazul încercării de încovoiere a epruvetelor din materialele compozite ranforsate cu făină de lemn de brad și respectiv, cu făină de lemn de fag. Se observă că panta curbelor înregistrate în cazul materialelor compozite ranforsate cu făină de lemn de brad este mai mare decât panta curbelor înregistrate în cazul celor ranforsate cu făină de lemn de fag.

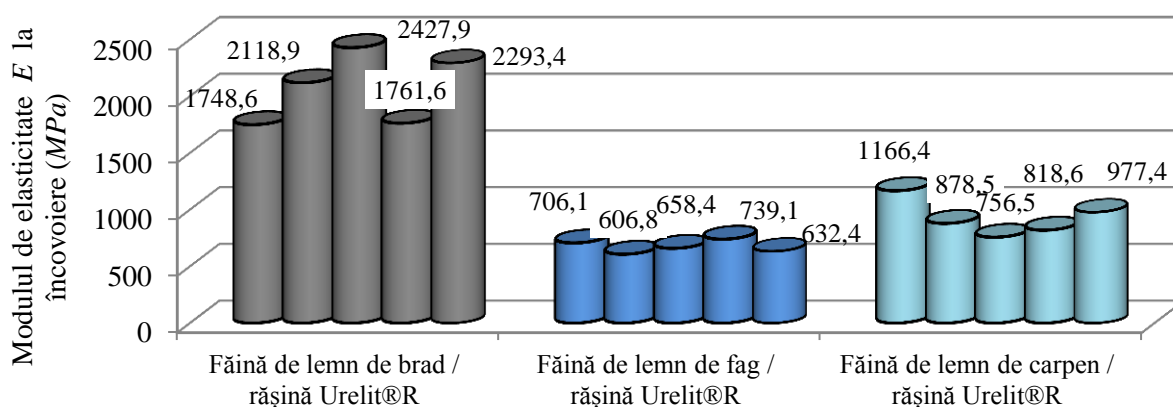


**Fig. 2.1.** Compararea curbelor forță – deplasare ( $F - v$ ) obținute în cazul materialele compozite cu făină de lemn de brad și cu făină de lemn de fag

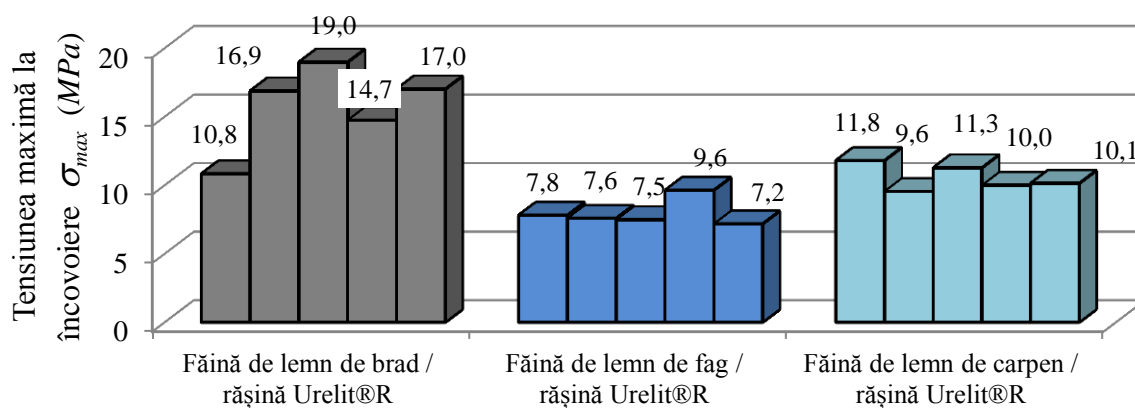


**Fig. 2.2.** Compararea curbelor forță – deplasare ( $F - v$ ) obținute în cazul materialele compozite cu făină de lemn de carpen și cu făină de lemn de fag

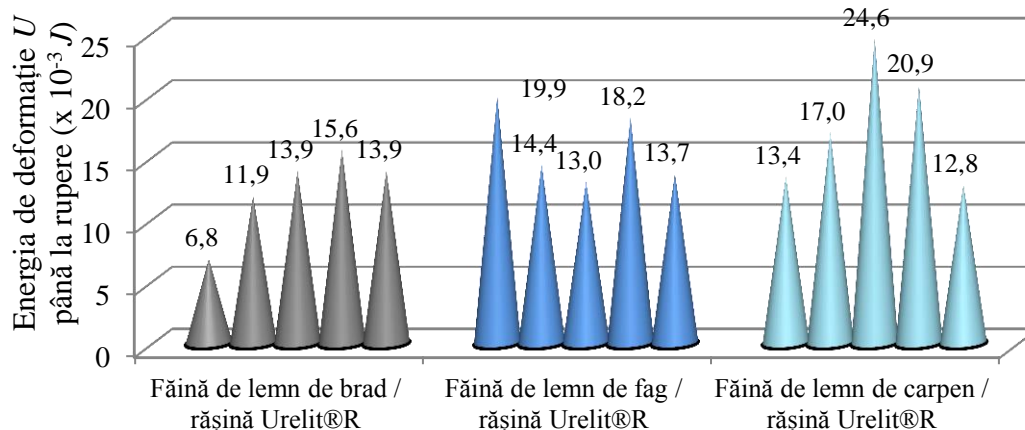
În figura 2.2 se prezintă comparativ curbele forță – deplasare ( $F - v$ ) înregistrate în cazul încercării de încovoiere a epruvetelor din materialele compozite ranforsate cu făină de lemn de carpen și respectiv, cu făină de lemn de fag.



**Fig. 2.3.** Efectele tipului de fibre de lemn asupra modului de elasticitate  $E$  la încovoiere în cazul materialelor compozite pe bază de rășină ureo-formaldehidică de tip *Urelit®R*



**Fig. 2.4.** Efectele tipului de fibre de lemn asupra tensiunii maxime  $\sigma_{max}$  la încovoiere în cazul materialelor compozite pe bază de rășină ureo-formaldehidică de tip *Urelit®R*



**Fig. 2.5.** Efectele tipului de fibre de lemn asupra energiei de deformare  $U$  consumate până la rupere în cazul materialelor compozite pe bază de rășină ureo-formaldehidică de tip *Urelit®R*

În continuare, se prezintă comparativ rezultatele obținute prin încercarea la încovoiere, în cazul materialelor compozite testate în ceea ce privește următoarele proprietăți mecanice: modulul de elasticitate  $E$  (Fig. 2.3); tensiunea normală maximă  $\sigma_{\max}$  (Fig. 2.4); energia de deformație  $U$  consumată până la rupere (Fig. 2.5).

În tabelul 2.2 se prezintă valorile medii ale caracteristicilor mecanice de încovoiere obținute în cazul materialelor compozite testate. Valoarea medie a modulului de elasticitate  $E$  corespunzătoare materialului compozit ranforsat cu făină de lemn de brad este de 3,1 ori mai mare decât valoarea corespunzătoare materialului compozit ranforsat cu făină de lemn de fag și respectiv, de 2,25 ori mai mare decât valoarea obținută în cazul ranforsării cu făină de lemn de carpen. Tensiunea normală maximă  $\sigma_{\max}$  corespunzătoare materialului compozit ranforsat cu făină de lemn de brad este de 2,14 ori mai mare decât valoarea corespunzătoare materialului compozit ranforsat cu făină de lemn de fag și respectiv, de 1,60 ori mai mare (cu 60%) decât valoarea obținută în cazul ranforsării cu făină de lemn de carpen.

**Tabel 2.2**

Valorile medii ale caracteristicilor mecanice obținute prin încercarea de încovoiere în cazul materialelor compozite ranforsate cu făină de lemn

Tipul materialului compozit	Unitate de măsură	Făină de fag / rășină Urelit®R	Făină de carpen / rășină Urelit®R	Făină de brad / rășină Urelit®R
Modulul de elasticitate $E$ la încovoiere	(MPa)	668,5	919,48	2070,1
Tensiunea maximă $\sigma_{\max}$ la încovoiere	(MPa)	7,9	10,548	16,9
Energia de deformație $U$ până la forța maximă	( $\times 10^{-3} J$ )	15,8	17,73	13,8
Modul de rigiditate $EI_z$ la încovoiere	( $\times 10^4 N \cdot mm^2$ )	6,2387	6,7128	10,891
Forța maximă $F_{\max}$	(N)	22,904	24,445	30,539
Deplasarea $v_{\max}$ la forța maximă	(mm)	1,4059	1,3655	0,92725
Deformația specifică maximă $\varepsilon_{\max}$	-	0,015686	0,014025	0,008953

În schimb, cea mai mică valoare a energiei de deformație  $U$  consumată până la rupere s-a înregistrat în cazul materialelor compozite ranforsate cu făină de lemn de brad (Tab. 2.2). Valoarea energiei de deformație  $U$  a fost mai mare cu 14,49% în cazul materialului compozit ranforsat cu făină de lemn de fag comparativ cu valoarea înregistrată pentru materialul compozit ranforsat cu făină de lemn de brad. Valoarea a energiei de deformație  $U$  a fost mai mare cu 28,48% în cazul materialului compozit ranforsat cu făină de carpen comparativ cu valoarea înregistrată pentru materialul compozit ranforsat cu făină de lemn de brad.



### 2.2.3. Concluzii

În concluzie, ranforsarea cu făină de lemn de brad asigură materialului compozit caracteristici mecanice de două-trei ori mai mari decât în cazul utilizării făinii de lemn de fag sau carpen. Din acest motiv aşchiile din fibre de lemn de brad sunt recomandate și în literatura de specialitate pentru ranforsarea fețelor în cazul panourilor de tip sandwich obținute prin presare în timp ce “pentru miez se recomandă aşchii grosiere care provin din lemn de fag” (Barbu, 1999).

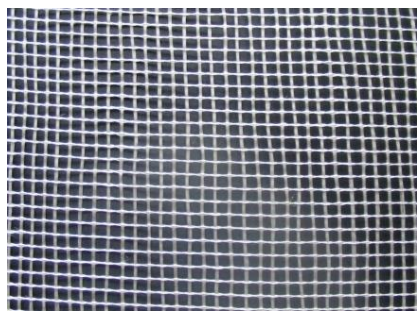
### 2.3. Efectul tipului fibrelor de lemn asupra comportării mecanice după imersiune în apă a materialelor compozite ranforsate cu țesătură de sticlă și făină de lemn

În acest subcapitol se prezintă rezultatele referitoare la proprietățile mecanice de încovoiere în cazul a două materiale compozite pe bază de rășină poliesterică ranforsată hibrid cu țesătură de sticlă și făină de lemn (de brad și de stejar). S-a decis înlocuirea rășinii ureo-formaldehidică de tip *Urelit®R* cu rășina poliesterică *Colpoly 7233* deoarece materialele compozite pe bază de rășini poliesterice ranforsate cu fibre de sticlă absorb o cantitate mai mică de apă și se degradează mai puțin după imersiune îndelungată (9200 ore) în apă sau apă de mare (Cerbu – Teza de doctorat, 2005).

Având în vedere concluziile din subcapitolul precedent, s-a utilizat făina de lemn de brad pentru ranforsarea panourilor din material compozit ale cărui straturi sunt ranforsate și cu țesătură de sticlă. Pentru comparație, s-au efectuat încercări pe materialul compozit similar ranforsat cu făină de lemn de stejar.

#### 2.3.1. Materialele testate și metoda de lucru

Mai întâi, s-au fabricat două tipuri de panouri de dimensiuni 450 mm x 300 mm, formate din șase straturi ranforsate cu țesătură de sticlă de tip *EWRI45* ( $\rho = 145 \text{ g/m}^2$ ) și cu făină de lemn de brad și respectiv, de stejar. Țesătura de sticlă *EWRI45* este de tip plană bidirecțională, având mărimea ochiurilor de 5 mm și este utilizată în construcții pentru ranforsarea stratului de tencuială și/sau fixarea plăcilor utilizate pentru izolarea clădirilor. S-a ales pentru ranforsare o astfel de țesătură de sticlă cu ochiuri mari deoarece “rețelele de inserție cu ochiuri prezintă avantajul unei bune ancorări mecanice în masa de aşchii de lemn” (Barbu, 1999).



**Fig. 2.6.** Țesătura de sticlă *EWRI45* bidirecțională plană, cu ochiuri de 5 mm, utilizată pentru ranforsare

Înainte de turnare, acest amestec a fost omogenizat prin mixare manuală, continuă timp de  $\cong 10$  min. Rapoartele masice ale materialelor de ranforsare pentru fiecare strat au fost: 10,12% fibre de sticlă; 15,23% făină de lemn de brad sau de stejar. Mărimea fibrelor de lemn a fost de  $0,5 \div 1$  mm.

*Colpoly 7233* este o rășină poliesterică nesaturată pe bază de dicitopentadienă și acid ortoftalic dizolvate în stiren (Fișa tehnică, 2008). Această rășină este tixotropică, preaccelerată și conține indicator de peroxid. *Colpoly 7233* este recomandată pentru toate aplicațiile cu fibre de sticlă: ambarcațiuni, scaune, rezervoare, elemente de caroserie, echipament sportiv, etc. Produsul poate fi aplicat manual sau prin pulverizare cu pistolul. Conform fișei tehnice, avantajele utilizării acestei rășini sunt: conținut redus de stiren; proprietăți mecanice bune; indice tixotropic mediu ( $2,8 \div 3,5$ ).

Din fiecare panou s-au fabricat câte trei serii de epruvete pentru încercarea de încovoiere: un set de epruvete martor; un set de epruvete pentru testare după imersiune în apă; un set de epruvete pentru testare după imersiune în apă de mare. Durata maximă de imersiune a epruvetelor în cele două medii a fost de 5863 ore (8 luni, 4 zile și 7 ore).

Ca metodă de lucru, mai întâi s-au studiat comparativ curbele de absorbție de apă în cazul celor două tipuri de medii de imersiune (apă potabilă și apă de mare din Marea Neagră) și în cazul celor două tipuri de materiale compozite hibride de tip *sticlă-E / făină de lemn / poliester Colpoly 7233*.

Apoi, epruvetele menținute în cele două medii de imersiune, au fost încercate mecanic prin încovoiere utilizând metoda celor trei puncte pe mașina de încercare LR5K Plus fabricată de LLOYD Instruments. S-a căutat ca epruvetele să se testeze la încovoiere după imersiune îndelungată până la atingerea saturației (după cca. 5600-5800 ore în acest caz) pentru a se urmări variația în timp a proprietăților mecanice. Rezultatele obținute pentru epruvetele umede s-au comparat cu rezultatele obținute în cazul epruvetelor martor (epruvete uscate).

### 2.3.2. Rezultate și discuții

Rezultatele privind efectul tipului fibrelor de lemn asupra curbelor de absorbție

În cadrul acestei secțiuni, se prezintă curbele de absorbție pentru materialele compozite hibride de tip țesătură de sticlă EWR145 / făină de lemn / rășină poliesterică Colpoly 7233 în timpul imersiunii în: apă (Fig. 2.7, a); apă de mare (Fig. 2.7, b).

Absorbția de apă (sau apă de mare) notată cu  $m$ , exprimată în procente (%), s-a calculat conform EN ISO 62 (2008) prin utilizarea următoarei relații:

$$m = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100 (\%), \quad (2.1)$$

în care  $m_1$  reprezintă masa epruvetei din material compozit după un anumit timp  $t$  de imersiune;  $m_0$  reprezintă masa epruvetei înainte de imersiune (masa epruvetei uscate).

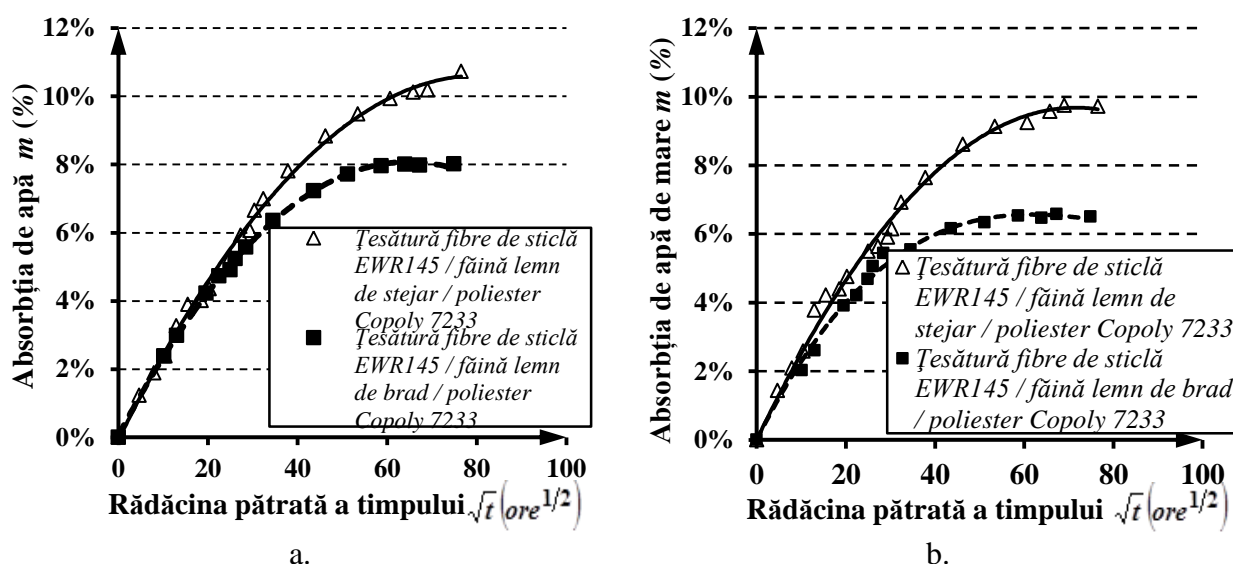


Fig. 2.7. Curbele de absorbție în cazul materialelor compozite hibride de tip Sticlă EWR145 / făină de lemn / poliester Colpoly 7233 în timpul imersiunii în: a. Apă; b. Apă de mare

Se remarcă faptul că în primele cca. 100 ore de imersiune, curbele de absorbție se suprapun în cazul ambelor materiale compozite atât în cazul în care mediul de imersiune este apa (Fig. 2.7, a) cât și în cazul în care mediul de imersiune este apa de mare (Fig. 2.7, b).

Materialul compozit de tip sticlă-EWR145 / făină de lemn de stejar / poliester Colpoly 7233 a absorbit 10,73% (raport masic) apă după 5853 ore de imersiune iar materialul compozit similar dar pe bază de făină de lemn de brad a absorbit 8,02% după 5612 ore de imersiune în apă (Fig. 2.7, a). În mod similar, materialul compozit hibrid cu făină de lemn a absorbit 9,72% umiditate după 5853 ore de imersiune în apă de mare în timp ce materialul compozit pe bază de făină de lemn de brad a absorbit 6,50% după 5612 ore de imersiune în apă de mare (Fig. 2.7, b). Deci,

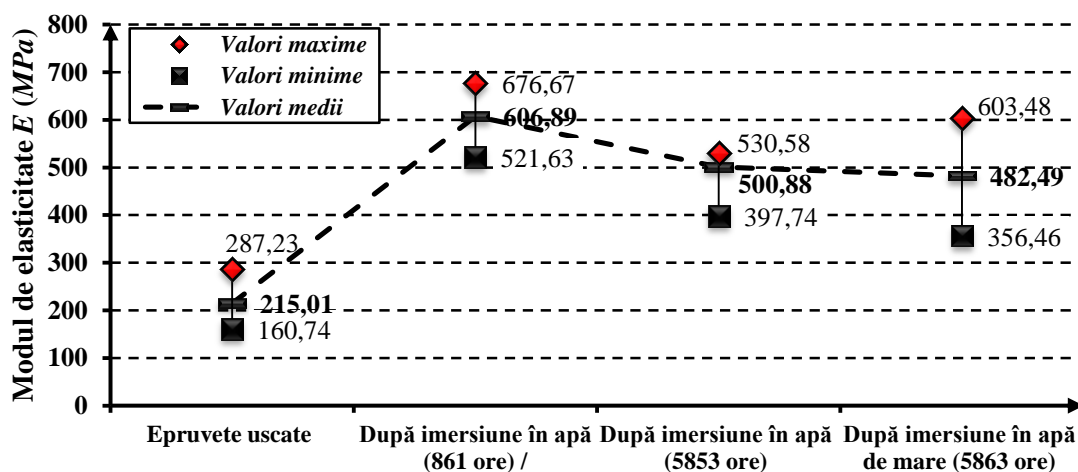
cantitatea de umiditate absorbită de cele două tipuri de materiale compozite hibride este cu cca. 1÷2% mai mică în cazul epruvetelor menținute în apă de mare decât în cazul celor menținute în apă normală după aceeași perioadă de timp de imersiune. Se confirmă încă o dată faptul că sărurile din apa de mare acționează ca o barieră împotriva absorbției de umiditate în cazul materialelor compozite polimerice (Pomiès *et al.*, 1995; Cerbu – Teza de doctorat, 2005).

*Rezultatele privind efectul tipului fibrelor de lemn și efectul duratei de imersiune în diverse medii asupra proprietăților de încovoiere*

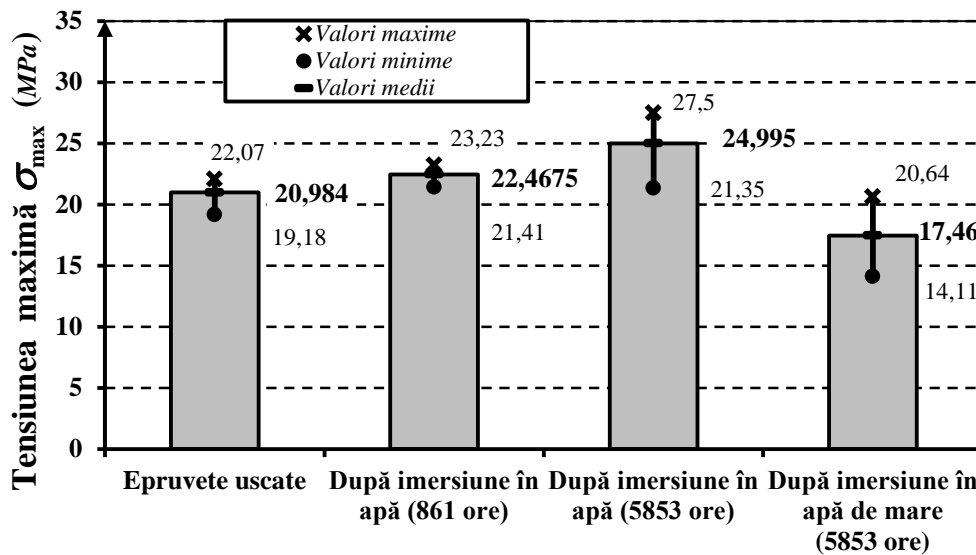
Pentru a vedea evoluția în timp a proprietăților mecanice, în cazul materialului compozit hibrid de tipul țesătură de sticlă EWR145 / făină de lemn de stejar / rășină poliesterică Colpoly 7233 s-au testat patru seturi de epruvete: un set de epruvete uscate (epruvete martor); două seturi de epruvete după 861 ore și după 5853 ore de imersiune în apă; un set de epruvete după 5863 ore de imersiune în apă de mare.

În cazul materialului compozit de tipul sticlă EWR145 / făină de lemn de stejar / poliester Colpoly 7233, se prezintă rezultatele obținute în cazul epruvetelor umede după imersiune în cele două medii, comparativ cu rezultatele obținute în cazul epruvetelor uscate, în ceea ce privește:

- modulul de elasticitate  $E$  la încovoiere (Fig. 2.8);
- valorile tensiunii normale maxime  $\sigma_{\max}$  la încovoiere (Fig. 2.9).



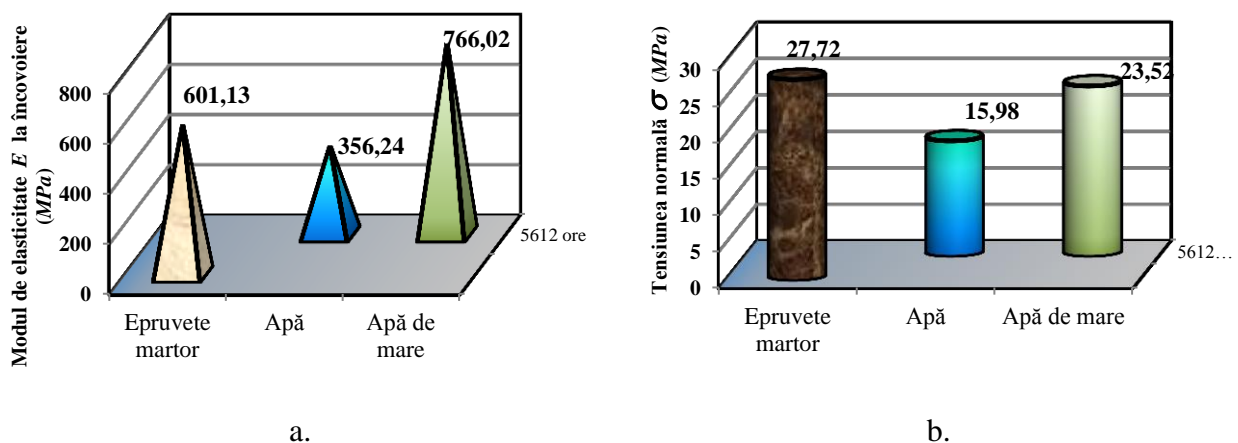
**Fig. 2.8.** Valorile modulelor de elasticitate  $E$  determinate prin încercarea la încovoiere în cazul materialului compozit de tipul sticlă EWR145 / făină lemn de stejar / poliester Colpoly 7233



**Fig. 2.9.** Valorile tensiunii normale  $\sigma$  determinate prin încercarea la încovoiere în cazul materialului compozit de tipul *sticlă EWR145 / făină lemn de stejar / poliester Colpoly 7233*

În cazul materialului compozit de tipul *sticlă EWR145 / făină lemn de stejar / poliester Colpoly 7233*, după 5863 ore de imersiune în apă sau apă de mare, modulul de elasticitate  $E$  la încovoiere crește de 2,33 ori și respectiv, de 2,24 ori (Fig. 2.8).

Tensiunea normală maximă  $\sigma_{\max}$  la încovoiere crește cu 19,11% după imersiune timp de 5853 ore în apă, în timp ce aceasta scade cu 16,79% după aceeași perioadă de imersiune în apa de mare (Fig. 2.9).



**Fig. 2.10.** Variația proprietăților de încovoiere în funcție de mediul de imersiune în cazul materialului compozit *Sticlă-EWR145 / făină de lemn de brad / poliester Colpoly 7233*:  
a. Modulul de elasticitate  $E$ ; b. Tensiunea normală maximă  $\sigma$

În figura 2.10 se prezintă comparativ rezultatele referitoare la proprietățile de încovoiere în cazul materialului compozit *Sticlă-EWR145 / făină de lemn de brad / poliester Colpoly 7233*, înainte și după imersiune în apă și respectiv, în apă de mare, timp de 5612 ore. Modulul de elasticitate  $E$

scade cu 40,74% după imersiunea timp de 5612 ore în apă și crește cu 27,43% după aceeași perioadă de imersiune în apă de mare (Fig. 2.10, a). Tensiunea normală maximă  $\sigma_{\max}$ , scade cu 42,35% și cu 15,15% după 5612 ore de imersiune în apă și respectiv, în apă de mare (Fig. 2.10,b).

Se remarcă faptul că în cazul epruvetelor martor, modulul de elasticitate  $E$  este mai mare de 2,09 ori în cazul materialului compozit hibrid cu făină de lemn de brad decât în cazul materialului compozit cu făină de lemn de stejar (Fig. 2.8 și Fig. 2.10,a). Tot în cazul epruvetelor uscate, valoarea medie a tensiunii normale maxime  $\sigma_{\max}$ , înregistrată în cazul materialului compozit hibrid cu făină de lemn de brad, este mai mare cu 32,1% decât în cazul materialului compozit cu făină de lemn de stejar (Fig. 2.9 și Fig. 2.10,b).

*Efectul tipului de fibre de lemn și a mediului de imersiune asupra degradării suprafețelor materialelor compozite*



**Fig. 2.11.** Epruvetă din material compozit țesătură de sticlă EWR145 / făină de lemn de stejar / poliester Colpoly, testată la încovoiere după imersiune timp de 5612 ore în apă

Referitor la degradarea suprafețelor epruvetelor ca efect al acțiunii umidității, în cazul materialului compozit de tipul țesătură de sticlă EWR145 / făină de lemn de brad / poliester Colpoly 7233, nu s-au observat pete sau modificări de culoare vizibile cu ochiul liber, după 5612 ore de imersiune în apă (Fig. 2.11).

În figura 2.12 se prezintă fotografiile ale epruvetelor fabricate din materialul compozit de tipul țesătură de sticlă EWR145 / făină de lemn de stejar / poliester Colpoly 7233 care au fost menținute 5853 ore în apă (Fig. 2.12,a) și apă de mare (Fig. 2.12,b). Se observă că în cazul acestui material compozit, au apărut pete de culoare închisă pe muchiile epruvetelor. Aceste pete sunt mult mai evidente în cazul epruvetelor menținute în apă de mare timp de 5863 ore (Fig. 2.12,b).

Cauza apariției petelor de culoare închisă în cazul materialului compozit hibrid cu făină de lemn de stejar, este atribuită conținutului mai ridicat de tanini caracteristic lemnului de stejar în comparație cu lemnul de brad (Klyosov, 2007). Taninii formează cu apa compuși hidroxilici de culoare închisă (Klyosov, 2007). Degradarea mai pronunțată a epruvetelor menținute în apă de mare (Fig. 2.12,b) comparativ cu cele ținute în apă (Fig. 2.12, a), durata imersiunii fiind aceeași (5853 ore), este cauzată de acțiunea ciupercilor, a algelor marine și a micro-organismelor

existente în apa de mare. Acestea folosesc rășina poliesterică ca sursă de hrană și colonizează materialele compozite (Gu, 2007; Gu *et al.*, 1996; Wagner *et al.*, 1996).



**Fig. 2.12.** Fotografii ale epruvetelor (după încovoiere) din material compozit țesătură de sticlă EWR145 / făină de lemn de stejar / poliester Colpoly 7233, degradate după imersiune timp de 5853 ore în: a. Apă; b. Apă de mare

### Concluzii

Analiza comparativă a rezultatelor prezentate în cadrul acestui subcapitol conduce la formularea unor concluzii după cum urmează.

- În cazul materialului compozit de tipul țesătură de sticlă EWR145 / făină de lemn de stejar / poliester Colpoly 7233 s-a observat o dublare a modulului de elasticitate  $E$  după imersiune timp de 5863 ore în apa de mare (Fig. 2.8). În schimb, în cazul materialului compozit cu făină de lemn de brad s-a înregistrat o scădere a modulului de elasticitate după imersiune în apă și respectiv, o creștere cu 27,43% după imersiune în apă de mare (Fig. 2.10,a).
- După imersiune în apă timp de cca. 5600÷5800 ore, tensiunea normală maximă  $\sigma_{\max}$  la încovoiere crește cu 19,11% în cazul materialului compozit cu făină de lemn de stejar (Fig. 2.9) și respectiv, scade cu 42,35% în cazul materialului compozit cu făină de lemn de brad (Fig. 2.10,b).
- Cu toate avantajele prezentate mai înainte în ceea ce privește comportarea mecanică la încovoiere a materialului compozit cu făină de lemn de stejar, acesta nu se recomandă în aplicații care implică medii cu umiditate ridicată deoarece taninii din lemnul de stejar formează cu apa compuși hidroxilici de culoare închisă așa cum se poate observa în figura 2.12 (Klyosov, 2007). În acest sens, pentru aplicații în mediu umed se recomandă materialul compozit hibrid cu făină de lemn de brad.
- Țesătura de sticlă de tip EWR145 utilizată pentru ranforsarea materialului compozit hibrid, având ochiuri mari (5 mm) a permis trecerea făinii de lemn dintr-un strat în altul

*astfel încât straturile nu sunt de aceeași grosime și în consecință, straturile din țesătură de sticlă nu sunt echidistante după cum se poate observa în figurile 2.11 și 2.12. În acest sens, se recomandă utilizarea unei țesături de sticlă cu densitate mai mare și cu ochiuri de dimensiuni mai mici.*

***Concluzia finală a cercetărilor prezentate în acest subcapitol este că trebuie să se reia cercetările referitoare la efectele umidității absorbite asupra materialului compozit hibrid ranforsat cu țesătură de sticlă și cu făină de lemn de brad pentru o structură de material îmbunătățită, fabricată din: țesătură de sticlă având densitatea de  $200 \text{ g/m}^2$  și cu mărimea mai mică a ochiurilor; făină de lemn de brad cu fibre de lemn având mărimea mai mică decât  $500 \mu\text{m}$ ; rășină epoxi Epolam 2015 care este recomandată pentru aplicații în mediu umed conform Fișei tehnice (2006).***

#### **2.4. Comportarea mecanică în timp a materialului compozit de tip sticlă-E / făină de lemn de brad / epoxi sub acțiunea umidității**

Ținând cont de aplicațiile materialelor compozite hibride armate atât cu țesătură de sticlă și cu făină de lemn în medii cu umiditate ridicată (panouri stradale, panouri de protecție acustică și de izolație, componente de mobilier de grădină etc), în acest capitol se prezintă rezultatele experimentale referitoare la comportarea mecanică a materialului compozit fabricat din rășină epoxi Epolam 2015 ranforsată hibrid cu țesătură de sticlă cu densitatea  $200 \text{ g/m}^2$  și făină de lemn de brad (soluție propusă la finalul subcapitolului precedent) după imersiune de lungă durată în apă (după nouă luni).

Astfel, se prezintă pentru materialul compozit de tip *sticlă-E / făină de lemn de brad / epoxi Epolam 2015*, variația caracteristicilor mecanice determinate prin încercarea de încovoiere prin metoda celor trei puncte și în testul de impact de tip Charpy, după imersiunea totală în apă pentru 1177 ore, 3048 ore și respectiv, 6572 ore. În cele din urmă, s-au analizat comparativ rezultatele obținute în cazul epruvetelor martor (uscate) cu cele obținute pe epruvetele testate după imersiune în apă.

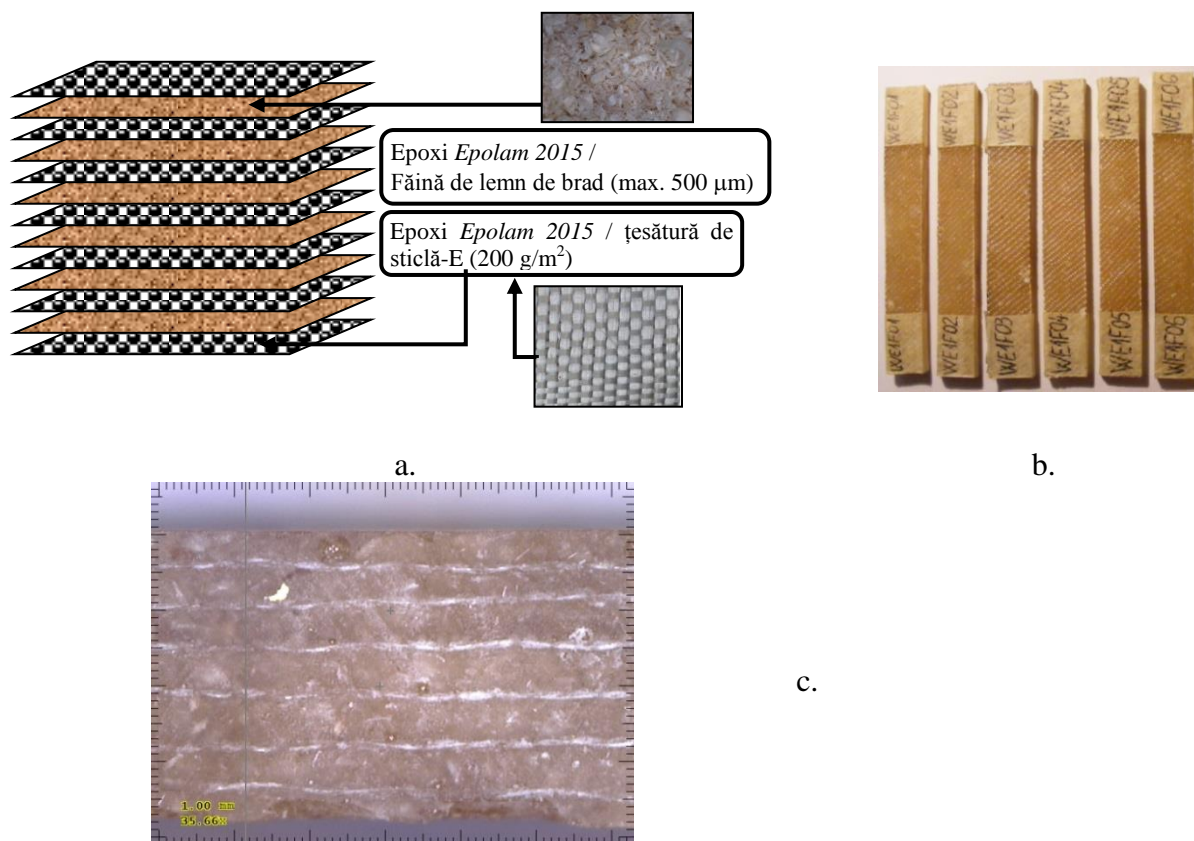
Materialul compozit hibrid de tip *sticlă / făină de lemn de brad / epoxi Epolam 2015* analizat în cadrul acestui capitol, s-a utilizat pentru fabricarea la nivel de prototip a componentei de șezut-spătar a unui scaun (Cerbu, 2012) care poate fi utilizat ca obiect de mobilier pentru interior sau pentru exterior (pentru terase, grădini). Din această cauză, cercetările privind efectele umidității asupra proprietăților mecanice sunt necesare pentru aplicațiile de exterior.



### 2.4.1. Materiale testate. Metoda de lucru

#### Materiale

S-a fabricat o placă din material compozit stratificat utilizând țesătură de fibre de sticlă de tip *E* (densitatea  $200 \text{ g/m}^2$ ) pentru a ranfora rășina epoxi *Epolam 2015* amestecată cu făină de lemn de brad. Structura pe straturi a materialului compozit stratificat hibrid se prezintă în figura 2.13, a și conține șapte straturi de țesătură de sticlă de tip *E*.



**Fig. 2.13.** Structura materialului compozit stratificat hibrid:

a.Schematic; b.Epruvete de încovoiere; c. Fotografie înregistrată cu microscopul digital

Țesătura de sticlă este fabricată de *Axons Technologies* iar fibrele sunt dispuse în mod egal pe direcția bătăturii (50%) și respectiv, pe direcția urzelii (50%) conform *Fișei tehnice* a țesăturii de sticlă *WE200* (2010). Firele de țesătură de pe ambele direcții (bătătură și urzeală) sunt de asemenea de același tip.

Fibrele de lemn cu mărimea mai mică decât  $500 \mu\text{m}$  formează așa-numita făină de lemn. Acestea s-au obținut prin reciclarea deșeurilor rezultate în timpul prelucrării mecanice a lemnului de brad. Mai întâi, deșeurile din făină de lemn de brad au fost măcinate fin. Apoi, s-a utilizat un echipament de sitare pentru a separa așchiile de lemn pe mărimi.

Pentru a inițializa și pentru a accelera procesul de polimerizare a rășinii, s-a amestecat întăritorul

*Epolam 2014* (produs de *Axson Technologies*) cu rășina epoxi de tip *Epolam 2015* și s-a omogenizat amestecul prin mixare manuală, continuă timp de 5 min., înainte de adăugarea făinii de lemn.

Conform *Fișei tehnice* a rășinii epoxi de tip *Epolam 2015* (produsă de *Axson Technologies*, 2006), aceasta este utilizată pe scară largă pentru fabricarea materialelor compozite stratificate prin tehnologia de așezare manuală a straturilor (*handing lay-up technology*) sau prin injectare cu presiune scăzută. Acest tip de rășină are o comportare bună la impregnarea lemnului și în mediu umed conform *Fișei tehnice* a rășinii *Epolam 2015* (2006).

**Tabelul 2.3**

Caracteristicile fizice și chimice ale rășinii epoxi de tip *Epolam 2015* în stare lichidă (*Fișa tehnică - Axson Technologies*, 2006)

Caracteristică	Valoare	Unitate de măsură	Metoda de testare
Densitate, 25 °C	1,15	$g/cm^3$	EN ISO 1675: 1985
Vâscozitate, 25 °C	1550	$mPa \cdot s$	Brookfield LVT
Raportul de amestecare cu întăritorul	32 (raport masic) 38 (raport volumic)	%	-
Timp de gelifiere, la 23 °C (100 g rășină + 32 g întăritor)	2,5	ore	-
Timp de manipulare	60	minute	-
Temperatura de tranziție vitroasă	80	°C	EN ISO 11359: 2002 C9188

**Tabelul 2.4**

Caracteristici mecanice ale rășinii epoxi de tip *Epolam 2015* (cu întăritor) fără ranforsare (*Fișa tehnică a rășinii Epolam 2015*, 2006)

Caracteristica	Valoare	Unitate de măsură	Metoda de testare
Rezistența la tracțiune	70	$MPa$	EN ISO 527: 1993
Rezistența la încovoire	120	$MPa$	EN ISO 178: 2001
Modul de elasticitate $E$	3100	$MPa$	EN ISO 178 :2001
Rezistența la impact - <i>Charpy</i> (epruvetă fără crestătură)	40	$kJ/m^2$	EN ISO 179
Lungirea max. la încercarea de tracțiune	5	%	EN ISO 527: 1993
Duritate	83	Shore D15	EN ISO 868: 2003

Proprietățile fizice și cele chimice ale rășinii epoxi *Epolam 2015* în stare lichidă sunt prezentate în tabelul 2.3 iar proprietățile mecanice ale rășinii epoxi tratate, fără ranforsare, sunt prezentate în tabelul 2.4.

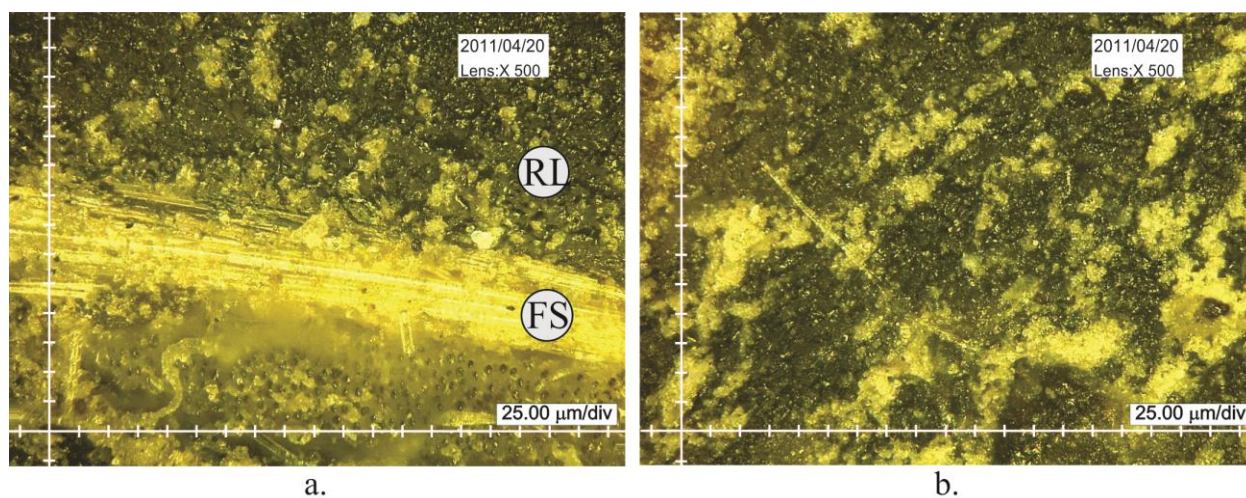
Pentru fabricarea panoului din material compozit stratificat din care s-au tăiat epruvetele, s-a utilizat tehnologia manuală de formare a straturilor și compactare cu rola a acestora, așa numita

„*handing lay-up tehnology*” în literatura de specialitate.

După fabricare, panoul a fost menținut timp de o săptămână la temperatura camerei (cca. 22-24°C) pentru polimerizarea completă a rășinii.

În figura 2.13,c se arată că straturile ranforsate cu țesătură de sticlă alternează cu cele ranforsate cu făină de lemn. În final, materialul compozit stratificat hibrid a avut următoarea componență în procente de greutate: 5÷6% făină de lemn de brad; 14÷15% țesătură de sticlă de tip *E*; 80% soluție vâscoasă formată din rășina epoxi *Epolam 2015* și întăritorul de tip *Epolam 2014*.

În figura 2.14 se prezintă o fotografie a secțiunii panoului din material compozit stratificat obținută cu un microscop digital care mărește până la 3000x. Astfel, în figura 2.14,a se prezintă un strat ranforsat cu fibre de sticlă, aflat între două straturi ranforsate cu făină de lemn de brad. În figura 2.14,b prezintă doar stratul obținut prin amestecarea făinii de lemn de brad cu soluția vâscoasă rezultată din omogenizarea întăritorului *Epolam 2014* în masa de rășină epoxi *Epolam 2015*. Această fotografie digitală arată faptul că făina de lemn a fost uniform distribuită în rășină astfel încât stratul poate fi considerat omogen la nivel macroscopic.



