



Universitatea „DUNĂREA DE JOS” din Galați
Facultatea de Mecanică



**Contribuții teoretice și
experimentale la studiul proprietăților
mecanice ale unor compozite
polimerice
REZUMAT**

Coordonator:
Prof. dr. ing. Iulian-Gabriel BIRSAN

Doctorand:
Victor UNGUREANU

2012

CUPRINS

1. Compozite laminate	5
1.1. Generalități.....	5
1.2. Clasificarea materialelor compozite polimerice	5
1.3. Compozite laminate	6
1.4. Analiza proprietăților mecanice ale unui compozit.....	6
1.4.1. Arhitectura împletiturii.....	6
1.4.2. Tehnici de formare a compozitelor polimerice	7
1.4.3. Analiza la nivel macromecanic	7
1.4.3.1. Modele de calcul pentru laminat.....	7
1.4.3.2. Calculul de rezistență al materialelor compozite laminate armate cu fibre	8
1.5. Testarea materialelor compozite	9
1.6. Obiectivele tezei de doctorat	10
2. Formarea clasei de materiale compozite	10
2.1. Matricea polimerică	10
2.2. Materialul ranforsant	11
2.2.1. Selectarea fibrelor	11
2.2.2. Alegerea tipului împletiturii	12
2.2.3. Tratatamentul țesăturilor	12
2.3. Stabilirea unei metodologii originale de formare a materialului compozit	13
2.4. Testarea la tracțiune a laminelor armate cu țesături	14
2.5. Stabilirea tratamentului optim aplicat pe țesături.....	14
2.6. Concentrația componentelor	15
2.7. Comportamentul mecanic al laminelor	16
2.7.1. Metodologia de formare a probelor și parametrii de încercare la tracțiune	16
2.7.2. O soluție originală de aditivare cu pulberi a matricei epoxidice.....	17
2.8. Determinarea proprietăților mecanice pentru clasa de compozite hibride.....	19
2.8.1 Comportamentul mecanic al materialului compozit ranforsat cu țesături la diferite unghiuri față de forța aplicată.....	20
2.9. Laminele ranforsate cu fibre de sticlă	22
3. Determinarea caracteristicilor mecanice ale compozitelor ranforsate cu țesătură plan-diagonală	23
3.1. Stabilirea parametrilor de testare pentru lamine formate pentru acest studiu de cercetare.....	23
3.2. Calculul coeficientului lui Poisson.....	24
3.3 Testarea laminelor ranforsate cu țesătură plan-diagonală, cu fibre de carbon.....	25
3.4. Testarea laminelor ranforsate cu țesătură plan-diagonală cu fibre de carbon și țesătură plan-diagonală mixtă	28
3.5. Compararea valorilor experimentale ale celor două compozite ranforsate cu țesături plan-simple, plan-diagonale, cu fibre de carbon și mixte	31
4. Modelarea cu elemente finite a laminei.....	31
4.1 Analiza la nivel micromecanic	32
4.3.2. Analiza cu ajutorul metodei cu elemente finite la nivel micromecanic al celulei cu geometria 1.....	32

4.3.3. Analiza cu MEF la nivel micromecanic cu geometria de tip 2.....	35
4.4. Studiul la nivel mezomecanic al laminelor	37
4.4.1. Studiul laminelor cu țesătură plan-simplă	37
4.4.2. Studiul laminelor cu țesătură plan-diagonală al analizei cu MEF	39
4.5.3. Comparația tensiunilor de forfecare în cele două tipuri de țesături alese pentru compozit	41
4.6. Validarea simulării.....	42
5. Comportamentul mecanic al pseudo-compozitului format cu mai multe straturi de țesătură, aranjate la diferite unghiuri	43
5.2. Analiza rezultatelor experimentale.....	45
6. Concluzii finale și contribuții personale.....	46
6.1. Concluzii generale	46
6.2. Contribuții personale în formarea materialelor compozite și în testarea și simularea acestora.	47
6.3. Direcții viitoare de cercetare	48
Bibliografie	49

1. COMPOZITE LAMINATE

1.1. Generalități

În general, un sistem compozit este definit ca o combinație dintre două sau mai multe componente de naturi diferite, cu scopul de a obține un material cu proprietăți superioare sau cu un anumit set de proprietăți [1,2,3,4,5,6].

Din punct de vedere constitutiv, compozitele sunt formate din constituenți discontinui (pulberi, mustăți de fibre, fibre etc.) și unul de legătură între cei discontinui (matricea) [3,16]. Raportul volumic dintre matrice și materialul de ranforsare trebuie să fie astfel încât elementele matricei să interacționeze cu adaosul și să se distribuie uniform în compozit [6]. Distribuția aditivilor în compozit se poate efectua cu ajutorul altui aditiv sau prin distribuție mecanică [17]. La particulele continue (fibrele continue lungi), obținerea compozitului se face prin aranjarea fibrelor pe o anumită direcție sau prin împletirea lor pentru a-și menține forma inițială-acest tip de materiale se numește compozit ranforsat cu fibre [9,18].

Proprietățile fizice și mecanice ale compozitelor depind de geometria și de aranjarea componentelor [19]. Cu cât concentrația armăturii este mai mare, cu atât crește rezistența și rigiditatea materialului compozit [20]. Raportul volumic dintre matrice și materialul ranforsat nu poate depăși o anumită limită; dacă volumul matricei este prea mic, nu va fi suficient pentru a se obține o legătură bună între particule sau fibre [21]. Geometria armăturii și aranjarea ei în matrice pot îmbunătăți caracteristicile compozitului [22]. Astfel, există mai mulți factori care se iau în considerare când se proiectează un material compozit [23]. Tipul de armare și matricea, aranjarea geometrică a fibrelor, fracția volumică pentru fiecare component al compozitului, solicitările mecanice la care este supus, mediul în care este folosit etc., toate acestea trebuie luate în considerare [24].

Materialele compozite pot fi analizate în funcție de diferite caracteristici (termice, mecanice, fizice). Rezistența acestor materiale se poate evalua printr-o relație de deformare elastică, rezultată din acțiunea forțelor - legea lui Hooke pentru materiale omogene izotrope [25]. Materialele compozite se analizează în mod similar, prin stabilirea relației între tensiune și deformare [26].

Materialele izotrope și omogene (oțelul, alte aliaje metalice, ceramice etc.) se presupun a fi omogene și au aceleași proprietăți mecanice și fizice pe toate direcțiile (x, y, z,) (figura 1.1). Spre deosebire de materialele convenționale din inginerie, un material compozit este, în general, neomogen și nu se comportă ca un material izotrop [1]. Cele mai multe compozite se comportă ca un material anizotrop sau, în particular, ortotrop [13].

Comportamentul unui material anizotrop este diferit pentru toate direcțiile. Există diferite grade de anizotropie [13]. Deformația pe oricare direcție depinde de tipul solicitării la care este supus materialul, dar și de material [27].

1.2. Clasificarea materialelor compozite polimerice

Materialele compozite polimerice se clasifică în compozite cu particule și compozite fibroase [28]. Fiecare din aceste clase au proprietăți unice și potențial de aplicare, putând fi împărțite în subcategorii [29].

Materialele compozite fibroase sunt formate din fibre continue (lungi) sau discontinue (mustăți), suspendate în matrice [7].

La rândul lor, compozitele cu fibre discontinue pot fi orientate sau aranjate aleatoriu în matrice [30]. Din cauza discontinuității și aranjării aleatorii a fibrelor, aceste materiale compozite sunt considerate anizotrope, dar în multe cazuri pot forma și un material izotrop. Compozitele cu fibre continue pot fi cu un singur strat sau cu mai multe straturi. Într-un singur strat, fibrele continue pot fi unidireționale sau împletite (țesute), iar materialele cu mai multe straturi sunt considerate materiale laminate. În general, un material ranforsat cu fibre lungi pe un singur strat (lamina) este un material ortotrop [31].

Fibrele continue conferă materialului compozit caracteristici mecanice foarte bune. Fibrele scurte oferă proprietăți mecanice inferioare față de cele continue, datorită raportului nefavorabil între lungime și diametru, însă prezintă anumite avantaje la prelucrare și posibilitatea orientării privilegiate a unor proprietăți [32].

Materialele compozite cu particule sunt caracterizate ca având particule suspendate în matrice [33]. Particulele au dimensiuni și forme variate, în funcție de utilizarea compozitului. De obicei, aceste materiale sunt izotrope.

1.3. Compozite laminate

Lamina este un strat foarte subțire dintr-un compozit, reprezentând elementul fundamental. Compozitul ranforsat cu fibre este un material format din fibre înglobate în materialul matricei. Deseori, în matrice se adaugă aditivi pentru a îmbunătăți aderența dintre fibre și matrice [37]. O slabă legătură dintre matrice și materialul ranforsat ar duce la ruperea fibrelor sau la cedarea prea rapidă a matricei, ceea ce induce forțe de forfecare asupra fibrelor [16].

Compozitul laminat reprezintă suprapunerea mai multor lamine cu proprietăți diferite, sau cu aceleași proprietăți [38]. De obicei, laminele se lipesc între ele cu același material din care este formată matricea pentru o aderență mai bună sau se utilizează un material intermediar pentru lipire [39]. La rândul lor, laminele se pot așeza la diferite unghiuri pentru formarea unui material laminat ortotrop sau anizotrop [4].

Cunoscând comportamentul mecanic al componentelor unui compozit, se poate estima comportamentul întregului compozit. Acest lucru se poate face și pentru compozitul laminat: studiind comportamentul mecanic al laminei se poate evalua comportamentul întregului compozit. Majoritatea autorilor stabilesc un set de condiții inițiale, care le permite extinderea studiului de la lamină la laminat [5, 11, 36].

Modelarea comportamentului unui strat dintr-un laminat și apoi a întregului compozit, poate scurta timpul necesar testării și finalizării întregului ansamblu și poate sta la baza unor îmbunătățiri a setului de proprietăți.

1.4. Analiza proprietăților mecanice ale unui compozit

Analiza proprietăților mecanice se poate împărți pe niveluri de structură ale materialului [32].

Nivelul micromecanic se ocupă cu studiul interacțiunilor microscopice între componentele de baza ale compozitului. De obicei, acest studiu este realizat prin utilizarea modelelor matematice și determinări experimentale ale caracteristicilor fiecărei componente în parte.

La nivelul mezomecanic studiul se face pe zona intermediară dintre nivelul micromecanic și cel macromecanic. Această analiză este o zonă de studiu importantă, analizând, în cazul componentelor, interacțiunea dintre țesături sau țesătură și matrice.

Nivelul macromecanic se ocupă de răspunsul global al compozitului la aplicarea încărcărilor externe.

În urma analizei acestor trei niveluri, se poate face o caracterizare mecanică generală și utilă a compozitului.

1.4.1. Arhitectura împletiturii

Cu excepția fibrelor de bor și a celor de carbură de siliciu, care se obțin sub forma unui singur filament cu diametru relativ mare, celelalte fibre se obțin sub formă de mănunchiuri de filamente continue și fine, care pot fi folosite ca atare, tăiate la lungimi standardizate sau prelucrate prin operații textile în materiale nețesute sau în țesături și împletiri bi- și tridimensionale, neîmpregnate sau preîmpregnate [33].

Îmbunătățirea proprietăților mecanice ale materialelor compozite a dus la folosirea ca elemente de armare a fibrelor de tip roving [40,56,14].

Țesăturile executate din fibre lungi sunt caracterizate prin numărul de noduri pe centimetrul pătrat, prin dimensiuni, porozitate și aspectul suprafeței [21]. Nodul reprezintă trecerea între două fire perpendiculare.

Cele mai utilizate țesături sunt cele împletite 2D, dar se folosesc și țesăturile 3D, chiar și 4D (pentru structuri care sunt supuse unor solicitări mecanice mai mari, în structuri aeronautice, spațiale etc.) (figura 1.16). Împletiturile 4D se realizează prin introducerea unui nou set de fire pe direcția perpendiculară pe straturile împletiturii 3D [33].

1.4.2. Tehnici de formare a compozitelor polimerice

Un aspect important în interacțiunea dintre componente îl are formarea (fabricarea) materialului compozit. Există foarte multe modalități de formare a compozitului, depinzând de matricea polimerică folosită [10,29]. Alte aspecte de care ar putea depinde alegerea metodei optime de formare a compozitului sunt mărimea pieselor, calitatea lor, forma, cadența de formare etc.; mai multe detalii se pot găsi în cărți de referință despre materiale compozite [1-14]. Cea mai uzuală metodă de formare ale materialelor ranforsate cu țesătură este prin stratificare. O metodă des utilizată în industrie este folosirea unei matrice aditivate pentru un laminat ranforsat cu fibre, care este considerată o metodă hibridă de formare. Această metodă determină îmbunătățirea caracteristicilor termice și fizice ale matricei și compozitului [65].

Țesăturile, pentru a-și menține forma (stabilitatea geometrică), sunt tratate cu soluții de umectare [33]. Pe firele împletite se aplică o spălare pentru îndepărtarea impurităților și soluțiilor de umectare. Spălarea fibrelor se face cu diluanți chimici pentru îndepărtarea soluțiilor de umectare și apă pentru înlăturarea impurităților [7].

Prin tratamentul țesăturilor se dorește ca aderența dintre matricea epoxidică și fibre să fie cât mai bună [67,66,68,69]. În urma testelor mecanice s-a observat eficiența tratamentului termic aplicat fibrelor [66].

1.4.3. Analiza la nivel macromecanic

1.4.3.1. Modele de calcul pentru laminat

Ipotezele luate în considerare pentru studiul plăcilor realizate din materiale compozite stratificate și armate cu fibre sunt analizate în lucrarea [14].

În lucrarea lui Shernburn este prezentată o analiză amplă asupra geometriei și modelării mecanice a textilelor [21]. Modelarea mecanică a materialului s-a axat pe compresiunea firelor - un element important pentru fabricarea țesăturilor. Studiul geometriei a avut un rol important pentru implementarea modelului în analiza cu MEF.

Inițializarea analizei cu MEF la nivel mezomecanic, a materialului compozit ranforsat cu fibre lungi și rășină epoxidică, se efectuează cu ajutorul datelor de intrare prezentate în tabelul 1.2 [71].

Un element important în lucrarea prezentată este principiul suprapunerii efectelor. Zona de testare este formată dintr-o împletitură biaxială longitudinală [71].

Valorile din domeniul elastic, calculate cu modelul analitic, au fost comparate cu rezultatele obținute în analiza cu MEF, din zona elastică de testare ale materialului compozit, pe direcțiile x , y și z . Matricea compozitului a fost modelată ca un material izotrop, folosind cele două constante elastice ale rășinii epoxidice, firele împletite au fost modelate ca un material ortotrop care conține 90% fibre, proprietățile mecanice au fost calculate cu ajutorul modelului analitic [71].

Înainte de obținerea rezultatelor pentru modelul analitic și modelul cu elemente finite, s-a efectuat testarea efectivă a materialului compozit. Epruvetele au fost tăiate și testate conform standardului ASTM D 3039/D 3039M. Frația volumică de 39% a matricei, compozitului format din fibre de carbon și rășină epoxidică. Secțiunea firului este aproximativ elipsoidală.

La nivel mezomecanic, aproximarea analitică și analiza cu elemente finite pot înlocui, uneori, testele efective. Erorile relative ale proprietăților obținute în urma calculelor au avut o

variație de maxim 10%. Pentru executarea unui ansamblu cu o geometrie mai complexă este nevoie de testarea efectivă a elementelor de bază.

Cu ajutorul testelor de tracțiune se pot măsura și calcula constantele elastice ale unui material compozit [74]. Fibrele lungi sunt elemente de rezistență mecanică la tracțiune pentru laminele ranforsate. Fibrele naturale sau sintetice au proprietăți mecanice superioare matricei – considerată ca un material de ranforsat.

O modalitate de aranjare este utilizarea laminelor sub anumite unghiuri pentru a forma un material izotrop [73].

Țesăturile, din punct de vedere geometric, sunt simetrice față de axa de simetrie a țesăturilor. Dacă se folosesc unghiuri de aranjare a laminei 0° - 45° , se obține o simetrie a curbelor tensiune-deformație pentru unghiurile 45° - 90° [73].

1.4.3.2. Calculul de rezistență al materialelor compozite laminate armate cu fibre

Materialele compozite laminate și stratificate cu fibre sunt materiale ortotrope cu izotropie transversală. Asemănător materialelor clasice, există două categorii de metode de calcul, metode analitice și metode numerice [75].

Metoda analitică aplicată pentru un material compozit depinde de tipul materialului, cât și de forma structurii acestuia [76].

Pentru modelarea proprietăților mecanice ale structurilor de rezistență realizate din materiale compozite se utilizează modele matematice [77].

Modelele teoretice sunt o etapă intermediară între teoria referitoare la structurile unui ansamblu și experiența. Modelele se bazează de multe ori pe seturi de ipoteze formulate pe baza analogiei cu structuri pentru care teoria este bine cunoscută [78].

Cele mai des utilizate sunt modelele intuitive care facilitează interpretarea teoriei și aplicarea ei în structuri reale [79].

Modelele efective permit găsirea unor soluții pe cale experimentală a unor probleme care nu pot fi rezolvate pe cale analitică sau numerică, fie pentru că nu există metode de calcul adecvate, fie pentru că metodele existente sunt prea laborioase și costisitoare [14].

Prin complexitatea lor, modelele de calcul ale materialelor compozite stratificate, nu pot fi realizate la fel ca în cazul materialelor clasice. Modelarea la nivelul laminelor armate cu fibre este foarte dificilă, dar și foarte utilă, întrucât în acest mod se pot fi obține rezultate mai apropiate de realitate, legate de comportamentul fiecărei lamine din componența laminatului [80]. Cu ajutorul acestor modele pot fi puse în evidență deformațiile care apar în stratificatele armate cu fibre: ruperi de fibre și matrice, delaminări etc.

Metoda analitică este precisă, chiar dacă este elaborată presupunând că sunt respectate anumite ipoteze care îi limitează aplicabilitatea și îi condiționează precizia. Orice abatere de la ipotezele modelului analitic duce la creșterea erorilor de calcul.

Complexitatea metodelor analitice, cât și imposibilitatea aplicării acestor metode pentru o varietate mare de structuri complexe, au determinat cercetătorii să încerce soluționarea problemelor legate de calculul structurilor din materiale compozite cu ajutorul metodelor numerice. Se înlătură astfel necesitatea scrierii și rezolvării unor ecuații complexe care caracterizează materialele compozite [81].

Metodele numerice de calcul au avantajul de a fi aplicabile unor clase mai generale de probleme. Metoda elementelor finite (MEF) este metoda cea mai răspândită pentru analiza mecanică a materialelor compozite laminate armate cu fibre.

Există și alte metode de calcul numeric (metoda cologației, metoda elementelor de frontieră, metoda diferențelor finite etc.), dar utilizarea lor este dificilă pentru materialele anizotrope, din această categorie făcând parte și materialele compozite polimerice cu fibre lungi [82].

Dominiul sistemelor de calcul s-a dezvoltat în ultimele decenii foarte mult; astfel s-au adus îmbunătățiri substanțiale în metodele cu analiză numerică. Apariția unor software-uri de calcul a facilitat aplicarea metodelor de calcul [83].

Analiza cu MEF prezintă avantaje (simplitatea conceptelor, generalitatea și suplețea analizelor, facilități de pre- și postprocesare) și dezavantaje (metoda este aproximativă, elaborarea modelului de calcul este laborioasă, programele cu MEF sunt complexe și scumpe etc.). Și, ca orice metodă, are limite de calcul. Precizia rezultatelor este un element esențial în analiza unui ansamblu, cu MEF; în principiu, este convergentă și soluția unei probleme se poate apropia oricât de mult de soluția exactă (necunoscută), dar o poate atinge foarte rar (doar pentru structuri simple) și nici nu poate preciza abaterile dintre cele două soluții. Limitele softului de calcul și resursele sistemului de calcul cu utilizarea MEF pot fi o piedică pentru utilizarea acestor tipuri de analize [84].

Literatura de specialitate se îmbogățește permanent cu aplicații matematice moderne ale MEF, diversificându-se astfel modalitățile de determinare a matricei de rigiditate a unui element finit pentru materiale compozite. Apariția unui număr foarte mare de programe de firmă, în ale căror biblioteci există și elemente finite destinate analizei comportamentului mecanic al materialelor compozite stratificate și armate cu fibre, duce la un rezultat foarte apropiat de modelele reale [85].

În acest sens, deducerea matricei de rigiditate a unui element finit pentru analiza structurilor compozite se poate face în mai multe moduri, alegerea metodei și a teoriei matematice adecvate [86].

Metodele utilizate în analiza materialelor compozite laminate și armate cu fibre sunt atât metodele de analiză clasice, cât și metode mai noi, specifice materialelor compozite stratificate.

1.5. Testarea materialelor compozite

Tehnica de testare a materialelor compozite polimerice aditivat diferă de cea pentru materiale compozite polimerice armate cu țesături [94]. Testarea materialelor este reglementată de standarde internaționale, naționale, europene și/sau prin norme de firmă. Standardele de încercări mecanice precizează condițiile de testare, condițiile în care trebuie să se obțină epruvetele, dimensiunile lor, modul de lucru, caracteristicile determinate prin încercare, relațiile de calcul și modul de exprimare a rezultatelor. Pentru caracterizarea relevantă a materialelor compozite este necesară efectuarea unui număr minim de încercări în aceleași condiții [5].

Pentru a înțelege modul în care un material compozit laminat răspunde la solicitările mecanice externe, este importantă cunoașterea comportamentului unui strat al laminatului. În general, materialele compozite armate cu țesături au un grad ridicat de anizotropie. Pentru a reduce gradul de anizotropie al laminatului, laminele sunt orientate la unghiuri diferite. Răspunsurile mecanice ale materialelor compozite laminate depind de comportamentul componentelor [13]. Ca și la materialele omogene și izotrope, descrierea comportamentului mecanic se face prin utilizarea ecuațiilor constitutive liniar elastice, ecuații care descriu relațiile dintre tensiuni și deformații [5, 25].

Pentru caracterizarea mecanică a laminatelor există mai multe tipuri de teste:

- teste la tracțiune [95,96,97];
- teste la încovoiere [109] [110] [111];
- teste de determinare a rezistenței la delaminare [112,113];
- teste la compresiune [106] [107,108];
- teste dinamice și de oboseală [114].

În cazul laminatelor, pentru solicitările la tracțiune transversală, compresiune transversală și forfecare se consideră că limită de rezistență este în jurul rezistenței la rupere a matricei [42].

1.6. Obiectivele tezei de doctorat

Materialele compozite polimerice sunt tot mai des utilizate în industrie. Obiectivul acestei cercetări constă în studierea compozitelor cu diverse tipuri de țesături, pornind de la analiza fibrelor și firelor utilizate, crearea modelelor cu elemente finite prin validarea proprietăților prin testare, pe baza rezultatelor putând fi proiectate noi tipuri de compozite.

În vederea îndeplinirii acestui obiectiv, autorul a proiectat parcurgerea unor etape:

1. Crearea unei rețete optime de armare cu țesătură cu fibre de carbon și țesătură mixtă a unei matrice epoxidice cu scopul îmbunătățirii proprietăților mecanice ale compozitului astfel obținut;
2. Proiectarea unei tehnologii de laborator pentru obținerea materialelor compozite armate cu țesătură;
3. Obținerea epruvetelor necesare pentru identificarea influenței unghiului de testare mecanică pentru compozitele formate din țesătură cu fibre de carbon, țesătură mixtă (fibre de carbon+ fibre aramidice), țesătură cu fibre de sticlă;
4. Analiza influenței regimului de testare asupra proprietăților mecanice ale compozitelor formate;
5. Crearea unei rețete optime pentru compozitele hibride cu matricea epoxidică, armate cu țesătură din fibră de carbon, carbon-aramidică și aditivată cu pulberi, cu scopul de a îmbunătăți proprietățile mecanice ale compozitului format;
6. Utilizarea metodelor avansate de investigare nondestructivă pentru identificarea geometriei țesăturilor utilizate;
7. O analiză utilizând metoda elementelor finite, la nivel micro- și mezomecanic a compozitelor cu țesături, incluzând aici stabilirea geometriei celulelor, parametri de modelarea și analiza comparativă a rezultatelor.

2. FORMAREA CLASEI DE MATERIALE COMPOZITE

2.1. Matricea polimerică

Matricea utilizată pentru a analiza influența fibrelor lungi asupra caracteristicilor mecanice ale compozitului, este o matrice termorigidă, o rășină epoxidică bicomponentă. În stare inițială, este o matrice lichidă, ușor de manevrat și de utilizat, marca EIPHEN [115]; este o rășină pentru impregnare, stratificare și lipire, care polimerizează la temperatura camerei, de minim 20°C. Matricea poate fi utilizată cu doi întăritori EIPHEN, cu timpi diferiți de polimerizare: EIPHEN DE 4025, cu timp mare de polimerizare și EIPHEN DE 4020, cu timp scurt de polimerizare. Ambele tipuri de întăritori asigură timp suficient până la perioada de gelificare a rășinii, pentru manevrare în cazul formării materialelor armate și respectiv, pentru a asigura dispersia aditivilor. Pentru toate materialele formate s-a folosit întăritorul EIPHEN DE 4020 pentru rășina epoxidică, cu timp mare de polimerizare.

Din datele prezentate de producător, caracteristicile matricei astfel rezultate sunt: polimerizare la temperatura camerei, foarte bună rezistență la umiditate și la acțiunea radiației ultraviolete, timp de gel variabil, cu o aderență bună la lemn, metale, sticlă, rezistență termică mai bună după tratamentul termic, aspect transparent, fără impurități, nelipicioasă.

Un element important pentru matricea polimerică utilizată în studiul proprietăților mecanice ale laminatelor armate cu fibră este tratamentul rășinii după polimerizare. Există un tratament recomandat de producător, care conferă rășinii polimerice proprietăți mecanice îmbunătățite [116,117,118].

Tratamentul impune parcurgerea mai multor etape:

1. După extragerea din matriță, după polimerizare, materialul format se lasă timp de 14 zile la temperatura camerei, pentru evaporarea solvenților din întăritor.
2. Materialului format i se aplică un tratament termic de menținere la 60°C timp de 8 ore.

3. Se aplică apoi un tratament termic la temperatura de 80°C, timp de 2 ore,
4. După ce materialul ajunge la temperatura camerei, se efectuează un alt tratament termic la temperatura 120°C, cu menținere timp de o oră.

După acest tratament termic, matricea ajunge la o polimerizare de 99%; un procent foarte mare duce la îmbunătățirea caracteristicilor materialului format.

2.2. Materialul ranforsant

2.2.1. Selectarea fibrelor

Fibrele utilizate în acest studiu de cercetare sunt fibrele de carbon, de sticlă și aramidice (figura 2.1). Aceste trei tipuri de fibre sunt cele mai utilizate în industria constructoare de mașini. Fibra de carbon se utilizează pentru rezistența mecanică bună, rezistență termică bună și pentru conductivitatea electrică foarte bună. Fibra aramidică este bună pentru absorbția șocurilor mecanice, iar fibra de sticlă este folosită în structuri de rezistență [119,120,121].

Aceste trei tipuri de fibre prezintă unele dezavantaje: obținerea fibrei de carbon este costisitoare, prelucrarea fibrei aramidice este dificilă, fibra de sticlă este dură și implică dificultăți postprelucrare. Existența acestor dezavantaje duce la creșterea prețului structurilor finite.

Caracteristicile fibrelor au fost determinate pentru că producătorul nu a oferit nici o proprietate a fibrelor achiziționate. Dimensiunile fibrelor și firelor au fost determinate prin microscopie optică, fiind considerată de autor o metodă nedestructivă adecvată [122].



Fig. 2.1 Fibrele utilizate: a. fibre de sticlă; b. fibre de carbon; c. fibre aramidice

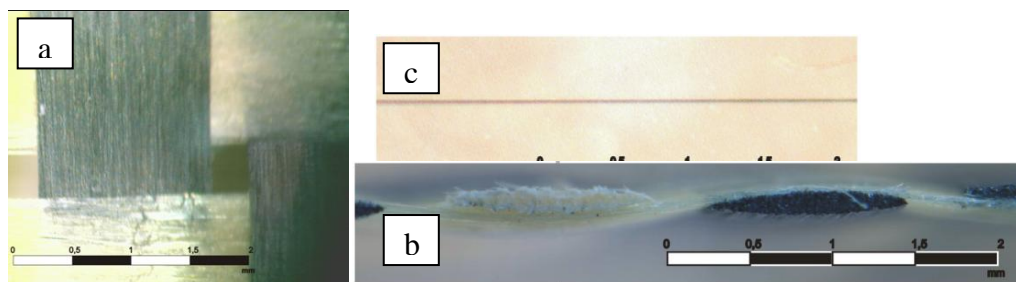


Fig. 2.2 Măsurarea nedestructivă a dimensiunilor fibrelor și firelor din carbon și aramidice

Din figura 2.2 s-au extras date dimensionale pentru fibre și țesături, pentru toate cele trei tipuri de fibre, prin metoda dimensionării unei imagini (pixel-mm). Această metodă este foarte des utilizată pentru măsurătorile non-contact. Un argument important în utilizarea acestei metode este instabilitatea dimensională a firelor și simplitatea procedurii. Există și alte metode mai avansate, cum ar fi măsurarea cu ultrasunete, prin analiză SEM, microscopie AFM, STM etc.