**Fig. 2.14.** Fotografii (500x) ale secțiunii compozitului în care se prezintă:

- a. Un strat din țesătură de sticlă și rășină; b. Un strat din rășină epoxi ranforsată cu făină de lemn de brad (FS – fibre de sticlă, RL – strat din rășină ranforsată cu făină de lemn)

Apoi, din panoul fabricat după procedura descrisă mai înainte, s-au tăiat epruvetele pentru ambele tipuri de încercări mecanice, încercarea de încovoiere prin metoda celor trei puncte și testele de impact *Charpy*. Ținând cont de recomandările din Standardelor Europene specifice unor astfel de încercări mecanice, epruvetele s-au tăiat din placă sub formă dreptunghiulară având următoarele dimensiuni: 120mm x 15mm pentru încercarea de încovoiere prin metoda celor trei puncte (EN ISO 14125, 1998); 80mm x 10mm pentru încercarea de impact *Charpy* conform (EN ISO 179-1, 2001). S-au pregătit patru seturi de epruvete pentru fiecare tip de încercare (încovoiere și impact de tip *Charpy*): un set de epruvete martor; trei seturi de epruvete care au

fost imersate în apă pentru diferite perioade de timp pentru a studia variația proprietăților mecanice în funcție de timpul de imersiune.

Toate epruvetele au fost uscate timp de trei zile la 40 °C într-o etuvă și apoi cântărite înainte de testare (epruvetele martor) sau de imersiune în apă, pentru a înregistra masa epruvetelor uscate.

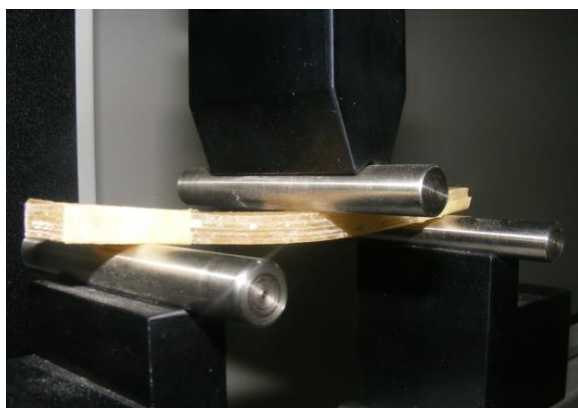
### *Metode de testare*

#### *Imersiunea în apă*

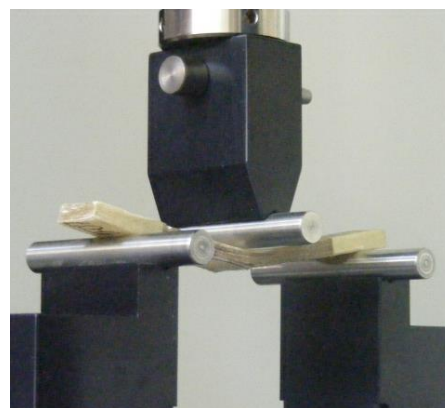
Ambele tipuri de epruvete (epruvetele de încovoiere și cele pentru testul de impact *Charpy*) au fost împărțite în patru seturi. Dintre acestea, un set de epruvete a fost păstrat la loc uscat în desicator, până în momentul testării mecanice. Celelalte trei seturi de epruvete au fost introduse în apă la temperatura camerei înainte de încercarea mecanică, pentru perioade diferite de timp: pentru 1177 ore ( $\approx 1$  lună și 19 zile); pentru 3048 ore ( $\approx 4$  luni și 7 zile); pentru 6572 ore ( $\approx 9$  luni și 4 zile). Recipientele cu apă au fost acoperite în tot acest timp. Pentru a păstra aproximativ constante condițiile de imersiune, apa a fost schimbată în fiecare săptămână. Pentru a monitoriza absorbția de apă, cuantificată prin conținutul  $m$  de apă absorbită, epruvetele au fost scoase periodic din apă, uscate la suprafață prin tamponare cu hârtie absorbantă și cântărite prin utilizarea unei balanțe electronice de tipul SI-234A (fabricată de *Denver Instrument*) având domeniul de măsurare 0-250 g, cu o precizie de  $\pm 0,0001$  g.

#### *Testarea mecanică*

După imersiune, atât epruvetele uscate cât și cele umede au fost supuse încercării mecanice de încovoiere prin utilizarea metodei celor trei puncte conform EN ISO 14125 (1998).



a.



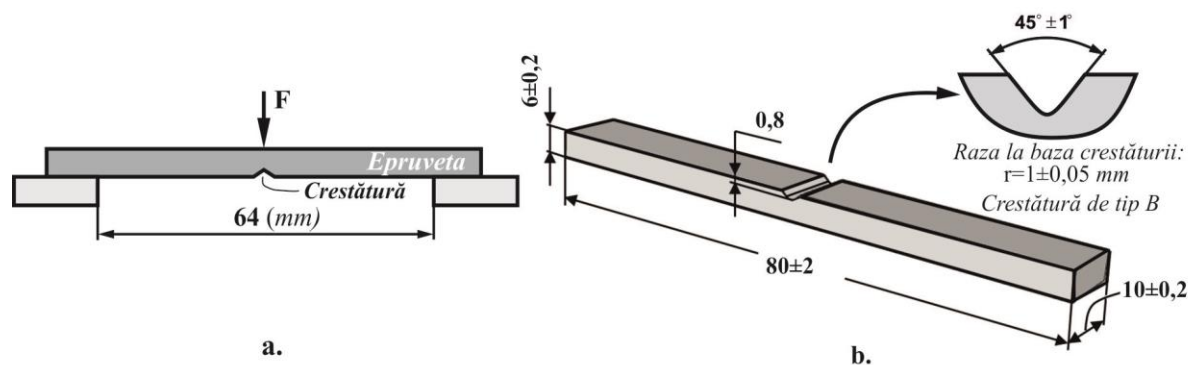
b.

**Fig. 2.15.** Încercarea la încovoiere prin metoda celor trei puncte:  
a. Înainte de rupere; b. După ruperea primului strat.

Pentru încercarea de încovoiere s-a utilizat echipamentul *LR5K Plus* fabricat de *LLOYD Instruments*. Capacitatea mașinii este până la forța maximă de  $\pm 15 \text{ kN}$ . Epruvetele de încovoiere au fost simplu rezemate la ambele capete iar forța s-a aplicat la mijlocul epruvetei. Distanța dintre reazeme a fost egală cu  $96 \text{ mm}$  (Fig. 2.15). Viteza de încărcare a fost de  $1,5 \text{ mm/min}$  conform standardului utilizat (EN ISO 14125, 1998).

Înainte de încercarea de încovoiere, dimensiunile secțiunii transversale corespunzătoare fiecărei epruvete au fost măsurate cu precizie de  $0,1 \text{ mm}$  iar acestea au fost considerate ca date de intrare în software-ul mașinii. Echipamentul de testare a permis înregistrarea perechilor de valori (forța  $F$  și săgeata  $v$  la mijlocul epruvetei de încovoiere) sub formă de fișiere având 300-500 de înregistrări. Astfel, în final, s-au putut calcula cu precizie, valorile medii ale următoarelor mărimi: modulul de elasticitate longitudinal  $E$  (modulul lui *Young*); modulul de rigiditate la încovoiere  $EI_z$ ; tensiunea maximă  $\sigma_{\max}$  la încovoiere, calculată pentru  $F_{\max}$ ; energia de deformație  $U$  consumată până la forța maximă  $F_{\max}$ ; săgeata maximă  $v_{\max}$  înregistrată la forța maximă  $F_{\max}$ .

Rezultatele obținute (modulul de elasticitate  $E$ , tensiunea maximă  $\sigma_{\max}$  la încovoiere, energia de deformație  $U$  consumată până la forța maximă  $F_{\max}$ ) în cazul epruvetelor umede, s-au comparat cu cele obținute în cazul epruvetelor uscate, așa-numitele epruvete martor.



**Fig. 2.16.** Epruveta utilizată la încercarea de impact de tipul *Charpy*:  
a. Schema de încărcare; b. Forma și dimensiunile epruvetei

Referitor la încercarea de impact *Charpy*, în figura 2.16,a se prezintă schema de încărcare utilizată iar forma și dimensiunile epruvetei sunt prezentate în figura 2.16,b (EN ISO 179-1 2001). Creștătura epruvetei a cărei schiță detaliată este prezentată în figura 2.16,b are rolul de a produce un concentrator de tensiune și astfel, să conducă la inițierea ruperii (EN ISO 179-1 2001).



a.

b.

Fig. 2.17. Încercarea la impact de tip Charpy:

a. Echipamentul de testare la impact *HIT50P* (*Zwich*) din *Laboratorul de Dinamica Structurilor* (Sala *CI10*, Universitatea *Transilvania* din Brașov); b. Poziționarea epruvetei.

În cazul epruvetelor testate în acest subcapitol, s-au prelucrat prin frezare creștături de tipul *B* conform EN ISO 179-1 2001 (Fig. 2.16, b). În plus, creștătura se utilizează pentru alinierea epruvetei *Charpy* în raport cu reazemele echipamentului *Charpy* astfel ca ciocanul de impact al pendulului să lovească epruveta în partea opusă creștăturii (Fig. 2.16, a).

Pentru încercarea mecanică de impact de tip *Charpy*, s-a utilizat un pendul de impact *HIT50P* fabricat de *Zwich* (Ulm, Germania) din *Laboratorul de Dinamica Structurilor* (Sala *CI10*, Universitatea *Transilvania* din Brașov), a cărui valoare maximă a energiei de impact este egală cu 50J (Fig. 2.17). Înainte de testul de impact *Charpy*, s-au măsurat dimensiunile secțiunii transversale ale fiecărei epruvete.

Impactul se produce prin balansarea pendulului (ciocanului) în cădere liberă de la înălțimea  $h$ . Astfel, după ce ciocanul este eliberat, acesta parcurge traiectoria unui arc de cerc, lovește epruveta și după rupere, ciocanul atinge înălțimea  $h'$ . Diferența dintre energia potențială inițială și cea finală a ciocanului reprezintă energia necesară ruperii epruvetei dacă se neglijează frecarea cu aerul și frecările din lagărele pendulului. Această mărime se numește energie de rupere prin test de impact *Charpy* și se notează cu  $U$ .

Echipamentul *HIT50P* utilizat permite înregistrarea automată a energiei de rupere  $U$  pentru fiecare epruvetă testată. În final, se calculează pentru fiecare epruvetă, rezistența de rupere la impact notată cu  $K$ , numită reziliență, cu următoarea relație:

$$K = \frac{U}{A}, \quad (2.2)$$

în care  $A$  reprezintă aria secțiunii transversale a epruvetei în dreptul creștăturii.

### *Analiza la microscop a materialului degradat*

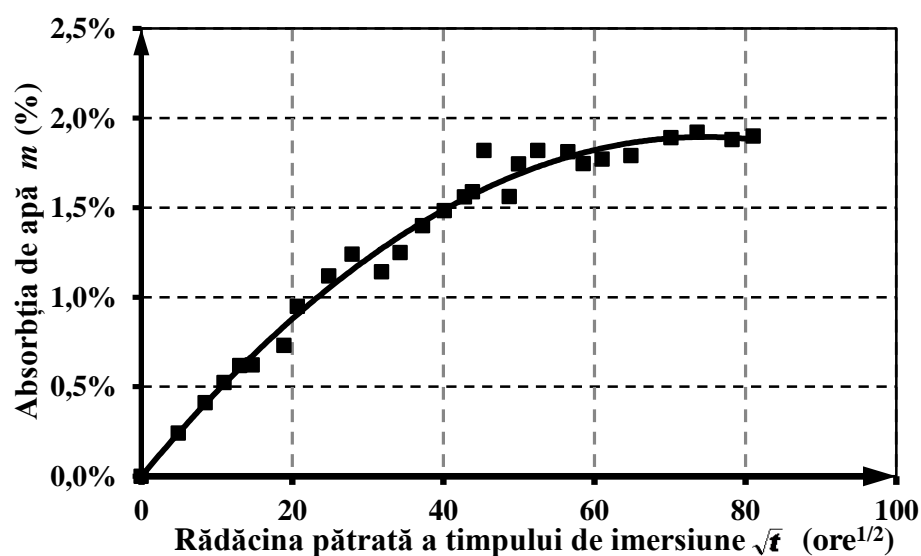
Pentru a explica variația proprietăților mecanice cauzate de efectele apei absorbite, s-a studiat mecanismul de deteriorare al materialului atât la nivelul matricei cât și la nivelul fibrelor de ranforsare. În acest scop, s-a utilizat un microscop digital Keyence-VHX600 fabricat în Japonia, a cărui capacitate de mărire este până la 5000x. Acest echipament dispune de un sistem de iluminare ajustabil și de un soft de procesare digitală a imaginilor achiziționate. Soft-ul permite de asemenea măsurări ale suprafețelor, unghiurilor, perimetrelor și construcția imaginilor 3D prin scanare de adâncime.

#### **2.4.2. Rezultate și discuții**

##### *Datele de absorbție*

În figura 2.18 se prezintă curba de absorbție a apei în timpul celor 6572 ore de imersiune, pe baza datelor de absorbție înregistrate pentru materialul compozit hibrid sticlă-E / făină de lemn de brad / rășină epoxi. Valoarea medie a cantității de apă absorbite a fost egală: 1,25% după 1177 ore ( $\approx 1$  lună și 19 zile) de imersiune; 1,81% după 3048 ore ( $\approx 4$  luni și 7 zile) de imersiune și 1,90% după 6572 ore ( $\approx 9$  luni și 4 zile) de imersiune.

Se observă că o parte din epruvetele analizate au prezentat pete de culoare închisă (gri spre negru) pe muchiile epruvetelor după 6572 ore de imersiune în apă. Inițial s-a presupus și apoi, s-a confirmat prin analiza cu microscopul digital, că oxidarea rășinii și degradarea fibrelor de lemn ar fi cauzele apariției petelor câtă vreme nu au existat astfel de pete pe muchiile epruvetelor înainte de imersiune.



**Fig. 2.18.** Curba de absorbție de apă pe durata celor 6572 ore de imersiune în apă

*Efectele duratei de imersiune asupra caracteristicilor mecanice de încovoiere*

În figura 2.19 se prezintă comparativ curbele  $F-v$  înregistrate atât în cazul epruvetelor martor (epruvete uscate) cât și pe cele corespunzătoare epruvetelor încercate după imersiune în apă timp de 3048 ore.

Se menționează că modulul de elasticitate  $E$  la încovoiere s-a calculat pentru datele experimentale aflate pe porțiunea liniară a curbei  $F-v$  (Fig. 2.19) pentru domeniul  $v = 1 \div 4,5 \text{ mm}$  conform cu standardul (EN ISO 14125, 1998).

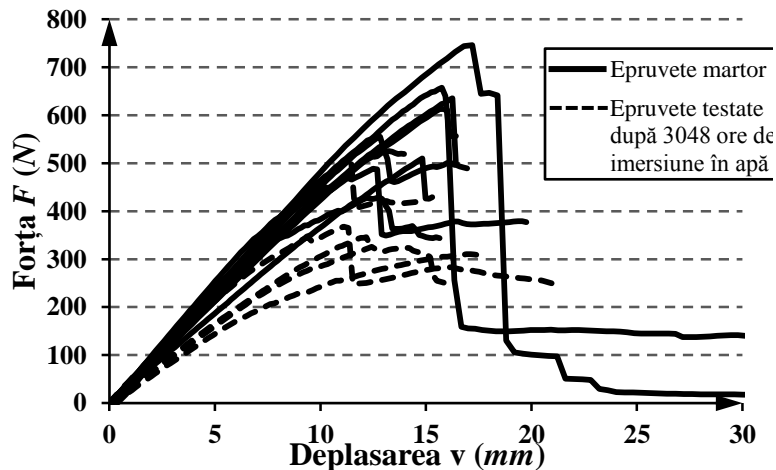


Fig. 2.19. Curbele  $F-v$  înregistrate în încercarea la încovoiere, înainte și după imersiune în apă

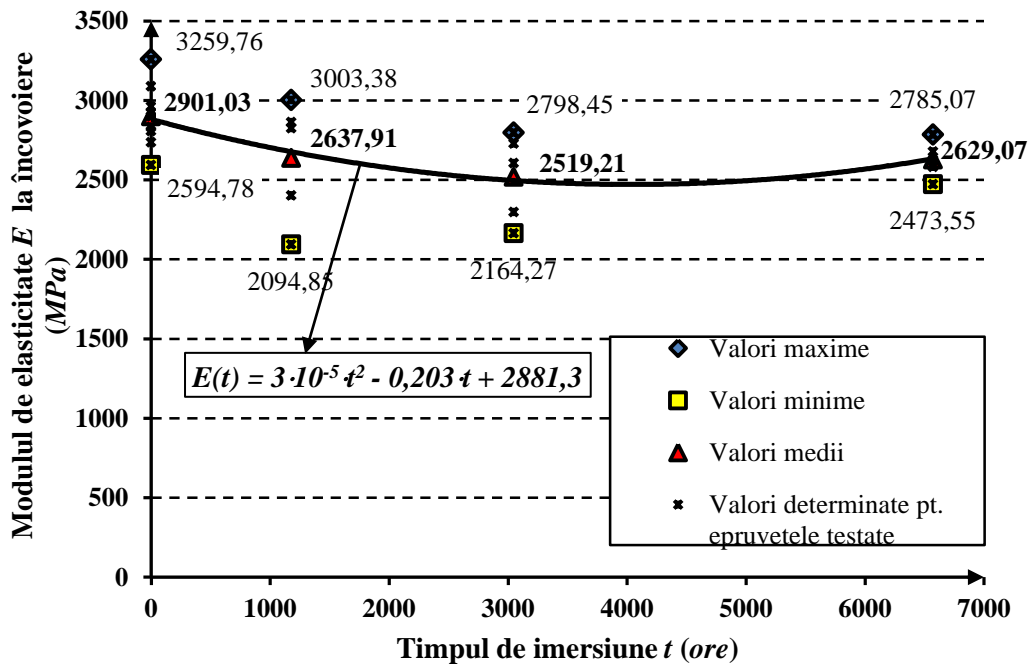


Fig. 2.20. Variația modului de elasticitate  $E$  la încovoiere în funcție de durata de imersiune în apă



În continuare, se prezintă variația următoarelor proprietăți mecanice în funcție de timpul de imersiune în apă (după 1177 ore, 3048 ore, 6572 ore): modulul de elasticitate  $E$  la încovoiere (Fig. 2.20); tensiunea maximă  $\sigma_{\max}$  la încovoiere (Fig. 2.21); energia de deformație  $U$  consumată până la forța maximă  $F_{\max}$  (Fig. 2.22) în încercarea la încovoiere.

Se poate observa că modulul de elasticitate  $E$  la încovoiere (Fig. 2.20) a scăzut de la valoarea de 2901,03 MPa până la 2637,21 MPa (cu 9,07%) după 1177 ore de imersiune în apă, până la 2519,21 MPa (cu 13,16%) după 3048 ore de imersiune, în timp ce acesta a scăzut până la 2629,07 MPa (doar cu 9,37%) după 6572 ore de imersiune (la saturație).

Variația valorilor medii ale modulului de elasticitate  $E$  la încovoiere se poate aproxima cu următoarea funcție polinomială de gradul al II-lea (Fig. 2.20):

$$E(t) = 3 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 0,203t + 2881,3 \quad (\text{MPa}), \quad (2.3)$$

unde  $t$  reprezintă timpul de imersiune. Funcția (2.3) arată dependența modulului de elasticitate  $E$  la încovoiere de timpul de imersiune în apă în cazul materialului compozit hibrid analizat.

În aceeași manieră, în figura 2.21 se arată că valoarea medie a tensiunii normale maxime  $\sigma_{\max}$  la încovoiere a scăzut cu 31,03% de la 141,37 MPa la 97,5 MPa după 1177 ore de imersiune în apă. Această valoare a scăzut la 88,30 MPa (cu 37,54%) după 3048 ore de imersiune, în timp ce aceasta a scăzut doar la 94,33 MPa (cu 33,27%) după 6572 ore de imersiune (la saturație).

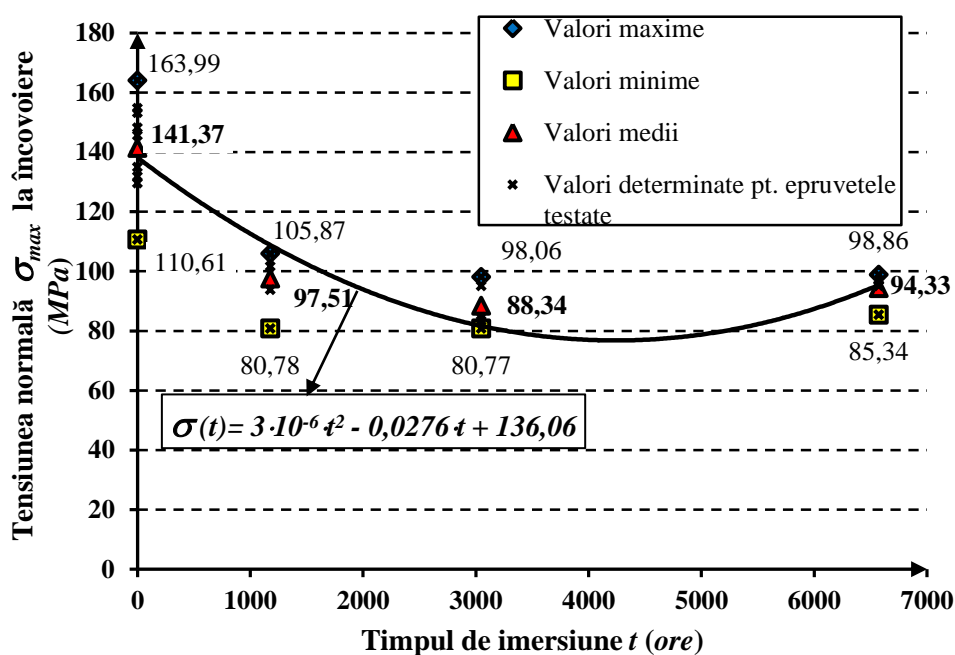


Fig. 2.21. Variația tensiunii normale maxime  $\sigma_{\max}$  la încovoiere în funcție de durata de imersiune în apă

Pentru a arăta dependența tensiunii normale maxime  $\sigma_{max}$  la încovoiere în funcție de durata de imersiune în apă, variația valorilor medii determinate ale acestei mărimi s-au aproximat cu o funcție polinomială de gradul al II-lea (Fig. 2.21) după cum urmează:

$$\sigma(t) = 3 \cdot 10^{-6} t^2 - 0,0276 \cdot t + 136,06 \quad (MPa). \quad (2.4)$$

Analizând figura 2.22, se observa că valoarea medie a energiei de deformație  $U$  consumate până la forța maximă  $F_{max}$ , a înregistrat de asemenea o scădere de la valoarea de 4712,35  $N \cdot mm$ : până la valoarea de 2719,32  $N \cdot mm$  (cu 42,29%) după 1177 ore de imersiune în apă; până la 2621,15  $N \cdot mm$  (cu 44,38%) după 3048 ore de imersiune; până la valoarea de 2038,49  $N \cdot mm$  (cu 56,74%) după 6572 ore de imersiune.

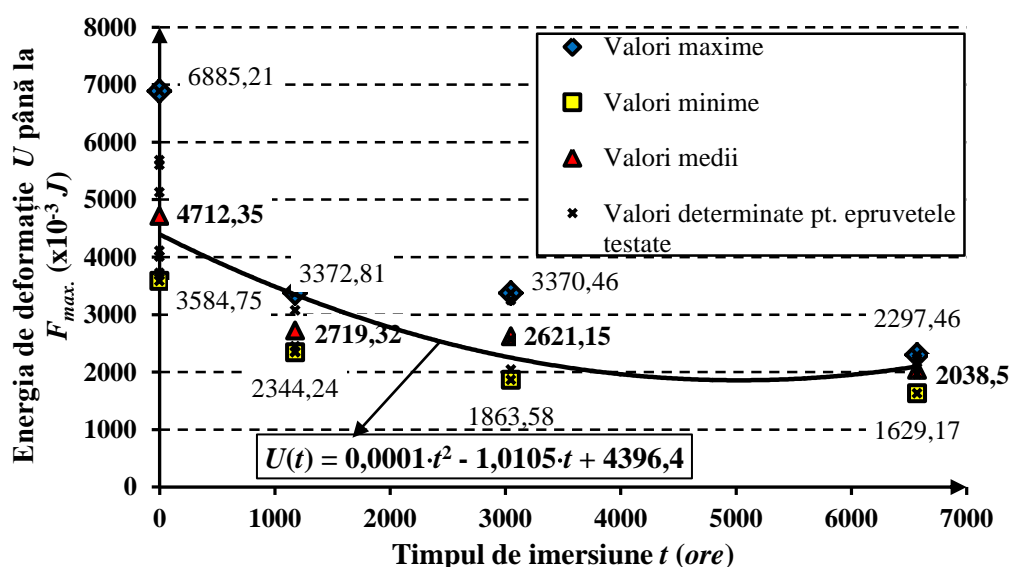


Fig. 2.22. Energia de deformație  $U$  până la  $F_{max}$  în funcție de durata de imersiune în apă

Variația energiei de deformație  $U$  consumate până la forța maximă  $F_{max}$ , în funcție de timpul  $t$  de imersiune poate fi aproximată cu funcția de gradul al II-lea (Fig. 2.22):

$$U(t) = 0,0001 \cdot t^2 - 1,0105 \cdot t + 4396,4 \quad (x10^{-3} J). \quad (2.5)$$

Se remarcă faptul că există o diferență destul de mică între rezultatele referitoare la proprietățile mecanice corespunzătoare epruvetelor încercate după 3048 ore de imersiune în apă, comparativ cu rezultatele corespunzătoare epruvetelor testate după 6572 ore de imersiune (Fig. 2.20...2.22).

Creșterea în mică măsură a caracteristicilor mecanice la saturație (Fig. 2.20...2.22) conduce la concluzia că în interiorul materialului compozit ar avea loc modificări care produc aceste efecte. Observații similare au fost raportate în literatura de specialitate în cazul materialelor compozite ranforsate cu fibre de cânepă (Dhakal *et al.*, 2007) și în cazul materialelor compozite polimerice

ranforsate cu fibre de iută (Ayensu, 2000; Karmakar *et al.*, 1994). Astfel, s-a arătat că un raport volumic de 26% al fibrelor de cânepă conduce la creșterea rezistenței la tracțiune după 30 ore de imersiune în cazul materialelor compozite cânepă / polimer (Dhakal *et al.*, 2007).

Cauza creșterii proprietăților mecanice la saturație (Fig. 2.20...2.22) este atribuită umflării suplimentare a fibrelor de lemn în mod similar cu comportarea fibrelor de cânepă (Dhakal *et al.*, 2007) și cu cea a fibrelor de iută (Ayensu, 2000). Astfel, după umflarea fibrelor de lemn din cauza absorbției de umiditate, acestea umple golurile de la interfața dintre rășină și fibrele de sticlă (Dhakal *et al.*, 2007). În consecință, îmbunătățirea contactului la nivelul interfeței fibre-rășină, a condus la îmbunătățirea comportării mecanice la încovoiere a materialului compozit hibrid sticlă / făină de lemn / rășină la saturație (curba de absorbție din Fig. 2.18). În alt articol (Ayensu 2000), concluziile au fost asemănătoare și anume s-a observat că rezistența la încovoiere a crescut cu 45% după 72 ore de imersiune în apă în cazul materialelor compozite polimerice ranforsate cu fibre de iută.

Din analiza curbelor  $F-v$  (forță – deplasarea verticală a mijlocului epruvetei) înregistrate la încovoiere, se observă că forța maximă  $F_{max}$  a scăzut de la valoarea medie de 574,42 N (epruvete uscate) până la 371,30 N (cu 35,36%) după 1177 ore de imersiune și respectiv, până la 337,04 N (cu 41,32%) după 3048 ore de imersiune. Mai mult, valoarea maximă a deplasării maxime  $V_{max}$  a mijlocului epruvetei, la forța maximă  $F_{max}$ , a scăzut de asemenea puțin de la 14,59 mm la 13,52 mm după 1177 ore de imersiune și respectiv, până la valoarea de 12,96 mm după 3048 ore de imersiune.

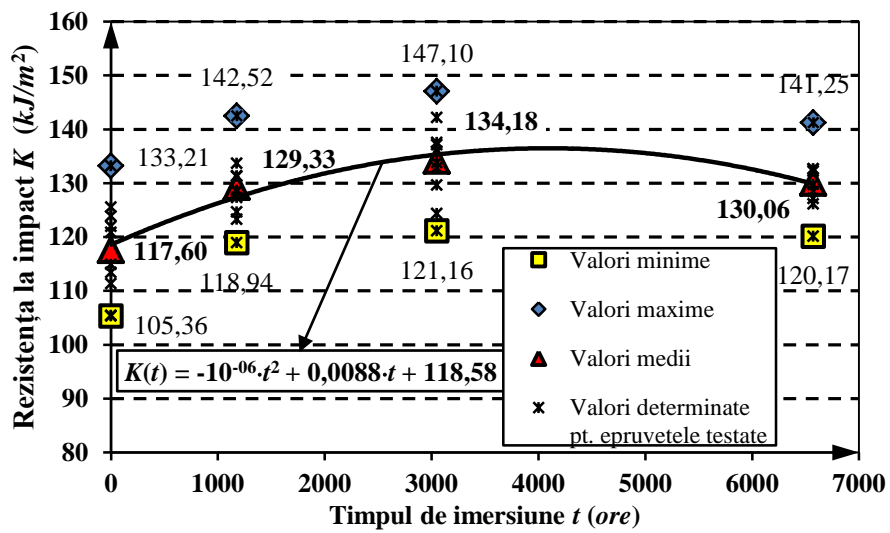
#### *Efectele duratei de imersiune asupra caracteristicilor de impact în testul Charpy*

În figura 2.23 se prezintă valorile determinate pentru rezistența la impact  $K$  (reziliență) în funcție de durata de imersiune în apă, înainte de încercarea la impact de tip Charpy. În cazul epruvetelor martor (epruvete uscate), valoarea medie a rezistenței la impact  $K$  a fost egală cu 117,60  $kJ/m^2$  și se observă că această valoare este mai mare decât valoarea de 40  $kJ/m^2$  care caracterizează rășina epoxi de tip *Epolam 2015* cu întăritor, fără ranforsare (Tab. 2.4).

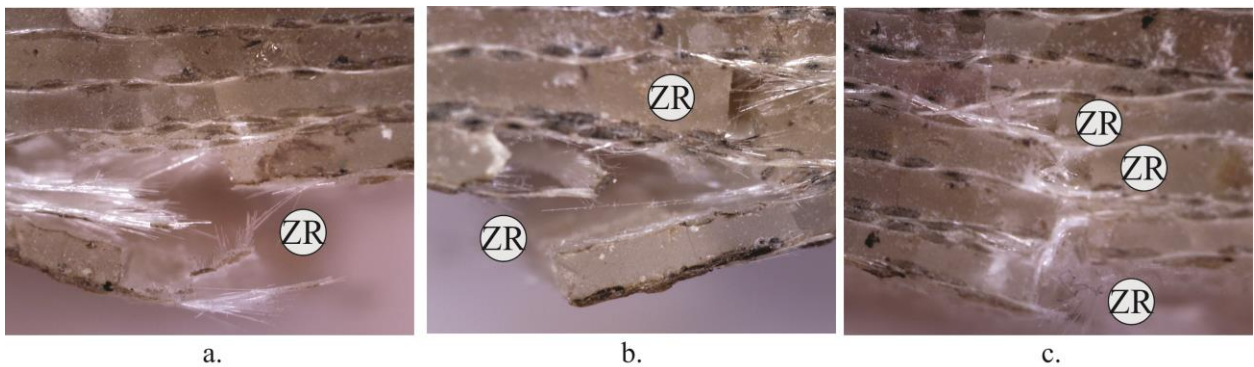
Se remarcă faptul că rezistența la impact  $K$  a crescut de la valoarea de 117,60  $kJ/m^2$ : până la 129,33  $kJ/m^2$  (cu 9,97%) după 1177 ore de imersiune în apă; până la 134,18  $kJ/m^2$  (cu 14,10%) după 3048 ore de imersiune; până la 130,06  $kJ/m^2$  (cu 10,59%) după 6572 ore de imersiune.

Rezistența la impact  $K$  în funcție de timpul  $t$  de imersiune poate fi aproximată cu funcția de gradul al II-lea (Fig. 2.23):

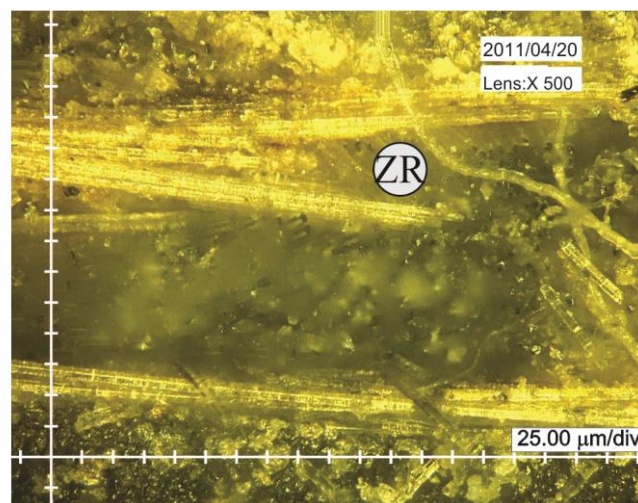
$$K(t) = -10^{-6} \cdot t^2 + 0,0088 \cdot t + 118,58 \quad (kJ/m^2). \quad (2.6)$$



**Fig. 2.23.** Variația rezistenței la impact  $K$  determinată prin testul *Charpy*, în funcție de durata de imersiune în apă



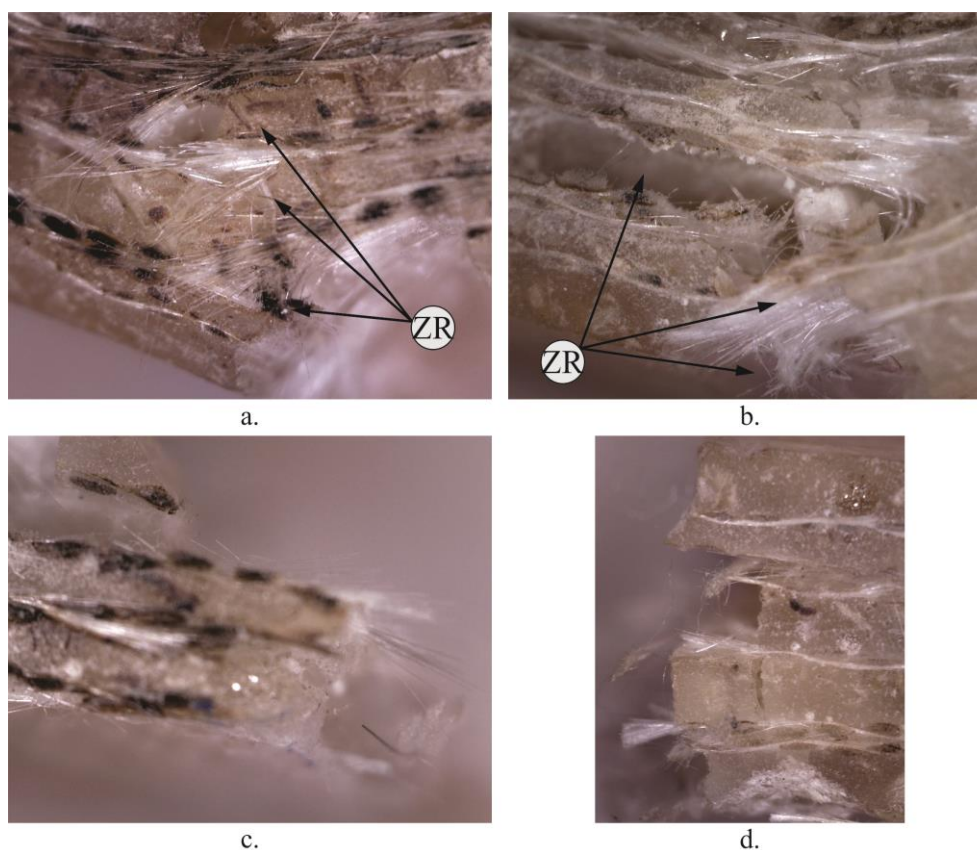
**Fig. 2.24.** Zona de rupere a epruvetelor prin încercarea de încovoiere (ZR – zona de rupere)



**Fig. 2.25.** Zona ruptă a epruvetei (500x) după solicitarea la încovoiere (ZR – zona de rupere)

*Rezultatele analizelor la microscop a zonelor de rupere*

În cele din urmă, pentru a explica mecanismul degradării proprietăților mecanice, s-au analizat zonele de rupere ale epruvetelor după încercarea la încovoiere. În acest scop, în figura 2.24 se prezintă o fotografie (500x) obținută prin analiză la microscop digital a unei epruvete rupte prin încercarea la încovoiere după 6572 ore de imersiune în apă. Se poate observa că doar două-trei straturi au fost complet rupte.



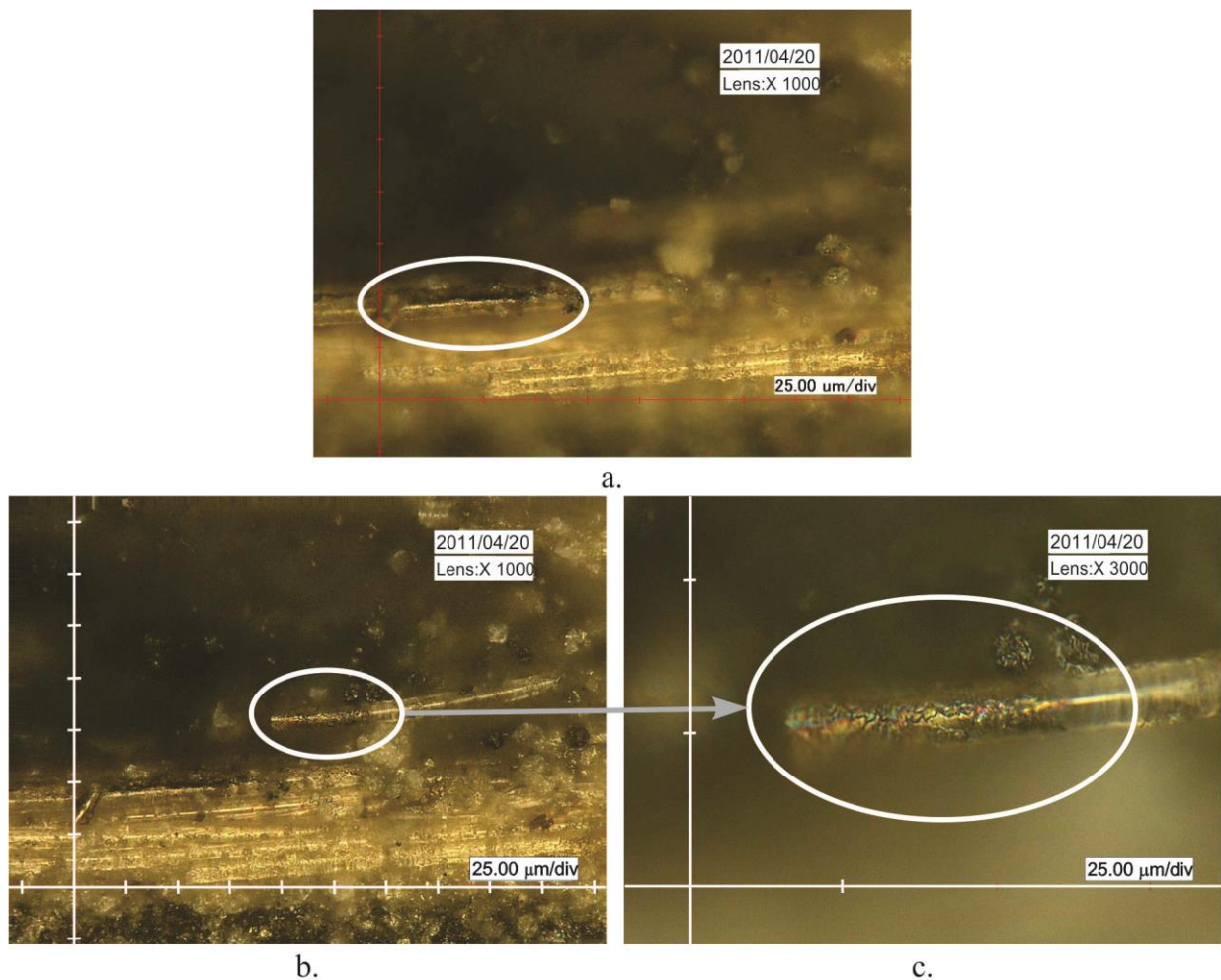
**Fig. 2.26.** Zona de rupere a epruvetelor prin încercarea la impact de tip *Charpy*:  
Rupere parțială a straturilor (ZR – zone de rupere); b...d. Ruperea completă a straturilor

În schimb, cele mai multe epruvete s-au rupt complet prin încercarea la impact de tip *Charpy*. Doar în cazul unei singure epruvete din cele zece testate, s-au rupt doar două straturi și în figura 2.26,a se prezintă o fotografie mărită (200x) a straturilor rupte. În figurile 2.26,b...d se prezintă secțiunea epruvetelor rupte complet prin testul *Charpy*.

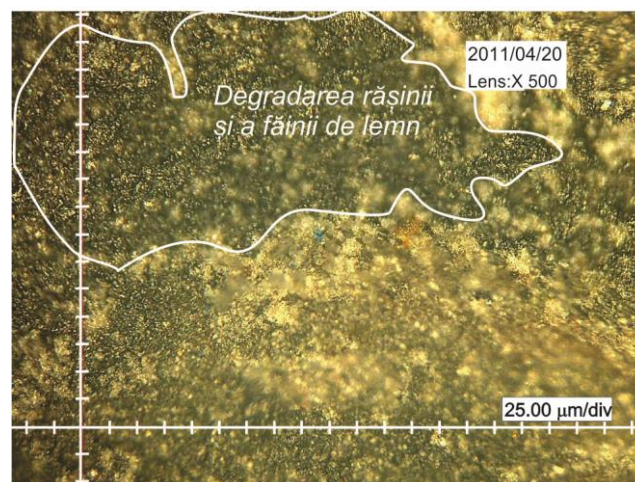
Figura 2.27,a și b, prezintă o fotografie la microscop (1000x) a fibrelor de sticlă deteriorate din cauza apei absorbite după 6572 ore de imersiune. Un detaliu al fotografiei la zona de interfață dintre fibra de sticlă și rășină, mărită de 3000 de ori (Fig. 2.27,c), arată fisurile care s-au dezvoltat pe fibra de sticlă. Se remarcă faptul că zonele deteriorate (micro-fisuri) alternează cu suprafețele lucioase care caracterizează fibrele de sticlă.

Pe de altă parte, analiza microscopică a stratului fabricat din făină de lemn și rășină epoxi (Fig.

2.28), a condus la concluzia că rășina și-a modificat culoarea și s-a deteriorat sub acțiunea apei absorbite, ceea ce explică apariția petelor de culoare închisă pe muchiile epruvetelor. În schimb, se pot observa alte zone de culoare deschisă corespunzătoare rășinii nedegradate (Fig. 2.28).



**Fig. 2.27.** Zone degradate la suprafața fibrelor de sticlă:  
a, b. Fotografii cu zoom 1000x; c. Fotografie a fibrei de sticlă degradată (zoom 3000x)



**Fig. 2.28.** Zona degradată cauzată de oxidarea rășinii din stratul din făină de lemn / epoxi

Cauza acestor zone degradate constă în oxidarea rășinii sub acțiunea apei absorbite în interiorul materialului compozit (Pomiès *et al.*, 1995; Cerbu – Teza de doctorat, 2005).

Deteriorările evidențiate mai înainte, reprezintă efectele produse de mecanismul de degradare al materialului, cauzat de apa absorbită prin imersiune.

În ceea ce privește zonele deteriorate cauzate de efectele absorbției de apă, atât matricea din rășină cât și fibrele de sticlă au fost analizate cu microscopul digital (Fig. 2.27 și 2.28).

Se cunoaște faptul că principalii constituenți ai fibrelor de lemn sunt: celuloza, lignina și hemiceluloza. Lignina este un material fotosensibil iar culoarea acesteia se modifică de la culoarea maronie la gri sub acțiunea razelor ultraviolete (UV) și sub acțiunea apei (Fig. 2.28) (Klyosov 2007). Celuloza și hemiceluloza sunt polizaharide și acestea conțin multe grupări hidroxil (-OH) care facilitează formarea de legături de hidrogen cu structura polimerului (Klyosov 2007). Prezența grupărilor hidroxil explică natura hidrofilică a fibrelor de lemn (Klyosov 2007). Pe de altă parte, legătura de hidrogen formată între moleculele de apă și structura celulozică este cauza degradării caracteristicilor mecanice în cazul materialului compozit sticlă / făină de lemn / epoxi după imersiunea de lungă durată în apă. Moleculele de apă sunt absorbite în interiorul materialului compozit hibrid și apoi, acestea plasticizează polimerul din cauza legăturilor chimice care se formează (Maggana și Pissis 1999). În plus, moleculele de apă formează legături de hidrogen cu structura celulozei (Dhakal *et al.*, 2007). Astfel, atât structura celulozei cât și structura polimerului s-au deteriorat. Mai mult decât atât, interfața dintre fibrele de sticlă și rășina epoxi a fost afectată (Fig. 2.27, c). Astfel, degradarea legăturii la interfața dintre fibrele de sticlă și rășina polimerică reprezintă cauza atât a dezvoltării microfisurilor cât și a depunerii de oxizi la acest nivel (Fig. 2.27).

În final, concluzia este că deteriorările materialului de tipul celor descrise în cadrul acestui capitol, reprezintă cauza degradării proprietăților mecanice după imersiunea de lungă durată în apă a materialului compozit hibrid de tipul *țesătură de sticlă-E / făină de lemn de brad / rășină epoxi Epolam 2015*.

## 2.5. Concluzii

Mai întâi se prezintă principalele concluzii referitoare la rezultatele publicate în cadrul acestui capitol.