Compozitele cu țesături sunt formate din fire care conțin un număr fix de fibre continue pe lungimea firului. Distribuția fibrelor pe aria secțiunii unui fir poate fi sub formă de pătrat – distanța maximă între fibre și cu un număr minim de fibre pe aria secțiunii unui fir, sau sub formă hexagonală – distanță minimă între fibre și cu un număr maxim de fibre pe aria secțiunii unui fir. Aceste două tipuri de geometrii se consideră în cazul aranjării perfecte a

fibrelor în fir. În realitate, fibrele sunt aranjate aleatoriu în fir, aceste două geometrii sunt posibile pe unele zone din aria secțiunii sau există posibilitatea ca într-un fir să fie ambele tipuri de aranjamente ale fibrelor [123].

În cazul unui aranjament ideal, o formulă de calcul pentru numărul de fibre în fir este:

$$\int_{x=-\omega/2}^{x=\omega/2} V_f(x)h(x)dx = A_y \quad (2.1)$$

unde ω este grosimea firului, $V_f(x)$ este fracția volumică a distribuției firului, $h(x)$ este înălțimea firului, A_y este numărul de fibre pe aria secțiunii. În implementarea numerică a acestei relații, se consideră aria transversală ca fiind reprezentată de o polilinie și se calculează după următoarea relație:

$$\sum_{i=0}^{i=n-1} V_{f,i} \frac{h_i+h_{i+1}}{2} dx_i = A_y \quad (2.2)$$

Teoretic, numărul maxim al fibrelor pe aria secțiunii unui fir, este format din $\frac{\pi}{2\sqrt{3}} = 0,9069$ pentru împachetarea hexagonală, și pentru împachetarea pătrată este $\frac{\pi}{4} = 0,7854$, de aceea orice valoare calculată nu depășește valoarea 0,9069 pentru a realiza un model real.

2.2.2. Alegerea tipului împletituri

În acest studiu s-au utilizat două tipuri de împletituri pentru fibrele de carbon și pentru fibrele mixte.

Cea mai utilizată împletitură a firelor pentru materialele ranforsate este țesătura plan-simplă (figura 2.3 a). Acest tip de țesătură utilizează o alternanță simplă, fiecare fir de urzeală trece alternativ peste și pe sub fiecare fir de băătură. Orice tip de fir, alcătuit din orice tip de fibră, poate fi utilizat pentru o astfel de țesătură. Avantajele acestei țesături sunt stabilitatea dimensională și porozitatea medie. Printre dezavantaje se numără acoperirea slabă și nivelul înalt de încrețire al firelor, care provoacă valori relativ joase ale proprietăților mecanice comparativ cu alte țesături.

Un al doilea tip de împletitură utilizată în lucrare este țesătura plan-diagonală (figura 2.3 b). Două fire de urzeală se țes alternativ peste și pe dedesubtul a două fire de băătură, într-o secvență regulată și repetată, astfel încât să se obțină efectul vizual al unei linii diagonale drepte sau întrerupte, pe față sau chiar pe dosul țesăturii. Printre avantaje sunt încrețirea redusă, suprafața plană a materialului rezultat și proprietăți mecanice bune.

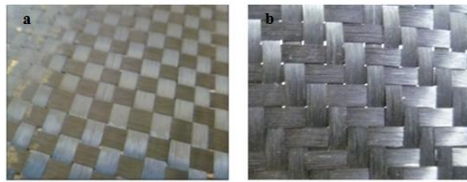


Fig. 2.3 Țesătură cu fibră de carbon:
a. țesătură plană-simplă; b. țesătură plan-diagonală

Acest tipuri de țesături s-au utilizat pentru fibrele de carbon și pentru împletitura mixtă. Pentru pânza formată din fibre de sticlă s-a utilizat numai o țesătură plan-simplă.

2.2.3. Tratamentul țesăturilor

Tratamentul țesăturilor este un proces esențial pentru îmbunătățirea aderenței matricei la materialul ranforsant.

Studiul a constatat în utilizarea a două tipuri de țesătură, cu două tipuri de tratamente pentru fiecare țesătură.

Primul tratament reprezintă o metodă utilizată pentru diminuarea concentrației solvenților recomandați de producători. Tratamentul se efectuează la temperatura camerei, de aproximativ de 20°-26°C, temperatură necesară pentru polimerizare.

Etapele tratamentului firelor pentru toate tipurile de țesături, sunt următoarele (figura 2.4):

- spălarea cu apă și detergent din abundență;
- clătirea cu apă până la înlăturarea completă a detergentului;
- tratarea cu soluție apoasă de 58% hipoclorit;
- clătirea cu apă;
- tratarea chimică cu soluție de NaOH, cu concentrația de 20%, pentru înlăturarea hipocloritului;
- clătirea cu apă;
- uscarea țesăturilor timp de 24 de ore în spațiu cu o temperatură medie de 25°C și bine ventilat;
- aplicarea, prin pulverizare, a unui strat controlat de rășină epoxidică cu nitrodiluant, în raport de 1:5;
- uscarea țesăturilor timp de 28 ore (până la evaporarea solvenților și polimerizarea rășinii epoxidice) [120].

După parcurgerea acestui proces tehnologic, țesăturile capătă caracteristici optime pentru a fi utilizate la formarea compozitelor. Unul dintre avantajele tratamentului aplicat, și cel mai important, este stabilitatea dimensională a firelor și a țesăturilor, lucru care permite ușurarea manipulării acestora (decuparea exactă la diferite unghiuri, fără deteriorarea structurilor țesute) și scurtarea timpului de formare [124].

În figura 2.5 sunt date imagini SEM ale fibrelor după diferite etape de tratament, aplicate țesăturilor.

Un al doilea tip de tratament are aceleași etape, dar cu o concentrație dublă a rășinii polimerizate (figura 2.6.1), pentru identificarea raportului optim de rășină utilizat pentru tratarea țesăturilor [125].

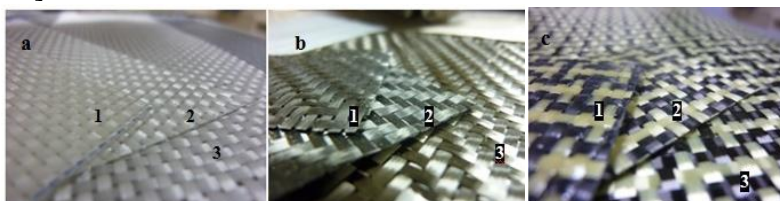


Fig. 2.4. Trei tipuri de tratamente aplicate țesăturilor de:

- a. fibra sticlă; b. fibră de carbon; c. fibră mixtă;
1. tratament chimic de oxidare și curățare a fibrelor cu un timp mare de tratare;
 2. tratament chimic de oxidare și curățare a fibrelor cu un timp mic de tratare;
 3. cu tratamentul oferit de producător

Țesăturile din figura 2.6 sunt cele trei tipuri de fibre alese pentru cercetare, cu aplicarea a unor tratamente pentru a fi prelucrate: 1. un tratament chimic de oxidare și de curățare a fibrelor, cu un timp de pulverizare mare; 2. un tratament chimic de oxidare și de curățare a fibrelor, cu un timp de pulverizare mic; 3. cu tratament recomandat și aplicat de producător.

Tratamentele 1 și 2 propuse de autor s-au făcut pe țesături livrate de producător cu tratamentul numărul 3.

2.3. Stabilirea unei metodologii originale de formare a materialului compozit

Pentru acest tip de matrice, cel mai răspândit mod de formare a materialelor ranforsate cu fibre lungi este impregnarea firelor cu rășină. Modul de impregnare poate fi diferit în funcție de mărimea și forma structurii.

În general, rășinile epoxidice au o aderență foarte bună la aproape orice tip de material. Din acest motiv, în prima etapă s-a utilizat un strat superficial de agent de demulare, substanță la care nu aderă rășina epoxidică EPIPHEN 4020, pe matrița de sticlă (figura 2.7) [126]. Ca material pentru matrița a fost aleasă sticlă, pentru proprietățile ei chimice și mecanice (nu intră în reacție cu substanțele active chimic, are deformări mici la presiuni relativ mari, este ușor de manevrat, are o calitate a suprafeței foarte bună, fără prelucrări prealabile) [127].

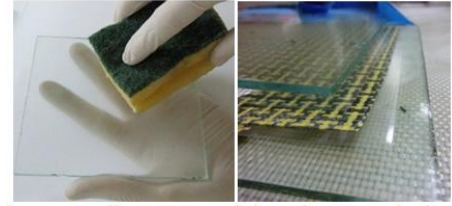


Fig. 2.5. Aplicarea agentului sau însesarea de demulare.

O altă modalitate de pregătire a matriței este folosirea foliilor de PET ca agent de demulare. Matrița epoxidică nu aderă la foliile PET. Foliile au o calitate a suprafeței foarte bună și o rigiditate suficientă pentru a menține forma dorită (figura 2.7).

2.4. Testarea la tracțiune a laminelor armate cu țesături

Testele au fost efectuate pe lamine ranforsate cu țesături. Epruvetele au fost tăiate la unghiul de 0° , 90° față de direcția țesăturii (figura 2.8). Epruvetele au fost tăiate și testate conform standardului la tracțiune SRENSR EN ISO 527-4 . Standardul stabilește condițiile de încercare pentru determinarea proprietăților la tracțiune ale materialelor plastice compozite armate cu fibre.

În urma obținerii compozitului laminat sau a laminelor pentru toate tipurile de țesătură, după un tratament termic impus de producător, s-au realizat epruvete conform standardului SR EN ISO 527-4 [128].

Testele au fost efectuate pe mașina de testare TESTOMETRIC 5K M350 (figura 2.9) și s-a utilizat softul WinTest Analysis din Laboratorul de Cercetare a Materialelor Polimerice, al Facultății de Mecanică din cadrul Universității „Dunărea de Jos” din Galați. Cu ajutorul lor se poate măsura deformația relativă și forța la care este supus materialul; cu ajutorul softului se pot obține și calcula direct unii parametri: deformația relativă, energia și forța la rupere, forța maximă, modulul lui Young la tracțiune și alți parametri [129].



Fig. 2.9. Mașina de testare mecanică universală Testometric 5k M350 din cadrul Laboratorului de Cercetare ale Materialelor Polimerice

Răspunsul depinde de raportul dintre urzeală și bățatură. Fenomenul a fost observat la nivelul microscopic al țesăturii, la comportamentul neliniar la tracțiune, dar acesta se datorează geometriei neliniare, care este amplificată de comprimarea firelor la scară microscopică.

2.5. Stabilirea tratamentului optim aplicat pe țesături

În urma prelucrării firelor, s-au extras foi de dimensiuni 200 mm x 280 mm pentru a le impregna în rășina polimerică și pentru a vedea metoda cea mai eficientă de prelucrare a țesăturilor.

După impregnarea țesăturii, s-au obținut lamine de grosimea împletiturii (conform tabelului 2.5). În urma tratamentului recomandat de producător pentru matricea utilizată, s-au decupat, cu ajutorul mașinii cu jet de apă, epruvete conform standardului SR EN ISO 527-4.

S-a observat o îmbunătățire a proprietăților mecanice pentru laminele cu țesătură tratată cu o concentrație mică de rășină în timpul prelucrării. Pentru laminele cu țesătură neprelucrată s-au întâmpinat dificultăți în menținerea aranjării firelor, ceea ce duce la rearanjarea firelor și apariția unor tensiuni de forfecare mai mari în zonele deteriorate (figura 2.11).

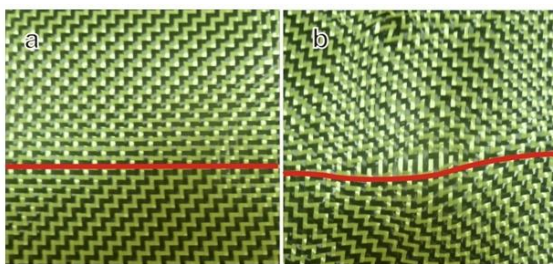


Fig. 2.11. Probleme întâmpinate în timpul turnării:

a) țesătură tratată după schema propusă în acest studiu; b) cu tratamentul oferit de producător.

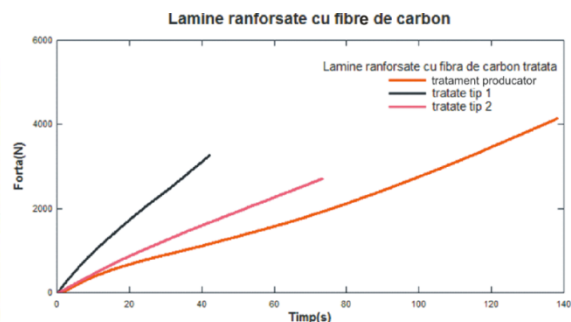


Fig. 2.12. Lamine ranforsate cu fibre de carbon cu diferite tratamente

Un alt fapt observat în timpul lucrului cu țesăturile este tăierea firelor. Metoda utilizată pentru tăiere este cu foarfecă mecanică. Fibrele fiind foarte rigide și într-un fir fiind aranjate minim 5000 fibre (pentru fibrele de sticlă), apar alunecări în zona tăieturii. Prin aplicarea unui strat superficial de rășină, se menține forma și geometria firelor.

Din figura 2.12, se observă o comportamentul epruvetelor în timpul aplicării unei forțe de tracțiune. Forța maximă obținută în urma testelor depășește 4 000N pentru tratamentul aplicat de producător, dar are o deformație mare. Celelalte două tipuri de tratamente au un răspuns liniar până la cedarea materialului, ceea ce demonstrează o aderență mai bună între matrice și fibre. Pentru tratamentul de tip 2, elasticitatea materialului este mai mare (panta curbei mai mică), dar rezistența la rupere scade.

În cazul în care se utilizează un tratament cu concentrație de rășină epoxidică mai mare, apare delaminarea stratului de matrice în timpul aplicării unei forțe de tracțiune și ceea ce duce la distrugerea matricei (figura 2.12).

Tratamentul de tip 1 este cel mai adecvat pentru continuarea studiului la nivel mezomecanic, chiar dacă țesătura netratată a avut un comportament mecanic mai bun, dar imprevizibil în urma turnării, iar alungirea mare a compozitului format duce la o aderență mică între matrice și țesătură, rezultând deci o incompatibilitate de a forma un material compozit eficient.

2.6. Concentrația componentelor

Un alt aspect important în studiul materialelor compozite îl reprezintă concentrația optimă dintre fibre și matrice, aceasta putându-se calcula cu ajutorul caracteristicilor fizico-mecanice pentru fiecare dintre componentele materialului compozit (cu regula amestecului) [130,131,132].