- *Se poate concluziona că absorbția de apă conduce la degradarea caracteristicilor mecanice în cazul materialului compozit hibrid pe bază de rășină epoxi Epolam 2015 ranforsată atât cu țesătură din fibre de sticlă cât și cu făină de lemn de brad. S-a dovedit că nu doar natura*

hidrofilă a făinii de lemn este cauza degradării caracteristicilor mecanice la încovoiere (modul de elasticitate  $E$  și tensiunea maximă  $\sigma_{\max}$  la încovoiere). Alte cauze ale degradării proprietăților mecanice sunt următoarele: deteriorările care au avut loc la interfața dintre fibrele de sticlă și rășină (Fig. 2.27, c); efectele plasticizării structurii celulozice a fibrelor de lemn prin formarea de legături de hidrogen.

- Este bine-cunoscut faptul că imersiunea completă în apă este considerată ca un procedeu de îmbătrânire accelerată (Springer, 1988; Abdul Khalil et al., 2011; Pomiès et al., 1995). Ținând cont de degradarea accentuată a tensiunii maxime  $\sigma_{\max}$  la încovoiere și anume, scăderea cu 33,27% comparativ cu valoarea înregistrată în cazul epruvetelor uscate (nedegradate) după 6572 ore de imersiune în apă, se recomandă utilizarea cu anumite restricții a unui astfel de material compozit hibrid pentru aplicații în medii cu umiditate ridicată pe termen lung.
- Totuși, ținând cont de valorile bune ale caracteristicilor mecanice determinate pentru epruvetele martor, uscate (modulul de elasticitate la încovoiere;  $E = 2901 \text{MPa}$  tensiunea maximă la încovoiere  $\sigma_{\max} = 141 \text{MPa}$ ; rezistența la impact  $K = 117.6 \text{kJ/m}^2$ ) și de necesitatea de reciclare a cantităților mari de deșeuri lemnoase, materialul compozit hibrid analizat în cadrul acestui capitol, poate fi utilizat pentru: fabricarea plăcilor utilizate în construcții, componente de mobilier, ornamente, carcase și așa mai departe.
- În plus, fibrele de lemn provenite din deșeuri de lemn, reprezintă o sursă regenerabilă și sustenabilă de materie primă care poate fi utilizată ca material de ranforsare sau ca umplutură în cazul materialelor compozite în general. În cazul materialului compozit hibrid de tipul sticlă-E / făină de lemn de brad / rășină epoxi, analizat în cadrul acestui capitol, fibrele de lemn își aduc aportul prin aspectul apropiat lemnului (Fig. 2.13, b și c), pe care îl conferă materialului, aspect diferit față de materialul compozit clasic ranforsat doar cu fibre de sticlă. Acest avantaj recomandă materialul compozit hibrid pentru fabricarea elementelor de design (placări de pereți, componente de mobilier).
- Se recomandă ca în cazul aplicațiilor de exterior (mobilier de grădină, terase) sau în medii cu umiditate ridicată, să se utilizeze făină de lemn de brad sau cea provenită din alte specii de rășinoase, deoarece acestea au un conținut redus de tanini (Klyosov, 2007). Așa cum s-a arătat, din cauza reacțiilor chimice care ar avea loc, prezența unor cantități mai mari de tanini ar putea conduce la apariția petelor de culoare închisă la suprafața pieselor care lucrează în astfel de medii, după o perioadă mai lungă de timp (Fig. 2.28).

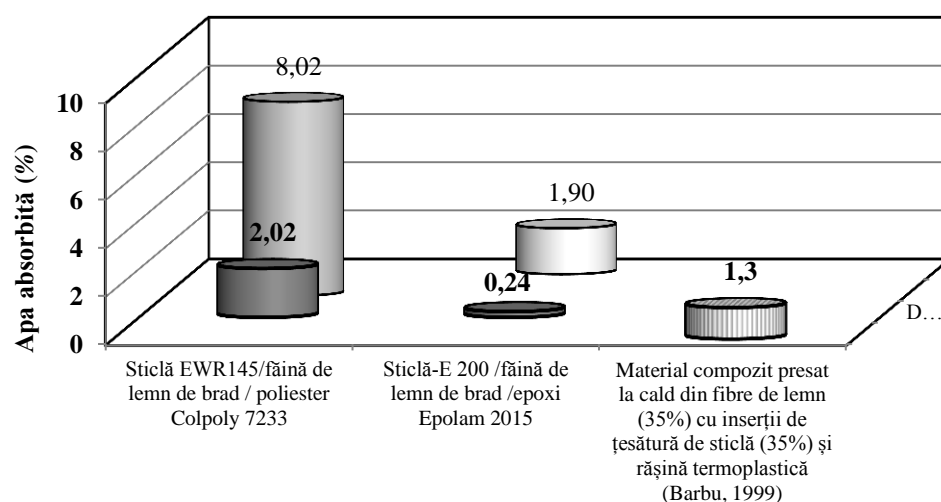
\*\*\*



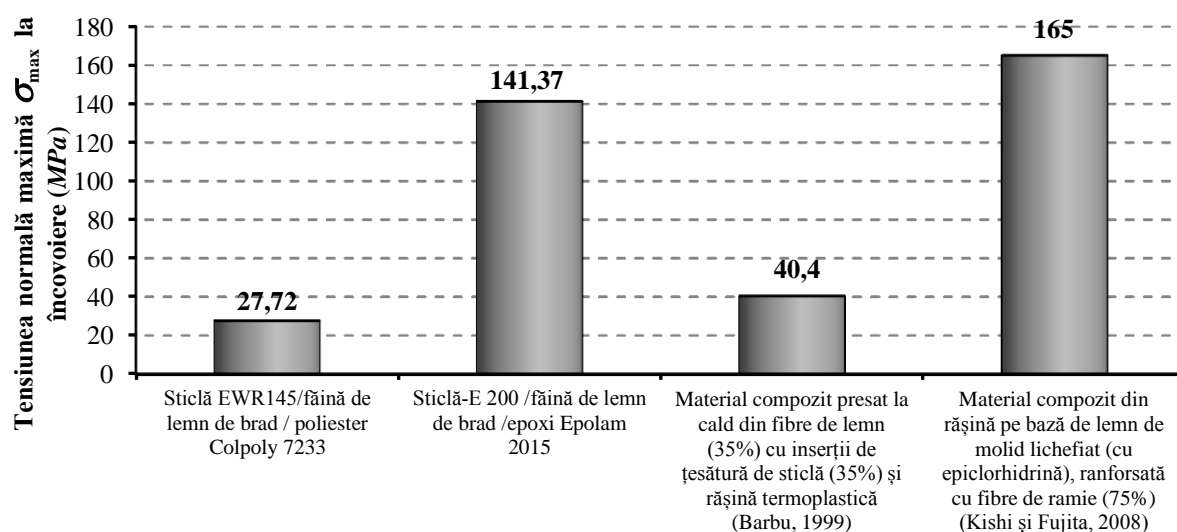
Rezultatele cercetărilor prezentate în cadrul acestui capitol s-au comparat cu cele publicate în literatura de specialitate (Fig. 2.29...2.31) referitoare la: materialele compozite din aşchii de lemn presate la cald la temperaturi de 180 °C cu inserții din țesătură din fibre de sticlă în straturile de fețe; materiale compozite din rășină pe bază de lemn de molid lichefiat, ranforsată cu fibre de ramie (Barbu, 1999; Kishi și Fujita, 2008).

Comparațiile cu literatura de specialitate se referă la următoarele mărimi (Barbu, 1999; Kishi și Fujita, 2008):

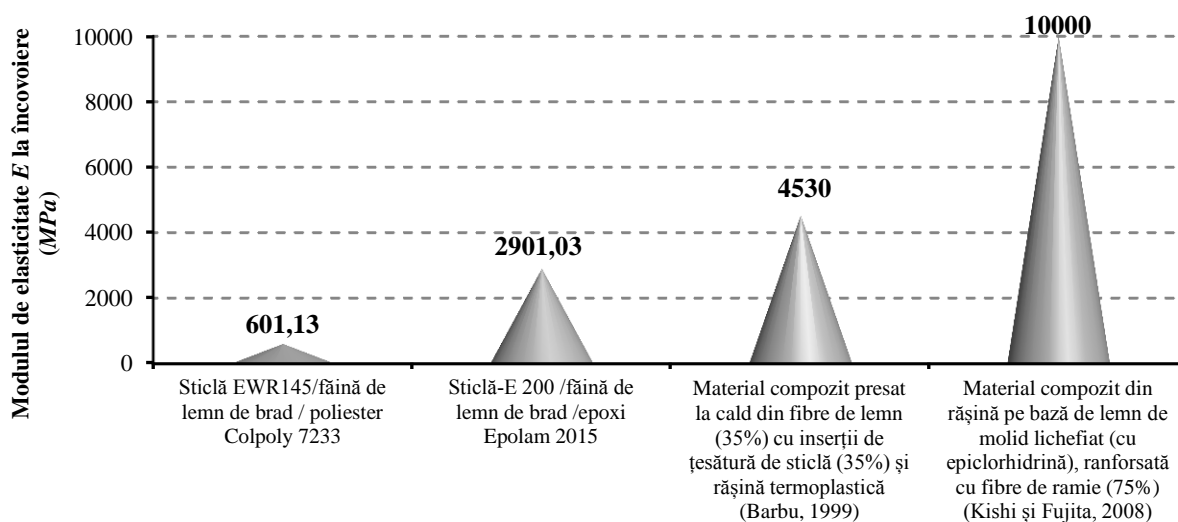
- *absorbția de apă* (Fig. 2.29);
- *tensiunea normală max.  $\sigma_{\max}$  la încovoiere* (Fig. 2.30);
- *modulul de elasticitate  $E$  la încovoiere* (Fig. 2.31).



**Fig. 2.29.** Comparația rezultatelor cu cele din literatura de specialitate în ceea ce privește absorbția de apă



**Fig. 2.30.** Comparația rezultatelor cu cele din literatura de specialitate în ceea ce privește tensiunea normală max.  $\sigma_{\max}$  la încovoiere



**Fig. 2.31.** Comparația rezultatelor cu cele din literatura de specialitate în ceea ce privește modulul de elasticitate  $E$  la încovoiere

Materialele compozite presate la cald din așchii de lemn cu inserții din țesătură de sticlă, conțin așchii din lemn de brad în straturile de fețe și așchii din lemn de fag în straturile de miez (Barbu, 1999). Inserția din țesătură de sticlă s-a introdus doar în straturile de fețe iar țesătura este de tip plană, bidirecțională, având densitatea  $\rho = 300 \text{ g/m}^2$ , mărimea ochiurilor de 4,5 mm. Raportul volumic de așchii de lemn a fost egală cu 35% iar raportul volumic de țesătură de sticlă a fost egală cu 35%.

În cazul celui de-al doilea tip de material compozit utilizat pentru comparație (Fig. 2.30...2.31), fibrele de lemn de molid având lungimi de 20-80  $\mu\text{m}$  au fost lichefiate în prealabil, prin reacții chimice cu resorcinol la temperaturi de 250  $^{\circ}\text{C}$  (Kishi și Fujita, 2008). S-a sintetizat rășina epoxi pe bază de lemn lichefiat prin tratare cu epiclorhidrină și apoi, s-a utilizat pentru fabricarea unui material compozit stratificat ranforsat cu țesătură de ramie (75% din masa totală a materialului compozit). Materialul compozit s-a obținut prin presare timp de 4 ore la 130  $^{\circ}\text{C}$  (Kishi și Fujita, 2008).

Se observă că umiditatea absorbită de panourile de tip sandwich din așchii de lemn cu inserții din țesătură de sticlă, fabricate prin presare la cald, a fost egală cu 1,3% după 2 ore de imersiune în apă (Fig. 2.29), valoare apropiată de conținutul de apă de 1,9% înregistrat după 6572 ore de imersiune, în cazul materialului compozit pe bază de rășină epoxi *Epolam 2015* ranforsată hibrid cu țesătură de sticlă și făină de lemn de brad (Barbu, 1999).

În figura 2.30 se observă că tensiunea normală maximă  $\sigma_{\text{max}} = 141,37 \text{ MPa}$  la încovoiere corespunzătoare materialului compozit Sticlă-E /făină de lemn de brad / epoxi *Epolam 2015*, este de 3,5 ori mai mare decât valoarea de 40,4 MPa corespunzătoare materialului compozit de tip

sandwich din aşchii de lemn cu inserții din țesătură de sticlă (Barbu, 1999).

În schimb, tensiunea normală maximă  $\sigma_{\max}=165\text{MPa}$  la încovoiere corespunzătoare materialului compozit cu rășină epoxi pe bază de lemn lichefiat, este mai mare cu 16,71% decât cea corespunzătoare materialului compozit Sticlă-E /făină de lemn de brad / epoxi *Epolam 2015* (Fig. 2.30).

Modulul de elasticitate  $E$  la încovoiere este mai mic cu 35,96% în cazul materialului compozit Sticlă-E /făină de lemn de brad / epoxi *Epolam 2015* comparativ cu valoarea corespunzătoare materialului compozit de tip sandwich din aşchii de lemn cu inserții din țesătură de sticlă format prin presare la cald (Fig. 2.31). Însă, materialul compozit de tip sandwich are o grosime de 48 mm care este mult mai mare decât grosimea de 6÷7 mm corespunzătoare celorlalte două tipuri de materiale compozite analizate în cadrul acestui capitol (Barbu, 1999).

Valoarea modulului de elasticitate  $E \cong 10000\text{MPa}$  corespunzătoare materialului compozit ranforsat cu țesătură de ramie, care este mult mai mare decât valorile corespunzătoare celorlalte materiale compozite, se atribuie: conținutului mare de material de ranforsare (75% din masă); procedului chimic de lichefiere al fibrelor de lemn (Kishi și Fujita, 2008).

Materialul compozit sticlă *EWRI45* / făină de lemn de brad / poliester *Colpoly 7233* are proprietăți inferioare comparativ cu celelalte trei materiale compozite (Fig. 2.30 și 2.31).

Pe lângă avantajele menționate mai sus, referitoare la absorbția de umiditate și la tensiunea maximă de încovoiere, materialul compozit hibrid de tip Sticlă-E / făină de lemn de brad / epoxi *Epolam 2015* are următoarele avantaje comparativ cu celelalte două materiale utilizate pentru comparație: tehnologia de obținere permite formarea pe straturi a materialului compozit ceea ce nu necesită investiții mari în echipamente (ca în cazul panourilor obținute prin presare la cald); se pot obține piese de dimensiuni mari cu geometrie complexă; nu necesită tratamente chimice pentru lichefierea fibrelor de lemn.

Structura materialului compozit Sticlă-E / făină de lemn de brad / epoxi *Epolam 2015* se îmbunătățește prin utilizarea unor fibre de lemn mai fine deoarece cu cât fibrele de lemn au dimensiuni mai mici cu atât tensiunea de rupere  $\sigma_r$  la încovoiere și modulul de elasticitate  $E$  la încovoiere sunt mai mari (Cui *et al.*, 2008).

\*\*\*

Rezultatele prezentate în cadrul acestui capitol, s-au prezentat în Rapoartele de cercetare ale Proiectului PN-II-PCE, IDEI 733/2008, în perioada 2009-2011. Se menționează faptul că autoarea tezei de abilitare a fost directoarea acestui grant de cercetare câștigat prin competiție

națională.

Rezultatele au fost diseminate prin publicarea unui articol în revista *Materiale Plastice* (Cerbu *et. al.*, 2010) și publicarea unor articole în reviste BDI: revista *ProLigno*, *Annals of the University of Petroșani - Mechanical Engineering*.

Rezultatele au fost de asemenea diseminate în cadrul unor conferințe internaționale și publicate în Proceeding-urile conferințelor (o parte indexate ISI sau BDI): *The World Congress on Engineering WCE*, Londra, 2010 și 2011; *The 2<sup>nd</sup> WSEAS International Conference on Engineering Mechanics, Structures and Engineering Geology (EMESEG '09)*, Rodos Island, Greece, 22-24 July, 2009; *The 20<sup>th</sup> International DAAAM Symposium*, Viena, 2009; *The International Conference "Wood Science and Engineering in the Third Millenium" ICWSE 2011*, Brasov; *Sympózium Drevné Kompozitné Materiály (Composite Wood Materials)*, Zvolen, 2008.

\*\*\*

În capitolul 4 se prezintă o aplicație pentru materialul compozit Sticlă-E / făină de lemn de brad /epoxi *Epolam 2015* și anume fabricarea componentei de șezut-spătar a unui scaun. Pentru această piesă se vor prezenta atât rezultatele teoretice referitoare la distribuția tensiunilor și deformațiilor cât și rezultatele măsurărilor experimentale ale deformațiilor specifice.

# Cap. 3

## 3. EFECTUL TIPULUI DE FIBRE DE LEMN ASUPRA COEFICIENTULUI DE CONTRACȚIE TRANSVERSALĂ ÎN CAZUL MATERIALELOR COMPOZITE HIBRIDE DE TIPUL STICLĂ-E / FĂINĂ DE LEMN / EPOXI

### 3.1. Introducere

În ultimii ani, s-au publicat numeroase articole referitoare la caracterizarea mecanică a materialelor compozite ranforsate cu fibre de sticlă. Multe dintre acestea se referă la influența structurii de material (tipul fibrelor de sticlă pentru ranforsare, numărul de straturi, orientarea fibrelor) și la efectele factorilor de mediu (umiditate, cicluri termice, radiații, raze UV) asupra comportării mecanice (Abdul Khalil *et al.*, 2011; Hadăr *et al.*, 2007; Xepapadaki *et al.*, 2010; Pomiès *et al.*, 1995; Cerbu - Teza de doctorat, 2005; Cerbu *et al.*, 2010). Pe de altă parte, s-a demonstrat că în structurile din materiale compozite stratificate au loc câteva fenomene locale în ceea ce privește câmpul deformațiilor (Hadăr *et al.*, 2007; Stan *et al.*, 2011).

În schimb, există puține articole care prezintă rezultate experimentale referitoare la determinarea coeficientului  $\nu$  de contracție transversală (coeficientul lui *Poisson*) care este o caracteristică elastică necesară pentru modelarea cât mai precisă a materialului în soft-urile de analiză cu elemente finite.

Unele lucrări din literatura de specialitate s-au concentrat asupra caracterizării țesăturilor din punct de vedere mecanic. Astfel, s-a studiat comportarea mecanică în încercarea la tracțiune, în cazul firului inovativ de tip dublu spiralat și în cazul materialelor compozite ranforsate cu țesături din acest tip de fire (Miller *et al.*, 2009). S-au prezentat grafice referitoare la variația deformației specifice  $\varepsilon_l$  în direcția longitudinală a epruvetei solicitate la tracțiune (direcția forței de tracțiune) în funcție de deformația specifică  $\varepsilon_t$  în direcția transversală pe direcția solicitării la tracțiune. Datele experimentale s-au obținut prin utilizarea mărcilor tensometrice aplicate pe epruvete.

Într-o altă lucrare s-a studiat variația coeficientului lui *Poisson*  $\nu$  în funcție de deformația specifică longitudinală  $\varepsilon_l$  în cazul sulfurii de polifenilen ranforsată cu fibre de carbon, prin utilizarea mărcilor tensometrice, a fibrelor optice și a unui extensometru pentru măsurarea deformațiilor specifice (Baere *et al.*, 2009). S-a arătat că forma hiperbolică a acestei funcții este cauzată în întregime de comportarea neliniară a unui astfel de material compozit.

Pentru a studia micro-deformațiile plastice în rășina epoxi ranforsată cu fibre scurte de sticlă de borosilicat (35% în greutate), care se dezvoltă în timpul solicitării mecanice, s-a utilizat încercarea de tracțiune combinată cu metoda corelării digitale a imaginii (Godara și Raabe, 2007). În literatura de specialitate această metodă este cunoscută sub denumirea de metoda CDI (abrevierea din limba engleză, de la “digital image correlation”). S-a demonstrat astfel faptul că în cazul unui astfel de material compozit din rășină epoxi ranforsată cu fibre scurte de sticlă, comportarea anizotropă depinde de unghiul de orientare al fibrelor față de direcția de încărcare (Godara și Raabe, 2007).

Metoda corelării digitale a imaginilor (DIC) care este cunoscută de asemenea cu denumirea de *fotogrametrie* și a fost utilizată de asemenea pentru a măsura deformația locală de la vârful fisurii, considerată ca parametru de rupere în scopul caracterizării deteriorărilor de la interfața epruvetelor de tip sandwich cu două defecte interlaminare inițiale (Constantinescu *et al.*, 2009).

Utilizarea făinii de lemn ca material de ranforsare pentru a dezvolta materiale compozite noi, cu rășini termorigide, inclusiv materiale compozite hibride (de exemplu, ranforsate hibrid cu țesătură de sticlă și făină de lemn), a condus la necesitatea caracterizării mecanice a acestora. În capitolul anterior (capitolul 2) s-au prezentat proprietățile determinate prin încercările de încovoiere, ale materialelor compozite ranforsate atât cu fibre de sticlă cât și cu făină de lemn (Cerbu și Curtu, 2010; Cerbu, 2010; Cerbu *et al.*, 2011).

În scopul modelării și simulării comportării mecanice a pieselor fabricate din materiale compozite hibride ranforsate atât cu fibre de sticlă cât și cu făină de lemn, care este un material ortotrop, este nevoie să se cunoască caracteristicile elastice și de rezistență.

În consecință, a apărut necesitatea determinării coeficienților de contracție transversală: coeficientul lui *Poisson*  $\nu_{12}$  în planul *12* de ranforsare al materialului compozit (în sistemul de coordonate de material notat cu *123*); coeficienții  $\nu_{23}, \nu_{13}$  de contracție transversală interlaminară din planele *23* și *13*, plane care sunt perpendiculare pe planul de ranforsare al materialului compozit. Acestea sunt caracteristici elastice necesare pentru modelarea materialului compozit, pe lângă modulele de elasticitate  $E_1, E_2$  ale stratului din material

compozit, corespunzătoare celor două direcții ale țesăturii de sticlă bidirecțională, utilizată ca material de ranforsare.

În cazul structurilor din materiale compozite formate din straturi subțiri numite “lamine” coeficienții  $\nu_{23}, \nu_{13}$  de contracție transversală interlaminară nu intervin în calculele de rezistență (Barbero, 1998; Hadăr, 2002; Berthelot, 2007; Alămoreanu și Chiriță, 1997). Ca urmare, în software-le de analiză cu elemente finite (ca de exemplu, Abaqus), nu intervin în etapa de definire a caracteristicilor de material pentru straturile subțiri din materiale compozite (Cerbu și Popa, 2013).

Obiectivele principale ale acestui capitol constau în:

- *determinarea coeficientului lui Poisson  $\nu_{12}$  corespunzător planului 12 de ranforsare, în cazul materialului compozit hibrid din rășină epoxi ranforsată atât cu fibre de sticlă cât și cu făină de lemn;*
- *comparația dintre rezultatele corespunzătoare materialului compozit sticlă-E / făină de lemn / epoxi cu cele obținute în cazul materialelor compozite ranforsate fie doar cu țesătură de sticlă, fie doar cu făină de lemn.*

În acest scop, s-a combinat încercarea la tracțiune cu determinarea stărilor de deformații prin metoda corelării digitale a imaginilor (metoda DIC), pentru a măsura deformațiile specifice pe ambele direcții: deformația specifică longitudinală  $\varepsilon_l$  măsurată în direcția longitudinală a epruvetei de tracțiune (direcția forței de tracțiune); deformația specifică transversală  $\varepsilon_t$  determinată în direcția transversală pe direcția solicitării de tracțiune. Apoi, curbele experimentale  $\varepsilon_l - \varepsilon_t$  au fost approximate prin *regresie liniară* utilizând *metoda celor mai mici pătrate* iar pantele acestor funcțiilor liniare de aproximare reprezintă coeficientul lui Poisson  $\nu$ .

## **3.2. Materiale și metoda experimentală**

### ***3.2.1. Materiale***

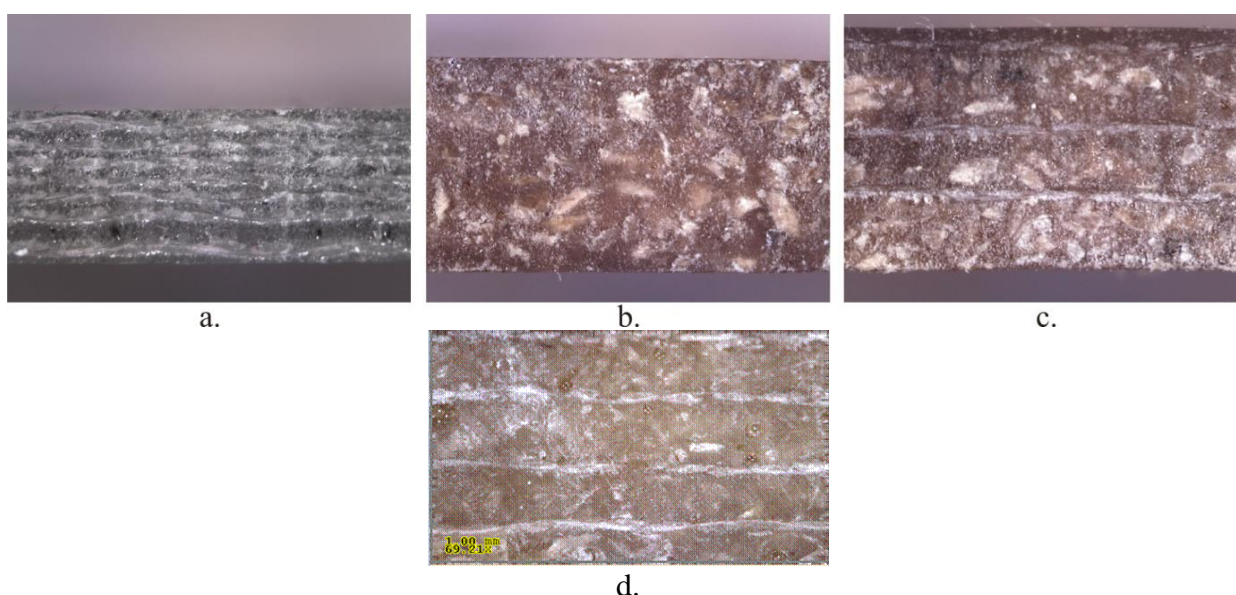
Mai întâi, s-au fabricat patru panouri din materiale compozite pentru care în tabelul 3.1, se prezintă tipul materialului de ranforsare și grosimile panourilor. În tabelul 3.1, s-au utilizat următoarele notații: litera *G* pentru fibrele de sticlă (de la „glass” în engleză); litera *K* pentru făina de lemn de stejar („oak”, engleză); litera *F* pentru făina de lemn de brad („fir”, engleză).

Materialul *Compozit 1* a fost ranforsat doar cu țesătură de sticlă de tip *E*, plană, bidirecțională. Pentru ranforsarea materialului *Compozit 2* s-a utilizat doar făina de lemn de stejar (Tab. 3.1).

**Tabelul 3.1.**

Codificarea și structura de material corespunzătoare epruvetelor testate în vederea determinării coeficientului lui *Poisson*

Material compozit	Codificare epruvete	Material pentru matrice	Material de ranforsare	Grosimea medie a epruvetelor (mm)
<i>Compozit 1</i>	G01...G10	Rășină	Țesătură de sticlă (7 straturi)	2,5
<i>Compozit 2</i>	K01... K10	epoxi de tip	Făină de lemn de stejar	3,0
<i>Compozit 3</i>	4GK01... 4GK10	<i>Epolam 2015</i>	Țesătură de sticlă (4 straturi) + făină de lemn de stejar	3,5
<i>Compozit 4</i>	4GF01... 4GF10		Țesătură de sticlă (4 straturi) + făină de lemn de brad	4,0



**Fig. 3.1.** Fotografii în secțiune pentru materialele compozite testate, achiziționate cu microscopul digital: a. *Compozit 1*; b. *Compozit 2*; c. *Compozit 3*; d. *Compozit 4*

*Compozit 3* și *Compozit 4*, sunt materiale compozite hibride ranforsate atât cu țesătură de sticlă cât și cu făină de lemn de stejar și respectiv de brad (Tab. 3.1).

În figura 3.1 se prezintă fotografiile ale secțiunilor transversale (pe grosime) corespunzătoare materialelor compozite care au fost testate în vederea determinării coeficientului lui *Poisson*  $\nu_{12}$  în planul de ranforsare cu fibre, unde axele 1, 2 reprezintă axele sistemului de coordonate de material. Acest sistem de coordonate este aliniat cu direcțiile țesăturii bidirecționale de sticlă în cazul *Compozitelor 1, 3* și *4*. Fotografiile au fost achiziționate cu un microscop digital.

Țesătura de sticlă utilizată în cazul *Compozitelor 1, 3, 4*, a fost aceeași în toate cazurile. Acest tip de țesătură este bidirecțională, având densitatea  $\rho = 200 \text{ g/mm}^2$  fabricată de *AeroGlass* (Niederlenz, Switzerland). Țesătura este fabricată din același tip de fir din fibre de sticlă, atât pe direcția urzelii cât și pe direcția bătăturii (direcția de țesere) conform Fișei tehnice a țesăturii



fabricată de Aeroglass (2009).

Făina de lemn de stejar sau de brad sub formă de fibre a căror dimensiuni sunt mai mici decât  $200 \mu m$ , a fost obținută prin reciclarea deșeurilor de lemn de stejar / brad. S-a utilizat o moară de laborator și un sistem de site pentru a obține făina de lemn. Raportul masic al materialului de ranforsare (țesătură de sticlă, făină de lemn de stejar sau ambele) a fost de 24% în cazul tuturor tipuri de materiale compozite testate. Pentru a iniția și pentru a accelera procesul de polimerizare al rășinii, un agent de întărire a fost introdus în rășina epoxi și apoi, amestecul s-a omogenizat timp de 5-10 *min.*

Rășina epoxi a fost de același tip și anume *Epolam 2015*, în cazul celor patru tipuri de materiale compozite implicate în studiu. S-a utilizat o presiune scăzută de formare pentru fabricarea plăcilor utilizând tehnologia de formare manuală. Rășina epoxi de tip *Epolam 2015* este recomandată pentru fabricarea materialelor compozite stratificate prin tehnologia de formare manuală sau injecție cu presiune scăzută conform Fișei tehnice (2008). Caracteristicile fizice, chimice și mecanice au fost prezentate în *Capitolul 2* (Tab. 2.3 și 2.4).

### 3.2.2. *Metoda de lucru*

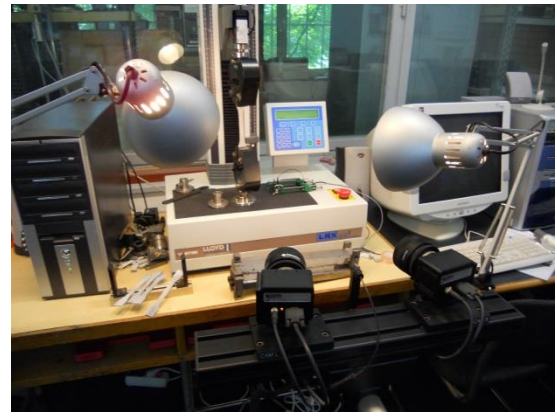
Epruvetele de tracțiune au fost debitate din panouri prin frezare, astfel încât forma și dimensiunile să fie conform cu norma europeană (EN ISO 527-4, 2000). Mașina de încercare la tracțiune de tip *LR5K Plus*, fabricată de *LLOYD Instruments* (Fig. 3.2,a), a fost utilizată pentru încercarea de tracțiune a fiecărei epruvete testate. Capacitatea mașinii este până la forța maximă de  $\pm 5 kN$ .

Încercarea de tracțiune cu mașina de încercare de tip *LR5K Plus*, a fost combinată cu sistemul *Aramis* de măsurare prin metoda corelării digitale a imaginii (DIC - Digital Image Correlation) care se prezintă în figura 3.2. Autoarea prezentei teze de abilitare a efectuat încercările împreună cu colaboratori din cadrul Catedrei de Rezistența Materialelor, Facultatea de Ingineria și Managementul Sistemelor Tehnologice, din *Universitatea Politehnica București* (Cerbu *et al.*, 2011).

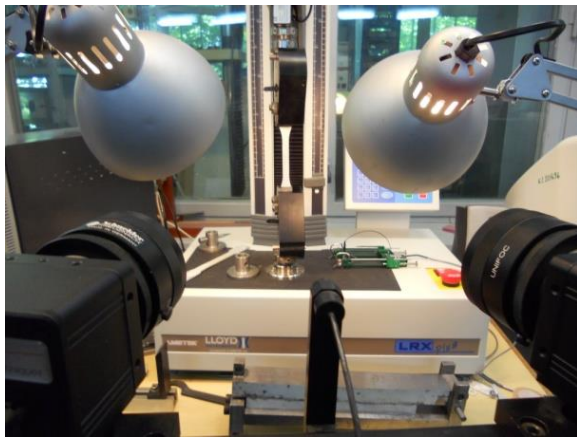
Pentru a înregistra deformațiile în timpul încercării de tracțiune, imaginile epruvetei au fost achiziționate utilizând două camere foto (Fig. 3.2,b) controlate cu sistemul *ARAMIS*. Datele achiziționate de camerele foto digitale au fost utilizate pentru determinarea deformațiilor specifice utilizând metoda corelării digitale a imaginii (metoda DIC).



a.



b.



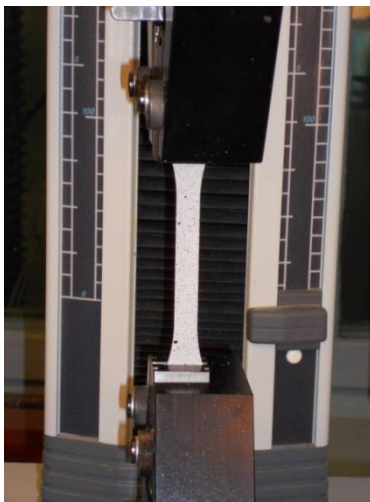
c.



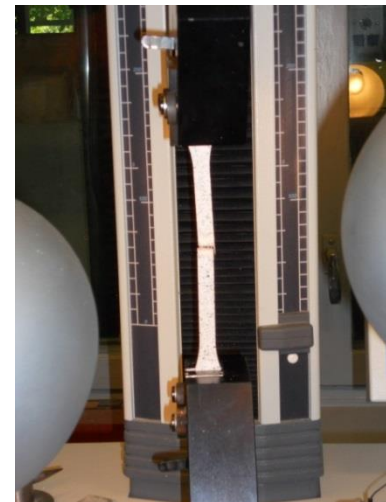
d.

**Fig. 3.2.** Echipamentele de testare:

a. Vedere de ansamblu; b,c. Mașină de încercare la tracțiune de tipul LR5K Plus; d. Sistemul Aramis



a.



b.

**Fig. 3.3.** Epruveta în timpul încercării la tracțiune

Se prezintă fotografiile ale epruvetei în timpul solicitării la tracțiune (Fig. 3.3, a) și după ce a avut loc ruperea (Fig. 3.2, b). Viteza de încărcare la tracțiune a fost de  $1 \text{ mm/min}$ . Înainte de fiecare încercare, dimensiunile epruvetei au fost măsurate cu precizie de  $0,1 \text{ mm}$  și apoi, acestea au fost

considerate ca date de intrare în soft-ul instalat pe computer, compatibil cu mașina de tracțiune.

Echipamentul de testare permite să se înregistreze perechi de valori (forța  $F$  de tracțiune și lungirea  $\Delta l$  a epruvetei; tensiunea normală  $\sigma$  și deformația specifică  $\varepsilon_l$  în direcția longitudinală a epruvetei) sub formă de fișiere care conțin 200-300 înregistrări, limitarea fiind dată de frecvența de achiziție a datelor.

În cazul de față, pentru măsurarea deformațiilor specifice  $\varepsilon_l, \varepsilon_t$  pe parcursul testelor de tracțiune în vederea determinării coeficientului lui Poisson  $\nu_{12}$ , s-a utilizat sistemul *Aramis 2M* (Fig. 3.2). Sistemul *Aramis 2M* utilizează metoda corelării digitale a imaginii (CDI - *Correlation Digital Images*) pentru evaluarea stării de deformație din suprafața analizată, fiind dotat cu două camere foto cu senzor CCD de 2 MegaPixeli. Achiziția foto este controlată de un dispozitiv numit „frame grabber” care asigură declanșarea sincronizată a expunerii pentru fiecare cameră foto și controlează timpul de expunere pentru fiecare cadru. În același timp, rolul dispozitivului „frame grabber” este de a descărca imaginile achiziționate pe hard-disk.

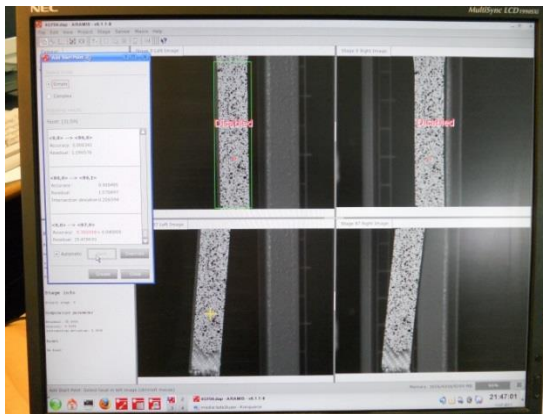
Metoda corelării digitale a imaginii (DIC) este o metodă optică pentru măsurarea deformațiilor prin utilizarea căreia se obține distribuția câmpului de deformații. *Aramis* este un sistem de măsurare optic pentru deformații, fabricat de *GOM (Gesellschaft für Optische Meßtechnik, Germania)* conform (Handbook for the Aramis system by GOM GmbH, Gesellschaft für Optische Meßtechnik, 2006). Sistemul *Aramis* analizează și calculează deformațiile fiind recomandabil pentru măsurarea deformațiilor tridimensionale în timpul încercărilor statice și dinamice. După crearea programului de măsurare în soft, imaginile sunt înregistrate în diverse etape de solicitare mecanică a epruvetei. Principalele componente hard și soft ale sistemului *Aramis* sunt: senzor cu două camere foto digitale; trigger box pentru alimentarea camerelor și pentru controlul înregistrării imaginii; computer; aplicația software-ul *Aramis* și sistemul de operare *Linux*.

Epruvetele care s-au testat cu sistemul *Aramis* au fost vopsite în prealabil, cu un strat de vopsea albă peste care s-a aplicat prin pulverizare un strat de puncte negre dispuse aleator (Fig. 3.3). Pentru evaluarea stării de deformație care se dezvoltă pe suprafața analizată, programul de analiză *Aramis-v6.1.1-8* împarte zona de calcul în fațete (Fig. 3.4, a și b).

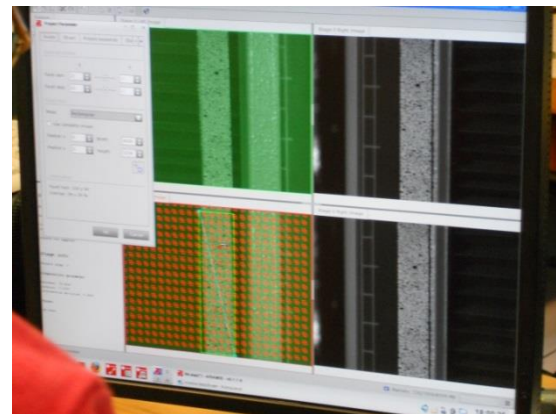
Aceste fațete includ mai multe puncte negre care sunt recunoscute prin analiza gradientilor de gri de pe suprafața analizată. În primul cadru achiziționat, numit cadrul de referință, toate fațetele generate au fost de formă dreptunghiulară (Fig. 3.4, a). Prin identificarea punctelor negre și reconstruirea fațetelor în cadrele achiziționate pe parcursul testului (Fig. 3.4,c) programul de analiză *Aramis-v6.1.1-8* determină deplasările și deformațiile specifice corespunzătoare

punctelor aflate în interiorul fațetelor (Fig. 3.4,d).

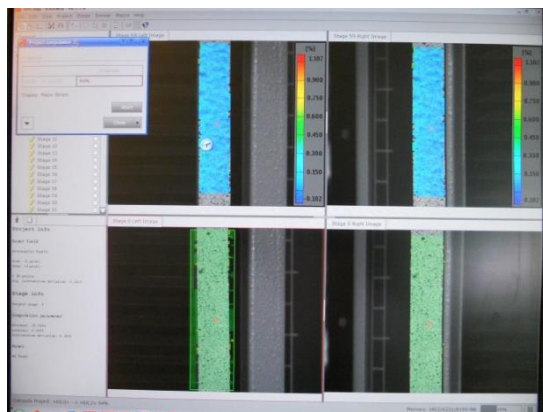
Legătura dintre distanța virtuală dintre 2 pixeli diferiți, de culoare neagră, din zona de calcul digitală, și distanța reală dintre cele două puncte negre de pe suprafața testată se face prin calibrarea sistemului (Handbook for the Aramis system by GOM GmbH, Gesellschaft für Optische Meßtechnik, 2006). Operația de calibrare presupune achiziționarea unui set de imagini în care un etalon special este amplasat în anumite poziții specificate de producător. În acest mod, programul de analiză *Aramis-v6.1.1-8* face legătura dintre distanța digitală și cea reală.



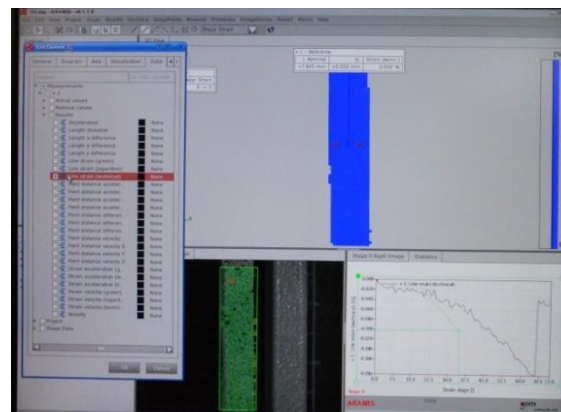
a.



b.



c.



d.

**Fig. 3.4.** Achiziția de date cu soft-ul ARAMIS-v6.1.1-8: a,b – selectarea punctelor de calcul; c. imaginea preluată de la camerele foto în timp real; d. curba  $\varepsilon_y - \varepsilon_x$  în timp real

Dimensiunea suprafeței care poate fi monitorizată cu sistemul Aramis este cuprinsă între  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  și  $2000 \times 2000 \text{ mm}^2$ , depinzând de dimensiunea etalonului folosit pentru operația de calibrare. Deformațiile specifice care pot fi măsurate cu ajutorul sistemului sunt cuprinse între 0,01% și 100%. Calibrarea a fost efectuată utilizând calibrul de  $35 \times 26 \text{ mm}^2$ . Dimensiunea fațetelor folosite a fost de  $25 \times 25$  pixeli iar pasul de  $17 \times 17$  pixeli. Viteza de achiziție a sistemului a fost de un cadru la 3 secunde. Lungimea mărcilor tensometrice virtuale simulate în analiză a fost în medie, de 8 mm.

### 3.2.3. Aproximarea datelor experimentale

Datele experimentale reprezentate grafic sunt puncte de coordonate  $(\varepsilon_{li}, \varepsilon_{ti})$  cu  $i = \overline{1, n}$ , unde:  $n$  reprezintă numărul de înregistrări al setului de date experimentale (numărul de puncte de pe grafic);  $\varepsilon_{li}$  reprezintă deformația specifică longitudinală măsurată în direcția longitudinală a epruvetei solicitate la tracțiune (în direcția forței de tracțiune);  $\varepsilon_{ti}$  reprezintă deformația specifică în direcția transversală a epruvetei de tracțiune.

Aproximarea datelor experimentale s-a făcut prin *metoda celor mai mici pătrate* (Attaway, 2009; Ghinea și Fireșteanu, 2007). S-a utilizat *regresia liniară* care înseamnă aproximarea printr-o funcție liniară a setului de date experimentale  $(\varepsilon_{li}, \varepsilon_{ti})$  cu  $i = \overline{1, n}$ , funcție care minimizează suma pătratelor dintre dreapta de aproximare și punctele corespunzătoare setului de date experimentale. Pentru ca aproximarea să fie considerată cât mai precisă, suma pătratelor distanțelor de la fiecare punct la dreapta care aproximează datele, trebuie să fie minimă (Attaway, 2009; Ghinea și Fireșteanu, 2007).

O măsură a calității aproximării datelor experimentale (gradul de precizie) prin curba obținută prin metoda regresiei pătratice (în acest caz, de tip liniară), se numește valoare pătrată notată cu  $R$ , care poate fi calculată utilizând următoarea relație de calcul aplicată în cazul unui set de date experimentale având coordonatele  $(x_i, y_i)$  cu  $i = \overline{1, n}$  (Attaway, 2009):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (3.1)$$

unde  $n$  reprezintă numărul punctelor din setul de date;  $y_i$  reprezintă ordonata punctului  $i$ ;  $x_i$  reprezintă abscisa punctului  $i$ ;  $f_i$  este valoarea funcției regresiei liniare.