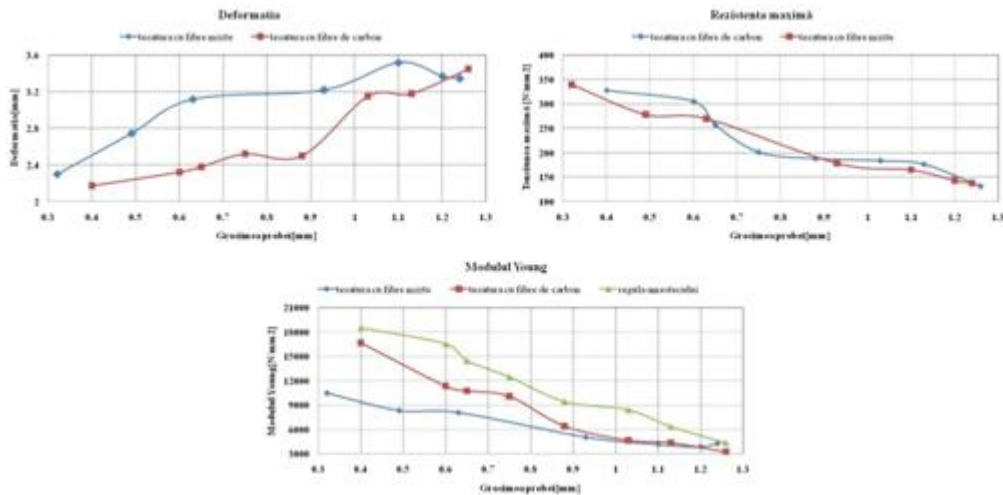


Fig. 2.14. Valorile medii ale proprietăților mecanice la tracțiune

Utilizând regula amestecului pentru materiale ranforsate cu țesătură, se observă un decalaj al valorilor modului de elasticitate longitudinal la tracțiune pe direcția urzelii, cauzat de apariția microfisurilor în matrice și apariția unei tensiuni de forfecare între matrice și fibră, în mod diferențiat, în funcție de natura firelor.

Creșterea grosimii laminei determină o mai mare deformație pentru laminele cu fibre mixte (cele aramidice fiind mai elastice). De la grosimi începând cu 0,8 – 1 mm, influența naturii fibrelor asupra deformației epruvetei se micșorează.

Rezistența la rupere scade odată cu creșterea grosimii epruvetei, indiferent de natura fibrelor.



Fig. 2.15. Fisurile în timpul testelor la tracțiune pentru compozitul ranforsat cu fibre de carbon, cu grosimea de 1,15 mm

De la grosimi de 0,9 mm influența naturii fibrelor nu se mai observă în mod evident ceea ce înseamnă că la grosimi mai mari ale laminei, matricea este cea care influențează puternic proprietățile mecanice ale laminei.

În urma cedării materialului compozit cu o fracție volumică mare a matricei, se observă fisurile în matrice și delaminarea firelor (figura 2.15).

Din evaluarea rezultatelor testelor, s-a constatat că cea mai eficientă concentrație a matricei epoxidice într-o lamină este pentru raportul de $V_m = 0.2$, rezultând pentru fibre $V_f = 0.8$. Este un raport optim pentru a obține proprietăți mecanice bune [133].

2.7. Comportamentul mecanic al laminelor

2.7.1. Metodologia de formare a probelor și parametrii de încercare la tracțiune

În urma rezultatelor obținute în cercetările anterioare [120,121,133], s-au stabilit următoarele aspecte de respectat pentru obținerea materialelor:

- fibrele se tratează conform tratamentului de tip1;
- obținerea unui raport optim între matrice și fibre.

În etapa următoare a studiului, formarea compozitului armat cu fibre s-a axat pe plăci cu dimensiunile 500 mm x 500 mm. Pentru realizarea compozitului s-au ales pentru matriță, plăci de sticlă de dimensiuni 600 mm x 600 mm; aceste plăci au fost acoperite cu un material de demulare pe ambele fețe ale matriței, în cazul surplusului de material, acesta fiind ușor de înlăturat. Mărimile plăcilor au fost alese pentru a nu influența formarea laminei.

Din aceste plăci s-au decupat epruvete conform standardului SR EN ISO 527-4, la diferite unghiuri ale țesăturii (figura 2.16). În urma optimizării aranjării epruvetelor pe placa formată, s-au stabilit următoarele unghiuri ale epruvetelor: 0°, 10°, 15°, 20°, 30°, 45° față de urzeală. Pentru fiecare unghi, s-au decupat câte 10 probe de testare pentru eliminarea erorilor de măsurare, caracteristică procedurii de măsurare și pentru estimarea cât mai reală a proprietăților mecanice [134].

Orientarea laminei în compozit are un rol prioritar asupra caracteristicilor mecanice ale compozitului ranforsat cu fibre lungi.

O fază premergătoare pentru această etapă de cercetare este stabilirea vitezei de testare la tracțiune.

În standardul SR EN ISO 527-4 este prezentată procedura de testare a epruvetelor. Viteza de testare recomandată este de 2 mm/min. Standardul se recomandă pentru lamine cu grosimi de peste 1mm, iar laminele formate în acest studiu au grosimi cuprinse între 0.25-0.45 mm, ceea ce necesită o etapă preliminară de stabilire a parametrilor de testare.

Matricea fiind un polimer termorigid și cu modul de elasticitate longitudinal mic, se recomandă o viteză de testare mică, de 0.1-1 mm/min. Țesătura fiind un material cu modul de elasticitate longitudinal mare și cu o deformare relativă mică, se recomandă o viteză de testare cuprinsă între 2-15 mm/min [135].

Din multitudinea de standarde la tracțiune studiate, a rezultat o variație mare de viteze de testare a laminelor ranforsate cu fibre și s-au stabilit inițial următoarele viteze de testare de: 2 mm/min, 4 mm/min, 5 mm/min, 10 mm/min și 15 mm/min. Testele s-au efectuat pe epruvete conform standardului SR EN ISO 527-4. Țesăturile utilizate pentru această cercetare sunt cu fibre de carbon și mixte (aramidice-carbon) cu împletitură plană-simplă [136].

Din figura 2.17 se observă o scădere a valorilor tensiunii maxime la tracțiune obținute pentru epruvetele cu unghiul de aplicare a forței de 20°, pentru ambele țesături utilizate.

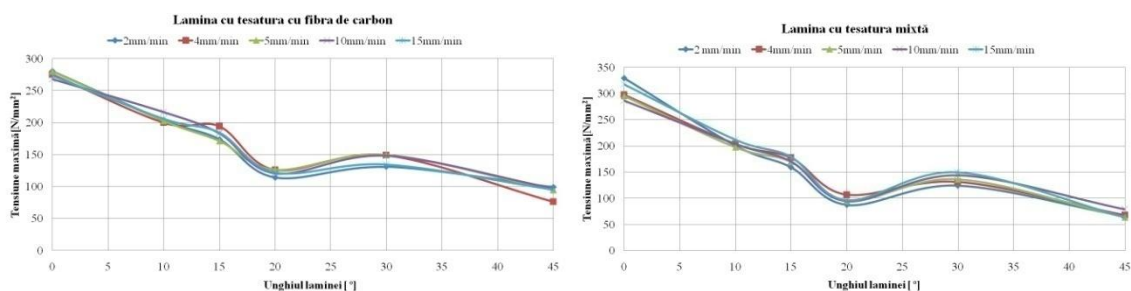


Fig. 2.12. Dependența tensiunii maxime de unghiul de acționare a forței, pentru laminele cu țesătură de carbon și țesătură mixtă

În urma studiului privind influența vitezei de acționare a forței pe lamină, s-a stabilit viteza mai mare decât cea recomandată în standardul SR EN ISO 527-4, de 5 mm/min. Pentru laminele formate cu rășină epoxidică ranforsată cu fibre lungi de carbon și aramidice, se poate utiliza orice viteză până la 15 mm/min, pentru că nu influențează semnificativ caracteristicile mecanice (figura 2.12).

2.7.2. O soluție originală de aditivare cu pulberi a matricei epoxidice

Pulberile sunt tot mai utilizate în materialele compozite. În funcție de natura și forma pulberilor utilizate, se pot îmbunătăți proprietățile fizice, mecanice și tribologice ale

compozitelor. În general, pulberile scad caracteristicile mecanice din cauza distanțării și întreruperii lanțurilor legăturilor polimerice [137].

Această caracterizare a pulberilor nu a fost determinată și pentru materialele hibride, când formarea se face în două etape, prima fiind aditivarea matricei cu pulberi, iar apoi, în materialul astfel, format se înserează fibre lungi [138].

Pentru formarea unui material multifuncțional cu diverse caracteristici, s-au utilizat următoarele pulberi: argila și talcul.

Argila și talcul conduc la obținerea unui material care se comportă ca un lichid foarte vâscos, deoarece zonele din jurul particulelor de argilă și talc sunt interconectate prin legături polimerice [129].

Dispersarea acestora în rășina bicomponentă se efectuează cu un mixer mecanic timp de 5 minute, și urmată de introducerea pulberilor în prepolimer. Ordinea de introducere a pulberilor nu influențează caracteristicile materialului compozit [124].

Concentrațiile sunt fracțiile masice ale argilei și respectiv talcului în matrice. S-au utilizat fracțiile masice pentru că tehnologic este mai ușor de controlat masa pulberilor pentru a fi apoi calculate ca fracțiile volumice.

Matricea aditivată s-a format prin utilizarea unui mixer mecanic pentru omogenizarea aditivilor în matrice. Prin utilizarea unei matrițe cu garnitură de cauciuc, cu dimensiunile 180 mm x 180 mm x 4.5 mm (figura 2.18), decupată pe interior, s-au format plăci de dimensiuni 150 mm x 150 mm pentru testele de determinare a caracteristicilor mecanice ale matricei aditate.

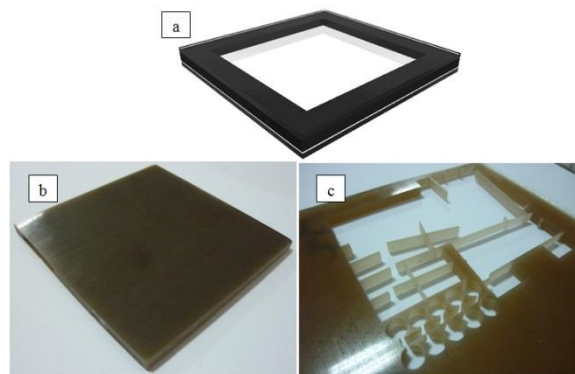


Fig. 2.18. Formarea compozitului aditivat cu pulberi

a. Matrița utilizată pentru matricea aditivată; b. materialul extras din matriță; c. tăierea epruvetelor pentru mai multe tipuri de teste

Pentru testele mecanice, s-au decupat probe cu mașina de debitat cu jet de apă WJM 4000, cu un regim de tăiere de 10 mm/min, fără utilizarea de pulbere abrazivă. S-a ales mașina de debitat cu jet de apă pentru evitarea supraîncălzirii materialului. Dimensiunile matriței au fost selectate pentru a extrage din același material, epruvete pentru mai multe tipuri de teste, caracteristice pentru determinarea proprietăților mecanice, fizice și tribologice [139,140].

Epruvetele pentru testele de încovoiere în trei puncte s-au realizat conform standardului SR EN ISO 14125, dar pot fi utilizate și pentru determinarea altor caracteristici ale compozitului [139,140]. S-au efectuat cinci teste pentru fiecare concentrație, pentru evaluarea proprietăților materialului.

Materialul compozit aditivat cu argilă și talc a fost testat cu o viteză de 0.5 mm/min, viteză recomandată pentru materialele rigide și casante [141]. În graficul din figura 2.19 a, s-a observat un comportament uniform și stabil, din punct de vedere mecanic, până la cedarea materialului. Aditivarea matricei epoxidice cu pulberi de talc și argilă scade proprietățile mecanice ale materialului, dar îmbunătățește alte caracteristici (fizice și tribologice) [122]. Și pentru alte tipuri de pulberi (amidon, titañați, ferită etc.), utilizate pentru a îmbunătăți

proprietățile fizice și tribologice, s-au observat scăderi ale rezistenței mecanice a materialului [135].

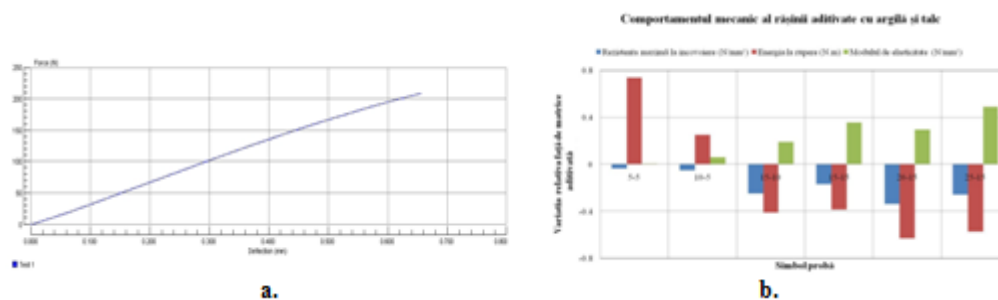


Fig. 2.19. Comportamentul mecanic la încovoiere în trei puncte al rășinii aditivate cu argilă și talc: a. diagrama forță-deformație pentru materialul 05-05; b. proprietățile mecanice la încovoiere în trei puncte ale compozitului

2.8. Determinarea proprietăților mecanice pentru clasa de compozite hibride

Pentru studiul proprietăților mecanice ale matricei aditivate s-au utilizat aceleași concentrații pentru a arma în materialul aditivat cu pulberi, fibrele lungi de carbon și cele aramidice – rezultatul fiind un compozit hibrid. Acest studiu s-a efectuat cu scopul obținerii unui material hibrid utilizat în mai multe ramuri ale industriei [142].

În figura 2.19 b, se observă că rezistența mecanică la încovoiere scade o dată cu creșterea concentrației de aditivi, iar modulul de elasticitate la încovoiere în trei puncte crește, rezultând o rigiditate mai mare a materialului compozit format. Concentrațiile de pulberi au o influență diversă asupra energiei la rupere a compozitelor, la concentrații mici (pentru materialele 05_05 și 10_05), energia la rupere crește față de valoarea de referință impusă (variația relativă față de matricea neaditivată), iar pentru concentrații mai mari, energia scade direct proporțional cu variația concentrației de pulberi.

Pentru testele mecanice de tracțiune s-au utilizat epruvete conform standardului SR EN ISO 527-4, laminele fiind supuse unui tratament termic recomandat de producătorul de rășină epoxidică pentru a ajunge la faza superioară de polimerizare. Conform etapei premergătoare s-a stabilit, viteza de testare a epruvetelor la valoarea de 5 mm/min. Unghiul de acțiune a forței față de țesătură este 0°. Rezultatele sunt reprezentate în următoarele grafice (figurile 2.20 și 2.21).

Din punct de vedere mecanic, matricea aditivată cu pulbere de argilă și talc este mai slabă la testele de încovoiere în trei puncte (figura 2.19). Testele de tracțiune pentru laminele aditivate cu pulberi au fost greu de realizat, materialul fiind casant iar pretensiunile la prinderea în bacuri duc la apariția microfisurilor în epruvete și cedarea materialului înainte aplicării unei sarcini.