În relația (3.1),  $\bar{y}$  reprezintă valoarea medie a datelor din setul de date, calculată cu relația (Attaway, 2009):

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i. \quad (3.3)$$

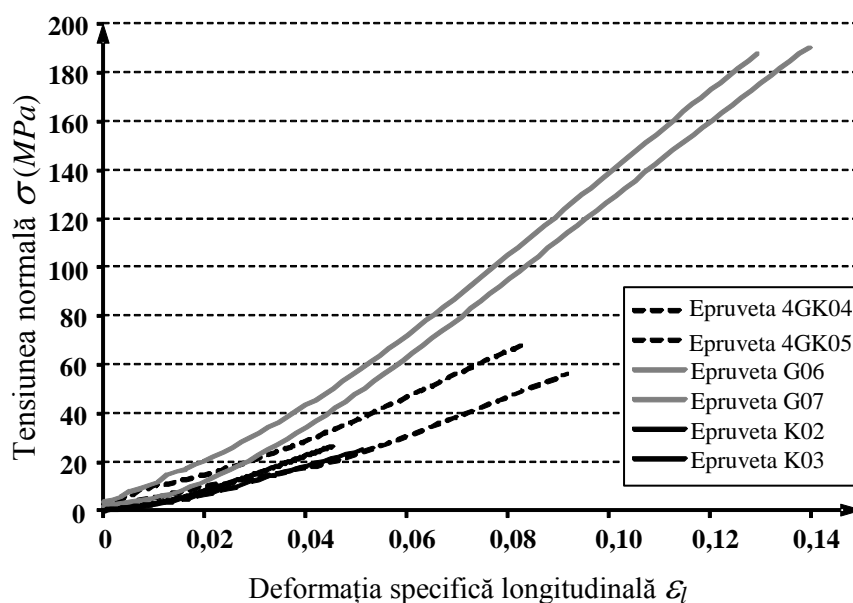
În cazul aproximării prin *metoda celor mai mici pătrate* de tip *regresie liniară*, mărimea  $R^2$  este o măsură statistică care evaluează gradul de precizie al funcției liniare care aproximează datele experimentale. Dreapta care aproximează datele este mai precisă atunci când valoarea pătrată  $R$

care este subunitară ( $R < 1$ ), este cât mai apropiată de valoarea 1 (Attaway, 2009). Din acest motiv, atunci când se aproximează datele experimentale cu o funcție liniară, se calculează valoarea pătrată  $R$  pentru a putea să se aprecieze acuratețea aproximării.

### 3.3. Rezultate și discuții

În figurile 3.5 și 3.6 se prezintă curbele  $\sigma - \varepsilon_l$  (tensiunea normală – deformația specifică longitudinală) înregistrate de mașina de încercare la tracțiune *LR5K Plus*, în cazul epruvetelor testate. Deoarece unele curbe aproape se suprapun, se prezintă doar curbele înregistrate pentru două epruvete din același material. Analizând aceste curbe, se observă că pantele corespunzătoare curbelor înregistrate în cazul materialului *Compozit 1*, sunt mai mari decât în cazul celorlalte materiale compozite (Fig. 3.5). Rezultă că modulul de elasticitate  $E$  corespunzător materialului *Compozit 1* ranforsat doar cu fibre de sticlă, este mai mare decât valorile corespunzătoare celorlalte materiale compozite testate. În același timp, valoarea medie a tensiunii maxime la tracțiune  $\sigma_{\max} = 189,05 \text{ MPa}$  este mai mare în cazul materialului *Compozit 1* ranforsat doar cu țesătură de sticlă.

Tensiunea maximă la tracțiune  $\sigma_{\max}$  este egală cu  $61,94 \text{ MPa}$  în cazul materialului *Compozit 2*, în timp ce aceasta este egală cu  $25,61 \text{ MPa}$  în cazul materialului *Compozit 3*.



**Fig. 3.5.** Curbele  $\sigma - \varepsilon_l$  înregistrate în cazul epruvetelor fabricate din materialele: *Compozit 1*, *Compozit 2*, *Compozit 3*

Imaginile înregistrate cu cele două camere foto digitale ale sistemului *Aramis*, s-au prelucrat cu programul de analiză *Aramis-v6.1.1-8*. În scopul determinării coeficientului lui *Poisson*  $\nu_{12}$ , datele s-au analizat mai întâi, prin metoda corelării digitale a imaginii (DIC) pentru a determina variația deformației specifice  $\varepsilon_t$  în direcția transversală a epruvetei de tracțiune în funcție de deformația specifică  $\varepsilon_l$  în direcția longitudinală a epruvetei, pe suprafața fiecărei epruvete testate.

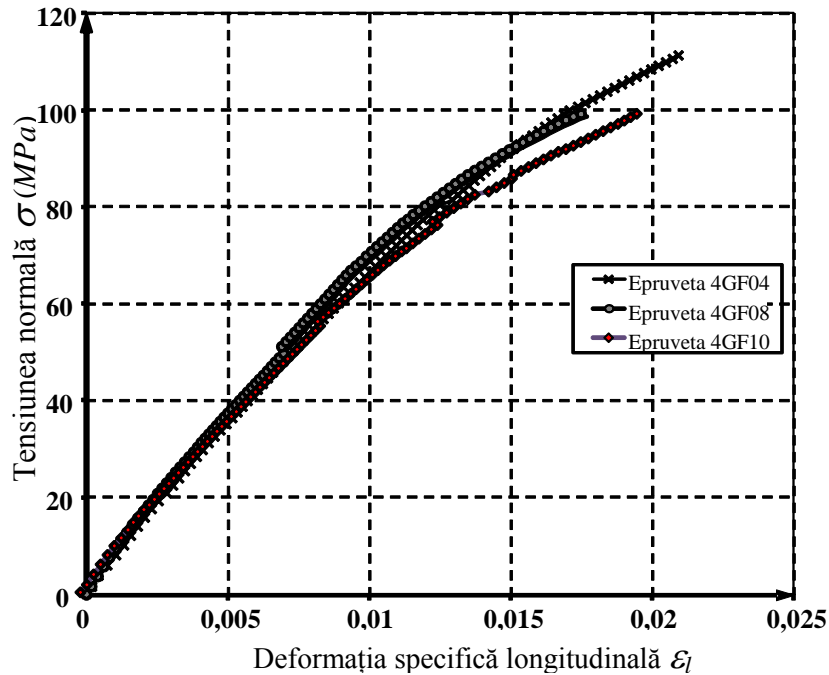


Fig. 3.6. Curbele  $\sigma - \varepsilon_l$  înregistrate în cazul epruvetelor fabricate din materialul *Compozit 4*

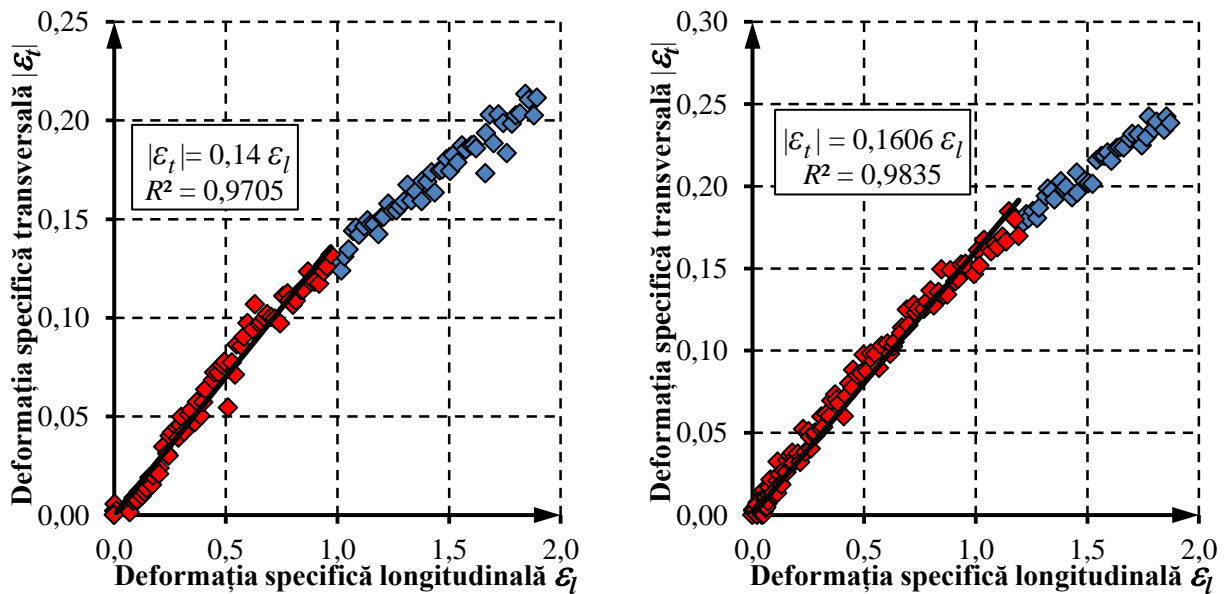
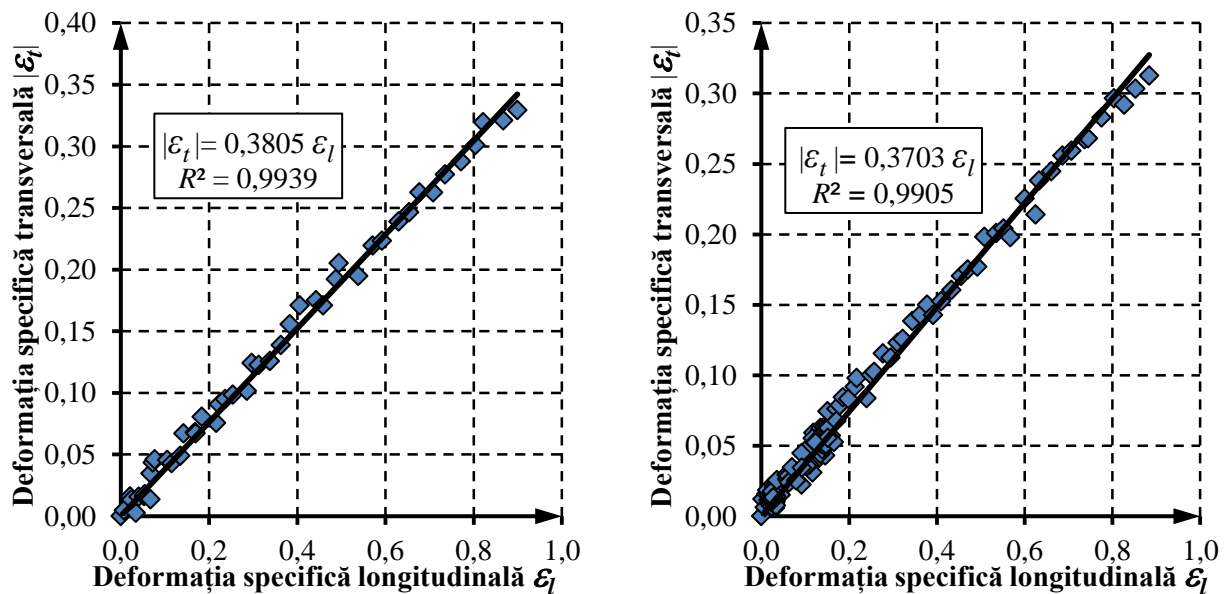
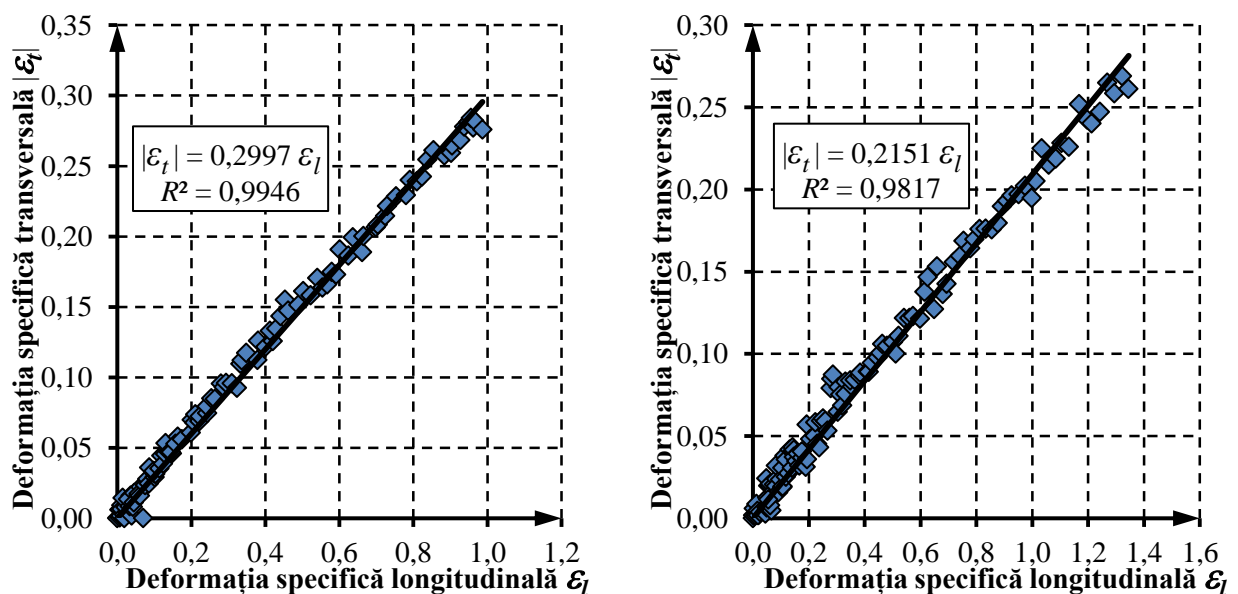


Fig. 3.7. Variația deformației specifice transversale  $|\varepsilon_t|$  în funcție de deformația specifică longitudinală  $\varepsilon_l$  în cazul materialului *Compozit 1* de tipul *Sticlă-E / epoxy*

În figurile 3.7...3.10 se prezintă graficele  $\varepsilon_t - \varepsilon_l$  pentru câte două epruvete din fiecare material compozit testat. Aceste date au fost approximate prin *regresie liniară* astfel încât funcțiile liniare să treacă prin origine. Valoarea pătratică  $R$  a fost de asemenea calculată și afișată pe grafice pentru a cuantifica acuratețea aproximării cu funcția liniară. Se remarcă faptul că, în fiecare caz, valoarea pătratică  $R$  este subunitară, foarte apropiată de valoarea 1, întocmai cum se recomandă în literatura de specialitate (Attaway, 2009; Ghinea și Firețeanu, 2007).

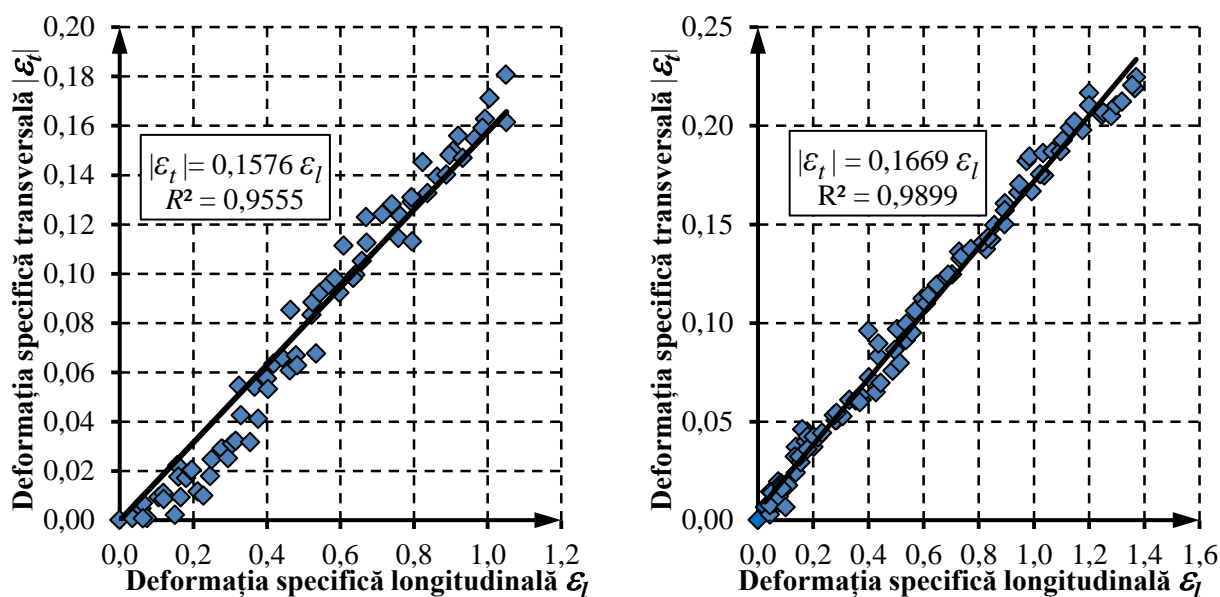


**Fig. 3.8.** Variația deformației specifice transversale  $|\varepsilon_t|$  în funcție de deformația specifică longitudinală  $\varepsilon_l$  în cazul materialului *Compozit 2* de tipul *făină lemn stejar / epoxi*



**Fig. 3.9.** Variația deformației specifice transversale  $|\varepsilon_t|$  în funcție de deformația specifică longitudinală  $\varepsilon_l$  în cazul materialului *Compozit 3* de tipul *Sticlă-E / făină lemn stejar / epoxi*





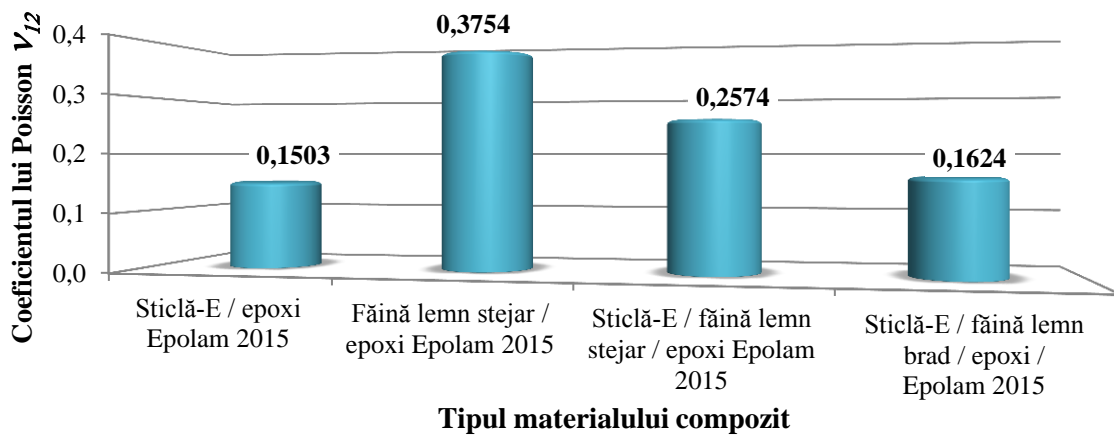
**Fig. 3.10.** Variația deformației specifice transversale  $|\varepsilon_t|$  în funcție de deformația specifică longitudinală  $\varepsilon_l$  în cazul materialului *Compozit 4* de tipul *Sticlă-E / făină lemn brad / epoxi*

Analizând graficele prezentate în figura 3.7, se poate observa că, materialul *Compozit 1* (sticlă-E / epoxi) este caracterizat printr-o comportare neliniară în ceea ce privește variația deformației specifice  $\varepsilon_t$  în direcția transversală în funcție de deformația specifică  $\varepsilon_l$  în direcția longitudinală. Din acest motiv și ținând cont de forma curbei  $\sigma - \varepsilon$  (Fig. 3.7), s-au aproximat prin *regresie liniară* doar datele experimentale pentru care  $\varepsilon_l \leq 1,1$ . În schimb, în cazul celorlalte materiale compozite testate, toate datele experimentale înregistrate au putut fi aproximate prin funcții liniare: *Compozit 2* (Fig. 3.8); *Compozit 3* (Fig. 3.9); *Compozit 4* (Fig. 3.10).

### 3.4. Concluzii

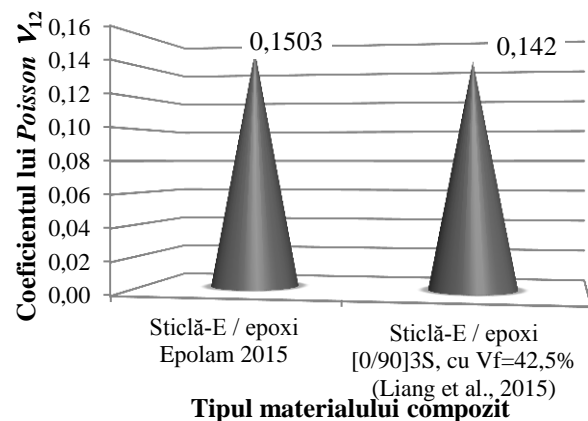
Analizând graficele prezentate în figurile 3.7...3.10, se pot face câteva observații importante care vor fi enumerate în continuare.

- Valorile medii obținute pentru coeficientul lui Poisson  $\nu_{12}$  au fost egale cu (Fig. 3.11):  $\nu_{12} = 0,1503$  în cazul materialului *Compozit 1* (sticlă-E / epoxi);  $\nu_{12} = 0,3754$  în cazul materialului *Compozit 2* (făină lemn stejar / epoxi);  $\nu_{12} = 0,2574$  în cazul *Compozit 3* (sticlă-E / făină lemn stejar / epoxi);  $\nu_{12} = 0,1624$  în cazul *Compozit 4* (sticlă-E / făină lemn brad / epoxi).



**Fig. 3.11.** Comparația coeficienților lui Poisson  $\nu_{12}$

- Comparând rezultatele obținute în cazul materialelor compozite hibride cu cele obținute în cazul compozitului ranforsat doar cu țesătură de sticlă (Fig. 3.11), se observă că ranforsarea suplimentară cu făină de lemn în cazul materialelor compozite ranforsate cu fibre de sticlă, conduce la creșterea coeficientului lui Poisson  $\nu_{12}$ .
- Dintre materialele compozite ranforsate cu făină de lemn, cea mai mare valoare a coeficientului lui Poisson  $\nu_{12} = 0,3754$  corespunde materialului ranforsat doar cu făină de lemn de stejar (Fig. 3.11).
- Cea mai mică valoare a coeficientului lui Poisson  $\nu_{12} = 0,1503$  (Fig. 3.11) s-a obținut în cazul materialului ranforsat doar cu țesătură de sticlă, care este comparabilă cu rezultatele publicate în literatura de specialitate, prezentate în figura 3.12 (Liang et al., 2015). O valoare apropiată  $\nu_{12} = 0,1624$  s-a obținut în cazul materialului compozit ranforsat hibrid atât cu țesătură de sticlă cât și cu făină de lemn de brad.



**Fig. 3.12.** Comparația dintre coeficientul lui Poisson  $\nu_{12}$  determinat în cazul materialului sticlă-E / epoxi și rezultatele din literatura de specialitate

- Trebuie să se țină cont de faptul că țesătura de sticlă utilizată este fabricată din același tip de fir atât pe direcția urzelii cât și pe direcția de țesere (bătătură). Acest lucru înseamnă că, materialul compozit ranforsat doar cu acest tip de țesătură, este material ortotrop caracterizat de aceeași valoare a modulului lui Young  $E_1 = E_2 = E$  pe ambele direcții. Ca urmare, coeficientul lui Poisson  $\nu_{21}$  are aceeași valoare ( $\nu_{21} = \nu_{12}$ ) ținând cont de

simetria matricei modul de elasticitate generalizată redusă notată cu  $[Q]$ , descrisă de relația (1.6) din Capitolul 1.

- În ceea ce privește comparația rezultatelor obținute în cazul materialelor compozite ranforsate hibrid (atât cu țesătură de sticlă cât și cu făină de lemn), coeficientul lui Poisson  $\nu_{12} = 0,2574$  este mai mare în cazul materialului compozit ranforsat cu făină de lemn de stejar și țesătură de sticlă, decât coeficientul lui Poisson  $\nu_{12} = 0,1624$  corespunzător materialului compozit ranforsat cu făină de lemn de brad și țesătură de sticlă (Fig. 3.11). Comportarea mecanică a acestor două materiale este diferită cu toate că s-a utilizat același raport masic (34%) de făină de lemn în ambele cazuri și același număr de straturi din țesătură de sticlă (4 straturi). Deci, utilizarea făinii de lemn de stejar în locul făinii de lemn de brad, conduce la creșterea coeficientului lui Poisson  $\nu_{12}$ .

În analiza cu elemente finite (FEA) a stării de tensiuni este important să se definească coeficientul lui Poisson  $\nu_{12}$  pentru modelarea precisă a materialului. Valoarea coeficientului lui Poisson  $\nu_{12}$  trebuie să fie determinată experimental deoarece proprietățile depind atât de raportul volumic fibre-rășină cât și de natura matricei (de obicei, rășină) și respectiv, de natura fibrelor. Rezultatele prezentate în acest capitol, dovedesc faptul că tipul fibrelor de lemn (de stejar sau brad) influențează rezultatele referitoare la coeficientul lui Poisson  $\nu_{12}$ .

Rezultatele prezentate pentru materialul *Compozit 4* (țesătură de sticlă / făină lemn brad / rășină epoxi) vor fi utilizate în capitolul următor în scopul simulării comportării mecanice a unei componente șezut-spătar a unui scaun, fabricată din acest material compozit.

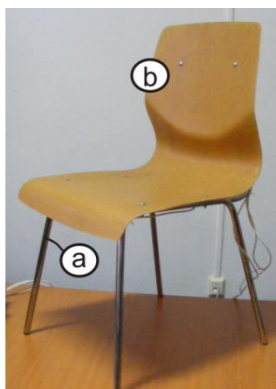
\*\*\*

Rezultatele prezentate în cadrul acestui capitol au fost diseminate parțial, de către autoarea tezei de abilitare în articole publicate în *Revista Materiale Plastice* (Cerbu *et al.*, 2011). De asemenea valoarea coeficientului lui Poisson  $\nu_{12} = 0,15$  corespunzătoare materialului compozit sticlă-E / epoxi *Epolam 2015* s-a utilizat la modelarea materialului în articolul publicat de către autoare în jurnalul *Advances in Mechanical Engineering* (Cerbu, 2015). Coeficientul lui Poisson  $\nu_{12} = 0,1624$  determinat în cazul materialului compozit hibrid de tipul sticlă-E / făină de lemn de brad / epoxi *Epolam 2015* s-a utilizat pentru definirea caracteristicilor de material în vederea modelării și simulării comportării mecanice a componentei de șezut-spătar a unui scaun, fabricată din acest material (Cerbu, 2012).

# Cap. 4

## 4. CERCETĂRI PRIVIND STĂRILE DE TENSIUNI ȘI DEFORMAȚII ÎN CAZUL COMPONENTEI ȘEZUT-SPĂTAR DE SCAUN FABRICATĂ DIN MATERIAL COMPOZIT STICLĂ / FĂINĂ DE LEMN / EPOXI

În cadrul acestui capitol, se prezintă cercetările teoretice și experimentale cu privire la stările de tensiuni și deformații care se dezvoltă în componenta de șezut-spătar a unui scaun fabricat din materialul compozit hibrid de tipul sticlă-E / făină de lemn de brad / epoxi *Epolam 2015*. Astfel, se propune totodată un exemplu practic de utilizare a unui astfel de material compozit hibrid, ca parte componentă (Fig. 4.1, componenta *b*) din structura scaunului prezentat în figura 4.1 montat pe structură metalică (Fig. 4.1, componenta *a*).



**Fig. 4.1.** Scaunul analizat:

a. Structura metalică; b. Componenta șezut-spătar fabricată din materialul compozit hibrid de tipul țesătură de sticlă-E / făină de lemn brad / epoxi

Componenta din material compozit hibrid a fost realizată doar la nivel de prototip iar design-ul se inspiră din cel al elementelor de mobilier modern, fabricate din materiale stratificate multate din lemn (Fig. 4.2). În acest sens, în figura 4.2,h se prezintă varianta omologată pe piață, a componentei de scaun fabricată din material stratificat mulat din lemn, care a fost utilizată ca model pentru realizarea matriței.

Elementul de noutate al scaunului din figura 4.1, constă în materialul utilizat pentru componenta de șezut-spătar.

Spre deosebire de varianta fabricată din material stratificat mulat din lemn, varianta din material compozit hibrid de tipul țesătură de sticlă / făină de lemn brad / epoxi se poate utiliza și pentru aplicații de exterior (ca de exemplu, la fabricarea mobilierului pentru grădini, terase sau parcuri) deoarece apa absorbită reprezintă doar 1,9% din masa materialului compozit hibrid după 6572 ore de imersiune (la saturație) conform rezultatelor prezentate în capitolul 2. Nu s-au observat pete sau modificări de culoare vizibile cu ochiul liber, pe suprafața epruvetelor după imersiune.



**Fig. 4.2.** Elemente de mobilier din stratificate mulate din lemn existente pe piață:  
 a..d. Produse fabricate integral din materiale stratificate mulate din lemn; e...h. Modele de  
 componente de șezut-spătar fabricate din materiale stratificate mulate din lemn  
 (<http://www.bizoo.ro/produse/scaune-lemn-bucatarie/start-0/10/>, 2011)

În cazul aplicațiilor de exterior, atât umiditatea din aer și cât și apa din precipitații trebuie considerați ca factori de mediu agresiv pe lângă ceilalți factori de mediu: variații de temperatură și cicluri termice, îngheț-dezghet, zăpadă, raze ultraviolete (UV) etc. Umiditatea mediului este variabilă între 40-50% (în zilele călduroase de vară) și 60-70% în zilele ploioase, depinzând și de zona geografică. Mobilierul de exterior este supus de asemenea acțiunii apei din precipitații (ploaie, topirea zăpezii).

În ceea ce privește efectele umidității, în capitolul 2, s-au prezentat efectele absorbției de apă asupra materialului compozit hibrid de tipul țesătură de sticlă / făină de lemn brad / epoxi după 6572 ore ( $\approx 9$  luni și 4 zile) de imersiune în apă. S-a arătat că după 6572 ore de imersiune în apă (la saturație), variațiile caracteristicilor de material sunt următoarele: modulul de elasticitate  $E$  la încovoiere (Fig. 2.20) scade cu 9,37%; tensiunea normală maximă  $\sigma_{max}$  la încovoiere scade cu 33,27%; rezistența la impact  $K$  crește cu 10,59%. Conform acestor rezultate, la proiectarea componentelor de mobilier de grădină trebuie să se țină cont de degradarea proprietăților mecanice când se analizează starea de tensiuni și deformații care se dezvoltă în astfel de piese sub acțiunea solicitărilor mecanice.

Pe de altă parte, imersiunea completă în apă este considerată ca un procedeu de îmbătrânire accelerată care echivalează cu ani de utilizare în mediul ambiant (Springer, 1988; Pomiès *et al.*, 1995).

Componenta de șezut-spătar fabricată din material compozit hibrid de tipul țesătură de sticlă /

făină de lemn brad / epoxi (Fig. 4.1) are și alte avantaje comparativ cu varianta din material stratificat mulat din lemn (Fig. 4.2,h) care se vor enumera în continuare.

- Masa componentei fabricată din materialul compozit sticlă-*E* / făină de lemn de brad / epoxi *Epolam 2015* este de 1,3 kg în timp ce masa variantei din material stratificat mulat din lemn este egală cu 3,1 kg.
- Fabricarea variantei din materialul compozit sticlă-*E* / făină de lemn de brad / epoxi *Epolam 2015* se poate face prin tehnologia manuală de turnare strat cu strat, cu investiție minimă în echipamente, în cazul seriilor mici de fabricație.
- Varianta din materialul compozit hibrid (Fig. 4.1) utilizează făină de lemn care se obține prin măcinarea deșeurilor lemnoase (inclusiv cele rezultate prin prelucrarea lemnului) care reprezintă o sursă regenerabilă și sustenabilă de materie primă. Soluția are implicații ecologice.

Un dezavantaj al componentei de șezut-spătar fabricată din material compozit hibrid de tipul țesătură de sticlă / făină de lemn brad / epoxi (Fig. 4.1), constă în faptul că tehnologia manuală nu se pretează la producție de serie mare. Există dificultăți în automatizarea acestei tehnologii din cauza amestecului vâscos de rășină cu făina de lemn și turnării acestuia între straturile din țesătură de sticlă.

Propunerea componentei de șezut-spătar a scaunului din figura 4.1, ca aplicație practică a materialului compozit hibrid de tipul sticlă-*E* / făină de lemn de brad / epoxi *Epolam 2015*, a condus la necesitatea analizei stărilor de tensiuni și deformații care se dezvoltă în această piesă sub acțiunea solicitării mecanice.

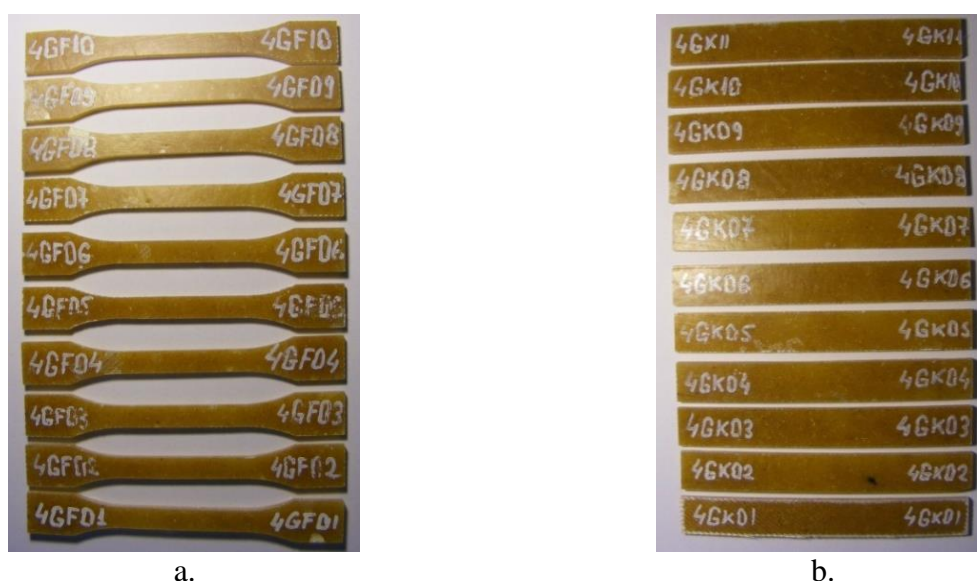
În acest scop, s-au stabilit următoarele obiective principale:

- *caracterizarea din punct de vedere mecanic, a materialului compozit hibrid de tipul sticlă-*E* / făină de lemn de brad / rășină epoxi care conține patru straturi din țesătură de sticlă, utilizat pentru fabricarea componentei de șezut-spătar (Compozit 4 din secțiunea 3.2.1), în vederea definerii materialului din modelul numeric;*
- *realizarea cercetărilor teoretice (modelări și simulări) privind stările de tensiuni și deformații în cazul componentei de șezut-spătar din material compozit sticlă-*E* / făină de lemn de brad / epoxi *Epolam 2015*, prin analiză cu elemente finite;*
- *realizarea cercetărilor experimentale privind măsurarea deformațiilor (prin metoda tensometrică electrică rezistivă) din componenta de șezut-spătar din material compozit sticlă-*E* / făină de lemn de brad / epoxi *Epolam 2015*;*

- comparația dintre rezultatele teoretice și cele experimentale;
- aplicarea rezultatelor experimentale referitoare la degradarea proprietăților mecanice ale materialului compozit hibrid, la modelul de piesă.

#### 4.1. Caracterizarea mecanică a materialului compozit hibrid definit în modelarea numerică

Modelarea cu acuratețe a materialului în cercetările teoretice a impus necesitatea acestei etape deoarece componenta de șezut spătar s-a fabricat din materialul *Compozit 4* a cărei structură a fost prezentată în subcapitolul 3.2.1. În comparație cu materialul compozit hibrid de tipul țesătura de sticlă de tip *E* / făina de lemn brad / epoxi *Epolam 2015* descris în secțiunea 2.4.1, materialul *Compozit 4* conține: numai patru straturi din țesătură de sticlă-E cu densitatea  $\rho = 200 \text{ g/m}^2$  (14,73% în procente de masă); făină de lemn de brad cu mărimea fibrelor de  $200 \mu\text{m}$  (9,42% în procente de masă) deoarece cu cât fibrele de lemn sunt mai fine cu atât modulul de elasticitate *E* la încovoiere este mai mare (Cui *et al.*, 2008).



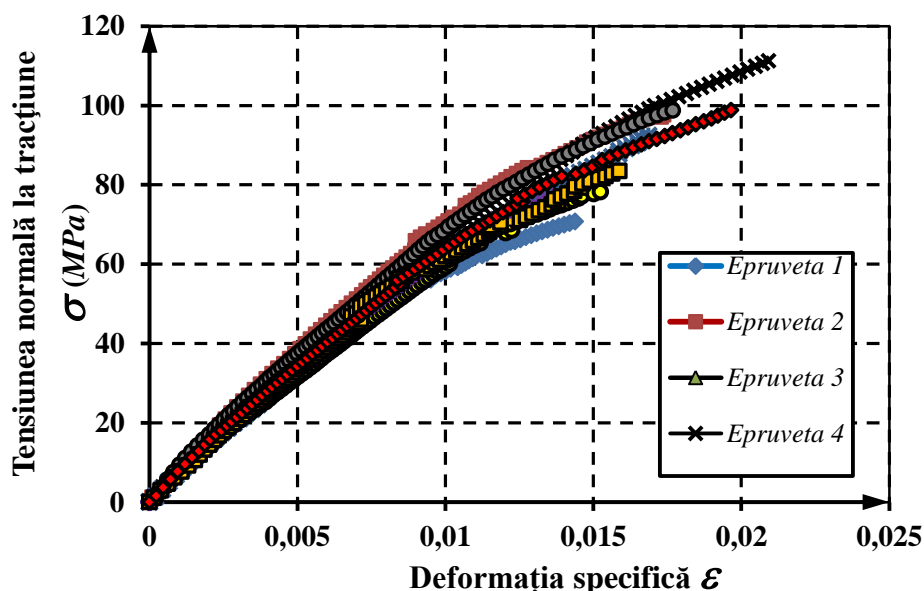
**Fig. 4.3.** Epruvete din materialul compozit hibrid *sticlă-E / făină de lemn de brad / epoxi Epolam 2015* utilizat la fabricarea componentei pentru scaun:

a. Epruvete de tracțiune (EN ISO 527-4); b. Epruvete de încovoiere (EN ISO 14125)

În acest scop s-a fabricat un panou din material compozit hibrid de tipul țesătura de sticlă de tip *E* / făina de lemn brad / epoxi *Epolam 2015* (*Compozit 4* din subcapitolul 3.2.1). Apoi, din panou s-au debitat pe mașină cu conducere numerică: epruvetele pentru încercările de tracțiune din figura 4.3,a (SR EN ISO 527-4, 2000); epruvete pentru încercarea de încovoiere prin metoda celor trei puncte (EN ISO 14125, 1998).

#### 4.1.1. Caracteristici de tracțiune

În figura 4.4 se prezintă curbele tensiune-deformație ( $\sigma - \varepsilon$ ) înregistrate la încercarea de tracțiune a materialului compozit de tipul sticlă-E / făina de lemn brad / epoxi *Epolam 2015* din care este fabricată componenta de șezut-spătar a scaunului.

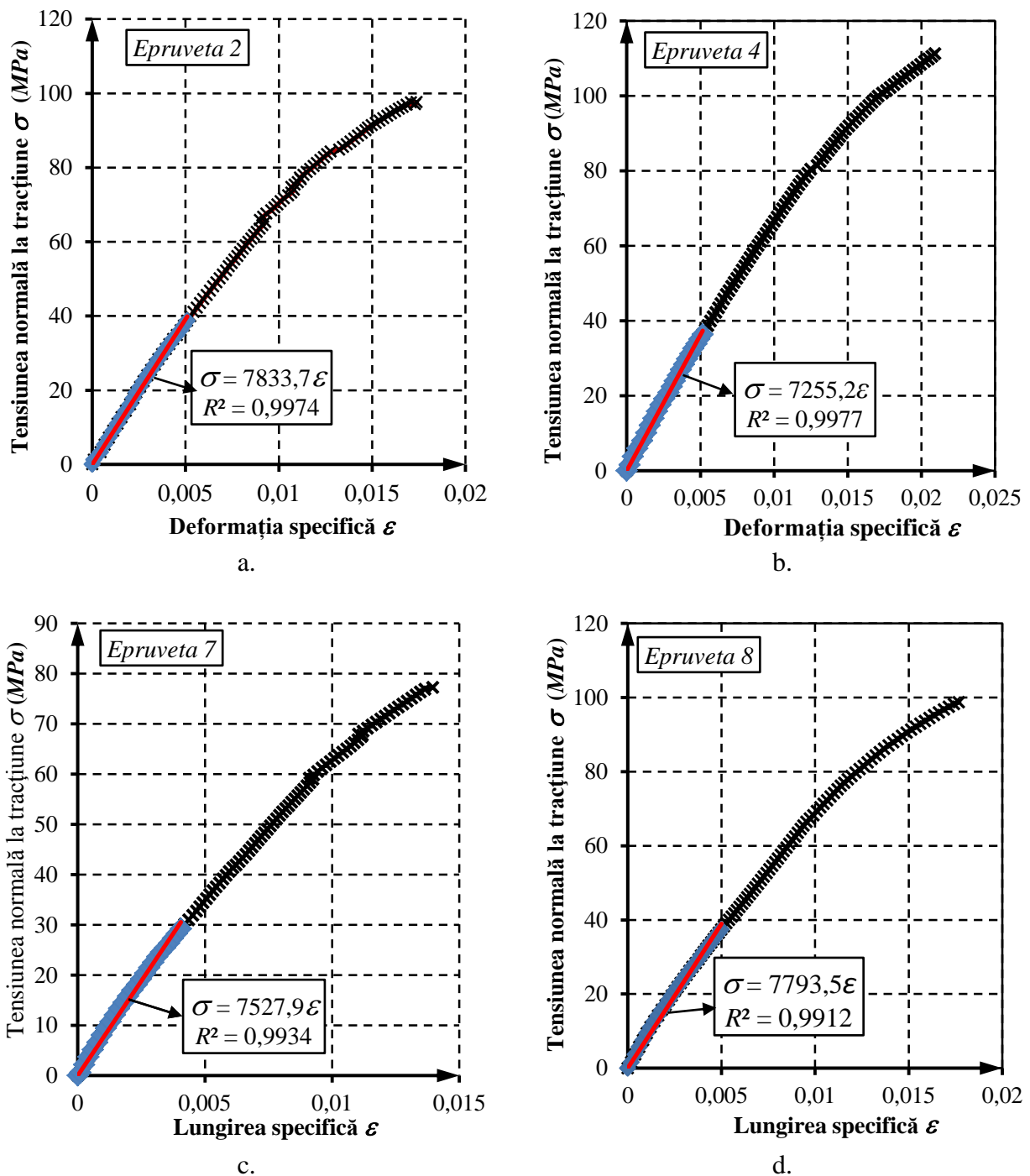


**Fig. 4.4.** Curbele  $\sigma - \varepsilon$  determinate prin încercarea la tracțiune a materialului compozit *sticlă-E / făina de lemn brad / epoxi Epolam 2015* din care este fabricată componenta pentru scaun

Materialului compozit *sticlă-E / făina de lemn brad / epoxi Epolam 2015* are o comportare elasto-plastică (Fig. 4.4). Ca urmare, modul de elasticitate  $E$  se determină prin aproximarea datelor experimentale din porțiunea liniară, prin *regresie liniară* utilizând *metoda celor mai mici pătrate*. Dreptele care aproximează datele experimentale și funcțiile liniare corespunzătoare, se prezintă în figura 4.5 pentru un număr de patru epruvete. Panta dreptei care aproximează datele experimentale pe porțiunea liniară, reprezintă modulul de elasticitate  $E$  al epruvetei căreia îi corespunde graficul tensiune-deformație ( $\sigma - \varepsilon$ ).

Ținând cont de faptul că materialul compozit hibrid este ranforsat cu țesătură de sticlă bidirecțională, fabricată din același tip de fir format din fibre de sticlă continue, pe ambele direcții, iar țesătura are aceeași orientare în toate straturile, materialul compozit hibrid este ortotrop. Acesta este caracterizat de modulele de elasticitate  $E_1 = E_2 = E$  pe cele două direcții  $1,2$  care coincid cu direcțiile de urzeală și bătătură ale țesăturii de sticlă.





**Fig. 4.5.** Determinarea modului de elasticitate  $E$  la tracțiune materialului compozit *sticlă-E / făina de lemn brad / epoxi Epolam 2015* din care este fabricată componenta pentru scaun

În tabelul 4.1 s-au centralizat datele referitoare la caracteristicile mecanice determinate prin încercarea de tracțiune pentru materialul compozit hibrid de tipul sticlă de tip  $E$  / făină de lemn brad / epoxi *Epolam 2015* din care este fabricată componenta de șezut-spătar a scaunului, analizată din punctul de vedere al stărilor de tensiuni și deformații.

**Tabelul 4.1**

Caracteristicile mecanice determinate prin încercarea de tracțiune pentru materialul compozit hibrid din care este fabricată componenta de șezut-spătar a scaunului analizat

Epruveta	Modul de elasticitate E (MPa)	Forța maximă F <sub>max</sub> (kN)	Tensiunea normală max. $\sigma_{max}$ (MPa)	Lungirea $\Delta l$ (mm)	Lungirea specifică $\varepsilon$	Energia de deformație U până la F <sub>max</sub> (N·mm)
1	7199,1	3,686400	70,69	0,79169	0,0158338	1837,85
2	7833,7	3,878274	97,60	0,87134	0,0174268	2003,53
3	7237,8	3,104560	82,11	0,66123	0,0132246	1043,52
4	7255,2	4,192764	111,26	1,20808	0,0241617	3221,31
5	6682,3	3,749768	92,31	0,84887	0,0169774	1759,53
6	6698,0	3,765132	78,25	0,77173	0,0154346	1672,93
7	7527,9	2,685678	77,24	0,70498	0,0140995	1092,44
8	7793,5	4,156425	98,75	1,70758	0,0341516	8619,73
9	6773,8	3,781463	83,50	0,80359	0,0160717	1752,76
10	7251,9	4,072213	98,82	0,11259	0,0022518	1201,59
Valoare medie	7225,3	3,707268	89,05	0,84817	0,0169633	2420,52

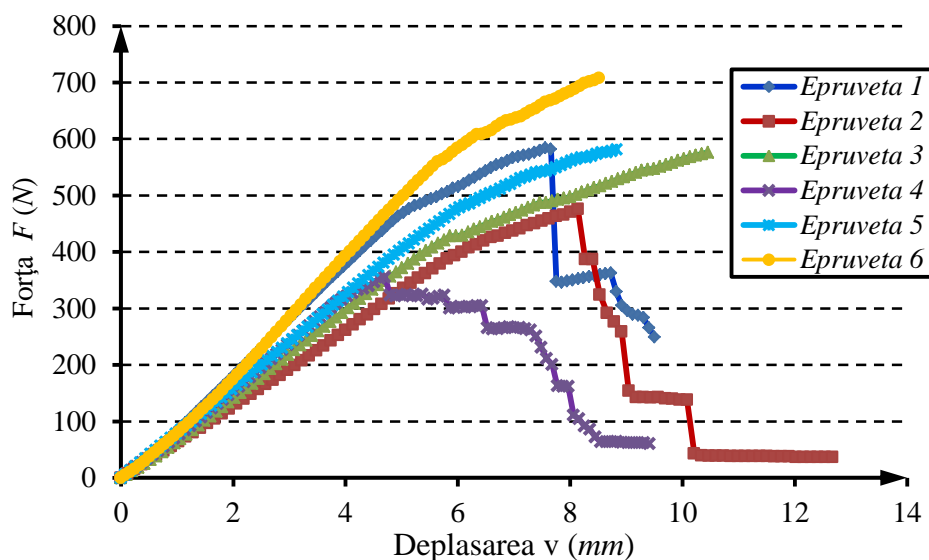
#### 4.1.2. Coeficientul de contracție transversală $\nu_{12}$ în planul de ranforsare 12

Rezultatele experimentale referitoare la coeficientul de contracție transversală  $\nu_{12}$  (coeficientul lui Poisson), au fost prezentate deja în capitolul 3. S-a determinat o valoare medie a coeficientului lui Poisson  $\nu_{12} = 0,1624$  în planul 12 de ranforsare cu fibre, în cazul materialului compozit hibrid de tipul sticlă-E / făină de lemn brad / epoxi *Epolam 2015* din care este fabricată componenta de șezut-spătar.

#### 4.1.3. Caracteristici de încovoiere

În figura 4.6 se prezintă curbele forță-deplasare ( $F-v$ ) înregistrate în timpul încercării de încovoiere prin metoda celor trei puncte a materialului compozit hibrid de tipul sticlă-E / făină de lemn brad / epoxi *Epolam 2015* din care este fabricată componenta de șezut-spătar a scaunului.

În tabelul 4.2 se prezintă rezultatele referitoare la caracteristicile mecanice determinate prin încercarea de încovoiere, în cazul materialului compozit hibrid de tipul sticlă-E / făină de lemn brad / epoxi *Epolam 2015* din care este fabricată componenta de șezut-spătar a scaunului care se analizează din punctul de vedere al stărilor de tensiuni și deformații în acest capitol.



**Fig. 4.6.** Curbele  $F-v$  înregistrate în încercarea de încovoiere a materialului compozit sticlă- $E$  / făină de lemn de brad / epoxi din care este fabricată componenta de șezut-spătar a scaunului

**Tabelul 4.2**

Caracteristicile mecanice de încovoiere pentru materialul compozit din care este fabricată componenta de șezut-spătar a scaunului analizat

Epruveta	Lățime (mm)	Grosime (mm)	Moment de inerție $I_z$ (mm <sup>4</sup> )	Modul de rezistență $W_z$ (mm <sup>3</sup> )	Modul de elasticitate $E$ (MPa)	Tensiune normală max. $\sigma_{max}$ (MPa)	Energia de deformație $U$ până la (N·mm)
1	20,1	4,4	142,6832	64,856	3574,2	144,16	2567,07
2	20,2	4,0	107,7333	53,867	3338,0	141,36	2128,99
3	20,1	3,8	91,9106	48,374	4378,4	190,64	3612,33
4	20,0	4,0	106,6667	53,333	4017,6	106,61	856,27
5	20,2	4,1	116,0170	56,594	3802,6	164,31	2986,09
6	20,2	4,4	143,3931	65,179	3695,3	173,70	3398,09
Valoarea medie	20,1	4,1	118,0673	57,034	3801,0	153,46	2591,47

#### 4.1.4. Degradarea caracteristicilor mecanice din cauza absorbției de umiditate

În tabelul 4.3 s-au sintetizat rezultatele referitoare la variația caracteristicilor mecanice după 6572 ore de imersiune în apă, în cazul materialului compozit hibrid de tipul sticlă- $E$  / făină de lemn brad / epoxi *Epolam 2015* din care este fabricată componenta de șezut-spătar analizată în cadrul acestui capitol.

Datele experimentale prezentate în cadrul acestui subcapitol, referitoare la caracteristicile mecanice ale materialului compozit hibrid de tipul sticlă- $E$  / făină de lemn brad / epoxi *Epolam 2015*, au fost utilizate în etapa de modelare a materialului, în modelul numeric utilizat pentru analiza deformațiilor și tensiunilor din componenta de șezut-spătar a scaunului.

**Tabelul 4.3**

Variația caracteristicilor mecanice ale materialului compozit hibrid după imersiune de lungă durată în apă

	Modulul de elasticitate $E$ la încovoiere (MPa)	Tensiunea normală max. $\sigma_{\max}$ la încovoiere (MPa)	Modulul de elasticitate $E$ la tracțiune (MPa)	Tensiunea normală max. $\sigma_{\max}$ la încovoiere (MPa)
Material nedegradat	3801	163	7225,3	89,05
După 1177 ore de imersiune în apă	3456	112	-	-
După 3048 ore de imersiune în apă	3301	102	-	-
După 6572 ore de imersiune în apă	3445	109	6605	78

În final, se analizează efectele reducerii caracteristicilor elastice asupra stărilor de deformație și în ceea ce privește deplasările în cazul solicitării mecanice a componentei de șezut-spătar.

#### **4.2. Cercetările teoretice privind stările de tensiuni și deformații în cazul componentei de șezut-spătar din material compozit sticlă-E / făină de lemn de brad / epoxi *Epolam 2015***

Cercetările teoretice constau în analiza cu elemente finite a scaunului prezentat în figura 4.1, utilizând software-ul *Abaqus* pentru analiza cu elemente finite.

Înainte de prezentarea modelului numeric și a rezultatelor simulării pentru diverse scheme de încărcare, în secțiunea următoare, se prezintă câteva aspecte legate de tehnicile de modelare cu elemente finite, utilizate în cazul structurilor din materiale compozite, cu particularități specifice programului de analiză *Abaqus*.

##### **4.2.1. Aspecte privind analiza cu elemente finite a structurilor din materiale compozite stratificate**

În funcție de scopul analizei, există diferite tehnici de modelare (Tutoriale software *Abaqus*, 2009; Cerbu și Popa, 2013) pentru materiale compozite:

- *modelarea microscopică* - matricea și materialul de ranforsare sunt ambele modelate separat ca materiale continue deformabile;
- *modelarea macroscopică* - materialul compozit este modelat ca un singur material

ortotrop sau ca un singur material anizotrop;

- *modelare mixtă* - materialul compozit este modelat printr-un număr de straturi ranforsate modelate la nivel macroscopic;
- *modelare cu ranforsare discretă* - ranforsare modelată cu elemente discrete sau cu alte instrumente de modelare;
- *submodelarea* - utilă pentru studiul concentratorilor de tensiune din jurul ajutărilor sau a fibrelor de ranforsare.

În majoritatea cazurilor de modelări cu elemente finite, structurile din materiale compozite sunt modelate ca: învelișuri stratificate; solide stratificate; elemente solide așezate pe straturi; învelișuri continue stratificate.

Pe lângă modelarea matricei și a materialului de ranforsare, deteriorarea progresivă și ruperea materialelor compozite, inclusiv la nivelul interfețelor (dintre fibră și matrice), poate fi modelată în ceea ce privește: prognoza modurilor de rupere (Tutoriale software *Abaqus*, 2009) atât pentru materialul matricei cât și pentru fibre (criteriul de rupere *Hashin*, UMAT în *Abaqus/Standard*, VUMAT în *Abaqus/Explicit*); delaminarea la interfața dintre două straturi, analizată prin separarea din structura materialului a secțiunilor lipite cu adeziv (Virtual Crack Closure Techniques); elemente coezive; contacte coezive.

#### *Modelarea macroscopică (Tutoriale software Abaqus, 2009)*

Prin această tehnică de modelare, materialul compozit este modelat ca un singur material ortotrop sau ca un singur material anizotrop. De obicei, materialul compozit este considerat elastic. În plus, modelul de plasticitate anizotropă a lui *Hill* este uneori utilizat pentru a modela deformațiile din afara domeniului elastic (Tutoriale *Abaqus*, 2009; Cerbu și Popa, 2013).

Analiza macroscopică se utilizează pentru a modela comportarea globală a componentelor de structură fabricate din materiale compozite. Comportarea neliniară a materialului și deteriorarea locală nu sunt luate în considerare din cauza naturii complexe în ceea ce privește modelarea acestor efecte. *Abaqus* nu are capabilități pentru modelarea deteriorării progresive și a delaminării sau a dezlipirii la interfața dintre straturi, în cazul în care trebuie să se țină cont de aceste aspecte. Ruperea structurală (flambaj și colaps) este studiată fără să se ia în considerare deteriorarea de material cum ar fi delaminarea. Verificările post-analiză sunt utilizate pentru a stabili dacă această aproximare este acceptabilă (Tutoriale software *Abaqus*, 2009).

Pentru modelarea macroscopică a materialelor compozite pe domeniul elastic, este esențial să se

definescă coeficienții de elasticitate anizotropă. În *Abaqus*, sunt disponibile câteva tipuri de comportări elastice anizotrope. Modulele de elasticitate pentru comportarea anizotropă sunt definite în *Abaqus* prin matricea  $[D]$  care poate definită pentru: material anizotrop; diferite simetrii de materiale (strat subțire numit “lamină“, material ortotrop); diferite temperaturi și variabile de câmp. Câtă vreme programul de analiză *Abaqus* dispune de o comandă pentru definirea orientării de material convenabilă, simetriile de material se utilizează prin specificarea proprietăților elastice ale materialului chiar dacă simetriile nu sunt aliniate cu sistemul de coordonate global.

Există diferite opțiuni de modelare a anizotropiei pentru definirea materialului în ceea ce privește comportarea liniar elastică (Tutoriale *Abaqus*, 2009; Cerbu și Popa, 2013):

- ELASTIC, TYPE = ENGINEERING CONSTANTS (Tutoriale software *Abaqus*, 2009). Această opțiune este pentru materiale ortotrope și necesită introducerea următoarelor proprietăți pentru material:  $E_1, E_2, E_3, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}, G_{12}, G_{13}, G_{23}$ ;
- ELASTIC, TYPE = LAMINA (Tutoriale software *Abaqus*, 2009). Această opțiune este aceeași cu cea precedentă dar este specifică pentru starea plană de tensiune, ca în cazul învelișurilor stratificate subțiri. Este necesar să se definească următoarele caracteristici:  $E_1, E_2, \nu_{12}, G_{12}, G_{13}, G_{23}$ .
- ELASTIC, TYPE = ORTHOTROPIC. Necesită definirea termenilor nenuli din matricea de rigiditate care caracterizează materialul ortotrop (Tutoriale software *Abaqus*, 2009):

$$[D] = \begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ & D_{2222} & D_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ & & D_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ & & & D_{1212} & 0 & 0 \\ \textit{simetric} & & & & D_{1313} & 0 \\ & & & & & D_{2323} \end{bmatrix}; \quad (4.1)$$

- ELASTIC, TYPE = ANISOTROPIC (Tutoriale software *Abaqus*, 2009). Necesită definirea termenilor nenuli din matricea de rigiditate  $[D]$  corespunzătoare cazului general de anizotropie:

$$[D] = \begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & D_{1112} & D_{1113} & D_{1123} \\ & D_{2222} & D_{2233} & D_{2212} & D_{2213} & D_{2223} \\ & & D_{3333} & D_{3312} & D_{3313} & D_{3323} \\ & & & D_{1212} & D_{1213} & D_{1223} \\ & \text{simetric} & & & D_{1313} & D_{1323} \\ & & & & & D_{2323} \end{bmatrix}. \quad (4.2)$$

În cazul unui material ortotrop, coeficienții de contracție transversală  $\nu_{ij}, \nu_{ji}$  (coeficienții lui *Poisson*) respectă următoarea relație (Barbero, 1998; Berthelot, 2007):

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j}, \quad (4.3)$$

unde  $\nu_{ij} = -\varepsilon_j / \varepsilon_i$  reprezintă coeficientul lui *Poisson* care definește raportul dintre deformația specifică transversală  $\varepsilon_j$  pe direcția  $j$  și deformația specifică longitudinală  $\varepsilon_i$  când materialul este sollicitat pe direcția  $i$ .

În cazul unui material ortotrop, constantele definite în matricea de rigiditate  $[D]$  sunt următoarele conform Tutorialelor software-ului *Abaqus* (2009):

$$\left. \begin{aligned} D_{1111} &= E_1(1 - \nu_{23}\nu_{32})\gamma; \\ D_{2222} &= E_2(1 - \nu_{13}\nu_{31})\gamma; \\ D_{3333} &= E_3(1 - \nu_{12}\nu_{21})\gamma; \\ D_{1122} &= E_1(\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23})\gamma = E_2(\nu_{12} + \nu_{32}\nu_{13})\gamma; \\ D_{1133} &= E_1(\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32})\gamma = E_3(\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23})\gamma; \\ D_{2233} &= E_2(\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31})\gamma = E_3(\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13})\gamma; \\ D_{1212} &= G_{12}; \\ D_{1313} &= G_{13}; \\ D_{2323} &= G_{23}; \end{aligned} \right\}, \quad (4.4)$$

în care s-a utilizat notația  $\gamma$  reprezintă

$$\gamma = \frac{1}{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}. \quad (4.5)$$

#### *Modelarea mixtă (Tutoriale software Abaqus, 2009)*

Prin această tehnică de modelare, materialul compozit se modelează printr-un număr de straturi,

fiecare strat având proprietăți de material ortotrop sau anizotrop. Straturile se consideră de obicei elastice cu toate că, proprietățile corespunzătoare domeniului plastic, pot fi utilizate.

În *Abaqus*, învelișurile se pot construi de tip multi-strat. Utilizatorul poate defini: un număr de straturi subțiri sau lamine; material și orientare diferită pe fiecare strat; un număr diferit de puncte de integrare utilizate pentru integrarea *Simpson* pe fiecare strat (Tutoriale software *Abaqus*, 2009).

Programul de analiză *Abaqus* dispune de două tipuri de elemente de tip *Shell*:

- *conventional shell elements* – caz în care, doar suprafața de referință este discretizată;
- *continuum shell elements* – un volum *3D* este discretizat dar comportarea elementului se bazează pe teoria de *shell*.

În cazul elementelor de tip *shell*, *punctele de integrare* se referă la pozițiile de integrare aflate pe suprafața învelișului iar *punctele din secțiune* se referă la pozițiile de integrare aflate pe grosimea învelișului.

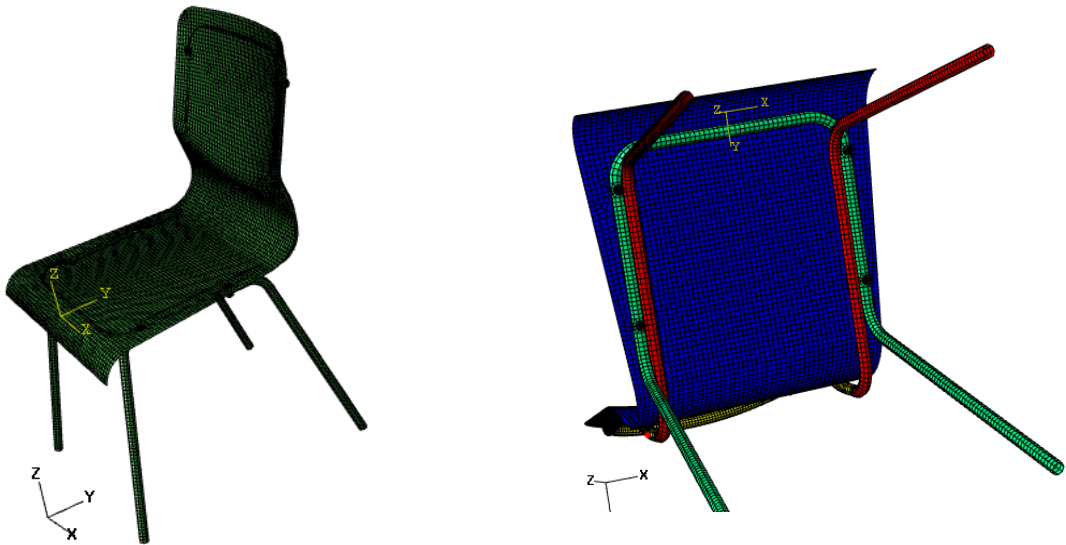
În cazul modelării învelișurilor din materiale compozite stratificate se poate selecta unul din tipurile de elemente finite din *Abaqus* care sunt descrise în continuare

- *Elemente de tip shell convenționale subțiri (STR13, S8R5, S9R5) și groase (S8R)*. Elementele de tip *shell* subțiri nu se recomandă pentru materiale compozite deoarece ignoră flexibilitatea transversală și presupun mici deformații.
- *Elemente de tip shell convenționale S4R și S3R* se utilizează pentru modelarea atât a învelișurilor subțiri cât și a învelișurilor groase. Elementul *S3R* este un element cu deformație constantă astfel că trebuie să se facă o discretizare mai fină în regiunile cu gradienti mari de deformație.
- *Elemente de tip shell continue (SC6R, SC8R)* sunt utilizate în cazul învelișurilor groase.

#### **4.2.2. Analiza teoretică a stărilor de tensiuni și deformații din componenta fabricată din material compozit de tipul țesătură de sticlă / făină de lemn de brad / rășină epoxi, din structura scaunului**

În figura 4.7 se prezintă modelul cu elemente finite al scaunului analizat în cadrul acestui capitol a cărui fotografie se prezintă în figura 4.1). Componenta de șezut-spătar (Fig. 4.1, componenta *b*) fabricată din materialul compozit hibrid de tipul sticlă / făină de lemn de brad / rășină epoxi, s-a discretizat utilizând elemente finite de tip *shell* cu patru noduri.



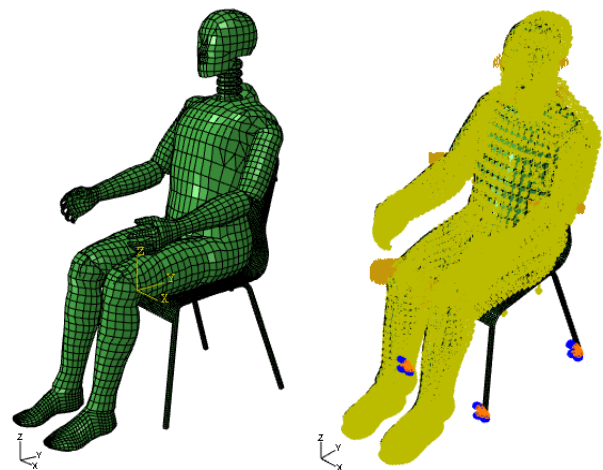


**Fig. 4.7.** Modelul cu elemente finite a scaunului analizat

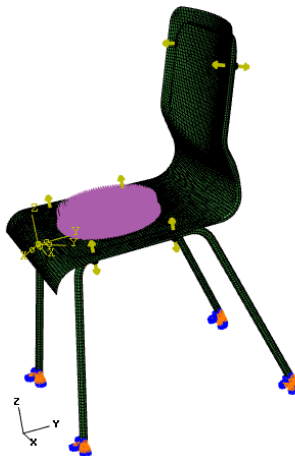
Încărcarea mecanică este de tipul forței distribuite (presiune) dată de greutatea unei persoane cu masa de 100 kg. S-a considerat că 75% din greutatea persoanei acționează pe șezut și 25% din greutate este aplicată pe spătar.



**Fig. 4.8.** Schema I de încărcare



**Fig. 4.9.** Schema a II-a de încărcare



**Fig. 4.10.** Schema a III-a de încărcare

În scopul analizei distribuțiilor de tensiuni și deformații, s-au considerat trei scheme de încărcare care sunt prezentate în continuare:

- în *Schema I de încărcare* (Fig. 4.8) s-a considerat că 75% din greutatea persoanei este uniform distribuită pe șezut iar 25% din greutatea acesteia este uniform distribuită pe spătar;
- în *Schema a II-a de încărcare* (Fig. 4.9) s-a considerat un manechin cu masa de 100 kg pentru care s-a aplicat o forță de tip gravity (75% pe direcția axei  $Oz$ ; 25% pe direcția axei  $Oy$ );
- *Schema a III-a de încărcare* (Fig. 4.10) s-a utilizat doar pentru comparația rezultatelor teoretice cu cele experimentale referitoare la deformațiile specifice.

În toate cazurile, s-au considerat de asemenea forțele de prestrângere din șuruburi care sunt definite de tip “*bold load*” în programul de analiză *Abaqus*.

Rezultatele referitoare la încercările mecanice efectuate pentru materialul compozit hibrid de tipul țesătură de sticlă / făină de lemn de brad / rășină epoxi *Epolam 2015*, s-au prezentat în cadrul sub-capitolului 4.1. În modelarea materialului, s-au considerat aceste rezultate și s-a ținut cont de faptul că, țesătura de sticlă utilizată pentru armare este bidirecțională, având același tip de fir format din fibre de sticlă continue pe ambele direcții (urzeală și bătătură). Materialul compozit utilizat este de tip ortotrop iar valorile medii ale caracteristicilor elastice și mecanice prezentate în secțiunea 4.1 sunt: modulele de elasticitate  $E_1 = E_2 = 7793 \text{ MPa}$  la tracțiune corespunzătoare celor două direcții de ranforsare 1, 2 cu țesătură; tensiunile normale maxime  $\sigma_{1t} = \sigma_{2t} = 89 \text{ MPa}$  la tracțiune corespunzătoare celor două direcții de ranforsare 1, 2 cu țesătură; coeficientul de contracție transversală  $\nu_{12} = 0,1624$  (coeficientul lui *Poisson*); modulele de elasticitate  $E_1 = E_2 = 3801 \text{ MPa}$ . la încovoiere; tensiunile normale maxime  $\sigma_{1i} = \sigma_{2i} = 153,46 \text{ MPa}$  la încovoiere.

Ținând cont de tehnicile de modelare pentru materiale compozite, utilizate de programul de analiză *Abaqus* (Cap. 4.2.1), aceste caracteristici au fost utilizate în modelarea materialului pe domeniul elastic (Fig. 4.11).

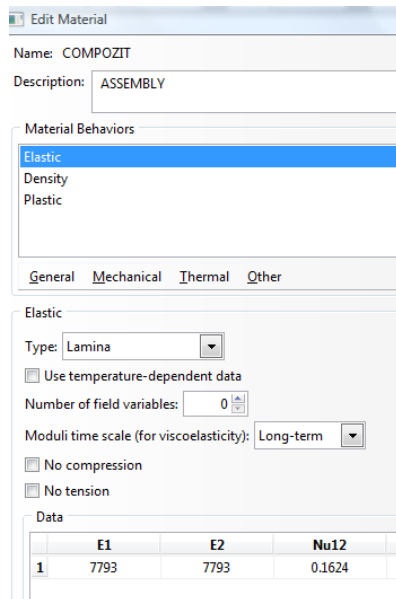


Fig. 4.11. Modelarea materialului pe domeniul elastic

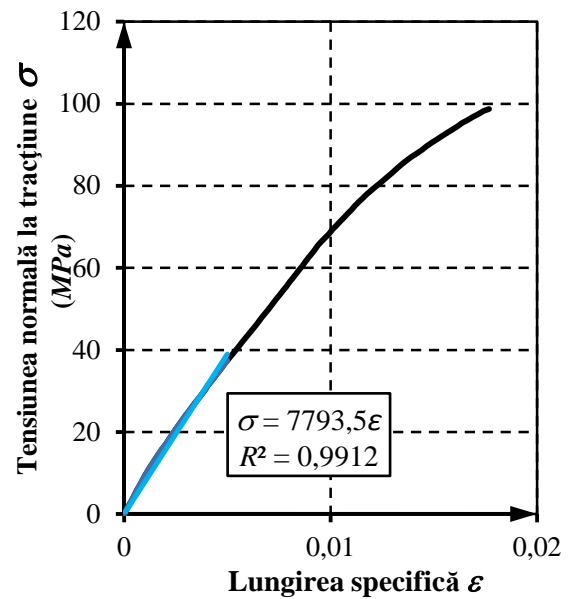


Fig. 4.12. Curba  $\sigma - \varepsilon$  utilizată pentru definirea proprietăților de material

Name	Separation	Master Surface	Slave Surface	Type	Sliding	Discretization	Property	Adjust	Surface Smoothing
INT-16		SPATE_DUMMY	SCAUN_SPATE	Interaction	Finite	Surf-Surf	INT	1.5	None
INT-1		S:SURUB_1	S:SCAUN_1	Tie		Surf-Surf		Off	
INT-2		S:SCAUN	S:SCHIELET_MI	Tie		Surf-Surf		Off	
INT-3		S:SCHIELET_MI	S:PIULITA_1	Tie		Surf-Surf		Off	
INT-4		S:SURUB_2	S:SCAUN_2	Tie		Surf-Surf		Off	
INT-5		S:SCHIELET_MI	S:PIULITA_2	Tie		Surf-Surf		Off	
INT-6		S:SURUB_4	S:SCAUN_4	Tie		Surf-Surf		Off	
INT-7		S:SCHIELET_MI	S:PIULITA_4	Tie		Surf-Surf		Off	
INT-8		S:SURUB_5	S:SCAUN_5	Tie		Surf-Surf		Off	
INT-9		S:SCHIELET_MI	S:PIULITA_5	Tie		Surf-Surf		Off	
INT-10		S:SURUB_3	S:SCAUN_3	Tie		Surf-Surf		Off	
INT-11		S:SCHIELET_MI	S:PIULITA_3	Tie		Surf-Surf		Off	
INT-12		S:SCAUN_SPA	S:SCHIELET_MI	Tie		Surf-Surf		Off	
INT-13		S:SURUB_6	S:SCAUN_6	Tie		Surf-Surf		Off	
INT-14		S:SCHIELET_MI	S:PIULITA_6	Tie		Surf-Surf		Off	

Fig. 4.13. Perechile de contacte definite în modelul cu elemente finite (Schema a II-a de încărcare)

Pentru domeniul plastic, s-au introdus în program coordonatele punctelor din graficul  $\sigma - \varepsilon$  (Fig. 4.12), corespunzătoare domeniului plastic.

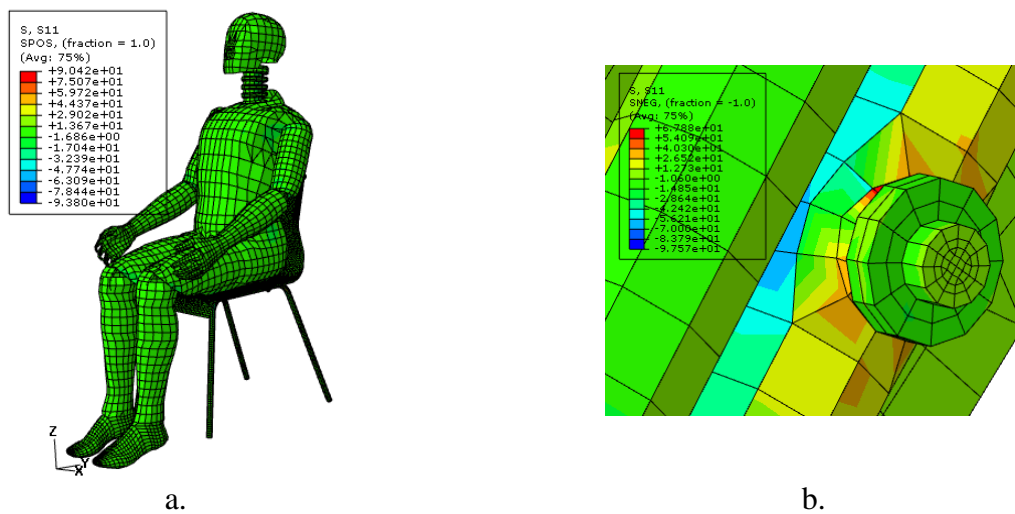
În figura 4.13 se prezintă contactele definite între elementele componente ale scaunului și manechin.

În figura 4.14,a se prezintă rezultatele privind distribuția tensiunilor normale  $\sigma_x$  pentru întregul model cu elemente finite al scaunului, în cazul *Schemei a II-a de încărcare*. Se observă că tensiunile maxime apar în asamblările cu șurub din cauza forței de strângere a șurubului care

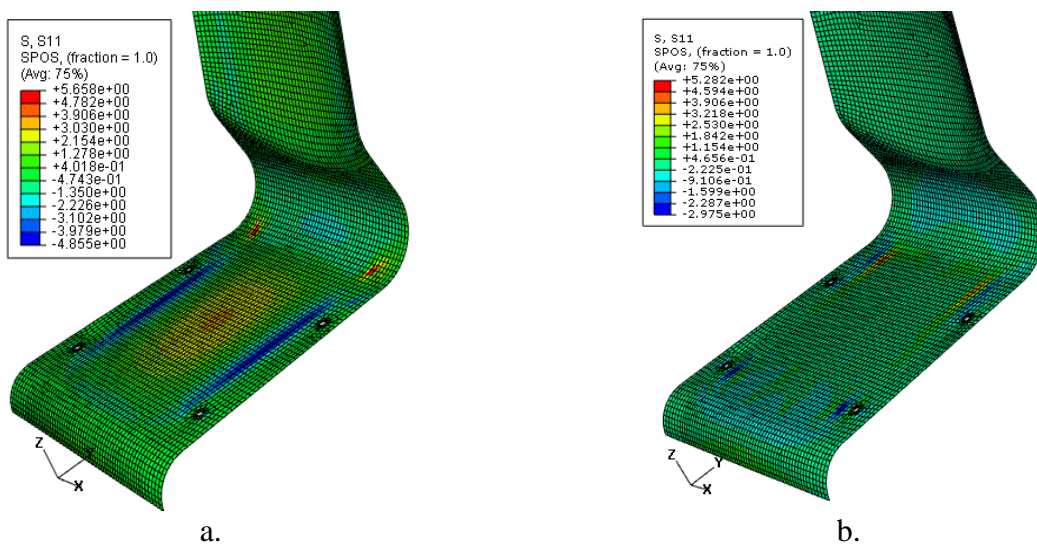
generează concentratori de tensiuni (Fig. 4.14,b).

În continuare, se prezintă doar rezultatele analizei cu elemente finite pentru componenta de șezut-spătar realizată din material compozit hibrid, pentru ambele scheme de încărcare, după cum urmează:

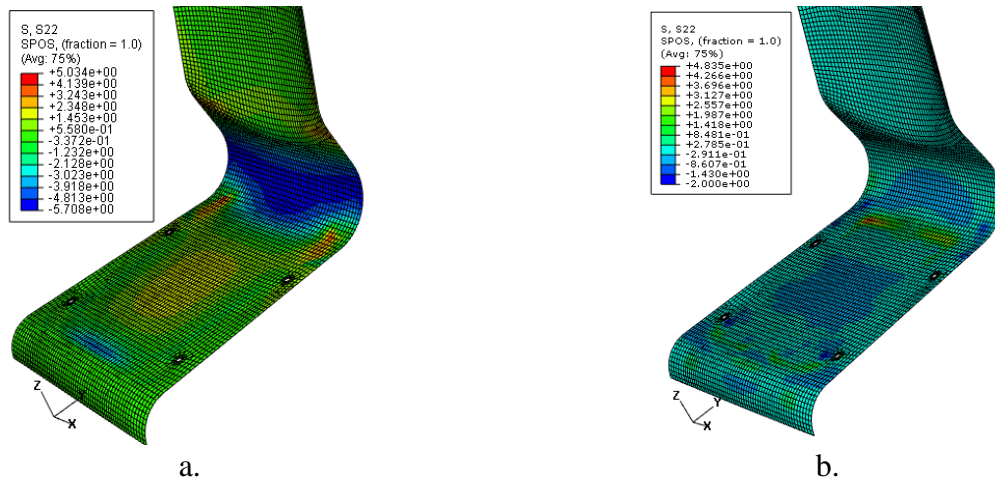
- distribuția de tensiuni normale  $\sigma_x$  și  $\sigma_y$  pe direcțiile axelor  $Ox$  și  $Oy$  (Fig. 4.15 și 4.16);
- distribuția de deformații specifice  $\varepsilon_x$  și  $\varepsilon_y$  pe direcțiile axelor  $Ox$  și respectiv,  $Oy$  (Fig. 4.17 și 4.18);
- deplasările  $u$  și  $w$  pe direcțiile axelor  $Ox$  și respectiv,  $Oz$  (Fig. 4.19 și 4.20).



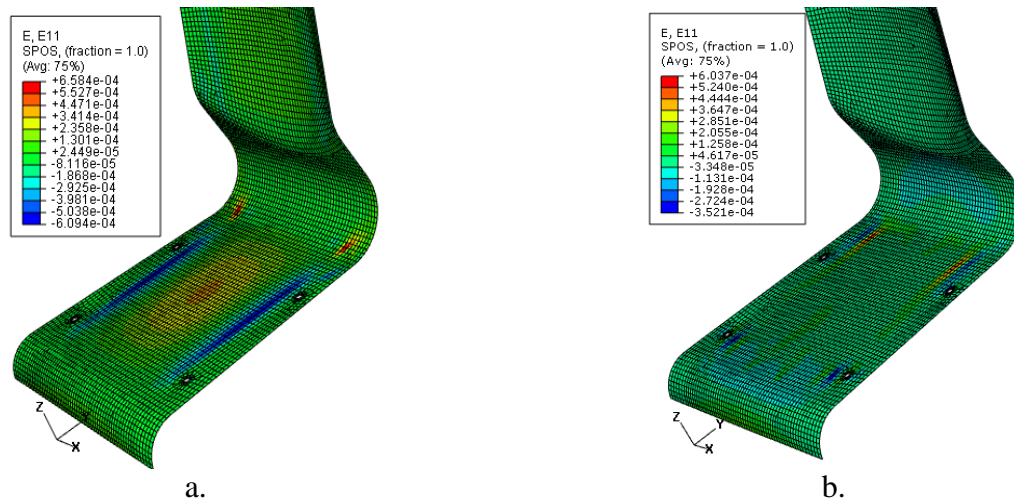
**Fig. 4.14.** Distribuția de tensiuni normale  $\sigma_x$  în direcția axei  $Ox$  în cazul Schemei a II-a de încărcare: a. Distribuția tensiunilor pentru întreg modelul; b. Detaliu privind distribuția tensiunilor în asamblarea cu șurub



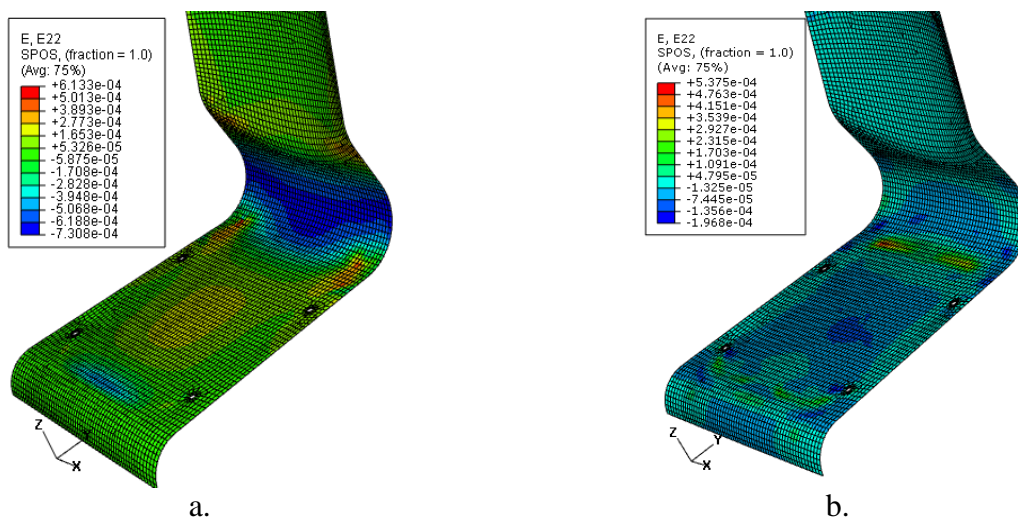
**Fig. 4.15.** Distribuția de tensiuni normale  $\sigma_x$  în direcția axei  $Ox$ , în componenta din material compozit hibrid: a. Schema I de încărcare; b. Schema a II-a de încărcare



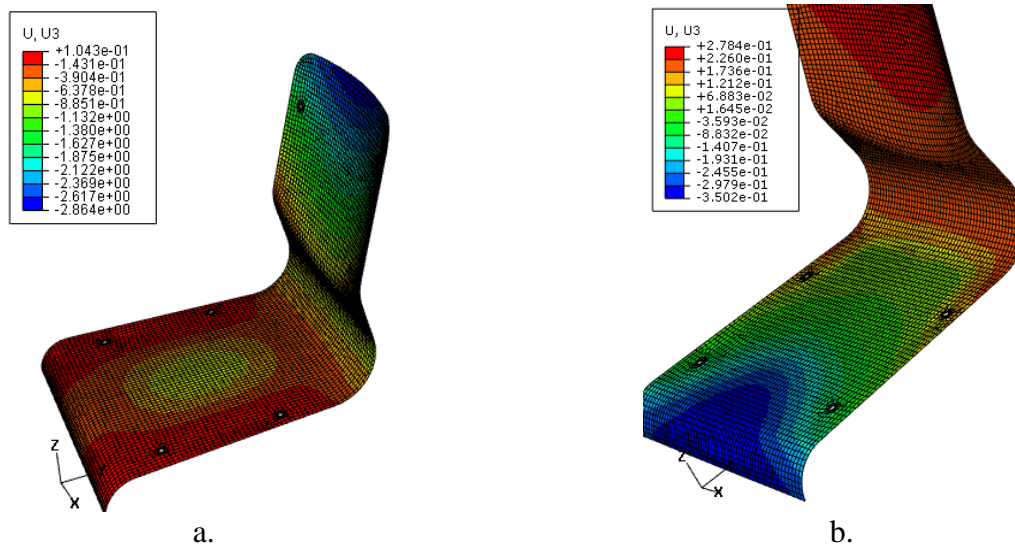
**Fig. 4.16.** Distribuția de tensiuni normale  $\sigma_y$  în direcția axei  $Oy$ , în componenta din material compozit hibrid: a. *Schema I* de încărcare; b. *Schema a II-a* de încărcare



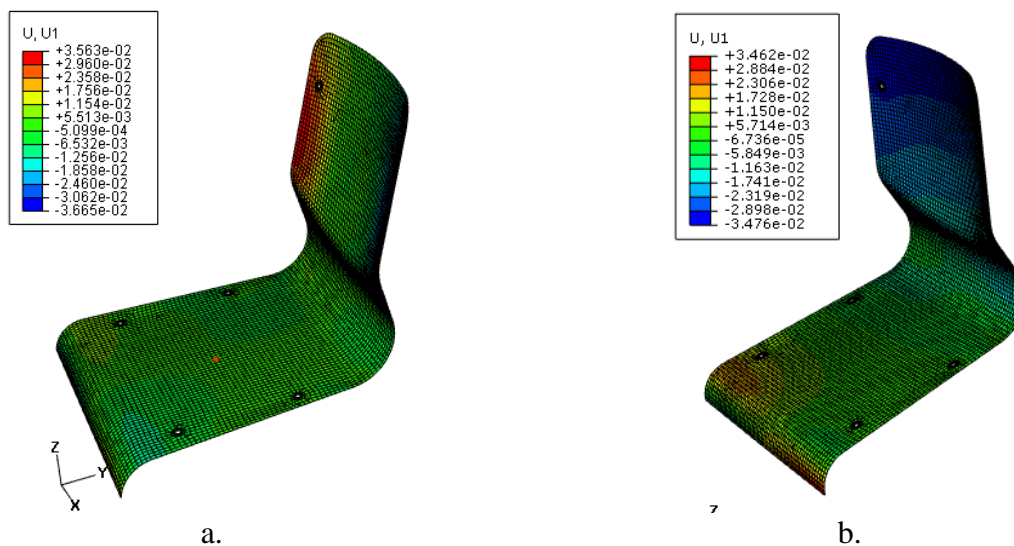
**Fig. 4.17.** Distribuția de deformații specifice  $\epsilon_x$  în direcția axei  $Ox$ , în componenta din material compozit hibrid: a. *Schema I* de încărcare; b. *Schema a II-a* de încărcare



**Fig. 4.18.** Distribuția de deformații specifice  $\epsilon_y$  în direcția axei  $Oy$ , în componenta din material compozit hibrid: a. *Schema I* de încărcare; b. *Schema a II-a* de încărcare



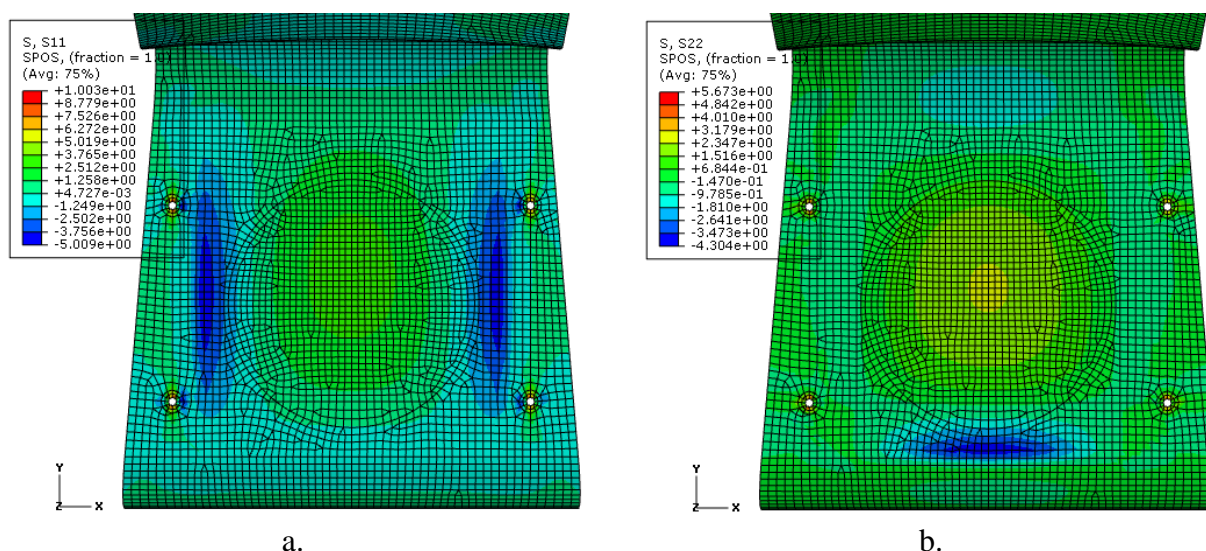
**Fig. 4.19.** Deplasările  $w$  în direcția axei  $Oz$  perpendiculară pe șezut, în componenta din material compozit hibrid: a. *Schema I* de încărcare; b. *Schema a II-a* de încărcare



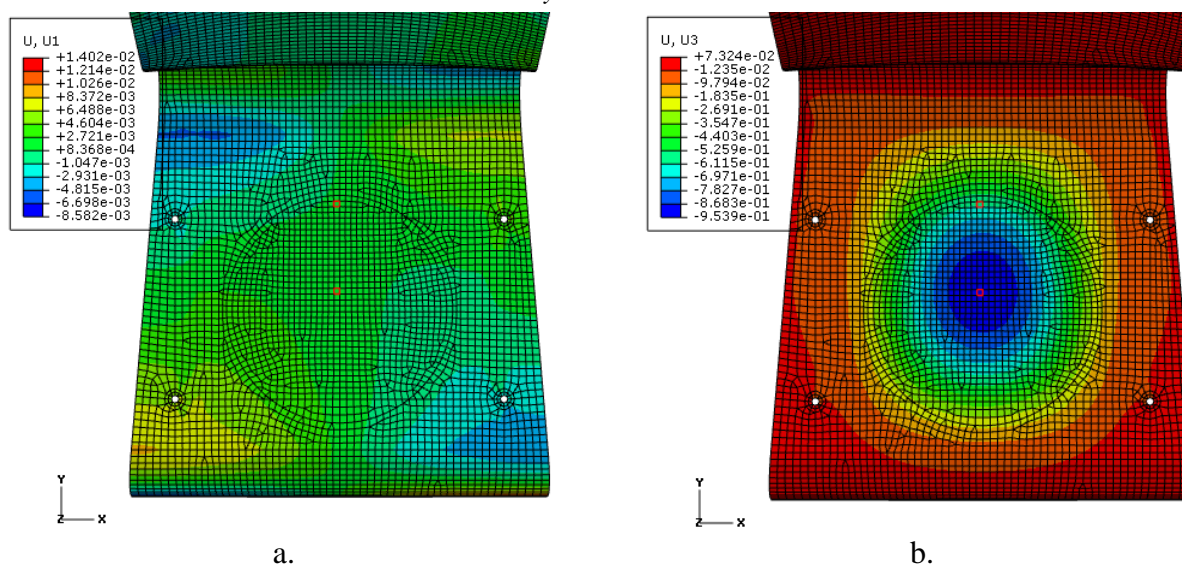
**Fig. 4.20.** Deplasările  $u$  în direcția axei  $Ox$ , în componenta din material compozit hibrid: a. *Schema I* de încărcare; b. *Schema a II-a* de încărcare

*Schema a III-a* de încărcare se utilizează doar pentru comparația cu rezultatele experimentale. În figurile 4.21 și 4.22, se prezintă rezultatele obținute prin analiza cu elemente finite, în cazul în care presiunea aplicată pe șezutul scaunului este  $p = 0,004562$  (corespunde forței  $F = 294,3 \text{ N}$ ) în *Schema a III-a* de încărcare.