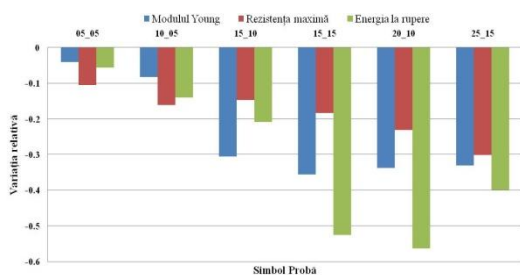


Fig. 2.20 Caracteristicile mecanice la tracțiune al laminelor aditivate cu pulberi și țesătură mixtă

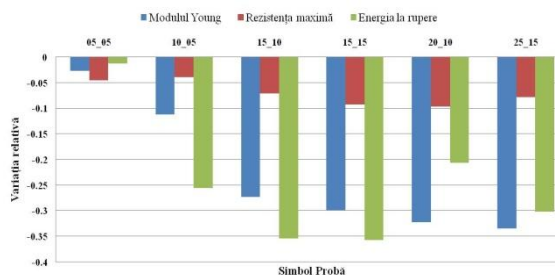


Fig. 2.21 Comportamentul mecanic la tracțiune al laminelor aditivate cu pulberi și țesătură cu fibre de carbon

Prin inserarea țesăturilor în matricea aditivată, rigiditatea materialului scade și materialul devine mult mai flexibil. La aplicarea unei forțe pe direcția fibrelor s-au obținut proprietățile mecanice ale materialelor formate, prezentate în figurile 2.20 și 2.21. Proprietățile măsurate, modulul de elasticitate longitudinal, rezistența la rupere, energia la rupere, au o tendință descrescătoare a valorilor față de cele ale rășinii neaditivate. Valorile minime s-au înregistrat pentru concentrațiile medii de 15_10, 15_15, valorile maxime s-au înregistrat pentru epruvetele cu concentrații mici, de 05_05. Rezultatele sunt foarte apropiate de cele obținute pentru compozitele neaditivate. Prin urmare, valorile experimentale pentru matricea aditivată cu concentrații mici sunt cele mai recomandate pentru a utiliza o astfel de matrice, doar pentru a îmbunătăți alte proprietăți ale materialului (fizice, tribologice etc.).

2.8.1 Comportamentul mecanic al materialului compozit ranforsat cu țesături la diferite unghiuri față de forța aplicată

Pentru a testa materialul hibrid format din punct de vedere mecanic, și a-l utiliza în industrie, este nevoie de determinarea proprietăților laminelor la diferite unghiuri de acționare a forței aplicate. Următoarele grafice vor prezenta o variație a proprietăților mecanice în funcție de unghiul de testare dintre fibre și direcția forței. Unghiul de tăiere se stabilește în funcție de urzeală țesăturii.

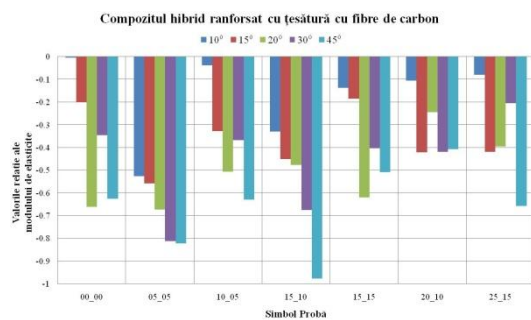


Fig. 2.22. Comportamentul mecanic la tracțiune al laminelor aditivate cu pulberi și țesătură cu fibre de carbon

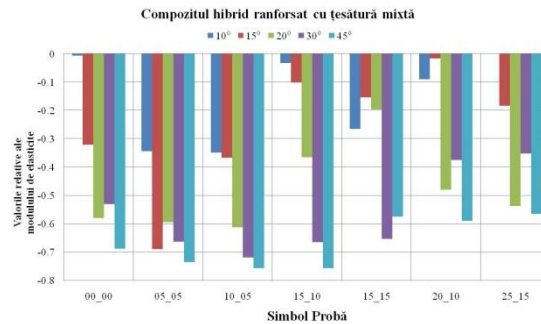


Fig. 2.22. Comportamentul mecanic la tracțiune al laminelor aditivate cu pulberi și țesătură mixtă

După cum se observă din figura 2.22, rezultatele obținute în urma testelor și valorile relative ale modul de elasticitate longitudinal pentru testele la tracțiune, depind de concentrația pulberilor dar și de orientarea fibrelor față de direcția forței, referința fiind considerată pentru laminele tăiate la unghiul 0° față de urzeală. Modulul lui Young este descrescător, dacă se modifică unghiul de acționare a forței. Pentru fibrele de carbon, la unghiul de 10° , variația este mică. O variație relativ mare o prezintă epruvetele care depășesc unghiul de 15° . Un alt aspect interesant pentru rezultatele obținute pentru modulul de elasticitate longitudinal este vizibil la unghiul de 20° ; acesta este un unghi critic pentru toate laminele testate (figura 2.22). Pentru acest unghi, variația depășește chiar și pe cea a caracteristicii pentru unghiul 45° , iar aceasta se datorează modului de aranjare a fibrelor în compozit. Din punct de vedere mecanic, unghiul de 45° este un unghi critic pentru materialele compozite ranforsate cu țesătură cu fibre de carbon.

Se observă că variația proprietăților mecanice este în funcție de concentrația pulberilor. Valorile relative ale modulului de elasticitate longitudinal pentru țesăturile carbon-aramidice sunt reprezentative pentru concentrațiile mici, pentru epruvetele 05_05 și 10_05. În cazul țesăturilor cu fibre de carbon, valorile variază mai mult în funcție de unghiul de acționare a forței aplicate.

Unghiul țesăturii inserate în compozit influențează semnificativ proprietățile mecanice ale materialului. Inserarea țesăturii sub un anumit unghi scade caracteristicile mecanice ale compozitului format din pulberi și țesătură, aderența dintre țesătură și matricea aditivată fiind mult mai mică datorită pulberilor.

Rezistența maximă la tracțiune se calculează în funcție de forța maximă și aria secțiunii inițiale a epruvetei. După cum s-a specificat în studiile anterioare [120, 121], în cazul compozitului ranforsat cu fibre, grosimea laminei este un element esențial pentru rezistența mecanică a compozitului stratificat (cu mai multe lamine). Grosimea compozitului format nu trebuie să depășească cu mai mult de 0,01 mm grosimea țesăturilor. Aceasta se poate realiza prin presarea matritelor sub o anumită forță, astfel încât să nu se modifice grosimea firelor. Forța se poate determina din testele de comprimare a țesăturilor utilizate în acest studiu.

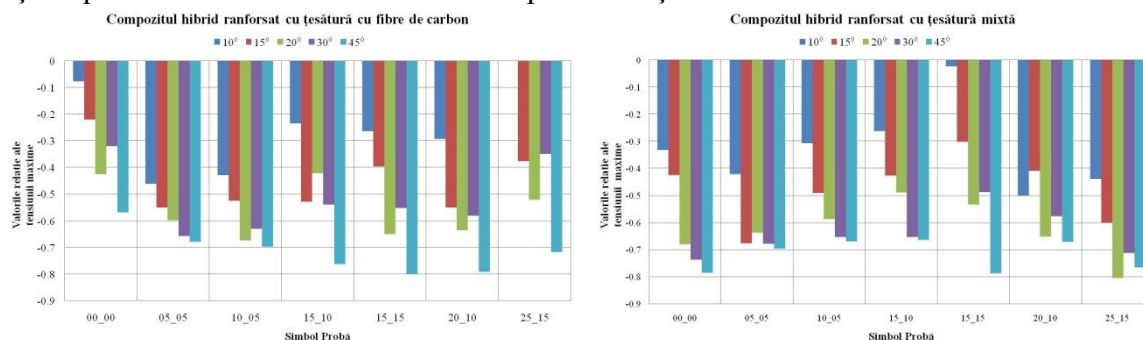


Fig. 2.23. Comportamentul mecanic la tracțiune al laminelor aditivate cu pulberi și țesătură

Valorile relative calculate în urma testelor la tracțiune pentru lamine aditivate cu pulberi și ranforsate cu fibre sunt reprezentate în figura 2.23. Unghiurile de aplicare a forței la 20° față de urzeală arată că rezistența mecanică este mai mică din cauza rearanjării firelor în compozit.

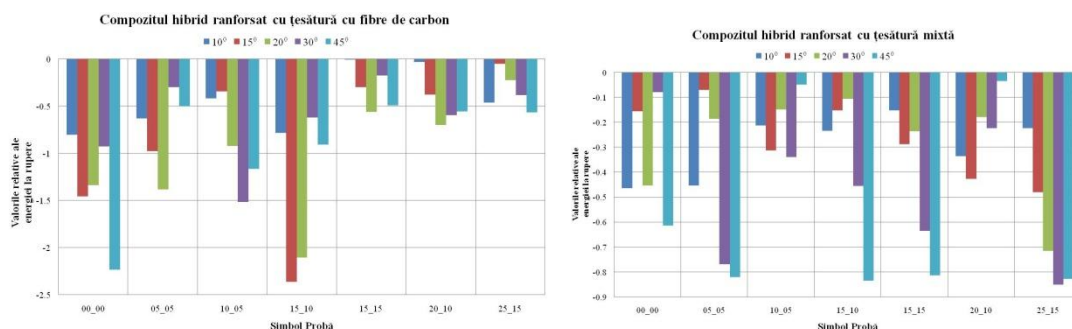


Fig. 2.24 Comportamentul mecanic la tracțiune al laminelor aditivate cu pulberi și fibre lungi

Energia la rupere la tracțiune are o variație relativă mai mică pentru alte unghiuri diferite de 0°, o variație mai mare fiind pentru concentrațiile mici ale pulberilor, deoarece impune materialului o elasticitate mai mică, matricea aditivată fiind mai rigidă.

Valorile obținute pentru încercările la tracțiune ale laminelor hibride aditivate cu pulberi și ranforsate cu țesături se pot compara cu cele calculate în ecuațiile matematice. Relațiile de calcul matematic propuse pentru studiul laminatelor sunt prezentate în capitolul anterior al lucrării.

Calculul este pentru materialele compozite ranforsate cu țesături. Diferența dintre valorile obținute pentru model și cele din testele experimentale efectuate este determinată de erorile de măsurare și din faptul că formulele de calcul matematic sunt pentru materiale perfect elastice. Aceste relații de calcul matematic poate fi folosite pentru orice tip și oricare orientare a laminei utilizate.

2.9. Laminele ranforsate cu fibre de sticlă

Țesătura cu fibre de sticlă este cu împletitură plan-simplă. Fibrele de sticlă sunt un element important în rezistența mecanică a structurilor compozite [143]. Din punct de vedere economic, fibrele de sticlă sunt ușor de obținut și de prelucrat. Sticla este un material inert care poate fi utilizat pentru construcția recipientelor folosite la depozitarea materialelor periculoase.

Fibrele de sticlă au o rezistență mare la tracțiune, rezistență bună la radiații, sunt rezistente la agenți chimici, nu sunt toxice, iar ciupercile și bacteriile nu le degradează, au o mai bună capacitate de izolare electrică și termică.

Materialul fiind inert, cea mai mare problemă este aderența dintre matrice și fibrele de sticlă în materialul compozit. O soluție a acestei probleme o reprezintă formarea fibrelor cu diametrul mic și cu o distanță mare între fibre pentru pătrunderea matricei între fibrele utilizate.

Laminele s-au format prin decuparea unui eșantion cu aria de 180 mm x 260 mm din țesătura tratată, la diferite unghiuri față de urzeală. Pentru ușurința tăierii s-au utilizat echere cu unghiuri de 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 90° (figura 2.28), pentru care s-au format următoarele notații: $s_0 = 0^\circ, \dots, s_{90} = 90^\circ$.

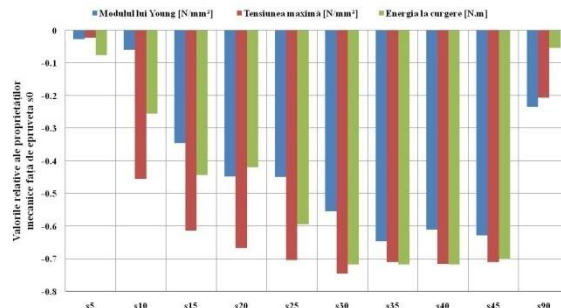


Fig. 2.28. Valorile relative ale proprietăților compozitului aditivat cu fibră de sticlă

Matrița utilizată este formată din două plăci de sticlă, de dimensiuni 200 mm x 270 mm, iar ca agent de demulare s-a utilizat o folie de PET. După formarea laminelor, acestea s-au supus la un tratament termic pentru polimerizarea totală a matricei utilizate, prezentat în subcapitolul 1.2. După tratamentul termic, din plăcile formate s-au decupat și testat epruvete conform standardului SR EN ISO 527-4.

Matricea utilizată pentru materialul compozit face parte din clasa rășinilor epoxidice EPIPHEN 4020, rășină bicomponentă, cu timp de polimerizare de 24 ore.

Din figura 2.28 se observă că valorile relative ale tensiunii maxime pentru epruvetele cu aplicare a forței la unghiuri mici, au valori apropiate de epruvetele testate la unghiul de 0° de aplicare a forței față de urzeală. O variație mai mare o au laminele tăiate la unghiuri de peste 15°. O explicație elementară a rezistenței mecanice la tracțiune, este că dacă firele lungi sunt prinse în ambele bacuri ale mașinii de testat, atunci au o rezistență mecanică bună, iar cedarea materialului ranforsat se efectuează în aceeași zonă ca și pentru materialele testate cu unghiuri mai mari.

Valorile relative ale rezultatelor obținute sunt calculate în funcție de epruveta s_0 . Caracteristicile mecanice au fost obținute experimental conform standardului SR EN ISO 527-4.

3.DETERMINAREA CARACTERISTICELOR MECANICE ALE COMPOZITELOR RANFORSATE CU ȚESĂTURĂ PLAN-DIAGONALĂ

3.1. Stabilirea parametrilor de testare pentru lamine formate pentru acest studiu de cercetare

În urma concluziilor formulate după o serie de teste mecanice efectuate pe lamine ranforsate cu fibre lungi, au fost stabilite etapele de formare pentru compozitele laminate și au fost determinate proprietăților mecanice [115,120].

Din bibliografia studiată [54,77], țesăturile plan-simple sunt cele mai utilizate țesături în industria constructoare de mașini. Pentru o rezistență mecanică mai bună a materialelor ranforsate cu fibre lungi se folosesc țesăturile plan-diagonale. În împletitura plan-diagonală, la aplicarea unei forțe de tracțiune, apar tensiuni tangențiale și momente parazite mai mici față de cele caracteristice unei țesături simple, la care unghiurile dintre fibre sunt mai mari.

De aceea, pentru următoarele materiale, s-au utilizat țesături diagonale mixte (fibre de carbon și aramidice) și cu fibre de carbon. Procedura de formare este asemănătoare cu cea prezentată în primele etape ale acestui studiu:

- pregătirea matrițelor (180 mm x 260 mm) mai mici pentru un control mai bun asupra țesăturii; ca material de demulare s-a utilizat folie PET;
- țesătura a fost tratată conform tratamentului de tip1;
- țesătura a fost tăiată direct la unghiul dorit pentru a micșora volumul de material utilizat;
- amestecarea rășinii bicomponente;
- țesătura este așezată în matrice cu rășina epoxidică;
- închiderea matriței;
- laminele au fost turnate în același timp pentru toate unghiurile utilizate pentru a nu lua în considerare mediul în care au fost formate.

Din țesătura tratată s-au extras lamine cu următoarele unghiuri 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 90° față de urzeala țesăturii epruvetei, care va fi și direcția de aplicare a forței de tracțiune [123]. Unghiurile au fost alese pentru a trece în revistă o gamă de solicitări, caracteristice aplicațiilor cât mai diverse din industrie. După ce s-au stabilit unghiurile de testare ale laminelor, a urmat etapa de formare a materialului. Lamina a fost formată în matriță de sticlă, de dimensiuni 200 mm x 270 mm. Ca agent de demulare s-a utilizat folie de PET, pentru a facilita extragerea laminei. După o polimerizare completă (prin utilizarea unui tratament termic recomandat de producătorul de rășină epoxidică), s-au extras epruvete conform standardului SR EN ISO 527-4 (figura 3.1). Testele au fost efectuate la o viteză de 1 mm/min.

Deoarece materialele formate au grosimi sub un milimetru, se utilizează taloane (figura 3.1) pentru a asigura transmiterea uniformă a încărcării în zona de testare, evitând concentrarea tensiunilor și apariția momentelor și tensiunilor de torsiune și forfecare între epruvetă și bacurile mașinii de testare [123,128]. Pentru taloanele din zona de prindere în bacuri, s-au utilizat aceleași materiale compozite pentru evitarea alunecărilor sau a ruperii în zona bacurilor [127].

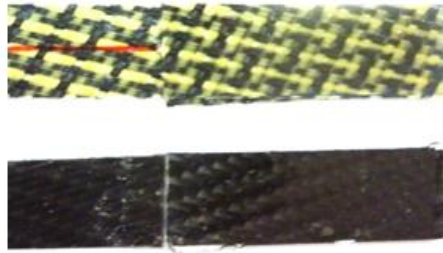


Fig. 3.1. Zona de prindere a epruvetelor

3.2. Calculul coeficientului lui Poisson

Pentru a caracteriza un material din punct de vedere mecanic este necesar să se cunoască minim două caracteristici (modulul de elasticitate și coeficientul lui Poisson). Cu aceste două caracteristici se pot obține apoi modulul de forfecare și modulul de elasticitate la răsucire [144].

Mașina de testare Testometric 5k M350 utilizată nu oferă posibilitatea calculării coeficientului lui Poisson.

Pentru a obține valori ale coeficientului lui Poisson pentru un material anizotrop din testele de tracțiune, se folosește tehnica tensometriei rezistive, prin aplicarea unor traductoare pe direcțiile yx , xy , xz , zx , yz , zy . La aplicarea traductorilor rezistivi se utilizează un adeziv care poate să introducă erori de măsurare în timpul testelor. O altă metodă de a determina coeficientul lui Poisson constă în măsurarea noncontact a variației distanței între două puncte (de exemplu, ARAMIS – un dispozitiv dedicat măsurării noncontact a deplasărilor).

Metoda folosită în acest studiu este similară dispozitivului ARAMIS, cu măsurarea noncontact a deformațiilor unui material.

Din punct de vedere funcțional, dispozitivul este format dintr-o cameră foto care înregistrează o succesiune de imagini pe durata testelor, cu o anumită frecvență (cadre/secunde). Cu ajutorul softului dedicat, se analizează deplasarea punctelor selectate inițial de utilizator. Cu ajutorul taloanelor de calibrare, pixelii înregistrați de la camera de fotografiat, prin calcule matematice, se transformă în unități de măsură a distanței (de exemplu, $100 \text{ px}=1 \text{ mm}$). Precizia de măsurare este în funcție de sensibilitatea senzorului camerei digitale utilizate.

Prima etapă este selectarea camerei digitale cu o rezoluție suficient de bună pentru obținerea raportului minim de $1 \text{ px}=1 \mu\text{m}$ (la distanța de focalizare dintre obiect și camera de 20 cm). Camera utilizată este o cameră digitală Canon A570IS, cu o rezoluție maximă de 7.2MP. Aceasta oferă o imagine de $3072 \times 2304 \text{ px}$. Prin calibrare se obține o rezoluție de $1 \text{ px}=2 \mu\text{m}$. Pentru a calibra camera se utilizează distanța focală a camerei și distanța dintre epruvetă și lentilele camerei, sau se poate utiliza un calibru (o referință care se află la aceeași distanță focală. Utilizarea unei referințe a fost anulată pentru evitarea erorilor de măsurare și de calcul care ar fi induse de această referință. Coeficientul lui Poisson este un raport între două deformații. Ca utilizare a unității de deplasarea punctelor pe imaginile primite sunt pixelii.

S-ar fi putut lucra și cu o cameră video și să se extragă imagini din film, dar timpul de testare a unei epruvete ar fi de peste 20 minute, ceea ce ar însemna o cantitate mare de informație inutilă. Producătorul Canon oferă un soft îmbunătățit al aparatului (CHDK) pentru a utiliza pseudocodul și pentru a genera o secvență automată de instrucțiuni [145].

S-a stabilit un număr maxim de imagini pentru care aparatul să execute linia de secvențe și să salveze imaginile. Intervalul pentru efectuarea unei fotografii este setat la 5 secunde, astfel camera are suficient timp pentru a executa următoarea secvență de instrucțiuni. Programul a fost efectuat în limbajul de programare uBasic. Salvarea programului se efectuează cu numele „calcul coeficient POISSON”.

Testele mecanice au fost efectuate pe mașina de testare mecanică Testometric 5k 340M de la Laboratorul de Cercetare Materiale Polimerice – LCMP din cadrul Facultății de Mecanică, din Universitatea ”Dunărea de Jos” din Galați. Epruvetele au fost decupate cu ajutorul mașinii de debitat cu apă, WJM 4000, conform standardului SR EN ISO 527-4 . Parametrii de testare sunt modificați pentru a surprinde momentul cât mai apropiat de cedarea materialului sau momentul din zona elastică a curbei tensiune-deformație a compozitului. Timpul de fotografiere setat în aparatul foto este de o fotografie la fiecare 5 secunde. Din acest motiv s-a schimbat viteza de testare la tracțiune de la 5 mm/min, la o viteză de 1 mm/min. Viteza mai mică de testare asigură o calitate a măsurătorilor mult mai bună. De asemenea, viteza mică de testare acordă fibrelor un timp suficient pentru a se rearanja în compozit la nivel microscopic.

Direcția de cedare a laminei face un unghi θ' cu direcția forței, apropiat ca valoare de unghiul θ (unghiul între firele laminei și direcția forței de aplicare a forței).

Timpul pentru zona elastică este calculat din curbele obținute din datele înregistrate de mașina de testare la tracțiune (figura 3.2).

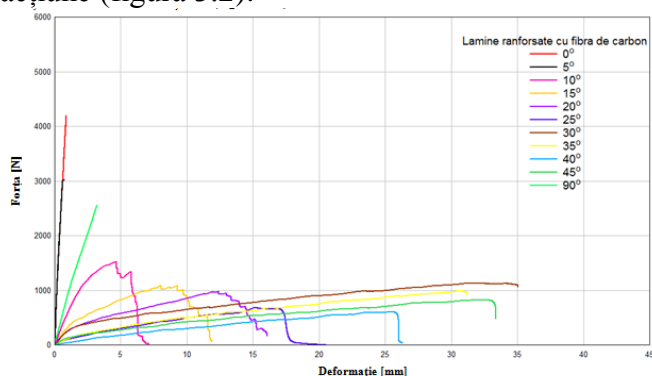


Fig. 3.2. Curbele testelor laminelor ranforsate cu țesătură plan-diagonală din fibre de carbon

Stabilirea parametrilor de testare și utilizarea unei metode de măsurare noncontact permit realizarea unor măsurători din care rezultă o caracterizare mai bună a compozitelor din punct de vedere mecanic.

Analiza caracteristicilor mecanice ale materialelor compozite s-a efectuat pentru fiecare tip de țesătură în parte. Rezultatele obținute sunt utile pentru comparația laminelor formate din aceleași tipuri de țesături sau din țesături diferite.

3.3 Testarea laminelor ranforsate cu țesătură plan-diagonală, cu fibre de carbon

Din graficul prezentat în figura 3.3, se observă variația coeficientului lui Poisson în funcție de unghiul la care este decupată lamina. Cea mai mare valoare a coeficientului apare pentru unghiul 20° , de 0,49. Pentru aceste condiții de poziționare a compozitului față de direcția aplicare a forței de tracțiune apar efecte de margine care distorsionează rezultatele de aceea trebuie interpretate cu atenție. Această contracție mare se poate explica prin micro-rearanjarea țesăturii în compozit față de direcția forței de aplicare. Firele din țesătură sunt aranjate inițial perpendicular unele față de altele, unghiurile 20° și -20° sunt unghiurile la care sunt așezate firele în compozit față de direcția forței, firele cu unghiul 20° , permit o variație mare a contracției din cauza firelor așezate la -20° care au ca efect restructurarea țesăturii în compozit prin modificarea unghiului. Acest studiu poate fi continuat pentru a diminua efectele de margine.

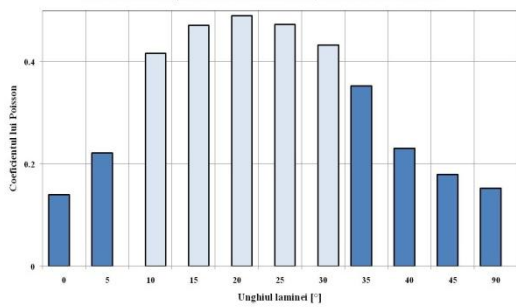


Fig. 3.3. Coeficientul Poisson pentru laminele ranforsate cu țesătură cu fibre de carbon.

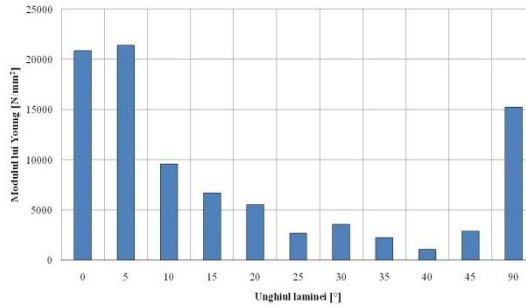


Fig. 3.4. Modulul Young pentru laminele ranforsate cu țesătură de carbon.

Valoarea mare a coeficientului lui Poisson în zona $\theta = 10^\circ - 30^\circ$ are două cauze:

- deformarea matricei;
- rearanjarea fibrelor (aceasta predomină prin apariția golurilor și imperfecțiunilor în interiorul firelor).

Un alt aspect reprezentativ din punct de vedere al măsurării coeficientului lui Poisson, îl reprezintă unghiul de 5° , pentru care s-a obținut o contracție mică apropiată de unghiurile 0° , 90° (unghiuri considerate de referință). În cazul laminelor cu unghiul 5° , apare un proces invers decât pentru probele cu unghiul 20° , în cazul epruvetelor cu unghiul de 5° de aplicarea forței, sunt direct implicate doar 4 fire în ambele bacuri ale mașinii de testat. Ele au o tendință de forfecare și de rearanjare a firelor care nu sunt prinse în bacuri. Firele „scurte” ale bătaii au o tendință de păstrare a dimensiunilor inițiale, ceea ce are ca rezultat un coeficient similar pentru materialele de bază (fibrele și matricea epoxidică utilizată) ale materialului compozit.

Valorile din figura 3.4 sunt mediile aritmetice ale valorilor obținute pentru un set de șapte încercări pe epruvete obținute din același material, cu condiții identice de testare.

Modulul lui Young este o caracteristică mecanică esențială în studiul proprietăților mecanice. Pentru materialele formate, valorile experimentale ale modulului de elasticitate sunt prezentate în figura 3.4.

Din rezultatele obținute în urma testelor de tracțiune a laminelor ranforsate cu fibre lungi de carbon, modulul de elasticitate longitudinal, E , variază invers proporțional cu unghiul de acțiune a forței față de urzeală. Valorile lui E , pentru laminele cu un unghi mare (25° , 30° , 35° , 45°) sunt foarte mici față de cele obținute pentru unghiul de referință (unghiul 0°) [142].

Valorile reprezentative pentru lamina cu unghiul 5° sunt mai mari decât pentru laminele cu unghiul 0° și 90° , datorită orientării dintre cele două direcții ale firelor (urzeală și bătaia țesăturii). Unghiurile de variație a celor două fire perpendiculare sunt de 5° , respectiv -5° și permit o rearanjare a țesăturilor din compozit, astfel încât firele să formeze o îmbinare cu o elasticitate mai mare.

Tensiunea la rupere la tracțiune a laminelor ranforsate cu fibre lungi de carbon este prezentată în figura 3.5. Similar cazului pentru modul de elasticitate longitudinal, unghiurile cu o rezistență mare sunt laminele cu unghiurile 0° , 5° , 90° , aceste trei lamine au fire direct implicate în preluarea sarcinii aplicate pe ambele bacuri ale mașinii de testare. Pentru celelalte unghiuri, variația este invers proporțională cu valoarea unghiului la care este testată lamina. Pentru unghiurile mari, materialul se comportă similar la tracțiune, iar pentru unghiurile $10^\circ - 45^\circ$, tensiunile au valori foarte apropiate, indiferent de unghiul de acțiune.

Din punct de vedere constructiv laminele cu unghiurile mai mari de 10° au tensiunile direct aplicate pe matrice, din cauza firelor din epruvete, fibrele având o influență mai mică asupra variației forței longitudinale. Variația limitei la curgere, care se poate extrage din rezultatele oferite de mașina de testare mecanică, este tensiunea la curgere a materialului compozit format prin raportul dintre forța la curgere și aria suprafeței inițiale. Tensiunea în

zona de curgere este invers proporțională față de unghiul de acționare al forței pe țesătură [127].

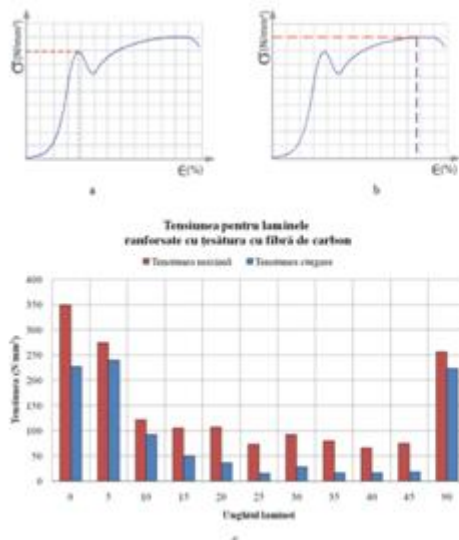


Fig. 3.5. Tensiunea pentru testele la tracțiune: a. calculul tensiunii la curgere; b. calculul tensiunii la rupere; c. tensiunea pentru laminele ranforsate.