În figura 4.21 se prezintă distribuția tensiunilor normale  $\sigma_x$  și  $\sigma_y$  în direcțiile axelor  $Ox$  și  $Oy$  sistemul de coordonate global cu axa  $Oz$  perpendiculară pe șezutul scaunului. În figura 4.22, se prezintă deplasările  $u$  și  $w$  în direcțiile axelor  $Ox$  și  $Oz$ .



**Fig. 4.21.** Distribuția tensiunilor normale în componenta din material compozit în cazul *Schemei a III-a* de încărcare ( $F = 294,3 \text{ N}$ ): a. Tensiunea normală  $\sigma_x$  în direcția axei  $Ox$ ; b. Tensiunea normală  $\sigma_y$  în direcția axei  $Oy$



**Fig. 4.22.** Distribuția deplasărilor pentru componenta din material compozit în cazul *Schemei a III-a* de încărcare ( $F = 294,3 \text{ N}$ ): a. Deplasările  $u$  în direcția axei  $Ox$ ; b. Deplasările  $w$  în direcția axei  $Oz$

#### 4.3. Cercetările experimentale privind stările de deformații în cazul componentei de șezut-spătar din material compozit sticlă-E / făină de lemn de brad / epxi *Epolam 2015*

Cercetările experimentale au ca scop validarea modelului teoretic și vizează determinarea deformațiilor specifice  $\varepsilon$  care se dezvoltă în componenta de șezut-spătar a scaunului supus analizei în cadrul acestui capitol.

În concordanță cu natura problemei studiate, cercetarea experimentală evidențiază o varietate de

tehnici de investigare distructivă sau nedistructivă, dintre care cel mai des utilizate sunt (Szava *et al.*, 2001):

- metoda tensometrică electrică rezistivă;
- metoda fotoelastică;
- metoda ultrasonică;
- metoda emisiei acustice;
- metoda holografică;
- metoda termografică etc.

Oricare dintre metodele prezentate mai sus se poate utiliza în vederea analizei experimentale a stărilor de deformații care se dezvoltă în structurile fabricate din materiale izotrope sau anizotrope.

#### **4.3.1. Metoda tensometrică electrică rezistivă**

În scopul cercetărilor experimentale a stărilor deformații care se dezvoltă într-o piesă sollicitată mecanic, se poate utiliza *metoda tensometrică electrică rezistivă*. Este o metodă de măsurare a deformațiilor liniare a unui corp sollicitat mecanic, prin intermediul unor traductoare electrice rezistive (Hoffman, 1989; Szava *et al.*, 2001). Se bazează pe principiul de transformare a variațiilor deformațiilor mecanice a unei rezistențe electrice sub formă de sârmă subțire sau foiță, în modificări ale rezistenței electrice. Această metodă impune acordarea unei atenții deosebite alegerii: tipului de traductoare, de adezivi, de lacuri de protective; a modului de pregătire a suprafețelor pe care se vor aplica acestea (Hoffman, 1989; Szava *et al.*, 2001). Din diverse cercetări experimentale prezentate în literatura de specialitate, s-a observat că măsurătorile care utilizează traductoare electrice rezistive de tip rozetă au condus la rezultate bune în ceea ce privește: determinarea deformațiilor specifice în cazul materialelor compozite aflate în stare generală de tensiune; analiza stărilor locale de deformații din starturile exterioare în cazul materialelor compozite stratificate armate cu fibre.

Criteriile care stau la baza alegerii traductoarelor electrice rezistive (*TER*) în vederea măsurării deformațiilor specifice din structurile mecanice analizate sunt următoarele (Hoffman, 1989; Szava *et al.*, 2001):

- tipul materialului (material izotrop, material ortotrop de tipul lemnului sau a materialului compozit, material anizotrop);
- geometria structurii investigate (piesa propriu-zisă sau epruveta) și calitatea suprafeței

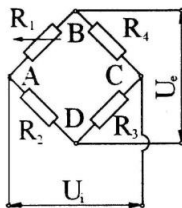


acesteia deoarece pot să apară variații locale ale deformațiilor specifice;

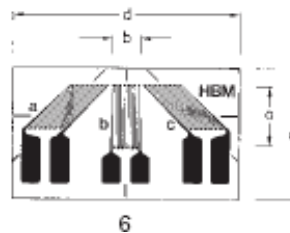
- coeficienții de dilatare sau conductivitate termică care depind de direcția de măsurare sau de sollicitările mecanice aplicate anterior;
- durata de timp a sollicitării mecanice;
- condițiile de mediu;
- precizia măsurării.

Se acordă o atenție deosebită materialelor utilizate în confecționarea traductoarelor, astfel că cele mai frecvent utilizate sunt acelea care au rețeaua confecționată din constantan (Hoffman, 1989). Acest materiale are următoarele avantaje: stabilitate a proprietăților la variații de temperatură, rezistență mare la oboseală.

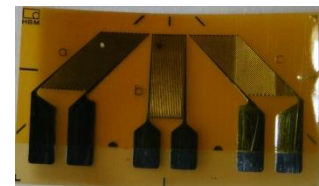
Datele tehnice ale unui traductor electric rezistiv sunt (Hoffman, 1989; Szava et al., 2001): tipul rețelei (fir sau folie), dimensiunile (lungimea de măsurare), rezistența electrică, factorul de stabilitate  $k$ , tensiunea maximă de alimentare, sensibilitatea transversală, domeniul temperaturii de utilizare. Tipurile de montaje în punte cu traductoare electrice rezistive pot fi: montaje în sfert de punte, montaje în semipunte și montaje în punte completă.



**Fig. 4.23.** Montaj de tip sfert de punte (Szava et al., 2001)



**Fig. 4.24.** Traductor electric rezistiv de tip rozetă 1-RY88-6/350 utilizat pentru măsurarea deformațiilor specifice: a.Schema; b. Fotografia traductorului utilizat

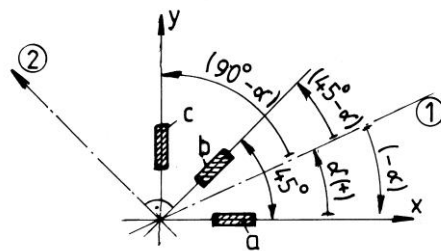


În cazul montajelor de tip sfert de punte (Fig. 4.23), cu  $R_j$  se notează rezistențele calibrate (deci, cele care aparțin aparatului de măsurare) și sunt marcate prin dreptunghiuri fără diagonale, iar cele active, adică cele lipite pe piesă (TER), sunt reprezentate prin dreptunghiuri prevăzute cu diagonale. În cazul din figura 4.23, în care rezistența activă este  $R_1$ , variației specifice de rezistență  $\frac{\Delta R_1}{R_1} = k \cdot \varepsilon$  îi corespunde semnalul în tensiune (în ipoteza liniarității acestuia) de mărime  $\Delta U_e = 0.25 \cdot k \cdot \varepsilon \cdot U_i$ , ceea ce va corespunde unui factor al punții de  $N = 1$ . Eroarea relativă este  $\eta_{rel} = 0,5 \cdot k \cdot \varepsilon$  iar montajul nu asigură compensarea efectului termic. În acest caz, deformația pe o direcție a traductorului electric rezistiv de tip rozetă, se calculează cu relația (Hoffman, 1989; Szava et al., 2001):

$$\varepsilon = 4 \cdot \frac{\Delta U_e}{U_i \cdot k} \left[ \frac{\mu m}{m} \right], \quad (4.5)$$

în care  $U_i$  reprezintă tensiunea de alimentare;  $\Delta U_e$  este variația tensiunii sau semnalul de ieșire;  $k$  este constanta traductorului electric rezistiv.

În cazul *tensometriei electrice rezistive* aplicată pentru cazul general al problemei plane, există trei necunoscute, ceea ce impune utilizarea rozetelor cu trei rezistențe, cu ajutorul cărora se măsoară deformațiile specifice liniare  $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$  iar necunoscutele sunt  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  numite deformații specifice principale care corespund direcțiilor principale de deformație notate cu  $\alpha_{1,2}$  (Fig. 4.25).



**Fig. 4.25.** Rozeta 0/90/0 cu trei rezistențe (Szava *et al.*, 2001)

În cazul traductorului electric rezistiv de tipul rozetei 0/45/90 cu trei rezistențe (Fig. 4.25), se consideră faptul că, o direcție principală de deformație (de exemplu, direcția principală 1 de deformație), formează unghiul  $\alpha$  cu marca notată cu "a". După înlocuirea valorilor unghiurilor următoare:

$$\alpha_a = -\alpha, \quad \alpha_b = 45^\circ - \alpha, \quad \text{respectiv} \quad \alpha_c = 90^\circ - \alpha, \quad (4.6)$$

în relația

$$\varepsilon(\alpha) = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos 2\alpha, \quad (4.7)$$

se obține un sistem de trei ecuații cu trei necunoscute. Soluțiile acestui sistem de ecuații cu trei necunoscute sunt (Hoffman, 1989; Szava *et al.*, 2001):

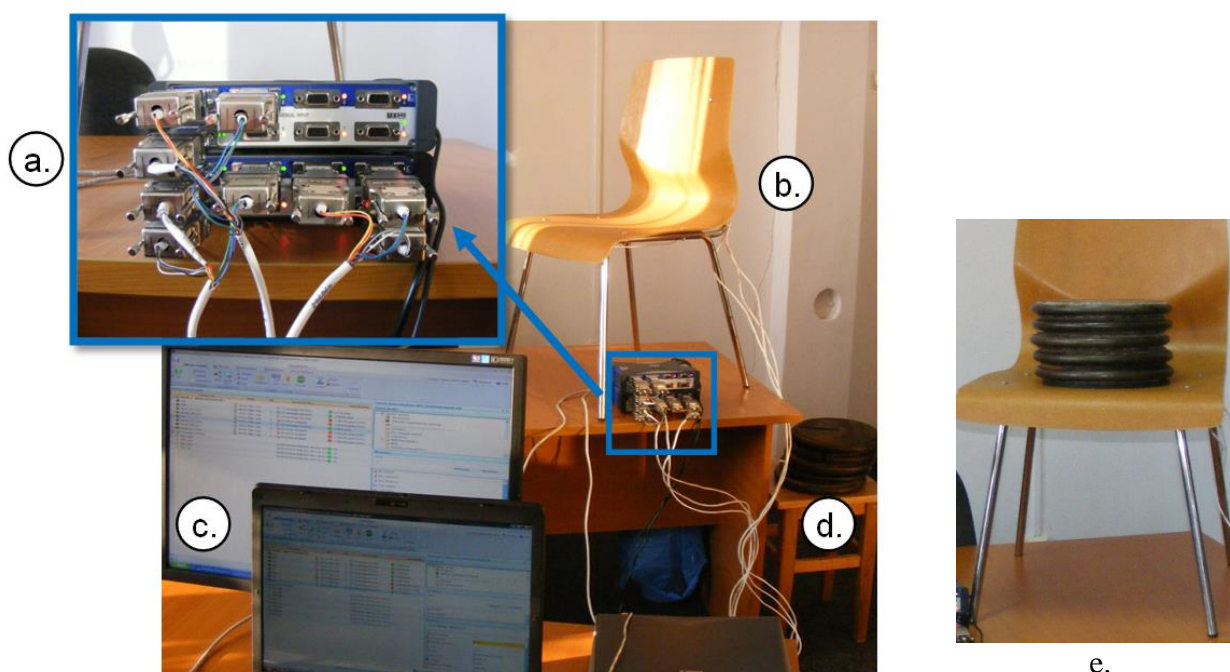
$$\operatorname{tg} 2\alpha_1 = \frac{2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)}{\varepsilon_a - \varepsilon_c}; \quad \alpha_2 = \alpha_1 + 90^\circ; \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_c)^2 + [2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)]^2}. \quad (4.9)$$

### 4.3.2. Măsurarea deformațiilor specifice prin metoda tensometrică electrică rezistivă

Pentru a valida modelul de analiză cu elemente finite din subcapitolul anterior, scaunul prezentat în figura 4.1 (sau Fig. 4.26,b) a fost supus analizei experimentale. S-au măsurat deformațiile specifice în diferite puncte ale componentei de șezut-spătar fabricată din material compozit hibrid. În acest scop, s-a utilizat standul experimental prezentat în figura 4.26.

Ținând cont de rezultatele analizei cu elemente finite din subcapitolul 4.2.2, care au arătat că partea de șezut a componentei fabricată din material compozit, este cea mai solicitată, pentru efectuarea încercărilor experimentale, scaunul a fost solicitat mecanic doar pe șezut (Fig. 4.26, e), cu mase etalon de câte 10 kg. Astfel, forțele aplicate au fost de: 98,1 N (10 kgf), 196,2 N (20 kgf), 294,30 N (30 kgf). Masele etalon sunt sub formă de discuri (Fig. 4.26, d) iar suprafața de contact cu scaunul este de formă circulară cu diametrul de 234 mm. Pentru a îmbunătăți contactul dintre masele etalon și suprafața de șezut a scaunului, s-a utilizat un element din cauciuc, de formă circulară cu diametru 234 mm, având grosimea de 6 mm.



**Fig.4.26.** Standul experimental utilizat pentru măsurarea deformațiilor prin metoda tensometrică electrică rezistivă: a. Amplificatoare universale MX840 cu adaptoare pt. traductoare cu ¼ punte; b. Scaun analizat; c. Aplicație Catman Easy pentru achiziția și prelucrarea datelor; d. Mase etalon; e. Solicitarea mecanică a scaunului cu mase etalon

#### Descrierea echipamentelor utilizate și a traductoarelor electrice rezistive

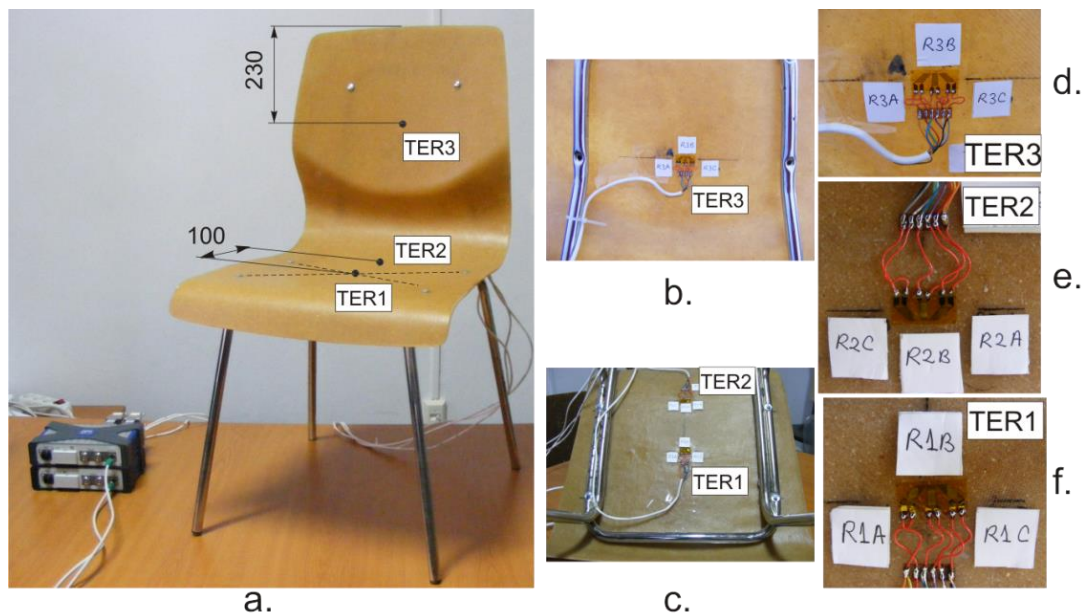
Pentru măsurarea deformațiilor specifice  $\varepsilon$  care se dezvoltă în componenta de șezut-spătar a scaunului, când aceasta este încărcată mecanic s-au utilizat echipamente și traductoare electrice rezistive de tip rozetă 0/45/90 care se descriu în continuare.

- **Traductoare electrice rezistive de tip rozetă 0/45/90, 1-RY88-6 / 350  $\Omega$**  (Fig. 4.24) fabricate de firma *HBM* cu următoarele caracteristici: rezistența de:  $350,0 \Omega \pm 0,3\%$  (la  $24^\circ\text{C}$ ); constantele traductorului electric rezistiv pentru fiecare rezistență  $k_a = 2,13 \pm 1\%$ ,  $k_b = 2,15 \pm 1\%$ ,  $k_c = 2,13 \pm 1\%$  (la  $24^\circ\text{C}$ ); sensibilitate transversală (rezistența *a*:  $0\%$ ; rezistența *b*:  $-0,3\%$ ; rezistența *c*:  $0\%$ ); lungimea de măsurare este de  $6\text{ mm}$ .
- **Adaptoare pentru lucrul cu traductoare electrice rezistive în  $\frac{1}{4}$  punte și  $\frac{1}{2}$  punte cu rezistența de 120/350 Ohm.**
- **Două amplificatoare universale MX840** (plăci de achiziție date), cu câte opt canale cu următoarele caracteristici:
  - frecvența de achiziție a datelor de până la  $19,2\text{ kHz}$  pe fiecare canal;
  - convertor A/D pe  $24\text{ biți}$  pentru fiecare canal pentru sincronizarea măsurătorilor paralele;
  - conține filter Bessel, Butterworth  $0,01 \div 3,2\text{ kHz}$  ( $-3\text{ dB}$ );
  - alimentare  $10 \div 30\text{ V}$  curent continuu;
  - asigură alimentarea pentru traductoare  $5\text{--}24\text{ V}$  curent continuu, ajustabilă pentru fiecare canal;
  - permite identificarea traductoarelor conectate TEDS;
  - conectare prin mufe tip D-SUB-15HD;
  - domeniul temperaturilor de lucru: între  $-20^\circ\text{C}$  și  $+65^\circ\text{C}$ ;
  - clasa de precizie  $0,05$ ;
  - compatibil cu: traductoare electrice rezistive cu punte întreagă și jumătate de punte, traductoare inductive punte întreagă și  $\frac{1}{2}$  punte, termorezistențe *PT100* și *PT1000*, termocupluri, potențiometre, numărător de impulsuri, *CANbus*;
  - software Quantum X (programul de analiză compatibil cu amplificatorul universal de tip *MX840*);
  - mufe de conectare pentru opt traductoare și cablu comunicare *Ethernet*.
- **Pachetul software *Catman Easy*** pentru prelucrarea datelor, specializat pe tensometrie deoarece permite: parametrizarea amplificatorului prin recunoașterea automată a tipului de traductor; posibilitatea de creare a canalelor virtuale pentru realizarea în timp real a calculelor matematice pentru traductoarele electrice rezistive de tip rozetă; stabilirea de valori limită și funcții de monitorizare; analiza datelor prin sincronizarea și suprapunerea în timp real a graficelor; exportul de date în formatele comune de tip: *Excel*, *ASCII*, *DIAdem*, *nSoft*; compatibil cu sistemele *MX840*, *MGCplus*, *MGCsplit* sau *Spider8*.

*Metoda de lucru*

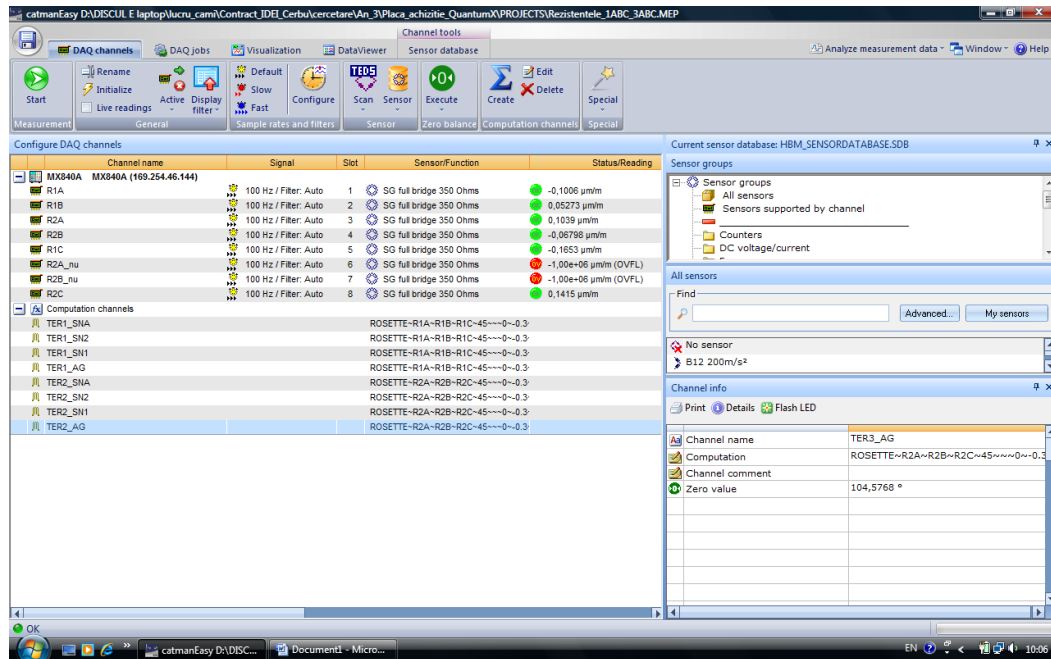
Pentru măsurarea experimentală a deformațiilor specifice  $\varepsilon$  utilizând metoda tensometrică electrică rezistivă, s-au parcurs următoarele etape:

- alegerea tipului de marcă tensometrică de tip rozetă 0/90/0, 1-RY88-6 / 350  $\Omega$  recomandată de firma producătoare *HBM* pentru măsurarea deformațiilor în cazul structurilor fabricate din materiale compozite;
- stabilirea zonelor de pe piesă unde au fost montate traductoarele electrice rezistive (notate cu TER) astfel încât să fie ușor accesibile și fără defecte sau fisuri;
- pregătirea suprafețelor pe care s-au aplicat traductoarele electrice rezistive, etapă care constă în curățirea mecanică în scopul aducerii la o rugozitate adecvată, marcarea poziției de așezare pentru TER, curățirea chimică a zonei pentru a obține suprafețe cât mai curate și neutralizarea suprafeței cu ajutorul unei soluții;
- aplicarea traductoarelor electrice rezistive pe suprafața piesei prin lipirea cu adeziv special recomandat de firma *HBM* (Fig. 4.27);

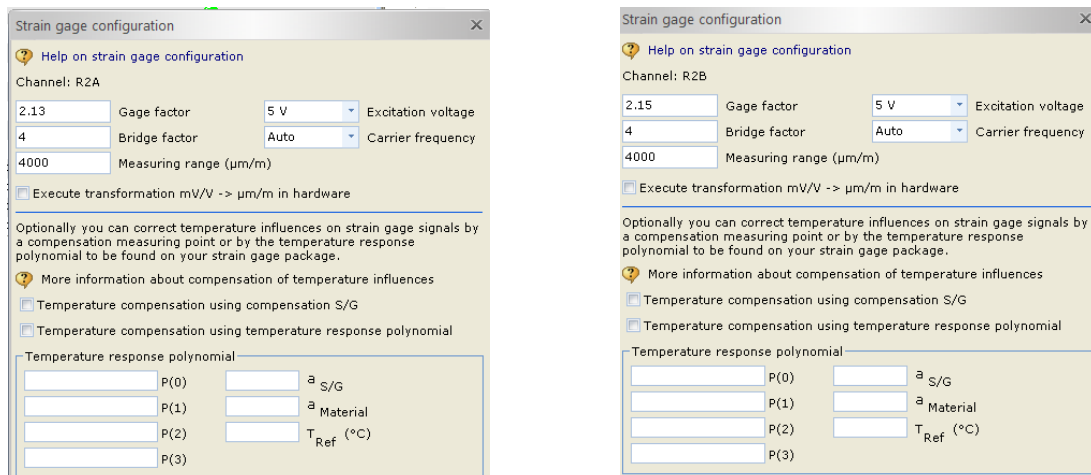


**Fig.4.27.** Montarea traductoarelor electrice rezistive de tip rozetă (TER) pentru măsurarea deformațiilor în scaun:

- a.Modul de amplasare al traductoarelor electrice rezistive (TER) pe scaun; b. *TER 3* lipită pe partea din spate a spătarului; c. *TER1* și *TER2* lipite pe partea inferioară a șezutului; d,e și f. Detalii traductoare electrice rezistive



**Fig. 4.28.** Definirea canalelor pentru achiziția datelor și inițializarea acestora la valoarea zero în software-ul *Catman Easy*



**Fig. 4.29.** Definirea constantelor pentru fiecare marcă tensometrică și pentru fiecare rezistență ( $k_a = 2,13 \pm 1\%$ ,  $k_b = 2,15 \pm 1\%$ ,  $k_c = 2,13 \pm 1\%$ )

- realizarea conexiunilor (cablarea) dintre traductoarele electrice rezistive (Fig. 4.27) și mufele compatibile cu amplificatoarele universale *MX840*, cu ajutorul cablurilor;
- conectarea efectivă a traductoarelor electrice rezistive la mufele celor două amplificatoare de tip *MX840* cu câte opt canale, prin intermediul adaptoarelor pentru lucrul cu traductoarele electrice rezistive în  $\frac{1}{4}$  punte și  $\frac{1}{2}$  punte cu rezistența de  $120/350\Omega$ ;
- conexiunea amplificatoarelor universale de tip *MX840* la computer;
- utilizarea software-ului *Catman Easy* compatibil cu sistemul de achiziție de tip *MX840* pentru măsurarea deformațiilor, etapă care începe cu: definirea canalelor pentru achiziția datelor (Fig. 4.28); inițializarea acestora la valoarea zero; definirea constantelor pentru

fiecare marcă tensometrică (Fig. 4.29) și pentru fiecare rezistență ( $k_a = 2,13 \pm 1\%$ ,  $k_b = 2,15 \pm 1\%$ ,  $k_c = 2,13 \pm 1\%$ ); definirea sensibilităților transversale (rezistența  $a$ : 0% ; rezistența  $b$ :  $-0,3\%$  ; rezistența  $c$ : 0% ); definirea graficelor pentru reprezentarea în timp real a datelor achiziționate;

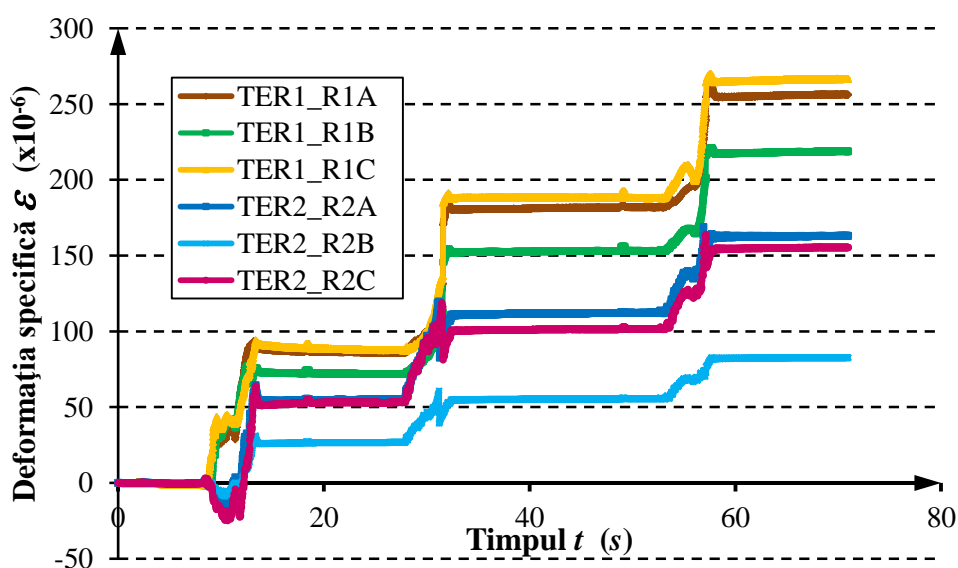
- efectuarea măsurătorilor propriu-zise pentru determinarea deformațiilor specifice liniare  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_b$ ,  $\varepsilon_c$  înregistrate pentru fiecare marcă de tip rozetă.

### Rezultatele măsurătorilor

Măsurătorile s-au efectuat pentru valori ale forței de încărcare egale cu: 98,10 N; 196,2 N; 294,30 N.

Achiziția semnalelor de la rezistențele electrice ale traductoarelor electrice rezistive (TER) s-a făcut prin intermediul plăcii de achiziție *MX840* cu rol de amplificare a semnalelor. Apoi, aceste semnale pot fi prelucrate fie cu soft-ul *QuantumX* livrat cu amplificatorul *MX840*, fie cu soft-ul *Catman Easy* specializat pe tensometrie.

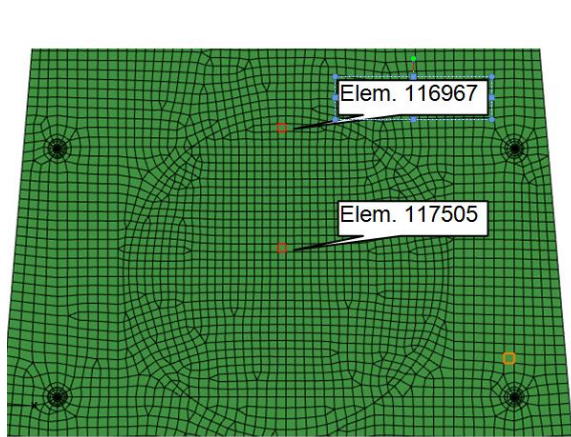
În figura 4.30, se prezintă graficele înregistrate în timp real referitoare la deformațiile specifice  $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$  înregistrate de cele două traductoare electrice rezistive (TER 1 și TER 2) lipite pe partea inferioară a șezutului (pe cele trei direcții A, B, C), în timpul încărcării cu trei mase etalon astfel încât forța aplicată a avut următoarele valori: 98,10 N (10 kgf); 196,2 N (20 kgf); 294,30 N (30 kg).



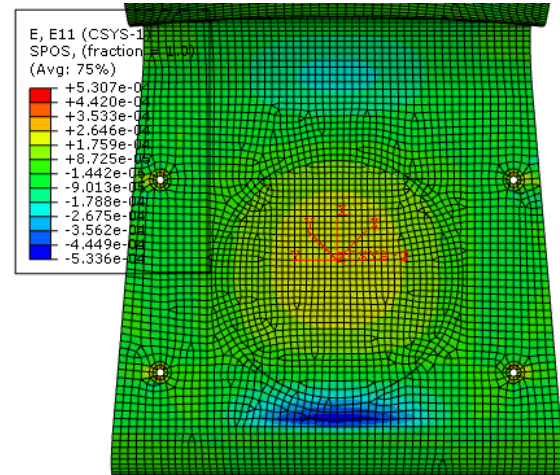
**Fig. 4.30.** Variația în timp a deformațiilor  $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$  înregistrate de cele două traductoare electrice rezistive *TER1*, *TER2* lipite pe partea inferioară a șezutului, pe câte trei direcții A, B, C

#### 4.4. Comparația dintre rezultatele teoretice și cele experimentale

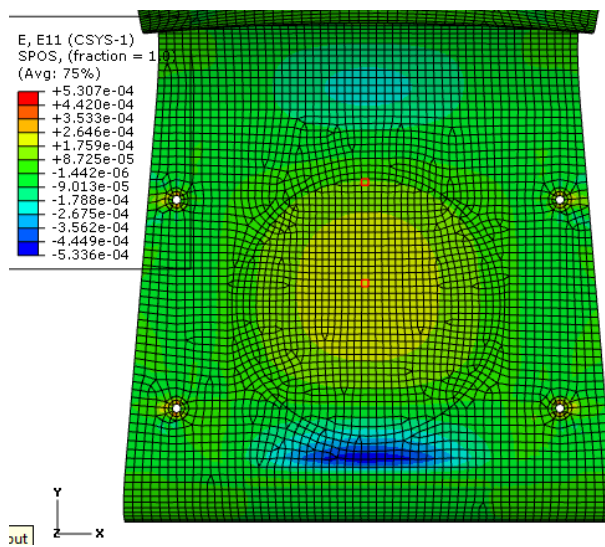
Pentru validarea modelului numeric, s-au comparat rezultatele teoretice cu cele experimentale pentru cazurile în care au fost aplicate în modelul corespunzător *Schemei a III-a de încărcare*, următoarele forțe: 98,10 N; 196,2 N; 294,30 N.



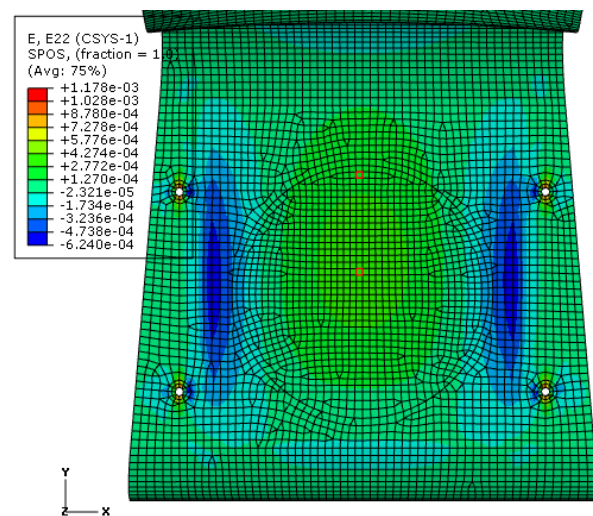
**Fig. 4.31.** Elementele finite din modelul numeric pentru care s-a analizat evoluția deformațiilor specifice



**Fig. 4.32.** Definierea sistemelor de coordonate CSYS-1 și CSYS-2 (*Schema a III-a de încărcare*)



**Fig. 4.33.** Distribuția deformațiilor specifice  $\varepsilon$  în raport cu sistemul de coordonate CSYS-1 în cazul *Schemei a III-a de încărcare* ( $F = 294,3\text{ N}$ )

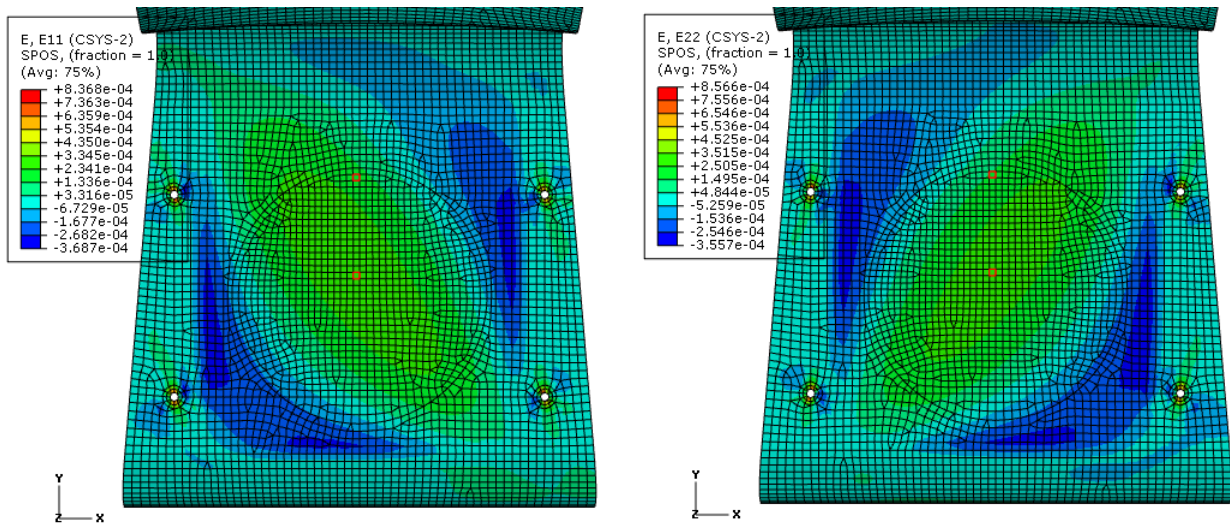


S-au comparat valorile deformațiilor specifice  $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$  determinate experimental cu valorile deformațiilor specifice obținute prin analiza cu elemente finite, pentru elementele 117505 și 116967 (Fig. 4.31), în direcțiile de măsurare corespunzătoare traductoarelor electrice rezistive de tip rozetă. În acest sens, s-au definit două sisteme de coordonate în raport cu care s-au analizat deformațiile specifice  $\varepsilon$  (Fig. 4.32): sistemul de coordonate CSYS-1 a cărui axă  $Ox$  coincide cu direcția rezistențelor  $R1B$  și  $R2B$  iar axa  $Oxy$  coincide cu planul de șezut al scaunului; sistemul



de coordonate *CSYS-2* rotit cu  $45^\circ$  față de sistemul de coordonate *CSYS-1*.

În continuare, se prezintă distribuția deformațiilor specifice  $\varepsilon$  pe șezutul scaunului, în raport cu sistemul de coordonate *CSYS-1* (Fig. 4.33) și în raport cu sistemul de coordonate *CSYS-2* (Fig. 4.34).



**Fig. 4.34.** Distribuția de deformații specifice  $\varepsilon$  în raport cu sistemul de coordonate *CSYS-2* 1 în cazul *Schemei a III-a* de încărcare ( $F = 294,3 \text{ N}$ )

**Tabelul 4.4**

Comparația rezultatelor teoretice (*Schema a III-a* de încărcare) cu cele experimentale

Forța ( $N$ )		98,1			196,2			294,3		
Presiune $p$ ( $N/mm^2$ )		0,00228112			0,004562			0,006843		
		$\varepsilon (x10^{-6})$		Err (%)	$\varepsilon (x10^{-6})$		Err (%)	$\varepsilon (x10^{-6})$		Err. (%)
		Teoretic	Exp.		Teoretic	Exp.		Teoretic	Exp.	
Marca tensometrică TER 1	R1A	97,19	86,41	11,10	194,81	181,20	6,99	292,43	255,18	12,74
	R1B	81,04	72,25	10,85	164,16	152,82	6,91	247,28	217,98	11,85
	R1C	97,19	88,56	8,87	194,81	188,43	3,28	292,43	265,50	9,21
Marca tensometrică TER 2	R2A	58,02	54,52	6,03	117,30	111,78	4,70	176,58	162,67	7,88
	R2B	29,01	26,52	8,58	60,35	55,22	8,50	91,68	82,34	10,18
	R2C	58,02	53,08	8,52	117,30	101,23	13,70	176,58	154,87	12,29

Rezultatele obținute prin analiza cu elemente finite și rezultatele obținute experimental prin măsurătorile cu traductoarele electrice rezistive de tip rozetă, s-au comparat în tabelul 4.4. În cazul fiecărei forțe de încărcare (98,10  $N$ , 196,2  $N$ , 294,30  $N$ ) s-au calculat erorile exprimate în procente, cu următoarea relație:

$$\text{Eroarea} = \frac{|\varepsilon_e - \varepsilon_t|}{\varepsilon_t} \cdot 100 (\%), \quad (4.10)$$

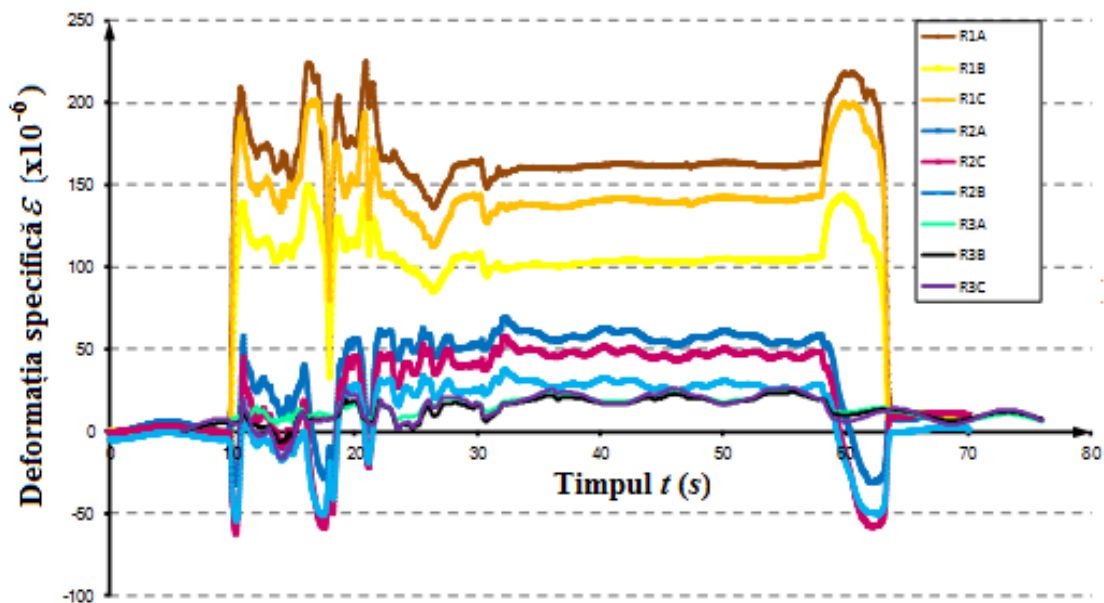
în care  $\varepsilon_e$  reprezintă valoarea deformației specifice rezultată din măsurătorile experimentale;  $\varepsilon_t$  reprezintă valoarea teoretică a deformației specifice rezultată prin analiza cu elemente finite.

Erorile de măsurare care au apărut în timpul investigației experimentale pot fi cauzate de:

- *nealinierea traductoarelor electrice rezistive față de direcțiile care au fost considerate pentru analiza deformațiilor specifice în modelul cu elemente finite și anume, direcțiile axelor corespunzătoare sistemelor de coordonate CSYS-1 și CSYS-2; astfel, pentru variații unghiulare cuprinse între  $0^\circ$  și  $\pm 4^\circ$  se pot ajunge la valori ale erorilor până la 65% (Hoffman, 1989);*
- *lipirea necorespunzătoare a rozetelor tensometrice, astfel încât contactul dintre suprafața acestora și suprafața piesei nu este perfectă;*
- *sensibilități referitoare la deformațiile specifice  $\varepsilon_t$  în direcție transversală, în cazul materialelor compozite;*
- *lipirea necorespunzătoare a rozetelor tensometrice, astfel încât contactul dintre suprafața acestora și suprafața piesei nu este perfectă;*
- *modul de aplicare a forței de încărcare cu referire la contactul dintre mase etalon și suprafața componentei de șezut-spătar a scaunului.*

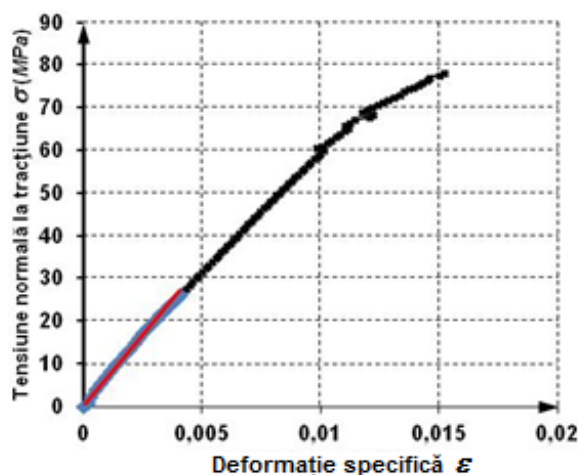
Ținând cont de posibilele cauze ale erorilor prezentate mai sus, comparația dintre rezultatele teoretice și cele experimentale (Tab. 4.4) în ceea ce privește starea de deformații din piesa din material compozit analizată (componenta de șezut-spătar a scaunului), conduce la concluzia că modelul de analiză cu elemente finite propus în capitolul 4.1 poate fi considerat corect într-o bună aproximare.

În figura 4.35, se prezintă variația în timp a deformațiilor specifice  $\varepsilon$  înregistrate de cele trei traductoare electrice rezistive lipite pe scaun, în timpul așezării pe scaun a unei persoane cu masa de  $\cong 70\text{kg}$ .



**Fig. 4.35.** Variația în timp a deformațiilor specifice  $\varepsilon$  înregistrate de cele trei traductoare electrice rezistive pe parcursul așezării pe scaun a unei persoane cu masa de  $\approx 70 \text{ kg}$

#### 4.5. Aplicarea rezultatelor experimentale referitoare la degradarea proprietăților mecanice ale materialului compozit hibrid, la modelul de piesă

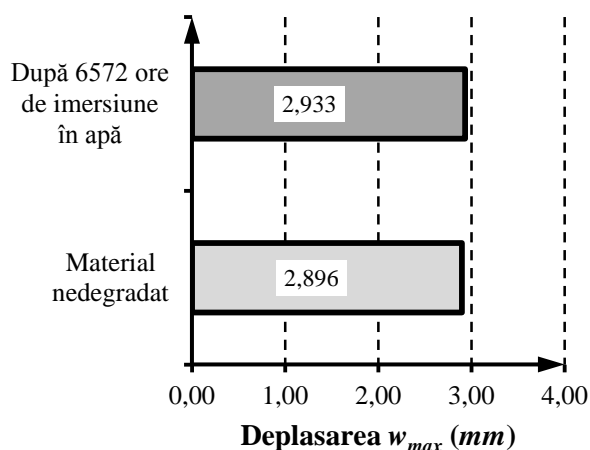


**Fig. 4.36.** Curba medie tensiune-deformație ( $\sigma - \varepsilon$ ) pentru materialul compozit hibrid după 6572 ore de imersiune în apă

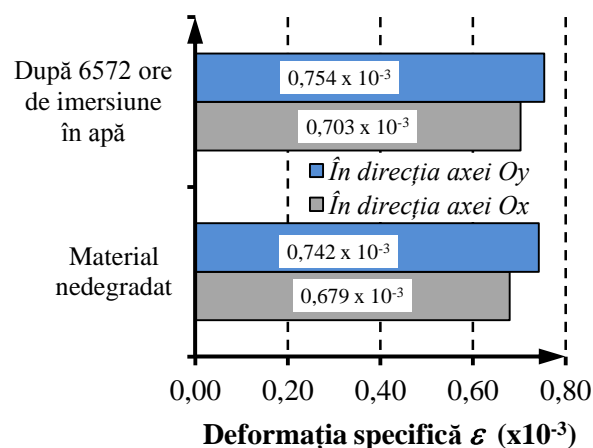
În continuare, se va analiza modul în care variază deplasările și stările de deformații din piesă după ce materialul compozit hibrid din care este fabricată componenta de șezut-spătar, s-a degradat din cauza absorbției de apă după 6572 ore de imersiune.

Conform tabelului 4.3 din subcapitolul 4.1.4, se observă că valoarea medie a modulului de elasticitate  $E$  scade de la valoarea de  $7225 \text{ MPa}$  în cazul materialului compozit nedegradat, la valoarea medie de  $6605 \text{ MPa}$  după imersiunea

totală în apă timp de 6572 ore. În figura 4.36 se prezintă curba medie tensiune-deformație ( $\sigma - \varepsilon$ ) rezultată din încercarea de tracțiune, corespunzătoare materialului compozit hibrid după degradare.



**Fig. 4.37.** Variația valorii max. a deplasării  $w_{max}$  în direcția axei  $Oz$ , după degradarea materialului compozit prin imersiune în apă (*Schema I* de încărcare)



**Fig. 4.38.** Variația valorilor maxime ale deformațiilor specifice  $\epsilon_{x_{max}}$ ,  $\epsilon_{y_{max}}$  după degradarea materialului compozit prin imersiune în apă (*Schema I* de încărcare)

Se reprezintă grafic în mod comparativ pentru *Schema I* de încărcare:

- variația valorii maxime a deplasării  $w_{max}$  (Fig. 4.37) în direcția axei  $Oz$ ; după degradarea materialului compozit prin imersiune în apă;
- variația valorilor maxime ale deformațiilor specifice  $\epsilon_{x_{max}}$ ,  $\epsilon_{y_{max}}$  (Fig. 4.38) în direcția axelor  $Ox$  și respectiv,  $Oy$ , după degradarea materialului compozit prin imersiune în apă.

Se observă o creștere cu 1,28% a deplasării  $w_{max}$  (de la 2,896 mm la 2,933 mm) în cazul materialului degradat din cauza absorbției de apă, față de cazul în care s-a considerat că materialul compozit este nedegradat.

Deformațiile specifice  $\epsilon_{x_{max}}$ ,  $\epsilon_{y_{max}}$  în direcțiile axelor  $Ox$  și  $Oy$ , au crescut cu 3,53% și respectiv, cu 1,62% în cazul materialului degradat din cauza absorbției de apă, față de cazul în care s-a considerat că materialul compozit este nedegradat.

#### 4.6. Concluzii

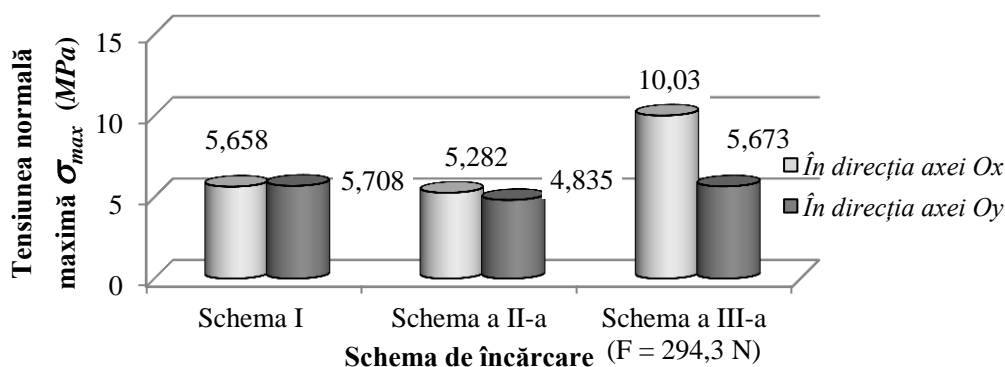
În capitolul 4, s-au prezentat rezultatele cercetărilor teoretice și a cercetărilor experimentale (măsurarea deformațiilor din piesă cu metoda tensometrică electrică rezistivă).

În continuare, se prezintă principalele concluzii referitoare la rezultatele publicate în cadrul acestui capitol.

- Ținând cont de cauzele semnalate pentru erori, cercetările experimentale validează într-o

bună aproximare, rezultatele teoretice obținute cu ajutorul modelării numerice folosind analiza cu elemente finite (subcapitolul 4.4).

- Utilizarea rezultatelor din cercetarea experimentală efectuată pe epruvete, s-a putut utiliza modelul numeric în scopul analizei efectului degradării materialului, cuantificabil prin efectul reducerii caracteristicilor elastice (modulul de elasticitate  $E$ ), asupra variației deplasării  $w_z$  pe direcție perpendiculară pe șezut și a deformațiilor specifice  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ .



**Fig. 4.39.** Reprezentarea comparativă a valorilor absolute maxime ale tensiunilor normale  $\sigma_x$  și  $\sigma_y$  în direcțiile axelor  $Ox$  și respectiv,  $Oy$  în cazul celor trei scheme de încărcare considerate

- Utilizând rezultatele prezentate în figurile 4.15, 4.16 și 4.21, s-au sintetizat grafic (Fig. 4.39) rezultatele referitoare la valorile absolute maxime ale tensiunilor normale  $\sigma_x$  și  $\sigma_y$  care se dezvoltă în componenta de șezut-spătar fabricată din materialul compozit hibrid, în direcțiile axelor  $Ox$  și respectiv  $Oy$ , în cazul celor trei scheme de încărcare considerate.
- Se observă că valoarea maximă a tensiunii normale este egală cu 10,03 MPa (Fig. 4.39) care se încadrează în domeniul liniar-elastic de pe curbele tensiune-deformație ( $\sigma - \varepsilon$ ) corespunzătoare materialului compozit nedegradat (Fig. 4.12) și respectiv, materialului compozit degradat (Fig. 4.36) din cauza absorbției de apă după 6572 ore de imersiune. În concluzie, validarea modelului cu elemente finite s-a făcut pentru domeniul elastic.
- După definirea în modelul teoretic, a caracteristicilor elastice corespunzătoare materialului compozit degradat din cauza absorbției de apă, s-a constatat creșterea cu 1,28% a deplasării  $w_{z\max}$  în direcția axei  $Oz$  perpendiculară pe șezutul scaunului.

\*\*\*

Rezultatele prezentate în cadrul acestui capitol, au fost diseminate în cadrul unor conferințe și simpozioane: Conferința COMAT 2012; Simpozionul Asociației Generale a Inginerilor din România. Lucrarea prezentată în cadrul Simpozionului științific AGIR a fost publicată în Buletinul AGIR (Cerbu, 2012).

## 5. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ȘTIINȚIFICE ORIGINALE

În tabelul 5.1 s-au sintetizat caracteristicile mecanice corespunzătoare materialelor compozite ranforsate cu țesături de in precum și caracteristicile materialelor compozite pe bază de făină de lemn de brad ale căror proprietăți au fost testate în prezenta teză de abilitare.

**Tabelul 5.1**  
Caracteristicile mecanice ale materialelor compozite analizate în prezenta teză de abilitare

Nr. Crt.	Tipul materialului compozit	Tracțiune		Încovoiere		Coeficientul de contracție transversală $\nu_{12}$	
		Tensiunea maximă $\sigma_{\max t}$ (MPa)	Modulul de elasticitate $E$ (MPa)	Tensiunea maximă $\sigma_{\max i}$ (MPa)	Modulul de elasticitate $E$ (MPa)		
1	In / epoxi <i>Epolam 2015</i> ( $V_f=40\%$ )	Bătătură	68 (C)	5871 (C)	102 (D)	2137 (D)	0,337
		Urzeală	49 (C)	4386 (D)	90 (D)	1884 (D)	0,297
2	Hibrid 1 – Sticlă / In / epoxi <i>Epolam 2015</i> ( $V_f=40\%$ )	Bătătură	123 (A)	7936 (A)	194 (A)	5047 (A)	-
		Urzeală	105 (B)	7262 (B)	138 (C)	4967 (A)	-
3	Hibrid 2 – Sticlă / In / epoxi <i>Epolam 2015</i> ( $V_f=40\%$ )	Bătătură	-	-	-	4084 (B)	-
		Urzeală	-	-	-	3943 (C)	-
6	Făină de brad / rășină <i>Urelit®R</i> ( $V_f=20\%$ )	-	-	17 (E)	2070 (D)	-	
7	Sticlă-EWR145* / făină de lemn de brad / poliester <i>Colpoly 723</i>	-	-	28 (E)	601 (E)	-	
9	Sticlă-E** / făină lemn de brad / epoxi <i>Epolam 2015</i> ( $V_{f\text{sticla}}=14,73\%$ ; $V_{f\text{lemn}}=9,42\%$ )	89 (B)	7225 (B)	163 (B)	3801 (C)	0,1624	

\*Țesătură de Sticlă-EWR145: bidirecțională, cu mărimea ochiurilor 5 mm, densitate 145 g/m<sup>2</sup>;

\*\* Țesătură de Sticlă-E: bidirecțională, mărimea ochiurilor sub 0,5 mm, densitate 200 g/m<sup>2</sup>

(A)...(E) – indicator care arată poziția în clasament, din punctul de vedere al caracteristicii mecanice respective (A- corespunde la valoarea cea mai mare, E- corespunde la valoarea cea mai mică).

Pe baza datelor prezentate în tabelul 5.1, se punctează în continuare, principalele concluzii referitoare la structurile din materiale compozite care au fost analizate:

- structura de material compozit de tipul Hibrid 1 – Sticlă / In / epoxi *Epolam 2015* ( $V_f=40\%$ ) are cele mai mari valori ale caracteristicilor mecanice (rezistențele la încovoiere și tracțiune) și elastice (modulele de elasticitate) comparativ cu toate celelalte materiale testate;
- structura de material compozit de tipul Sticlă-E / făină lemn de stejar / epoxi *Epolam 2015*

- are proprietăți de tracțiune comparabile cu cele corespunzătoare materialului compozit Hibrid 1 de tipul Sticlă / In / epoxi Epolam 2015 în direcția urzelii țesăturii de in;*
- *structura de material compozit de tipul Sticlă-E / făină de lemn de stejar / epoxi Epolam 2015 are modulul de elasticitate  $E$  la încovoiere comparabil cu cel corespunzător materialului compozit Hibrid 2 de tipul Sticlă / In / epoxi Epolam 2015 (cu straturi alternative) în direcția urzelii țesăturii de in;*
  - *proprietățile mecanice ale materialului compozit Sticlă-E (4 straturi) / făină lemn de stejar / epoxi Epolam 2015 sunt mai mari decât cele corespunzătoare compozitului In / epoxi Epolam 2015 (8 straturi de țesătură de in) în direcția bătăturii: cu 30,88% și 59,8% în cazul tensiunilor maxime  $\sigma_{\max}$  la tracțiune și respectiv, la încovoiere; cu 23,06% și 77,87% în cazul modulelor de elasticitate  $E$  la tracțiune și respectiv, la încovoiere.*

Principalele contribuții științifice originale ale autoarei tezei de abilitare, se evidențiază prin:

- *în capitolul 1 s-a optimizat structura de material compozit hibrid care conține atât straturi ranforsate cu țesătură de in cât și straturi ranforsate cu țesătură de sticlă, prin stabilirea pozițiilor straturilor astfel încât proprietățile mecanice să fie optime;*
- *valorile teoretice ale modulelor de elasticitate echivalente  $E_x$  la încovoiere, calculate cu modelul analitic de grindă compozită, corespunzătoare materialelor compozite de tipul In / epoxi Epolam 2015 și Sticlă / In / epoxi Epolam 2015 pe direcțiile bătăturii și respective, ale urzelii, au fost validate de rezultatele experimentale (eroarea maximă a fost de 6,11%);*
- *pentru materialul compozit hibrid de tipul sticlă-E / făină de lemn de brad / epoxi Epolam 2015 s-au determinat prin aproximarea datelor experimentale, funcții de variații ale caracteristicilor mecanice de încovoiere și impact, în funcție de durata de imersiune și s-au arătat cauzele degradării proprietăților: apariția microfisurilor la interfața dintre fibrele de sticlă și rășina epoxi (Fig. 2.27) din cauza apei absorbite care oxidează rășina polimerică și de asemenea, degradează fibrele de lemn (Fig. 2.28);*
- *s-a dovedit că ranforsarea cu făină de lemn de stejar conduce la creșterea coeficientului de contracție transversală  $\nu_{12}$ , astfel că  $\nu_{12} = 0,2574$  în cazul Sticlă / făină lemn de stejar / epoxi Epolam 2015, comparativ cu  $\nu_{12} = 0,15$  în cazul Sticlă / epoxi (Fig. 2.11);*
- *cercetările teoretice efectuate cu privire la stările de deformații în cazul componentei șezut-spătar de scaun, fabricată din materialul compozit Sticlă-E / făină lemn de brad / epoxi Epolam 2015, au fost validate de rezultatele experimentale obținute prin măsurarea deformațiilor specifice în punctele piesei reale, prin metoda tensometrică electrică rezistivă (Tab.4.4).*

## **(B-ii) Planuri de evoluție și dezvoltare a carierei**

### **1. Elemente de succes în cariera profesională**

#### **1.1. Studii**

- Studii universitare

1991–1996, Universitatea *Transilvania* din Brașov, Facultatea de *Inginerie Tehnologică*, specializarea *Tehnologia Construcțiilor de Mașini (TCM)*, titlul *Inginer în profilul mecanic*, Șef de promoție, Diplomă de licență (Examen de Licență - media 10), nr. 451 / 5 iulie 1996 (Seria P, nr. 0000701);

- Studii post-universitare

1996–1997, Studii aprofundate (Master) în cadrul Universității *Transilvania* din Brașov, Facultatea de *Inginerie Tehnologică*, specializarea: *Inginerie Tehnologică Asistată de Calculator*, titlul de *Master în profilul mecanic*, Diplomă de studii aprofundate nr. 75 / 21 oct. 1997 (Seria B, nr. 0004350);

2014, Universitatea *Transilvania* din Brașov, *Programul postuniversitar de formare și dezvoltare profesională continuă “Program de formare in blended-learning și tehnologii educaționale moderne pentru învățământul universitar”*, în domeniul *Inginerie electronică și telecomunicații, științe ale educației*, durata 80 ore / 10 ECTS (credite de studii transferabile), Certificat de atestare a competențelor profesionale recunoscut de *Ministerul Educației Naționale*, nr. 369 / 23.09.2014 (Seria B, nr. 0002219);

- Studii doctorale

1999–2005, Universitatea *Transilvania* din Brașov, Facultatea de *Inginerie Mecanică*, titlul de *Doctor* în domeniul fundamental *Științe Inginerești*, domeniul *Inginerie Mecanică*, susținută public la data de 17 dec. 2005, Diploma de doctor, nr. 1476 / 2.06.2006 (Seria B, nr. 0001651).

#### ***Alte specializări și calificări***

- 3-5 iunie 1996, curs *AutoCAD R12 – Level 1*, Universitatea *Transilvania* din Brașov, Facultatea T.C.M., *Autodesk - Authorized Training Center*, Certificat de absolvire UTCM-BV-001298, Certificat de absolvire UTCM-BV-001259;



- 5-15 decembrie 1996, curs *AutoCAD R12 – AutoLISP*, Universitatea *Transilvania* din Braşov, Facultatea T.C.M., *Autodesk* - Authorized Training Center, Certificat de absolvire UTCM-BV-001298;
- 8-12 septembrie 2008 – Curs “*Computational and Experimental Mechanics of Advanced Materials*”, Centre International des Science Mécaniques (CISM), Udine, Italia;
- 14-19 decembrie 2008 - curs "*Introduction to Abaqus*" de analiză cu elemente finite (FEA), certificat Dassault Systems (cursul s-a organizat la Cybernetics – Bucureşti);
- 2-3 februarie 2009 – curs "*Contact in Abaqus/Standard*", certificat Dassault Systems (Cybernetics – Bucureşti);
- 4-5 februarie 2009 – curs "*Obtaining a Converged Solution with Abaqus*", certificat Dassault Systems (Cybernetics – Bucureşti).

## 1.2. Experiința profesională și didactică

După absolvirea Facultății, autoarea tezei de abilitare s-a angajat prin concurs în **noiembrie 1996**, la **Institutul de Autovehicule Rutiere Braşov** (S.C. *I.N.A.R S.A.*) ca **inginer în cercetare-proiectare**. Activitățile de cercetare au constat în proiectarea automată asistată de calculator a instrumentelor de control (calibre de tip potcoavă sau de tip tampon etc.) utilizând programarea în limbajul de programare *AutoLISP* din *AutoCAD*. Autoarea tezei de abilitare a colaborat în calitate de membră în echipă la două contracte de cercetare: un (1) contract având ca beneficiar *Ministerul Cercetării*; un (1) contract având ca beneficiar S.C. *ROMAN S.A.*

În perioada **octombrie 1997 – octombrie 2000**, autoarea tezei de abilitare a ocupat postul de **inginer în cadrul Departamentul de cercetare – proiectare de la Intreprinderea de Unelte și Scule** (S.C. *I.U.S. S.A.*) din Braşov. Activitățile de cercetare-proiectare au constat în: proiectarea tehnologiilor de fabricație prin aşchiere pentru scule de mână, proiectarea asistată de calculator a sculelor aşchietoare (freze disc profilate) și a dispozitivelor de fabricație.

În toamna anului **1999**, în timp ce era angajată la S.C. *I.U.S. S.A.* – Braşov, autoarea prezentei teze de abilitare **a fost admisă prin concurs, la doctorat în cadrul Catedrei de Rezistența Materialelor și Vibrații, Facultatea de Inginerie Mecanică**, Universitatea *Transilvania* din Braşov. Documentarea și cercetările în vederea elaborării tezei de doctorat, le-a realizat sub coordonarea științifică a d-lui *Prof.dr.ing.dr.h.c. Ioan Curtu*.

Autoarea tezei de doctorat și-a **început cariera universitară în 1 octombrie 2000** când s-a transferat de la S.C. *IUS S.A.* la Universitatea *Transilvania* din Braşov, în cadrul *Catedrei de*

*Rezistența Materialelor și Vibrații*, pe postul de **asistent universitar** ocupat prin concurs. Activitatea didactică includea predarea seminariilor și laboratoarelor de *Rezistența Materialelor* la specializările din cadrul *Facultății de Ingineria Lemnului (IL)*. Referitor la activitatea de cercetare: a susținut o parte din examenele și referatele din programul de pregătire doctorală; a publicat articole din rezultatele cercetărilor proprii; a colaborat la realizarea a trei cărți publicate în domeniul rezistenței materialelor.

În anul **2002** ocupă prin concurs, postul de **Șef de lucrări în cadrul aceleiași Catedre de Rezistența Materialelor și Vibrații**. Până la următoarea avansare (2007), activitățile și responsabilități principale au constat în:

- predarea următoarelor cursuri: *Mecanica Materialelor Compozite* (IM, an III); *Rezistența Materialelor*; *Dinamica Materialelor Compozite* (IM, Master DSM); *Strength of Materials* (în limba engleză, IL, WST, an II);
- coordonare a 6 proiecte de diplomă (la programul de studii *Inginerie Mecanică*) și a 2 proiecte de disertație (la Masterul *Dinamica Structurilor Mecanice*);
- activități de cercetare și coordonare a grantului de cercetare de tip AT cod 414, în perioada 2003-2004, câștigat prin competiție națională, în calitate de director de proiect;
- diseminarea rezultatelor obținute din cercetare prin participări la conferințe, publicare de articole în reviste sau volumele conferințelor.

Începând cu **1 octombrie 2007 și până în prezent**, autoarea tezei de doctorat ocupă postul de **conferențiar universitar**, câștigat prin concurs, în cadrul *Catedrei de Rezistența Materialelor și Vibrații* și apoi, în cadrul *Departamentului de Inginerie Mecanică*. Activitățile și responsabilități principale au fost și sunt în continuare următoarele:

- predarea cursurilor de: *Mecanica Materialelor Compozite* (IM, an III); *Rezistența Materialelor* (AR-IFR, an II); *Dinamica Structurilor Mecanice* (IM, an III); *Modelarea și Simularea Comportării Neliniare a Materialelor* (Master STIM, an I); *Materiale Plastice, ceramice și compozite* (AR – IFR, an IV);
- coordonarea de proiecte de diplomă și disertație (total 12 proiecte);
- coordonatoarea Programului de studiu *Inginerie Mecanică în limba engleză* (din 2012);
- activități de cercetare – coordonare a două granturi de cercetare (grant AT cod **132 / 2007**, *Proiect de cercetare exploratorie PN-II*, tip **IDEI 733/2008**) câștigate prin competiție națională, în calitate de director de proiect;

- diseminarea rezultatelor obținute din cercetare (participare la conferințe, publicare de articole).

În perioada *octombrie 2000 – octombrie 2008*, autoarea prezentei teze de abilitare **a predat în cadrul Camerei de Comerț și Industrie Brașov, Direcția de învățământ**, următoarele cursuri acreditate de *Ministerul Educației din România: Introducere în Informatică, Operator pentru calculatoare și rețele, Proiectarea bazelor de date (Access)*.

Carierea universitară a impus implicarea și în alte activități didactice după cum urmează:

- secretar științific al *Comisiei de licență* a programului de studiu *Inginerie Mecanică* începând cu prima promoție (2002);
- coordonare studenților pentru realizarea lucrărilor pentru participarea la *Sesiunile științifice studențești* (total 16 lucrări);
- coordonare lucrări de licență și master în perioada 2005-2015 (total 16 proiecte);
- pregătirea studenților și participarea la faza națională a Concursului „C.C. Teodorescu” pe teme de rezistența materialelor, la două ediții care s-au organizat la Universitatea Politehnica din București;
- 2012-prezent, sunt coordonatoarea Programului de studiu *Inginerie Mecanică* în limba engleză;
- *membră a Comisiei de admitere pe Facultatea de Inginerie Mecanică*.

Se menționează că în perioada 2008-prezent, a ocupat sau ocupă următoarele poziții în structura Universității *Transilvania* din Brașov:

- 2008 - 2011 – secretar științific al *Catedrei de Rezistența Materialelor și Vibrații*;
- 2011 - prezent, membră a *Consiliului Facultății de Inginerie Mecanică*;
- 2013 – prezent, coordonatoarea Centrului de Cercetare C02B, "*Simulare Numerică, Testare și Mecanica Materialelor Compozite*" al Departamentului de *Inginerie Mecanică* din cadrul *Institutului de Cercetare – Dezvoltare* al Universității *Transilvania* din Brașov.

### ***Contribuții la îmbunătățirea bazei materiale prin investiții în echipamente de cercetare***

Se menționează că o parte din fondurile contractului IDEI\_733 / 2008 coordonat de autoarea prezentei teze de abilitare în calitate de director de proiect, au fost utilizate pentru investiții în

echipamente: *echipamentul de testare la impact HIT50P fabricat de Zwich* (Germania), din *Laboratorul de Dinamica Structurilor* (sala CI10), a fost achiziționat în 2010 (Fig. 2.17, a); *amplificatorul universal MX840* cu adaptoare pentru  $\frac{1}{4}$  punte pentru măsurarea deformațiilor specifice prin metoda tensometrică (Fig. 4.26, a) și software-ul *Catman Easy* pentru achiziția și prelucrarea datelor, specializat pe tensometrie (Fig. 4.26, c), au fost achiziționate în 2011.

### ***Abilități și domenii de competență***

Se menționează următoarele **domenii de competență profesională** ale autoarei prezentei teze de abilitare: - rezistența materialelor, elasticitatea și plasticitatea materialelor izotrope, anizotrope; - mecanica materialelor compozite; determinarea experimentală a caracteristicilor mecanice ale materialelor compozite; - cercetări privind influența factorilor de mediu agresiv (umiditate, temperatură, etc.) asupra caracteristicilor mecanice ale materialelor compozite; - analiza experimentală a stărilor de tensiuni și deformații în structurile mecanice; - optimizarea structurilor și pieselor din materiale compozite ce lucrează în mediu agresiv; - dinamica structurilor din materiale compozite.

### ***Competențe manageriale și de organizare***

- **3** contracte de cercetare în calitate de director și **11** contracte de cercetare în calitate de membră în echipa de cercetare (*Fișa pentru verificarea standardelor minimale*);
- 2008 - 2011 – *Secretar științific* al *Catedrei de Rezistența Materialelor și Vibrații*;
- 2013 – prezent, coordonatoarea *Centrului de Cercetare C02B*;
- 2011 - prezent, sunt membră a *Consiliului Facultății de Inginerie Mecanică*, *Universitatea Transilvania* din Brașov.

## **1.3. Elemente definerii ale activității de cercetare în domeniul tezei de abilitare**

### ***1.3.1. Teza de doctorat***

**Titlul tezei de doctorat:** *Cercetări privind optimizarea structurală a unor piese din materiale compozite solicitate în condiții agresive de mediu, Universitatea Transilvania din Brașov, coordonator: Prof.dr.ing.dr.h.c. Ioan Curtu, Diploma de doctor în Inginerie Mecanică din iunie 2006.*

Se menționează în continuare, doar câteva dintre contribuțiile originale și rezultatele semnificative.

- S-au studiat efectele absorbției de apă și apă de mare după imersiune de lungă durată (7000 ore) asupra caracteristicilor mecanice în cazul a patru tipuri de materiale compozite polimerice cu același conținut de fibre de sticlă dar fabricate cu rășini diferite: poliester *Heliopol 8431 AT*, poliester *Polylite 440-M880*, epoxi *LY 554*, vinil-ester *ATLAC 582*. Materialul compozit *sticla-E / epoxi LY554* nu este recomandat pentru mediul umed din cauza degradării accentuate a proprietăților: rezistența la tracțiune scade cu  $\approx 40\%$  /  $15\%$  după imersiune în apă / apă de mare; modulul de elasticitate  $E$  la încovoiere scade cu  $\approx 22\%$  /  $10\%$  după imersiune în apă / apă de mare; rezistența la încovoiere scade cu  $\approx 30\%$  /  $24\%$  după imersiune în apă / apă de mare (6987 ore de imersiune).
- Sărurile din apa de mare acționează ca o barieră de protecție împotriva absorbției de umiditate în materialele compozite polimerice și ca urmare au efect mai mic asupra degradării proprietăților mecanice.
- S-a realizat analiza cu MEF a plăcii spate a unui corp de barcă cu motor iar rezultatele s-au comparat cu rezultatele experimentale. Ținând cont de efectele de degradare ale factorilor de mediu asupra materialelor compozite, s-a optimizat structura de material și s-a recomandat utilizarea compozitelor de tipurile *sticlă-E / Heliopol 8431* sau *sticlă-E / poliester Polylite 440-M880* ș.a.

### 1.3.2. Monografii relevante pentru domeniul tezei de abilitare:

- **Cerbu Camelia**, *Materialele compozite și mediul agresiv*. Aplicații speciale; Editura Universității Transilvania Brașov, ISBN 973-635-861-5, ISBN 978-973-635-861-6, 2006.

Conține un review al literaturii de specialitate din domeniu și cercetări proprii din teza de doctorat.

- **Cerbu Camelia**, capitolul 19 “*Effects of the long-time immersion on the mechanical behaviour in case of some E-glass / resin composite materials*” în cartea “*Woven Fabric Engineering*”, ISBN 978-953-307-194-7, Editor: Polona Dobnik Dubrovski; *SCIYO Publisher*, 2010; p. 363-386 (24 pagini), <http://www.intechopen.com/books/woven-fabric-engineering>.

Cartea este cu open-access. După ce editorul cărții a studiat articolele publicate de Cerbu Camelia în reviste ISI sau indexate BDI, aceasta a invitat-o să publice un capitol conținând un review.

- Popa Alexandru Constantin V., **Cerbu Camelia**, *Introducere in Metoda Elementelor Finite*,

Editura Universității Transilvania din Brașov, 2013, ISBN 978-606-19-0332-0, 562 pagini.

Pe lângă noțiunile teoretice și programele de calcul utilizate în modelarea cu diverse tipuri de elemente finite, cartea conține noțiuni legate de: scurt istoric al analizei cu elemente finite; metode numerice utilizate în MEF; noțiuni de teoria elasticității; fundamentarea matematică a MEF s.a.m.d.

Monografiile publicate care au fost prezentate în această secțiune (cu excepția capitolului publicat în editură străină) au condus la acumularea de **16,36 puncte la criteriul CDI-MON** (*Monografii de specialitate sau capitole în monografii de specialitate naționale*) conform standardelor minimale stabilite de CNATCU pentru *Comisia de specialitate “Inginerie mecanică, mecatronică și robotică”* (*Fișa pentru verificarea standardelor minimale*).

### ***1.3.3. Contracte de cercetare în domeniul temei abordate în prezenta teză de abilitare***

**Cerbu Camelia a coordonat 3 contracte de cercetare** și a fost membru în echipă la **5 contracte** de cercetare din domeniul mecanicii materialelor compozite **din totalul de 11 contracte** de cercetare la care a colaborat (*Fișa pentru verificarea standardelor minimale*).

Ca urmare, la **criteriul RIA “Recunoaștere și impactul activității”**, **a realizat 18,637 puncte** (*minim de îndeplinit – 10 puncte*) din care **9,381 puncte în calitate de director de granturi de cercetare** (*minim de îndeplinit – 6 puncte*) conform standardelor minimale stabilite de CNATCU pentru *Comisia de specialitate “Inginerie mecanică, mecatronică și robotică”* (*Fișa pentru verificarea standardelor minimale*).

Dintre contractele coordonate, se menționează câteva din contribuțiile științifice aduse prin Contractul IDEI, Proiect de cercetare exploratorie PN-II-PCE, cod 733 / 2008, nr. 601 / 19.01.2009; „*Cercetări privind comportarea mecanică a unor structuri compozite și nano-compozite hibride ranforsate cu particule, țesături și materiale reciclate în condiții agresive de mediu*”; **director de proiect CERBU Camelia:**

- Utilizarea materialelor reciclate din deșeuri de lemn sub formă de făină de lemn pentru ranforsarea suplimentară a materialelor compozite cu fibre de sticlă. Astfel, se reduce numărul straturilor de țesătură de sticlă în condițiile obținerii unui raport optim rigiditate/greutate. S-a optimizat structura de material (tipul esenței de lemn și conținutul de făină de lemn) în scopul diminuării efectelor umidității asupra degradării proprietăților mecanice și a materialului (*Cap. 2 din prezenta teză de abilitare*).

- Aplicarea practică a cercetărilor efectuate pe epruvete, prin realizarea unui produs (prototip) - componenta de șezut-spătar fabricată din material compozit de tipul țesătură de sticlă de tip E (200g/m<sup>2</sup>) / făina de lemn de brad / epoxi Epolam 2015 testat în proiect. Măsurătorile experimentale utilizând metoda tensometrică electrică rezistivă au validat rezultatele obținute prin modelare numerică. Avantajele utilizării materialului compozit propus pentru fabricarea componentei de șezut-spătar, constau în: stabilitatea caracteristicilor mecanice ale materialului compozit sub acțiunea umidității în cazul aplicațiilor de exterior (scaune pentru terase); aspect plăcut datorită conținutului de făină de lemn; tehnologie care nu necesită investiții mari în echipament deoarece acestea se fabrică prin tehnologia manuală de formare pe straturi (*Cap. 4* din prezenta teză de abilitare).
- Diseminarea rezultatelor prin publicarea a 4 articole în reviste ISI, 4 articole în reviste BDI, 6 articole în volume ale conferințelor indexate ISI / BDI (conform Listei de lucrări).

#### ***1.3.4. Cerere brevet de invenție***

- **Publicarea rezumatului Cererii de brevet A/01214/24.11.11** (BI RO 127882 A0), “Material compozit stratificat hibrid pentru aplicații de exterior, procedeu de obținere și metodă de utilizare”. Rezumat publicat în BOPI 10/30.10.2012, autori: **Camelia Cerbu (85%)**, Vasile Ciofoaia (15%).

#### ***1.3.5. Cărți relevante***

- **Cerbu Camelia**; Curtu Ioan – *Mecanica și rezistența materialelor compozite*, Editura Universității Transilvania din Brașov, ISBN 978-973-598-614-8, 2009, 250 pagini;

Cartea reprezintă suportul de curs pentru disciplina “*Mecanica Materialelor Compozite*” și conține noțiuni de: micro-mecanică, mecanica stratului și a elementului de placă; modelarea plăcilor solificate la încovoiere și a structurilor din materiale compozite; vibrații în cazul grinzilor și plăcilor stratificate din materiale compozite.

A publicat încă trei suporturi de curs (1-singur autor, 2-prim-autor) care abordează tematici legate de: modelarea structurilor mecanice; rezistența materialelor (carte publicată în limba engleză); mecanica materialelor compozite.

Corespunzător **criteriului DID** “*Activitate didactică și profesională*”, a realizat **26,24 puncte** (minim de îndeplinit – 10 puncte) conform standardelor minimale stabilite de CNATCU pentru

Comisia de specialitate “Inginerie mecanică, mecatronică și robotică” (Fișa pentru verificarea standardelor minimale).

### 1.3.6. *Articole publicate în reviste cotate ISI sau în reviste / volume indexate BDI*

Se menționează faptul că aproape toate articolele publicate de către autoarea prezentei teze de abilitare sunt în domeniul mecanicii materialelor compozite (conform *Listei de lucrări*) dintre care:

- 6 articole publicate în reviste cotate ISI (**2 articole – singură autoare; 4 articole – prim autor**);
- **27** articole publicate în reviste sau volume indexate ISI / BDI, din care **20** articole– **prim autor**.

Ca urmare, la **criteriul CDI-ART a realizat 27,887 puncte** (minim de îndeplinit – 6 puncte) conform standardelor minimale stabilite de CNATCU pentru Comisia de specialitate “Inginerie mecanică, mecatronică și robotică” (Fișa pentru verificarea standardelor minimale).

Corespunzător **criteriului CDI** “Activitate de cercetare științifică, dezvoltare tehnologică și inovare”, a realizat **44,247 puncte față de minimul de 10 puncte de îndeplinit (CDI-ART: 27,887 puncte; CDI-MON: 16,36 puncte)**.

## 1.4. **Autonomia și vizibilitatea activității științifice**

### 1.4.1. *Publicații ca autor principal* (Fișa pentru verificarea standardelor minimale)

- număr lucrări indexate ISI Web of Science: **13** (**4-singur autor;8-prim autor; 1-colaborare**);
- număr lucrări indexate BDI: **20** (indexate Scopus, EBSCO, sciencedirect, Index Copernicus, DOAJ, ULRICHSWEB, SCPIO, Academic Keys, Google Scholar, **fără cele indexate ISI Web of Science**); dintre acestea **3 articole-singur autor** și **11 articole–prim autor**;
- număr lucrări în volumele conferințelor: **49** – conferințe internaționale (**10-singur autor, 24-prim autor**); **13** – conferințe naționale (**4-singur autor, 6-prim autor**).

### 1.4.2. *Granturi academice în calitate de coordonator de proiect*

Cerbu Camelia a obținut finanțare pentru **3 granturi academice în calitate de coordonator de proiect prin care a atras finanțare în valoare totală de 469.085,93 lei (≅113.611,80 Euro)** după cum urmează:



- **Contract IDEI, Proiect de cercetare exploratorie PN-II-PCE, cod ID\_733 / 2008, nr. 601 / 19.01.2009;** Titlul: „*Cercetări privind comportarea mecanică a unor structuri compozite și nano-compozite hibride ranforsate cu particule, țesături și materiale reciclate în condiții agresive de mediu*”; **director de proiect: CERBU Camelia;** Valoare totală: **423385,93 lei = 100166,86 Euro / 2009-2011;** Finanțator: UEFISCDI.  
<http://uefiscdi.gov.ro/UserFiles/File/proiecte%20propuse%20spre%20finantare/inginerie%20mecanica.pdf>  
[http://uefiscdi.gov.ro/userfiles/file/PN%20II%20\\_PCE%20competitia%202008/rezultate%20evaluare%20anuala%202010/2A\(1\).pdf](http://uefiscdi.gov.ro/userfiles/file/PN%20II%20_PCE%20competitia%202008/rezultate%20evaluare%20anuala%202010/2A(1).pdf)  
[http://uefiscdi.gov.ro/UserFiles/File/IRINA/REZULTATE%20FINALE%20IDEI%202011/PCE\\_2008%20IN%20DERULARE/2A\\_in%20derulare.pdf](http://uefiscdi.gov.ro/UserFiles/File/IRINA/REZULTATE%20FINALE%20IDEI%202011/PCE_2008%20IN%20DERULARE/2A_in%20derulare.pdf)
- **Grant de tip AT, cod 132 CNCSIS, Nr. contract: 4GR /28.05.2007;** Titlul: „*Cercetări privind conservarea caracteristicilor mecanice ale pieselor din materiale compozite cu matrice polimerică solicitate în mediu coroziv cu variații de temperatură și umiditate*”; **director de proiect: CERBU Camelia; 40.000 lei = 11985,73 Euro;** Finanțator: UEFISCDI:
  - <http://194.102.64.7/GranturiFinalizate/faces/Projects/ProjectDetails.jsp>
  - [http://uefiscdi.gov.ro/userfiles/file/granturi/2007/proces%20de%20evaluare%20-%20tip%20at%202007/COMISIA\\_2\\_AT\\_NOI\\_FINANTATE.htm](http://uefiscdi.gov.ro/userfiles/file/granturi/2007/proces%20de%20evaluare%20-%20tip%20at%202007/COMISIA_2_AT_NOI_FINANTATE.htm)
- **Grant de tip AT, cod 414, nr. 33.253 / 25.06.2003, 33.369 / 29.06.2004;** Titlul: “*Optimizarea structurală a pieselor din materiale compozite ce lucrează în condiții agresive de mediu (umiditate, temperatură, ciclu termic, etc.)*”; **director de proiect: CERBU Camelia; 57000 ROL = 1459,18 Euro (27000 ROL / 2003, 30000 ROL / 2004);** Finanțator: UEFISCDI. [http://vechi.cnscis.ro/index\\_afisare\\_1.php?id=397](http://vechi.cnscis.ro/index_afisare_1.php?id=397)
  - Valoare 2004: 30000 rol = 740,32 Euro (Curs mediu BNR / 2004: 1 Euro = 40,523 ROL)  
[http://uefiscdi.gov.ro/UserFiles/File/granturi/2004/AT/AT\\_CONTINUARI\\_FINANTATE.htm](http://uefiscdi.gov.ro/UserFiles/File/granturi/2004/AT/AT_CONTINUARI_FINANTATE.htm);
  - Valoare 2003: 27000 rol = 718,86 Euro (Curs mediu BNR / 2003: 1 Euro = 37,559 ROL)  
[http://uefiscdi.gov.ro/UserFiles/File/Competitii%20derulate/Rez\\_2003\\_AT\\_finantate\\_noi.pdf](http://uefiscdi.gov.ro/UserFiles/File/Competitii%20derulate/Rez_2003_AT_finantate_noi.pdf).

#### ***1.4.3. Prezentări orale la conferințe internaționale din străinătate și din țară, dintre care se menționează:***

- *ModTech 2015, International Conference Modern Technologies in Industrial Engineering*, 17-20 June 2015, Mamaia, România – a fost desemnată președinte pentru Secțiunea B “*Advances in Composite Materials and Technologies*”;
- *The 8th International Conference Interdisciplinarity in Engineering*, INTER-ENG 2014,

9-10 October 2014, Tîrgu-Mureş, România;

- *The World Congress on Engineering WCE 2011*, 6-8 July 2, 2011, London, U.K., organizată de IAENG (*International Association of Engineers*);
- *The 15th International Research / Expert Conference - Trends in the Development of Machinery and Associated Technology - TMT 2011*, 12-18 September, 2011, Prague, Czech Republic (Fig. B-ii.4);
- *The World Congress on Engineering 2010 - WCE 2010*, London, U.K., June 30 - July 2, 2010 (Fig. B-ii.2);
- *The World Congress on Engineering – WCE 2009*, London, U.K., 1-3 July, 2009 (Fig. B-ii.1);
- *The 13th International Research / Expert Conference - Trends in the Development of Machinery and Associated Technology TMT 2009*, Hammamet-Tunisia, 16-21 October, 2009 (Fig. B-ii.3);



**Fig. B-ii.1.** Prezentare orală a lucrării la *The World Congress on Engineering – WCE 2009* (organizată de IAENG), London, U.K, 1-3 July, 2009



**Fig. B-ii.2.** Prezentare orală a lucrării la *The World Congress on Engineering 2010 - WCE 2010*, (organizată de IAENG), London, U.K, June 30 - July 2, 2010



**Fig. B-ii.3.** Prezentare orală a lucrării în cadrul Conferinței TMT 2009, Hammamet-Tunisia, 16-21 October, 2010



**Fig. B-ii.4.** Prezentare orală a lucrării în cadrul Conferinței TMT 2011, 12-18 September, Prague, Czech Republic, 2011.

- *The 20th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: focus on Theory, Practice & Education", vol. 20, no. 1, 25-28th November 2009, Vienna.*

**1.4.4. Numărul total de citări obținute pentru articolele publicate - 48 citări conform table**

În tabelul B-ii.1, se prezintă sintetic numărul total de citări ale articolelor și citările semnificative ale articolelor indexate ISI / BDI, publicate de autoarea prezentei teze de abilitare.

**Tabelul B-ii.1**

Numărul de citări în reviste cotate ISI sau în reviste / volume indexate BDI, ale articolelor publicate de Cerbu Camelia

<b>Nr. Articole publicate de Cerbu C. în Rev. cotate ISI sau în reviste / volume indexate ISI / BDI</b>	<b>Nr. citări în Reviste ISI cu factor de impact</b>	<b>Nr. citări în publicații ISI fără factor de impact</b>	<b>Nr. citări în publicații BDI</b>
6 Articole în Reviste ISI	-2 citări în <i>Composites Part B: Engineering</i> (FI: 2,602 / 2014); -3 citări în <i>Materials &amp; Design</i> (Impact factor: 3,171/ 2014) -1 citare în <i>Journal of Optoelectronics and Advanced Materials</i> (FI: 0,563/2013) -7 citări în <i>Materiale Plastice</i> (FI: 0,463/ 2013) - 2 citări în <i>Optoelectronics and Advanced Materials, Rapid Comunication</i> (FI: 0,449 / 2013)	- 3 citări în reviste ISI fără factor de impact (-1 citare în <i>Advanced Materials Research</i> ; - 1 citare în <i>Applied Mechanics and Materials</i> ; - 1 citare în <i>Agronomy Research</i> ) - 4 citări în Proceeding-uri indexate ISI	- 9 citări în Reviste indexate BDI; - 4 citare în Proceeding indexat BDI;
7 Articole în Proceeding-uri indexate ISI	-1 citare în <i>Materiale Plastice</i> (FI: 0,379 / 2012)	-	- 3 citări în Reviste indexate BDI; - 1 citare în Proceeding indexat BDI;
20 Articole în Reviste sau Proceeding-uri indexate BDI	-	-	- 8 citări în Reviste indexate BDI
<b>Total citări = 48 citări</b>	<b>16 citări în Reviste ISI cu factor de impact</b>	<b>7 citări în publicații ISI fără factor de impact (3 în reviste + 4 în Proceeding-uri)</b>	<b>25 citări în publicații BDI (20 în reviste + 5 în Proceeding-uri)</b>

#### **1.4.5. Prelegeri la universități de prestigiu:**

- Mai 2008 - *Department of Mechanics*, Polytechnic University of Orleans, France – Titlul prezentării: “*Researches concerning to the structural optimisation of some members made of composite materials mechanically loaded under environmental aggressive conditions*”.

#### **1.4.6. Burse obținute**

- 15 Aprilie – 15 mai 2002, *Laboratory of Solid Mechanics*, Polytechnic University of Poitiers, Franta, finanțată prin *Program Tip D, Cod 8 cu Banca Mondială prin Guvernul României*;
- 5 -12 iunie 2003, *Technical University of Bratislava – Slovakia*, finanțată prin *National CEEPUS Offices Slovakia*: DI. Ingrid Vernerová SAIA-SCTS, Ružová dolina 6 SK-82005 Bratislava Phone: (+421 2) 554 10 387 Fax: (+421 2) 554 10 382;
- 12 –19 iunie 2003, *Technical University of Budapest, Hungarian, National CEEPUS Offices Hungary*: Anita Fazekas Hungarian CEEPUS Office POB 510, H-1438 Budapest 70 Phone: (+36 1) 2109700 Fax: (+36 1) 2109701.

#### **1.4.7. Prezentarea cărților publicate ca autor principal în reviste indexate BDI**

- Revista *ProLigno*, ISSN 1841-4737 (categoria B+, cod 746 CNCSIS), vol. 3, nr. 1, martie 2007, prezintă în cadrul secțiunii “*Recent Publications*”, p. 79, un rezumat al cărții următoare:
  - **Cerbu Camelia**, *Materialele compozite și mediul agresiv. Aplicații speciale*; Editura Universității Transilvania Brașov, ISBN 978-973-635-861-6; 2006, format B5 tipărit, 256 pagini; <http://www.proligno.ro/en/articles/2007/1/publications.htm>;
- Revista *ProLigno*, ISSN 1841-4737 (categoria B+, cod 746 CNCSIS), vol. 5, nr. 4, decembrie 2009, prezintă în cadrul secțiunii “*Recent Publications*”, p. 88, un rezumat al cărții următoare:
  - **Cerbu Camelia**, Curtu Ioan, *Mecanica și rezistența materialelor compozite*, Editura Universității Transilvania din Brașov, ISBN 978-973-598-614-8, 2009, format B5 tipărit, 264 pagini; <http://www.proligno.ro/en/articles/2009/4/publications.htm>.