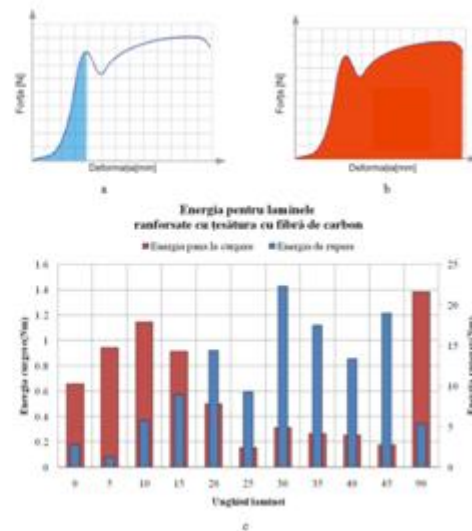


Fig. 3.6 Parametri ai energiei la tracțiune: a. calculul energiei la curgere; b. calculul energiei la rupere; c. energia pentru laminele ranforsate cu fibre de carbon.

Variația între tensiunea maximă și tensiunea la curgere a materialului se datorează țesăturii utilizate în compozit și desprinderii treptate a firelor din matrice. Împliciturile au o tendință de menținere și de creștere a tensiunii maxime a materialului după cedarea micromecanică a matricei. Prin apariția microfisurilor în matrice, restructurarea orientării firelor este mai ușor de realizat. De asemenea, reorientarea fibrelor duce la schimbarea unghiului firelor în țesătură, din unghiuri mai mari în unghiuri mici. Această tendință este observată pentru toate materialele formate cu țesături (figurile 3.5 și 3.6).

Energia la rupere pentru laminele ranforsate cu țesătură din fibre de carbon are o variație proporțională cu unghiul epruvetei. Unghiurile mari de aplicare a forței sunt caracterizate de o energie mult mai mare decât cea obținută pentru unghiurile mai mici. Această diferență de energie dintre unghiurile de aplicare a forței este datorată rearanjării firelor în compozit, reordonării țesăturii care duce la o alungire mare a laminelor, la o creștere mică a forței. Pentru laminele cu unghiuri mici, forța este mare, dar pentru o alungire mică (figura 3.7).

Pentru energia la curgere, valorile au o variație total diferită față de energia la rupere. Ordinul de mărime este mult mai mic. Pentru laminele cu unghiurile mici, energia în zona elastică a materialului este mare, dar mult mai mică decât energia de rupere. La unghiurile mari, energia la curgere este foarte mică. Excepție fac unghiurile de 10°, 15°. Laminele se comportă mai stabil, dar oferă o tendință de descreștere a energiei la curgere cu cât unghiul crește. Pentru setul de epruvete cu unghiuri mici, energia la rupere mare datorită tipului de țesătură utilizată, iar cu cât firele sunt mai lungi în laminele formate, cu atât și energia în zona elastică a materialului este mai mare.

O altă caracteristică reprezentativă în această analiza a proprietăților mecanice a unui material compozit ranforsat cu fibre lungi este deformația. Deformațiile la rupere și deformațiile la curgere ale materialelor formate au o variație diferită, în funcție de unghiul de acționare a forței față de firele de referință.

Deformația în zona elastică și deformația maximă sunt extrase din datele de ieșire ale mașinii de testare la tracțiune.

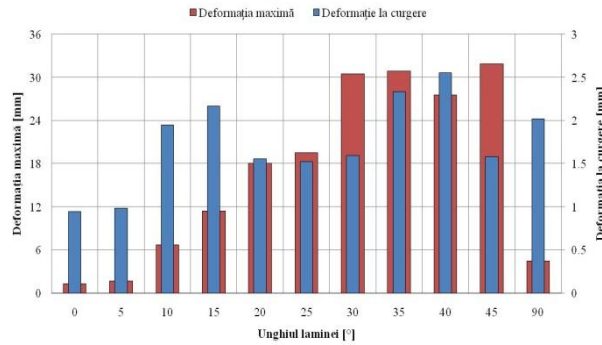


Fig. 3.7. Deformația pentru laminele ranforsate cu țesătură plan-diagonală cu fibre de carbon

Deformația maximă are o dependență de unghiul la care sunt firele în compozit; cu cât unghiul de acționare este mai mare, cu atât materialul are o deformație influențată mai mult de reformarea țesăturilor în compozit. Chiar dacă rezultatele obținute pentru tensiuni sunt mici pentru unghiurile mari, deformațiile sunt mari datorită firelor direct implicate în restructurarea țesăturilor.

Deformația se realizează ca rezultat al suprapunerii mai multor procese:

- deformarea matricei și fibrelor;
- desprinderii locale între fire și matrice;
- reordonarea firelor.

Este greu de stabilit ponderea fiecăruia în realizarea deformației materialului compozit.

O variație mică a deformațiilor la curgere, se datorează cedării materialului cu matrice de natură termorigidă. Materialul de legătură a compozitului este o matrice termorigidă, care are, deci o alungire mică. Rigiditatea rășinii epoxidice duce la cedarea rapidă a materialului compozit în ansamblu. De asemenea, microfisurile care apar în timpul aplicării unei forțe asupra unui compozit polimeric cu o matrice termorigidă duc la apariția unor tensiuni suplimentare de forfecare care duc la cedarea firelor lungi. Aceasta se poate observa din graficul prezentat în figura 3.7. Cu cât firele sunt mai lungi și sunt implicate direct în prinderea în bacurile mașinii de testare, cu atât tensiunile de forfecare sunt mai mari între firele perpendiculare (bătaie și urzeală) și matrice.

3.4. Testarea laminelor ranforsate cu țesătură plan-diagonală cu fibre de carbon și țesătură plan-diagonală mixtă

Următoarele teste s-au realizat pe seturi de lamine ranforsate cu fibre lungi – compozitul format din rășina epoxidică și țesătura mixtă (fire cu fibre de carbon și fire cu fibre aramidice). Ca și în cazul anterior, pentru laminele ranforsate cu fibre de carbon, s-a selectat o țesătură plan-diagonală. În capitolul 2 s-au detaliat procedura și epruvetele de testare (conform standardului de testare SR EN ISO 527-4) și s-au stabilit parametrii de testare la tracțiune a compozitului. S-au evidențiat și avantajele utilizării anumitor tipuri de fibre, cu o anumită tehnologie de tratare a țesăturilor utilizate, cu aplicarea tratamentelor termice pentru matrice recomandate de producător și a unor tratamente suplimentare, modalitatea de formarea a compozitului etc. Acestea vor ajuta și în studiul laminelor ranforsate cu țesătură mixtă.

Țesătura mixtă utilizată în această cercetare reprezintă un ansamblu repetitiv de celule formate din două fire cu fibre de carbon și două fire cu fibre aramidice [144]. Acest ansamblu este format printr-o împletitură plan-diagonală. În acest caz, este important de observat numărul de fire de carbon din epruvetă (având în vedere ca firele cu fibrele de carbon și firele aramidice sunt în perechi), influența lor asupra proprietăților mecanice a compozitului format fiind mare. Un alt factor important este distanța dintre două fire consecutive de carbon-

carbon, carbon - aramidic, aramidic - aramidic. De asemenea, se ia în considerare și numărul de fibre din care este format un fir. Toate aceste elemente au fost prezentate în capitolul 2.

Pentru a caracteriza mecanic o epruvetă ranforsată cu țesătură plan-diagonală, s-au format lamine cu diferite unghiuri între fire și direcția solicitării. Unghiurile alese și parametrii de testare au fost selectați similar ca în cazul laminelor formate cu țesătură plan-diagonală cu fibre lungi de carbon.

În urma testelor de tracțiune efectuate pe laminele ranforsate cu țesătura mixtă, s-au extras rezultate utile în evaluarea comportării mecanice a compozitului (figurile 3.8-3.11).

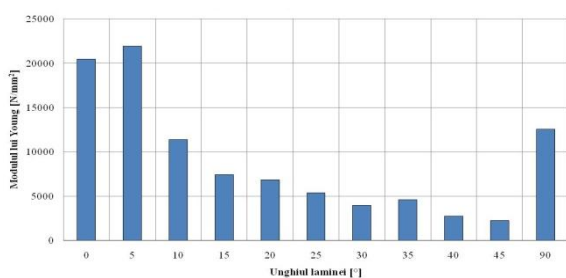


Fig. 3.8. Modulul lui Young pentru laminele ranforsate cu țesătură mixtă

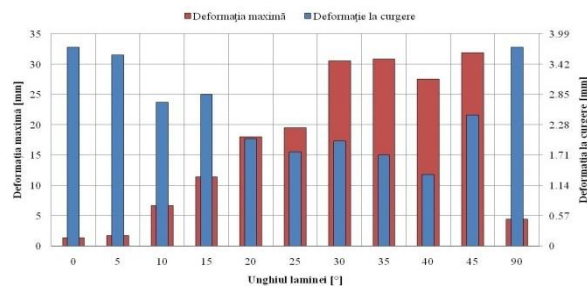


Fig. 3.9. Deformația pentru laminele ranforsate cu țesătură mixtă

Modulul lui Young pentru unghiurile mici de 0°, 5° și unghiul de 90°, are valori mari, dar aceste valori sunt cuprinse între valorile modului de elasticitate longitudinal ale materialelor utilizate ($E_{\text{matrice}}=10,5 \text{ GPa}$, $E_{\text{țesătură}}=207 \text{ GPa}$). Valorile obținute se pot încadra în mai multe grupe de unghiuri:

- grupa cu valori mari pentru E – pentru unghiurile 0°, 5°, 90°;
- grupa cu valori intermediare pentru E – pentru unghiurile 10°, 15°, 20°;
- grupa cu valori mici pentru E – pentru unghiurile 30°, 35°, 40°, 45°;

Prin gruparea în funcție de unghiul de aplicare a forței, se pot realiza seturi de materiale care au un comportament similar. Aceste unghiuri se pot introduce într-o structură cu un comportament similar din punct de vedere al proprietăților mecanice, indiferent de direcția de aplicare a forței, pentru a forma un compozit laminat cu unghiuri diferite ale laminelor și comportament uniform indiferent de unghiul de aplicare a forței.

O altă concluzie obținută din experimente este dependența deformației compozitului de unghiul dintre urzeală și direcția de aplicare a forței. Deformația reprezintă un element esențial în proiectarea și funcționarea ansamblurilor. La aplicarea unei forțe pe ansamblu este nevoie de cunoașterea deformației maxime a piesei finite, pentru a nu introduce tensiuni suplimentare cauzate de deformațiile în anumite straturi ale unui compozit laminat.

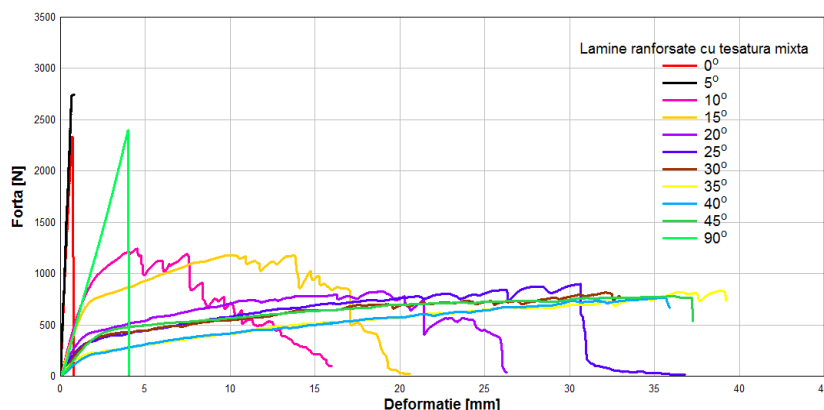


Fig. 3.10. Curbele testelor la tracțiune pentru lamine ranforsate cu țesătură plan-diagonală mixtă

În cazul compozitului studiat s-au analizat deformații din două zone ale curbei tensiune-deformație a materialului, deformația până în zona de curgere și deformația maximă a compozitului.

Pentru deformația maximă, se observă o dependență direct proporțională cu unghiul dintre fire și direcția forței de tracțiune. Se poate observa un grup de lamine, caracterizat de valori asemănătoare pentru deformația maximă; unghiurile acestui grup sunt 30°, 35°, 40°, 45°. Acest grup de epruvete care au o deformație mare, se datorează materialului ranforsat în compozit. Firele din țesătură, din acest set de epruvete, sunt mai puțin implicate în rezistența materialului la tracțiune, și permite materialului, în urma rearanjării firelor, o rezistență mai bună după zona de curgere (figura 3.10).

Figura 3.10 prezintă curbe forță-deformație pentru câte o epruvetă încercată la fiecare unghi și arată trecerea materialului dintr-o zona de deformare preponderent liniar-elastică în zona de deformare preponderent neliniară și elasto-plastică. Valorile obținute ale deformației pentru zona elastică a materialului sunt valori invers proporționale cu cele ale unghiului laminelor utilizate la tracțiune. Cu cât unghiul laminei este mai mare cu atât și deformația este mai mică, această dependență se datorează firelor care sunt direct implicate în aplicarea forței pe compozit. Cu cât firele cuprinse în bacurile mașinii de testare sunt mai lungi cu atât și deformația la curgere este mai mare și este direct proporțională cu deformațiile la curgere ale țesăturilor.

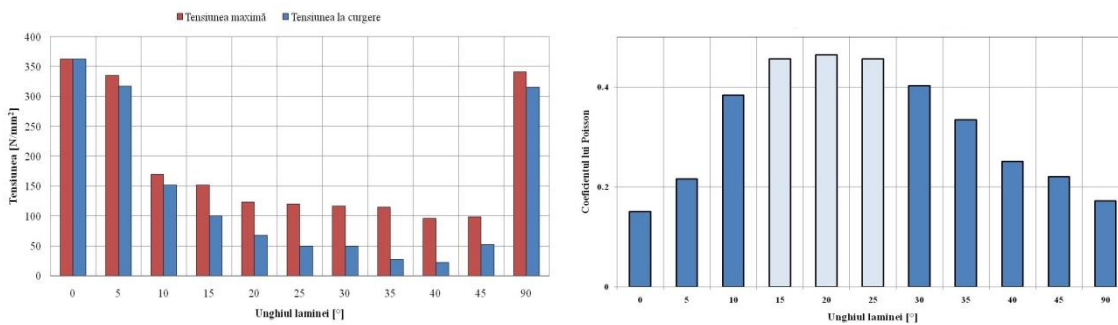


Fig. 3.11. Tensiuni și coeficientul lui Poisson la tracțiune pentru laminele ranforsate cu țesătură plan-diagonală mixtă

Tensiunea maximă pentru laminele ranforsate cu fibre lungi are o variație invers proporțională cu valorile unghiurilor de aplicare a forței pentru lamine (figura 3.11). La fel ca în cazul modulului de elasticitate longitudinal, deformația pentru materialul compozit are o tendință de grupare a rezultatelor epruvetelor testate în funcție de unghiurile de acțiune. Pentru unghiurile 20°-45°, valorile tensiunii maxime măsurate sunt apropiate, fiind datorate reformării și reorganizării firelor în compozit.