#### **1.4.8. Referent științific și membru în Comisii de evaluare**

- Autoarea prezentei teze de abilitare a recenzat articole la reviste de specialitate renumite, o parte fiind în domeniul materialelor compozite: *Journal of Composite Materials - Part B: Engineering*, Elsevier; *Journal of Composite Materials* (din colecția *Sage Journals*); *Journal Recent Patents on Materials Science* (publicat de *Bentham Science Publisher*); *BioResources*; *Optoelectronics and Advanced Materials - Rapid Communications* (OAM-RC).
- A fost desemnată ca expert evaluator în *Comisiile de evaluare* a proiectelor de cercetare

depuse în cadrul competițiilor naționale lansate de CNCSIS / UEFISCDI (2009-2010).

- Este *evaluator ARACIS* și a fost membră a *Comisiilor de evaluare externe* pentru diverse programe de studiu din domeniul *Inginerie Mecanică* la diverse Universități din România (Universitatea Politehnică din Timișoara, Academia Tehnică Militară, Universitatea Tehnică “Gh. Asachi” din Iași etc.).

## 2. Planuri de dezvoltare a carierei

### 2.1. Planuri de dezvoltare a activității didactice

Activitatea didactică reprezintă o activitate centrală din cariera autoarei prezentei teze de doctorat. În scopul îmbunătățirii performanțelor rezultate din activitatea didactică, a dezvoltării abilităților și competențelor de predare, comunicare și transfer de cunoștințe către studenți / masteranzi / doctoranzi, se urmărește în continuare:

- actualizarea, modernizarea suporturilor de curs și publicarea periodică în format tipărit sau electronic, a unor ediții actualizate;
- utilizarea tehnologiilor educaționale moderne și a tehnologiilor de formare de tip blended-learning pentru învățământul universitar;
- coordonarea studenților / masteranzilor în vederea realizării unor teme de cercetare și participarea cu lucrări la *Sesiunile cercurilor științifice studențești*;
- coordonarea studenților și a masteranzilor la *Proiectele de diplomă* și respectiv, la *Proiectele de disertație* și încurajarea masteranzilor pentru continuarea cercetărilor în programele de pregătire doctorală;
- implicarea activă în activitatea de pregătire a studenților pentru Concursul „C.C. Teodorescu” pe teme de rezistența materialelor, pentru participare la faza pe Universitate și la faza națională;
- publicarea suportului de curs pentru disciplina *Mechanics of composite materials* din *Planul de învățământ* al programului de studii *Inginerie Mecanică în limba engleză* (se menționează că prima ediție a suportului de curs în limba română a fost publicată în format electronic în 2007 iar ediția tipărită și actualizată, în 2009);
- participarea prin programe de tip *Erasmus* la stagii în universități din *Uniunea Europeană* pentru realizarea schimburilor de experiență legate de organizarea activităților de predare la orele de curs / laborator / seminar / proiect în vederea alinierii cursurilor cu cele similare predate în universități de prestigiu;
- promovarea în licee atât a celor două programe de studii de *Inginerie Mecanică* (în limbile română și engleză) cât și a programului de master *STIM (Simulare și Testare în Inginerie Mecanică)* coordonate de *Departamentul de Inginerie Mecanică*, în scopul atragerii de candidați pentru admitere;
- implicarea în activitatea de coordonare a programului de studii *Inginerie Mecanică* în limba engleză în calitate de coordonator (din 2012), prin stabilirea unor întâlniri periodice cu studenții de la acest program;
- pregătirea documentației și a dosarului de auto-evaluare a programului de studii

*Inginerie Mecanică* în limba engleză, în vederea acreditării în 2016, în calitate de coordonator de program (în 2012 s-a obținut autorizarea).

## **2.2. Planuri de dezvoltare a activității de cercetare științifică**

Activitatea de cercetare științifică stă la baza dezvoltării unei cariere academice de succes în contextul impus de necesitatea actualizării și modernizării periodice ale cursurilor universitare astfel încât acestea să țină pasul cu cele mai recente cercetări din domeniu și cu necesitățile impuse de mediul economic (industriile din domeniul suportului de curs sau industriile conexe). În acest sens, pentru a ține pasul cu cercetările de actualitate și pentru a le compara cu rezultatele proprii din cercetare, este necesar să se studieze continuu articolele din literatura de specialitate din domeniile modelării, simulării și testării mecanice a structurilor din materiale compozite.

În vederea creșterii impactului și a vizibilității activității științifice se urmărește în continuare:

- atragerea de fonduri pentru cercetare prin propuneri de contracte la nivel național sau internațional, în vederea dotării cu echipamente a laboratoarelor de cercetare și pentru achiziția de materiale necesare în activitățile de cercetare (eprovete, traductoare electrice rezistive, fibre, rășini, adezivi pentru lipirea straturilor etc.);
- stabilirea unor contacte și legături cu cadre didactice sau cercetători de la alte universități din țară sau din străinătate în vederea dezvoltării și intensificării colaborărilor științifice, a schimbului reciproc de experiență în cercetare și rezolvarea prin colaborare în cadrul proiectelor de tip Parteneriate, a temelor comune de cercetare;
- stabilirea unor teme de cercetare care să continue cercetările din prezenta teză de doctorat;
- publicarea anuală a minimum două articole cotate ISI (din care un articol ca prim autor) și a două articole publicate în reviste sau Proceeding-uri indexate ISI / BDI;
- publicarea unor monografii sau capitole de monografii care să conțină rezultate din prezenta teză de abilitare;
- participarea la conferințe internaționale organizate în țară sau străinătate, în special la cele la care se face o selecție a articolelor în vederea publicării în reviste ISI / BDI;
- dezvoltarea echipei de cercetare prin includerea tinerilor cercetători (masteranzi și doctoranzi) și a studenților coordonați la proiectele de diplomă;

- preocuparea continuă pentru dezvoltarea competențelor și abilităților de utilizare a software-lor moderne în activitățile de cercetare legate de: modelarea geometrică și analiza cu elemente finite a structurilor mecanice; simularea comportării mecanice a acestora; realizarea unor programe de calcul, de optimizare sau de prelucrare a datelor experimentale în *MatLab*;
- asigurarea unei continuități în ceea ce privește temele de cercetare abordate, atât între generațiile de studenți / masteranzi / doctoranzi cât și între temele abordate în cadrul proiectelor de diplomă / disertație / teme de doctorat.

\*\*\*

În ceea ce privește atragerea de fonduri pentru cercetare prin propuneri de contracte, se menționează că autoarea prezentei teze de abilitare a depus o propunere de contract în calitate de director, în competiția *Tinere echipe TE 2014* lansată de UEFISCDI, în decembrie 2014, care se află în prezent, în proces de evaluare. Titlul proiectului propus este "*Testarea, optimizarea structurilor din materiale compozite hibride cu fibre naturale solicitate static / dinamic în scopul îmbunătățirii durabilității*", acronim TOCOMDURAB. Proiectul continuă cercetările abordate în prezenta teză de abilitare și urmărește de asemenea, dezvoltarea și consolidarea echipei de tineri cercetători în vederea rezolvării temei propuse.

Referitor la dezvoltarea și întărirea legăturilor cu cercetătorii și cadrele didactice de la universități din străinătate, se menționează că autoarea prezentei teze de abilitare a propus un *Contract de colaborare internațională bilaterală România-China* în calitate de director de proiect, în competiția din iulie 2014, lansată de UEFISCDI. Nu s-a încheiat încă procesul de evaluare a propunerilor din această competiție. Titlul proiectului propus este "*Mechanical testing and damage modeling of high performance polymer composite materials used for wind energy applications under environmental effects*" iar activitățile de cercetare prevăzute continuă cercetările din prezenta teză de abilitare.

\*\*\*

În continuare, se prezintă temele de cercetare care constituie direcțiile viitoare de cercetare ale autoarei prezentei teze de abilitare.

- *Optimizarea structurilor din materiale compozite hibride ranforsate cu fibre de sticlă și fibre naturale solicitate static sau dinamic (solicitări ciclice de oboseală) în scopul îmbunătățirii durabilității.*
- *Cercetări privind efectele condițiilor de mediu (umiditate, variații de temperatură, cicluri*

*termice, raze ultraviolete etc.) asupra comportării la solicitări dinamice a structurilor din materiale compozite hibride ranforsate cu fibre de sticlă și fibre naturale.*

- *Modelarea, simularea și testarea caracteristicilor mecanice ale structurilor din materiale compozite de tip sandwich cu miez din diferite tipuri de profile, cu aplicații în industria autovehiculelor.*
- *Optimizarea structurilor din materiale compozite de tip sandwich cu miez din diferite tipuri de profile, care sunt solicitate mecanic în condiții agresive de mediu (umiditate, variații de temperatură, cicluri termice, raze ultraviolete etc.).*
- *Cercetări privind comportarea mecanică a structurilor din materiale compozite hibride de tip sandwich cu miezuri din fibre naturale sau materiale reciclabile cu aplicații în industria automobilelor (sau industria materialelor de construcții).*
- *Cercetări privind comportarea mecanică a îmbinărilor utilizate între componentele din structurile din materiale compozite ranforsate cu țesături.*

### **2.3. Concluzii**

În acest capitol, s-au prezentat realizările științifice în activitatea de cercetare și în activitatea didactică, care au condus la conturarea și apoi, la consolidarea autonomiei și vizibilității științifice la nivel național și internațional, ale autoarei tezei de abilitare până în momentul de față.

Realizările științifice și planurile de dezvoltarea a carierei profesionale arată că există premisele consolidării imaginii și a vizibilității științifice ale autoarei tezei de abilitare în direcția temei de cercetare abordată în prezenta de abilitare, temă care se înscrie în domeniul *Inginerie Mecanică*.

Competențele și abilitățile de coordonare a echipelor de cercetare, dezvoltate prin activitățile de coordonare a echipelor de cercetare din cele trei granturi de cercetare pe care le-a coordonat în calitate de director de proiect, precum și rezultatele cercetărilor, dovedesc faptul că autoarea tezei de abilitare are capacitatea de coordonare a unor echipe de cercetare formate din viitori doctoranzi.

Cadrul general de desfășurare a activității și anume *Departamentul de Inginerie Mecanică* din *Facultatea de Inginerie Mecanică*, din cadrul *Universității Transilvania din Brașov*, în care își desfășoară activitatea în calitate de *conferențiar universitar dr. ing.*, îi permite va permite în continuare autoarei prezentei teze de abilitare, să-și dezvolte o carieră de success atât în planul



activităților didactice cât și în planul activităților de cercetare.

Baza materială (echipamente, documentație tehnică) de care dispune în prezent *Universitatea Transilvania din Brașov (Institutul de Cercetare – Dezvoltare)* va permite continuarea cercetărilor deoarece toate cercetările prezentate în prezenta teză de abilitare (cu excepția celor din Cap. 3) au fost realizate în cadrul laboratoarelor din *Universitatea Transilvania din Brașov*.

## Bibliografie

- [1]. Abdul Khalil, H.P.S.; Jawaid, M.; Abu Bakar, A. (2011). *Woven hybrid composites: Water absorption and thickness swelling behaviors*, BioResources 6 (2), p. 1043-1052, DOI: 10.15376/biores.6.2.1043-1052;
- [2]. Adhikary, K. B.; Pang, S.; Staiger, M. P. (2008). *Dimensional stability and mechanical behaviour of wood-plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE)*, Composites Part B: Engineering, vol. 39 (5), p. 807-815, DOI:10.1016/j.compositesb.2007.10.005;
- [3]. Adhikary, K. B.; Pang, S.; Staiger, M. P. (2008). *Long-term moisture absorption and thickness swelling behaviour of recycled thermoplastics reinforced with Pinus radiata sawdust*. Chemical Engineering Journal, vol. 142 (2), p. 190-198, doi: 10.1016 /j.cej.2007.11.024. (2007);
- [4]. Alămoreanu, Elena; Chiriță, R. (1997). *Chapter 1.2.2. Materiale de armare*, Bare si placi din materiale compozite, Editura Tehnica, Bucuresti, p. 20-26;
- [5]. Alămoreanu, Elena; Constantinescu, D.M. (2005). *Proiectarea plăcilor compozite laminate*, Editura Academiei Române, București;
- [6]. Al-Maadeed, M. A.; Nógellová, Z.; Micušík, M.; Novák, I.; Krupa, I. (2014). *Mechanical, sorption and adhesive properties of composites based on low density polyethylene filled with date palm wood powder*, Materials and Design, vol. 53, p. 29–37, DOI: 10.1016/j.matdes.2013.05.093;
- [7]. Al-Maadeed, M. A.; Shabana, Y. M.; Khanam, P.N. (2014). *Processing, characterization and modeling of recycled polypropylene/glass fibre/wood flour composites*, Materials and Design, vol. 58, p. 374–380, DOI:10.1016/j.matdes.2014.02.044;
- [8]. Arbelaiz, A.; Fernández, B.; Cantero, G.; Llano-Ponte, R.; Valea, A.; Mondragon, I. (2005). *Mechanical properties of flax fibre/polypropylene composites. Influence of fibre/matrix modification and glass fibre hybridization*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 36 (12), 2005, p. 1637–1644;
- [9]. Assarar, M.; Scida, D.; El Mahi, A.; Poilâne, C.; Ayad, R. (2011). *Influence of water ageing on mechanical properties and damage events of two reinforced composite materials: Flax-fibres and glass-fibres*, Materials and Design, vol. 32, 2011, p. 788–795;
- [10]. Attaway, S. (2009). *Matlab. A practical introduction to programming and problem solving*, Chapter 14.1. Fitting curves to data, Elsevier, 2009, ISBN 978-0-75-068762-1, p. 421-429;
- [11]. Avila, A. F.; Duarte, M. V. (2003). *A mechanical analysis on recycled PET/HDPE composites*, Polymer Degradation and Stability, vol. 80 (2), p. 373-382. DOI:10.1016/S0141-3910(03)00025-9;
- [12]. Ayensu, A. (2000). *Interfacial debonding of natural fibre reinforced composites*, Quarterly Science Vision, vol. 6 (1), 25–34;
- [13]. Baere, I.; Van Paepegem, W.; Degrieck J. (2009). *On the nonlinear evolution of the Poisson's ratio under quasi-static loading for a carbon fabric-reinforced thermoplastic. Part I: Influence of the transverse strain sensor*, Polymer Testing, ISSN 0142-9418, vol. 28, 2009, p. 196-203;
- [14]. Baere, I.; Van Paepegem, W.; Degrieck J. (2009). *On the nonlinear evolution of the Poisson's ratio under quasi-static loading for a carbon fabric-reinforced thermoplastic. Part II: Analytical explanation*, Polymer Testing, ISSN 0142-9418, vol. 28, 2009, p. 324-330;
- [15]. Barbero, E. J. (1998). *Introduction to composite materials design*, CRC Publisher, USA, ISBN 978-1560327011;
- [16]. Barbero, E.J. (2008). *Finite element analysis of composite materials*, CRC Press, USA, ISBN 978-1-4200-5433-0;
- [17]. Barbu, C., M. (1999). *Materiale compozite din lemn*, Editura Luxlibris, ISBN 973-9240-80-1;
- [18]. Bartl, A.; Hackl, A.; Mihalyi, B.; Wistuba, M.; Marini, I. (2005). *Recycling of fibre materials*, Process Safety and Environmental Protection, vol. 83 (4), p. 351-358, DOI:10.1205/psep.04392;
- [19]. Berthelot, Jean Marie (1992). *Matériaux composites - Comportement mécanique et analyse des structures*, Masson;

- [20]. Berthelot, Jean Marie (2007). *Mechanical Behaviour of Composite Materials and Structures*, Chapters 23, ISMANS - Institute for Advanced Materials and Mechanics, Le Mans, France;
- [21]. Boualem, N.; Sereir, Z. (2010). *Reduction of hygrothermal transverse stresses in unidirectional hybrid composites under cyclic environmental conditions*, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, vol. 15 (1), p. 51-71, DOI: 10.1007/s11043-010-9120-y;
- [22]. Bratu, P. (2011). *Analiza structurilor elastice: comportarea la acțiuni statice și dinamice*, Editura Impuls, București, ISBN 978-973-8132-73-3;
- [23]. Carus, M. (2011). *Bio-composites: technologies, applications and markets*, In: 4th International conference on sustainable materials, polymers and composites, Birmingham, UK, 6–7 July 2011;
- [24]. **Cerbu Camelia** (2015). *Practical solution for improving the mechanical behaviour of the composite materials reinforced with flax woven fabric*, *Advances in Mechanical Engineering*, ISSN 1687-8132, vol. 7 (4), 30 April 2015, DOI: 10.1177/1687814015582084, <http://ade.sagepub.com/content/7/4/1687814015582084.full.pdf+html>;
- [25]. **Cerbu, Camelia** (2015). *Mechanical characterization of the flax / epoxy composite material*, *8th International Conference Interdisciplinarity in Engineering*, INTER-ENG 2014, 9-10 October 2014, Tirgu-Mures, Romania, Procedia Technology, Elsevier, ISSN 2212-0173, vol. 19, 2015, p. 268 – 275, DOI: 10.1016/j.protcy.2015.02.039;
- [26]. **Cerbu, Camelia** (2014). *Aspects concerning to the mechanical properties of the glass / flax / epoxy composite material*, In: *Proceeding of The 5th International Conference “Advanced Composite Materials Engineering” COMAT 2014*, 16-17 October 2014, Brașov, ISBN 978-606-19-0411-2, p.30-34;
- [27]. **Cerbu, Camelia; Popa, Alexandru Constantin V.** (2013). *Modelarea Structurilor Mecanice*, Editura Universității Transilvania din Brașov, ISBN 978-606-19-0331-3, 2013, 396 pagini;
- [28]. **Cerbu, Camelia** (2012). *Analiza starilor de tensiuni si deformatii in componente de mobilier realizate din materiale compozite (Analysis of the states of stresses and strains that develop in furniture components made of composite materials)*, *Buletinul AGIR*, ISSN 1224-7928 (categoria B+, cod 415 CNCSIS), anul XVII, Nr.1, ianuarie-martie 2012, p.78-81;
- [29]. **Cerbu, Camelia** (2012). *Determination of the strains developed in furniture parts made of glass fibres composite materials*, *The 4th International Conference 4th International Conference “Advanced Composite Materials Engineering ” COMAT 2012 and the 2nd International Conference Research & Innovation in Engineering*, 18 - 20 October 2012, Brașov, Editura Lux Libris, ISBN 978-973-131-162-3, p. 73-78;
- [30]. **Cerbu, Camelia** (2011). *Cercetări privind comportarea mecanică a unor structuri compozite și nano-compozite hibride ranforsate cu particule, țesături și materiale reciclate, în condiții de mediu agresiv* Raport de cercetare: Proiect PN-II-PCE, IDEI 733 / 2008, perioada 2009-2011;
- [31]. **Cerbu, Camelia; Curtu I.; Constantinescu D. M.; Miron M. C.** (2011). *Aspects concerning to the transverse contraction in the case of some composite materials reinforced with glass fabric*, *Materiale plastice*, vol. 48 (4), p.341-345;
- [32]. **Cerbu, Camelia; Teodorescu, H.; Scutaru, L.** (2011). *Adding Fillers to Change the Mechanical Behaviour of the Glass Composite Materials*, *Proceedings of The World Congress on Engineering WCE 2011, Vol III*, ISBN 978-988-19251-5-2, ISSN 2078-0958 (Print), ISSN 2078-0966 (Online), 6-8 July 2011, London, U.K, Publisher: Newswood Limited; Organization: International Association of Engineers; p. 2294-2297;
- [33]. **Cerbu, Camelia** (2010). *Chapter 19 “Effects of the long-time immersion on the mechanical behaviour in case of some E-glass / resin composite materials”*, In book: “Woven Fabric Engineering”, ISBN 978-953-307-194-7, SCIYO Publisher, Published in print edition August 2010, Editor: Polona Dobnik Dubrovski, p. 363-386, <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/12255.pdf> ;
- [34]. **Cerbu, Camelia; Curtu, I.; Ciofoaia, V.; Rosca, I. C.; Hanganu, L. C.** (2010). *Effects of the wood species on the mechanical characteristics in case of some E-glass fibres/wood flour/polyester composite materials*, *Mat. Plast*, ISSN 0025-5289, vol. 47 (1), 2010, p.109-114;
- [35]. **Cerbu, Camelia; Itu, C.; Curtu I.** (2010). *The problem of the using of the composite materials reinforced with glass fibres to manufacturing of some components of the garden chairs*, *Revista ProLigno*, vol. 6 (3), septembrie 2010, ISSN 1841-4737, p. 51-60;

- [36]. **Cerbu, Camelia**; Luca-Motoc, Dana (2010). *Solutions for Improving of the Mechanical Behaviour of the Composite Materials Filled with Wood Flour*, Proceedings of The World Congress on Engineering 2010, WCE 2010, Vol. II, ISBN 978-988-18210-7-2, June 30 - July 2, 2010, London, U.K, Publisher: Newswood Limited, Organization: International Association of Engineers, p. 1097;
- [37]. **Cerbu, Camelia** (2009). *Flexural tests of the Composite materials reinforced with both glass woven fabric and oak wood flour*, Annals of DAAAM for 2009 & Proceedings of the 20th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: focus on Theory, Practice & Education", Vol. 20, No. 1, 25-28th November 2009, Vienna, Austria, ISSN 1726-9679, ISBN 978-3-901509-70-4, Editor Branko Katalinic, p. 303-304;
- [38]. **Cerbu, Camelia**; Ciofoaia, V.; Curtu, I.; Vişan, A. (2009). *The effects of the immersion time on the mechanical behaviour in case of the composite materials reinforced with E-glass woven fabrics*, Materiale Plastice, ISSN 0025-5289, vol. 46 (2), p. 201-205;
- [39]. **Cerbu, Camelia**; Curtu, I. (2009). *Advantages of the admixture of the oak wood flour for matrix in E-glass composite materials*, WSEAS Brasov, Proceedings of the 1st International Conference on Manufacturing Engineering, Quality and Production Systems (MEQAPS '09), Vol. 2, 24-26th September 2009, Transilvania University of Braşov, ISSN 1790-2769, ISBN 978-960-474-122-9; (e-book ISBN 978-960-474-123-6); published by WSEAS Press, p. 306-309;
- [40]. **Cerbu, Camelia**; Curtu, I. (2009). *Flexural tests in case of some composites reinforced with carpinus / beech wood flour*, In: Annals of the University of Petroşani - Mechanical engineering, Vol. 11 (XXXVIII), Editura Universitas, Petroşani, 2009, ISSN 1454-9166 (categoria B+, cod 26 CNCSIS), p. 29-36;
- [41]. **Cerbu, Camelia**; Curtu, I. (2009). *Mecanica și rezistența materialelor compozite*, Editura Universității Transilvania din Braşov, ISBN 978-973-598-614-8, 2009;
- [42]. **Cerbu, Camelia**; Curtu, I. (2009). *Particularități privind comportarea mecanică în mediu umed în cazul unui material compozit hibrid cu făină de lemn / Particularities concerning the mechanical behaviour in wet environment in case of a hybrid composite material with wood flour*, Revista ProLigno, ISSN 1841-4737 (categoria B+, cod 746 CNCSIS), vol. 5 (3), septembrie 2009, p. 37-45, <http://www.proligno.ro/ro/articles/2009/200903.htm>;
- [43]. **Cerbu, Camelia**; Teodorescu-Draghicescu, H. (2009). *Bending behaviour of the composite materials made by recycling of the CDs and DVDs*, in: Proceedings of The World Congress on Engineering WCE 2009, vol. 2, ISSN: 2078-0958 (Print), Publisher: Newswood Limited; Organization: International Association of Engineers, p. 1753-1756, [http://www.iaeng.org/publication/WCE2009/WCE2009\\_pp1753-1756.pdf](http://www.iaeng.org/publication/WCE2009/WCE2009_pp1753-1756.pdf) ;
- [44]. **Cerbu, Camelia**; Curtu, I. (2008). *Environmental effects on the dynamic characteristics of the epoxy composites reinforced with chopped fibres*, Sympóziom Drevné Kompozitné Materiály (Composite Wood Materials), Zvolen, 25-27th of June, 2008, p. 51-55;
- [45]. **Cerbu, Camelia** (2007). *Aspects concerning the degradation of the elastic and mechanical characteristics of glass / polymer composite materials due to the humidity absorption*, Revista Materiale Plastice, ISSN 0025-5289, vol. 44 (2), p. 97-102;
- [46]. **Cerbu, Camelia** (2006). *Materialele compozite și mediul agresiv, Aplicații speciale*, Editura Universității Transilvania din Braşov, ISBN 973-635-861-5, ISBN 978-973-635-861-6, 256 pagini;
- [47]. **Cerbu, Camelia** (2005). *Teza de doctorat: "Cercetări privind optimizarea structurală a unor piese din materiale compozite solicitate mecanic în condiții de mediu agresiv"*, Conducător științific: Prof.dr.ing. Ioan Curtu, data susținerii publice: 17 decembrie 2005, Universitatea Transilvania din Braşov;
- [48]. Chiriacescu, S.T.; Balcu, I. (2008). *Introducere în teoria elasticității și rezistența materialelor*, Editura Universității Transilvania din Braşov, 2008, ISBN 978-973-598-244-7;
- [49]. Ciofoaia, V.; Botiș, M.; Dogaru, F.; Curtu, I. (2001). *Metoda elementelor finite*, Editura InfoMarket, Braşov, ISBN 973-8204-11-9;
- [50]. Ciofoaia, V.; Curtu, I. (2000). *Teoria elasticității corpurilor izotrope și anizotrope*, Universitatea Transilvania din Braşov;
- [51]. Codispoti, R.; Oliveira, D. V.; Figueiro, R.; Lourenço, P. B.; Olivito R. S. (2013). *Experimental behavior of natural fiber-based composites used for strengthening masonry*

- structures*, Conference Papers in Materials Science, Volume 2013, Hindawi Publishing Corporation, Article ID 539856. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/539856>;
- [52]. Constantinescu, D.M.; Găvan, M.; Constantin, N.; Goetting, H. C. (2005). *Local hardening mechanisms and behaviour of sandwich glass fibre specimens in mode I testing*, Proceedings of the International Conference on Structural Analysis of Advanced Materials, ICSAM 2005, ISBN 973-8449-98-7, Bucuresti, 15 - 17 septembrie 2005, p. 61 – 68;
- [53]. Constantinescu, D.M.; Sandu, M.; Marşavina, L.; Negru, R.; Miron, M.; Apostol, D. (2009). *Evaluation of Interlaminar Damage and Crack Propagation Through Digital Image Correlation Method*, Advances in strength of materials Book Series: Key Engineering Materials, Editor(s): Marsavina, L., Vol.: 399, p. 105-112;
- [54]. Corum, J.M.; Battiste, R.L.; Ruggles, M.B.; Ren, W. (2001). *Durability – based design criteria for a chopped-glass-fiber automotive structural composite*, Composite Science and Technology, vol. 61 (8), p. 1083-1095, DOI:10.2172/14879;
- [55]. Coşoreanu, Camelia; Brenci, Luminiţa-Maria; Zeleniuc, Octavia; Fotin, Adriana (2015). *Effect of particle size and geometry on the performance of single-layer and three-layer particle board made from sunflower seed husks*, BioResources, vol. 10 (1), p.1127-1136;
- [56]. Cristaldi, G.; Latteri, A.; Recca, G.; Cicala, G. (2010). *Chapter 17: Composites Based on Natural Fibre Fabrics*, In book: “Woven Fabric Engineering”, ISBN 978-953-307-194-7, SCIYO Publisher, Published in print edition August 2010, Editor: Polona Dobnik Dubrovski, [www.sciyo.com](http://www.sciyo.com), p. 317-342, <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/12253.pdf>;
- [57]. Cristescu, N. (1983). *Mecanica materialelor compozite*, Universitatea Bucuresti;
- [58]. Cui, Y.; Lee, S.; Noruziaan, B.; Cheung, M.; Tao, J. (2008). *Fabrication and interfacial modification of wood/recycled plastic composite materials*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, ISSN 1359-835X, vol. 39 (4), p. 655–661, DOI: 10.1016/j.compositesa.2007.10.017;
- [59]. Curtu, I.; Ciofoaia, V.; **Cerbu, Camelia**; Kuchar, P.; Botiş, M.; Cristea, Luciana; Popa, S.C.; Repanovici, Angela (2002). *Rezistenţa materialelor. Probleme. (Festigkeitslehre)*, vol. III, Editura Infomarket, ISBN 973 – 8204 –51 – 8;
- [60]. Curtu, I.; Crişan, L.R.; Biţ S.C. (1998). *Rezistenţa materialelor şi teoria elasticităţii: curs şi aplicaţii*, partea II - a, Braşov;
- [61]. Curtu, I.; Ghelmeziu, N. (1984). *Chapter “Rezistenţele lemnului”*, In: Mecanica lemnului si materialelor pe baza de lemn, Editura Tehnica, Bucuresti, 1984, p. 165 şi p.204;
- [62]. Dhakal H.N.; Zhang Z. (2015). *Chapter 3: The use of hemp fibres as reinforcements in composites*, In: Biofiber Reinforcements in Composite Materials, Edited by:Omar Faruk and Mohini Sain, ISBN: 978-1-78242-122-1 (print), Woodhead Publishing, Elsevier, p. 86-103, DOI : 10.1533/9781782421276.1.86.;
- [63]. Dhakal, H. N.; Zhang, Z. Y.; Richardson, M. O. W. (2007). *Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites*, Composites Science and Technology, 67(7-8), p. 1674–1683, DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.06.019;
- [64]. Dogaru, Fl. (2008). *Mecanica compozitelor laminate. Aspecte privind comportamentul la impact. (Mechanics of the laminated composites. Aspects concerning to the behaviour under impact.)*, Editura Universităţii Transilvania din Braşov, ISBN 978-973-598-251-5;
- [65]. Gay, D. (1991). *Matériaux composites*, Editions Hermes, Paris;
- [66]. Ghinea, M.; Fireşteanu, V. (2007). *Capitolul 16: Interpolarea şi aproximarea datelor*, în cartea: Matlab: Calcul numeric, grafică, aplicaţii, Editura Teora, ISBN 10: 973-601-275-1, ISBN 13: 978-973-601-275-4, p. 149-164;
- [67]. Godara, A.; Raabe, D. (2007). *Influence of fiber orientation on global mechanical behavior and mesoscale strain localization in a short glass-fiber-reinforced epoxy polymer composite during tensile deformation investigated using digital image correlation*, Composites Science and Technology, ISSN 0266-3538, vol. 67, 2007, p.2417-2427;
- [68]. Gu, J.D. (2007). *Microbial colonization of polymeric materials for space applications and mechanisms of biodeterioration: A review*, International Biodeterioration And Biodegradation, 2007, vol. 59 (3) SPEC. ISS., ISSN 0964-8305, p. 170-179, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2006.08.010>;
- [69]. Gu, J.D.; Ford, T.; Thorp, K.; Mitchell, R. (1996). *Microbial growth on fiber reinforced composite materials*, International Biodeterioration & Biodegradation, Published by Elsevier

- Science Limited, Printed in Great Britain, p. 197-204;
- [70]. Hadăr, A. (2002). *Structuri din compozite stratificate. Metode, algoritmi și programe de calcul*, Editura Academiei Române, București;
- [71]. Hadăr, A.; Constantinescu, I.N.; Jiga, G., Ionescu, D.S. (2007). *Some local problems in laminated composite structures*, Mat. Plast, ISSN 0025 / 5289, vol. 44 (4), p.354-360;
- [72]. Hoffman, K. (1989). *An introduction to measurements using strain gauges*, Publisher: Hottinger Baldwin in Messtechnik GmbH, Darmstadt;
- [73]. Jiga, G. Gh. (2004). *Noțiuni fundamentale în mecanica materialelor composite*, Editura ATLAS PRESS, București;
- [74]. Julian, F.; Méndez, J. A.; Espinach, F. X.; Verdaguer, N.; Mutje, P.; Vilaseca, F. (2012). "Bio-based composites from stone groundwood applied to new product development" BioResources vol. 7 (4), 5829-5842, DOI: 10.15376/biores.7.4.5829-5842;
- [75]. Kamdem, D. P.; Jiang, H.; Cui, W.; Freed, J.; Matuana, L. M. (2004). *Properties of wood plastic composites made of recycled HDPE and wood flour from CCA-treated wood removed from service*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 35 (3), p. 347-355, DOI: 10.1016/j.compositesa.2003.09.013;
- [76]. Karmakar, A.C.; Hoffmann, A; Hinrichsen, G. (1994). *Influence of water uptake on the mechanical properties of jute fibre reinforced polypropylene*, J. Appl Polym Sci, vol. 54(12), p. 1803–1807, DOI: 10.1002/app.1994.070541203;
- [77]. Khan, J. A.; Khan, M. A. (2015). Chapter 1: *The use of jute fibers as reinforcements in composites*. In: Biofiber Reinforcements in Composite Materials, Edited by: Omar Faruk and Mohini Sain, ISBN: 978-1-78242-122-1 (print), Woodhead Publishing, Elsevier, p. 3-34. 10.1533/9781782421276.1.3
- [78]. Kishi, H.; Fujita A. (2008). *Wood-based epoxy resins and the ramie fiber reinforced composites*, Environmental Engineering and Management Journal, "Gh. Asachi" Technical University of Iasi, Romania, vol. 7 (5), September/October 2008, p. 517-523;
- [79]. Klyosov, A. A. (2007). *Composition of wood-plastic composites: cellulose and lignocellulose fillers*, În: *Wood-plastic composites*, John Wiley & Sons Publishing, Hoboken, New Jersey, p. 75-122;
- [80]. Krishan, K.C. (1998). *Composite Materials, Science and Engineering*, Springer, New York;
- [81]. Liang, S.; Gning, P.B.; Guillaumat, L. (2015). *Quasi-static behaviour and damage assessment of flax/epoxy composites*, Materials and Design, vol. 67, 2015, p. 344–353;
- [82]. Maggana, C.; Pissis, P. (1999). *Water absorption and diffusion studies in an epoxy resin system*, J. Polym Sci. 37(11), 1165–1182, DOI: 10.1002/(SICI)1099-0488(19990601)37:11<1165::AID-POLB11>3.0.CO;2-E;
- [83]. Miller, W.; Hook, P.B.; Smith, C.W.; Wang, X.; Evans, K.E. (2009). *The manufacture and characterisation of a novel, low modulus, negative Poisson's ratio composite*, Composites Science and Technology, ISSN 0266-3538, vol. 69, 2009, p. 651-655;
- [84]. Munteanu, M. Gh.; Aldica, C. Gh.; Radu, Gh. N. (1997). *Metoda elementelor finite. Suport de curs și de laborator*, Reprografia Universității Transilvania din Brașov;
- [85]. Müssig J.; Haag K. (2015). Chapter 2: *The use of flax fibres as reinforcements in composites*, In: Biofiber Reinforcements in Composite Materials, Edited by: Omar Faruk and Mohini Sain, ISBN: 978-1-78242-122-1 (print), Woodhead Publishing, Elsevier, p. 35-85, DOI: 10.1533/9781782421276.1.35;
- [86]. Müssig, J. (editor) (2010). *Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications*. Chichester, UK, John Wiley & Sons, p. 538;
- [87]. Najafi, A.; Khademi-Eslam, H. (2011). *Lignocellulosic filler/recycled HDPI composites: Effect of filler type of physical and flexural properties*, BioResources vol. 6(3), 2411-2424, DOI: 10.15376/biores.6.3.2411-2424,
- [88]. Năstăsescu V. (1995). *Metoda elementelor finite*, Ed. Academiei Tehnice Militare, București;
- [89]. Ocha, O.O.; Reddy, J.N. (1992). *Finite element analysis of composite laminates*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht / Boston / London, ISBN 0-7923-1125-6;
- [90]. Papanicolaou, G. C.; Koutsomitopoulou, A. F.; Sfakianakis, A. (2012). *Effect of thermal fatigue on the mechanical properties of epoxy matrix composites reinforced with olive pits powder*, Journal of Applied Polymer Science 124(1), p. 67-76, DOI: 10.1002/app.35092;
- [91]. Petrucci, R.; Santulli, C.; Puglia, D.; Sarasini, F.; Torre, L.; Kenny, J.M. (2013). *Mechanical*

- characterisation of hybrid composite laminates based on basalt fibres in combination with flax, hemp and glass fibres manufactured by vacuum infusion*, Materials and Design, vol. 49, p. 728–735;
- [92]. Pomiès, F.; Carlsson, L. A.; Gillespie, J. W. (1995). *Marine Environmental Effects on Polymer Matrix Composites*, in: Composite Materials: Fatigue and Fracture, vol. 5, ASTM STP 1230, R.H. Martin (ed.), Philadelphia: American Society for Testing and Materials, p. 283-303, DOI: 10.1520/STP14020S;
- [93]. Popa, Alexandru Constantin V. (2002). *Metoda elementelor finite analiză și modelare în programul NISA*, Editura Universității Transilvania din Brașov, ISBN 973-635-009-6;
- [94]. Popa, Alexandru Constantin V.; **Cerbu, Camelia** (2013). *Introducere în Metoda Elementelor Finite*, Editura Universității Transilvania din Brașov, 2013, ISBN 978-606-19-0332-0, 562 pagini;
- [95]. Prabhakaran S.; Krishnaraj V.; Senthil kumar M.; Zitoune R. (2014). *Sound and vibration damping properties of flax fiber reinforced composites*, 12th Global Congress ON Manufacturing and Management, GCMM 2014, Procedia Engineering, vol. 97, 2014, p. 573 – 581;
- [96]. Radu, Gh.; Munteanu, M. Gh. (1995). *Teoria elasticității și rezistența materialelor*, vol. I Brașov, 1994, vol. II, Editura Macarie, Târgoviște;
- [97]. Rangaraj, S. V.; Smith, L.V. (1999). *The Nonlinearly Viscoelastic Response of a Wood-Thermoplastic Composite*. *Mech. Time-Depend. Mater.* vol.3, p. 125–139;
- [98]. Roșca, I.C. (2009). *Mechanical Vibrations*, ISBN 978-973-598-648-3, Editura Universității Transilvania din Brașov;
- [99]. Shah D.U.; Schubel, P.J.; Clifford, M.J. (2013). *Can flax replace E-glass in structural composites? A small wind turbine blade case study*, Composites: Part B, vol. 52, p.172–181;
- [100]. Shahzad A. (2012). *Hemp fiber and its composites – a review*, J Compos Mater, 2012; vol. 46 (8), p.973–986,
- [101]. Soler, M. (2014). *Textile structures for aeronautics* (Part I), Annals of the University of Oradea, Fascicle of Textiles, Leatherwork, Vol. XV, No. 2., ISSN 1843 – 813X, Publishing of the Oradea University, 2014, p. 101-106;
- [102]. Șomotecan, Mărioara (2000). *Compozite - Calcul de rezistență*, Editura U.T. PRES, Cluj-Napoca;
- [103]. Springer, G. S. (1988). *Environmental Effects, Environmental Effects on Composite Materials*, vol. 3, Edited by SPRINGER, G., S., Lancaster, PA: Technomic Publishing Company;
- [104]. Springer, G.S. (1984). *Environmental Effects on Composite Materials*, vol. 2, Technomic Publishing Inc., Lancaster, PA;
- [105]. Stan, Felicia; Munteanu, A.V.; Fetecău, C. (2011). *Analysis of Visco-elastic-plastic Behaviour of Short Glass*, Materiale Plastice, ISSN 0025-5289, vol. 48 (1), p.1-6;
- [106]. Stancato, A.C.; Burke, A.K.; Beraldo, A.L. (2005). *Mechanism of a vegetable waste composite with polymer-modified cement (VWCPMC)*, Cement & Concrete Composites, ISSN 0958-9465, vol. 27 (5), p. 599-603;
- [107]. Szava, I.; Ciofoaia, V.; Luca-Motoc, Dana; Curtu, I. (2001). *Metode experimentale in dinamica structurilor mecanice*, Editura Universitatii Transilvania din Brasov, ISBN 973-9474-40-3;
- [108]. Takeshige, F.; Kawakami, Y.; Hayashi, M.; Ebisu, S. (2007). *Fatigue behavior of resin composites in aqueous environments*, Dental Materials, vol. 23 (7), p. 893–899;
- [109]. Tenek, L.T.; Argyris, J. (1998). *Finite element analysis for composite structures*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht / Boston / London, ISBN 0-7923-4899-0;
- [110]. Teodorescu, P. P. (1965). *Probleme plane în teoria elasticității*, vol. 2, Editura Academiei R.S.R., București;
- [111]. Terciu O.M.; Curtu, I.; **Cerbu Camelia**; Stanciu M. D. (2012). *Testarea la tracțiune a materialelor compozite lignocelulozice cu aplicații în industria autovehiculelor*, Buletinul AGIR, ISSN 1224-7928 (categoria B+, cod 415 CNC SIS), anul XVII, nr.1, ianuarie-martie 2012, p.40-43;
- [112]. Terciu, O.M.; Curtu, I.; Stanciu, M.D.; **Cerbu, Camelia** (2011). *Mechanical properties of composites reinforced with natural fiber fabrics*, In Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22th International DAAAM Symposium Intelligent Manufacturing & Automation, Editor Katalinic B., ISSN 1726-9679, p. 607-608;

- [113]. Thompson, D. W.; Hansen, E. N.; Knowles, C.; Muszynski, L. (2010). *Opportunities for wood plastic composite products in the U.S. highway construction sector*, BioResources, vol. 5(3), p. 1336-1352, DOI: 10.15376/biores.5.3.1336-1552;
- [114]. Timoshenko, S. P.; Woinowsky-Krieger, S. (1968). *Teoria plăcilor plane și curbe*, Editura Tehnică, București, 1968;
- [115]. Vlase, S.; Teodorescu, H.; Purcărea, R.; Modrea, A. (2008). *Mecanica materialelor compozite armate cu fibre*, Editura Infomarket, ISBN 978-973-8204-98-0;
- [116]. Voinea, R.; Voiculescu, D.; Ceaușu, V. (1976). *Elasticitate și plasticitate*, vol. 1 și 2, Institutul Politehnică București, 1976;
- [117]. Voyiadjis, G. Z.; Kattan, P. I. (2005). *Mechanics of composite materials with Matlab*, ISBN 10: 3-540-24353-4, ISBN 13: 978-3-540-24353-3, Springer Berlin Heidelberg New York, 2005;
- [118]. Wagner, P.B.; Little B.J.; Hart, K.R.; Ray, R.I. (1996). *Biodegradation of composite materials*, International Biodeterioration & Biodegradation, Published by Elsevier Science Limited, Printed in Great Britain, p. 125-132;
- [119]. Wang H; Zhou H; Gui L; Zhang X. (2014). *Analysis of Effect of Fiber Orientation on Young's Modulus for Unidirectional Fiber Reinforced Composites*, Composites Part B: Engineering, Volume 56, p. 733-9;
- [120]. Xepapadaki, A.G.; Papanicolaou, G.C.; Keramidas, P.; Jiga, G. (2010). *Effect of Hygrothermal Fatigue on the Mechanical Behaviour of Polymeric Composite Laminates and Sandwich Structures*, Mat. Plast, ISSN 0025-5289, vol. 47 (2), p.153-197;
- [121]. Xue D.; Hu H. (2013). *Mechanical properties of biaxial weft-knitted flax composites*, Materials & Design, vol. 46, p. 264–269;
- [122]. Yan L.; Chouw N.; Jayaraman K. (2015). *Effect of UV and water spraying on the mechanical properties of flax fabric reinforced polymer composites used for civil engineering applications*, Materials and Design, vol. 71, p. 17–25;
- [123]. Zhou, H. W.; Yi, H. Y.; Gui, L. L.; Dai, G. M.; Peng, R. D.; Wang, H. W; Mishnaevsky L. (2013). *Compressive damage mechanism of GFRP composites under off-axis loading: Experimental and numerical investigations*, Composites Part B: Engineering, vol. 55, p. 119-127, DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.06.007;
- [124]. \*\*\* EN ISO 14125 (2000). Fibre-reinforced plastic composites – Determination of flexural properties, British Standard, London;
- [125]. \*\*\* EN ISO 179-1. (2001). Plastics materials, Determination of the properties in Charpy test. The 1st Part: Uninstrumentally dynamic test. Determination of the characteristics of the materials under Charpy test, European Committee for Standardization, Brussels;
- [126]. \*\*\* EN ISO 527-4 (2000). Plastics - Determination of tensile properties - Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites;
- [127]. \*\*\* EN ISO 62. (2008). Plastics. Determination of water absorption, European Committee for Standardization, Brussels;
- [128]. \*\*\* Fișa tehnică a rășinii de tipul *Epolam 2015* (2006). Axson Technologies (U.S.A.).
- [129]. \*\*\* Fișa tehnică a rășinii poliesterice de tipul *Colpoly 7233* (2008) ;
- [130]. \*\*\* Fișa tehnică a țesăturii de in de tip Roberta;
- [131]. \*\*\* Fișa tehnică a țesăturii de sticlă de tip *E* (2010), fabricată de AeroGlass (Niederlenz, Switzerland);
- [132]. \*\*\* Handbook for the Aramis system (2006), GOM GmbH, Gesellschaft für Optische Meßtechnik, Version 2006, Braunschweig, Germany;
- [133]. \*\*\*Tutoriale soft Abaqus, 2009.

Brașov  
23.06.2015

**Conf.dr.ing. Camelia CERBU**