Pentru tensiunea de curgere, datele experimentale obținute în urma testelor de tracțiune se pot grupa, având valori apropiate pentru tensiunea maximă pentru epruvetele cu unghiurile de 20° -45°. Valorile mai mici pentru tensiunea maximă sunt datorate cedării matricei utilizate.

Rearanjarea firelor duce la o zonă de curgere a materialului pe curba tensiune-deformație. Chiar dacă cele două materiale (matrice și fibre) sunt rigide și casante, prin unghiul de acțiune, se obține o reformare a compozitului, dar după cedarea matricei, se trece de la zona liniar-elastică la o zona neliniar-plastică. Restructurarea țesăturilor se poate face prin apariția microfisurilor în matrice; cu cât matricea este mai casantă, cu atât și tensiunea la curgere a materialului este mai mică. În cazul materialelor termoplastice, rezistența la curgere a materialului compozit format cu fibre lungi este mai mare, deoarece permite rearanjarea structurii țesăturilor.

Coeficientul lui Poisson este măsurat cu o metodă non-destructivă (vezi Capitolul 3.2). Coeficientul lui Poisson are valori dependente de valorile unghiurilor dintre direcție de aplicare a forței și urzeală (figura 3.11). Valoarea maximă a coeficientului lui Poisson este pentru lamina cu unghiurile de aplicare a forței de 15° , 20° , 30° , față de urzeală, iar pentru aceste condiții de poziționare a compozitului față de direcția aplicare a forței de tracțiune apar efecte de margine și o dislocare locală a firelor din compozit. Deformațiile mari pe cele două direcții (x , y), sunt datorate firelor lungi care sunt direct implicate în rearanjarea structurii compozitului. Pentru țesătura mixtă plan-diagonală, coeficientul lui Poisson este de 0,2, valoare apropiată de cea a matricei utilizate ($\nu_{matrice}=0,22$). Celelalte valori sunt mai puternic influențate de unghiul dintre direcția forței și urzeală care permite concentrarea și rearanjarea firelor în compozit.

3.5. Compararea valorilor experimentale ale celor două compozite ranforsate cu țesături plan-simple, plan-diagonale, cu fibre de carbon și mixte

Caracteristicile mecanice obținute în urma testelor la tracțiune pentru cele două compozite formate au avut valori total diferite.

Din figura 3.18, se observă o grupare a rezultatelor obținute pentru epruvetele cu unghiurile de 10° , 15° , 20° , 30° , 45° , indiferent de țesătura utilizată. Valorile experimentale obținute în urma testelor de tracțiune au o variație mică, indiferent de tipul țesăturii și de tipul fibrelor utilizate. Această grupare este datorată rigidității materialelor utilizate pentru formarea compozitului. De asemenea, la testarea cu unghiuri mari (15° - 45°), rearanjarea structurii țesăturii este similară și duce la un comportament mecanic similar, indiferent de tipul țesăturii. Apariția rezultatelor similare pentru toate tipurile de lamine cu unghiuri mari se datorează interfeței dintre fibră și matrice.

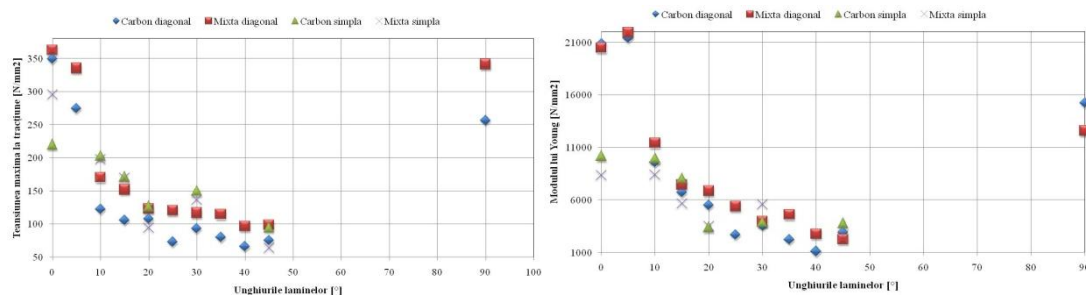


Fig. 3.12. Tensiunea maximă și modul de elasticitate longitudinal pentru laminele ranforsate cu țesătură

În figura 3.12, sunt prezentate valorile medii ale tensiunilor maxime obținute pentru materialele compozite ranforsate cu țesătură plan-diagonală și plan-simplă, cu fibre de carbon și cu fire mixte. Compozitele formate cu țesătură plan-diagonală au valori mai mari ale tensiunilor maxime decât cele pentru compozitele formate cu țesătură plan-simplă. Aceste rezultate sunt datorate tensiunilor de forfecare mai mari pentru țesătura plan-simplă care apar în zonele de trecere ale firelor (bătaia și urzeala țesăturilor). Pentru unghiurile mari formate între direcția forței și urzeală, tensiunile sunt apropiate ca valori.

4. MODELAREA CU ELEMENTE FINITE A LAMINEI

În urma studiului bibliografic de specialitate [71,81,111,84,87,91], s-a realizat o analiză cu elemente finite în mai multe etape. Studiul modelării cu elemente finite (MEF) se poate face pe niveluri: micro-mecanic, mezo-mecanic și macro-mecanic. Pentru aceste trei tipuri de analize este nevoie de stabilirea geometriei pieselor (corpurilor) considerate.

4.1 Analiza la nivel micromecanic

Chiar și în cazul aglomerărilor de fibre, regiunile în care matricea nu pătrunde sunt foarte rare. De asemenea, aceste defecte din interiorul materialului compozit nu influențează semnificativ caracteristicile mecanice ale laminelor [146].

Rearanjarea firelor este posibilă doar prin cedarea (cel puțin locală) a matricei rigide. Într-un fir există un număr foarte mare de fibre care pot duce la micro-fisurarea și rearanjarea componentelor în compozit.

Analiza geometriei unei fibre dintr-un fir înglobat în matrice polimerică este discutabilă [82,48]. S-a ales o geometrie în care sunt tipuri de geometrii cu o distanță minimă și maximă dintre două fire alăturate. Din punct de vedere geometric, distanța dintre două fibre dintr-un fir, se poate analiza prin trei tipuri de geometrii ale împachetării (figura 4.1).

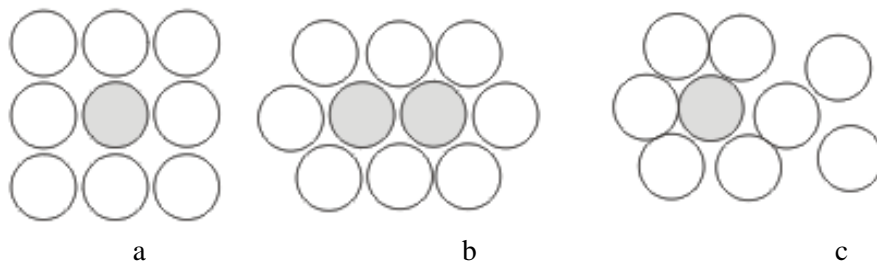


Fig. 4.1. Tipuri de geometrii ale împachetării fibrelor în fir:

- a. Împachetarea regulată "pătrat"; b. împachetarea regulată "hexagon"; c. împachetarea neregulată aleatorie [21]

Pentru alegerea geometriei împachetării au fost studiate forme regulate și neregulate (figura 4.1) [146,21]. Cele mai reprezentative împachetări regulate sunt cele cu aranjare geometrică pătratică (figura 4.1.a) și hexagonală (figura 4.1.b). De asemenea, au fost studiate forme geometrice neregulate după principii de aranjare aleatorie (figura 4.1.c).

Un caz simplificat al analizei cu MEF este o analiză comparativă pe zona cea mai apropiată dintre două fibre aranjate regulat și pe zona cea mai depărtată dintre două fibre aranjate regulat. Cazul ales pentru acest studiu este geometria pătratică, utilizată în continuare pentru efectuarea analizei cu MEF (figura 4.1.a).

4.3.2. Analiza cu ajutorul metodei cu elemente finite la nivel micromecanic al celulei cu geometria 1

Pentru acest studiu s-a ales o zonă ideală, numită în continuare "celulă", care are geometria formată din decupări, în care vor fi aranjate fibre (figura 4.2); această geometrie este o etapă intermediară pentru caracterizarea mecanică a compozitului, mai ales a compozitului cu fibre în țesătură.

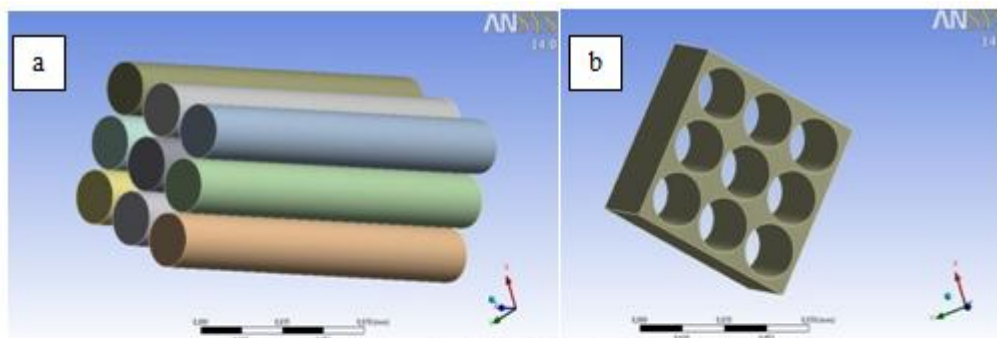


Fig. 4.2. Geometria de tip1, fibrele (a) și matricea (b)

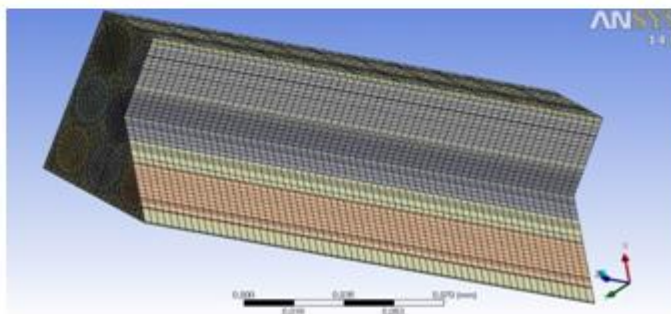


Fig. 4.3 Discretizarea geometriei formate

Dimensiunile au fost alese în urma măsurărilor cu metode noncontact ale fibrelor; dimensiunea a fost stabilită conform caracteristicilor fibrelor de carbon din tabelul 1.3. Scara geometriei este de 1:10 (figura 4.3). Pentru verificarea comportamentului celulei în interior, programul ANSYS, oferă un modulul SLICE PLANE pentru tăierea obiectelor geometrice, dar păstrând comportamentul celulei întregi (figura 4.3).

Presiunile aplicate pe fețele laterale sunt simetrice față de planul meridian al celulei (figura 4.7). Valorile presiunilor sunt rezultate din evaluarea unei presiuni medii, așa cum ar rezulta din solicitarea la tracțiune pe epruvetele deja testate.

Valorile presiunilor sunt de 10 MPa, aplicate simetric pe ambele fețe ale celulei cu geometria de tip1 (figura 4.4).

Suprafețele de contact fibră-matrice au fost modelate în modul de conexiune BONDED. Acest mod de conexiune oferă o legătură nod cu nod între planele de contact ale corpurilor (puncte, linii, suprafețe, solide). Secțiunea reprezentativă a fost efectuată pe zonele în care matricea dintre fibre are grosimea minimă și, respectiv, maximă (figura 4.5).

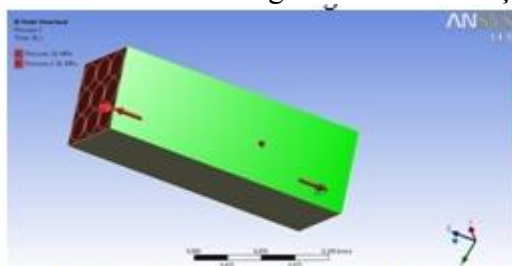


Fig. 4.4. Direcțiile și planele de aplicare a presiunilor

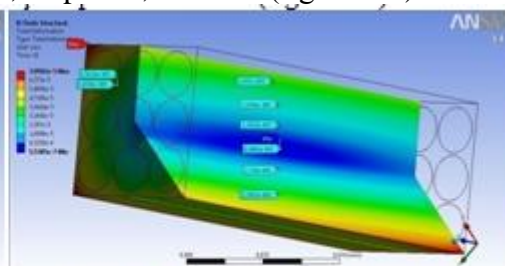


Fig. 4.5. Deformația totală a celulei compozitului.

Presiunile sunt aplicate și pe fibre și pe matrice (fibrele sunt înconjurate de matrice). Din experimentele efectuate s-a constatat că în matrice apar microfisuri care duc la cedarea matricei și elementul de rezistență a materialului compozit este fibra.

Figura 4.6 prezintă deformația totală a elementelor modelului; se observă o simetrie a deformațiilor pe compozit față de un plan median paralel cu suprafețele laterale pe care se

aplică presiunea. Valorile obținute în planul de secțiune a compozitului au evidențiat că pentru fibra din mijlocul compozitului deformațiile sunt foarte mici. Valorile deformațiilor fiind cuprinse între 0,554 nm-70,5 nm, foarte mici considerând matricea și fibrele materiale perfect elastice.

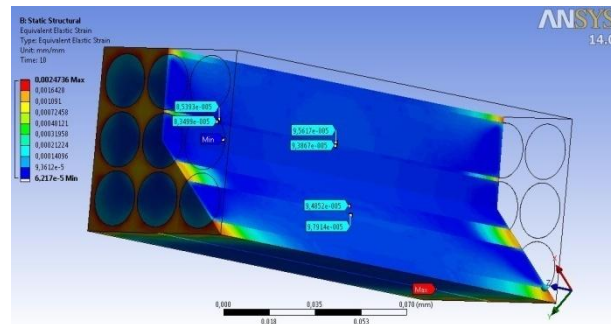


Fig. 4.6. Deformația relativă a celulei compozitului

În figura 4.7 se poate observa sugestiv deformațiile relative ale celulei compozitului. Prin urmare deformațiile relative minime sunt pentru fibre, iar deformațiile relative maxime sunt pentru zonele de margine ale compozitului. În regiunea centrală a geometriei analizate sunt valori cu diferențe mici ale deformațiilor relative între matrice și fibre, ceea ce ar presupune o bună aderență între componentele de bază ale materialului.

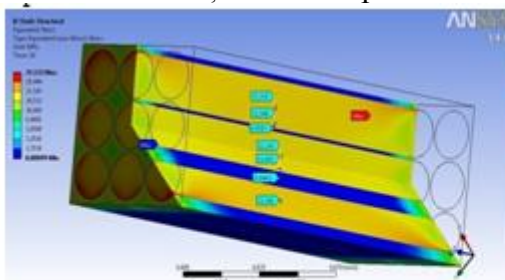


Fig. 4.7. Tensiuni von-Mises în modelul compozitului.

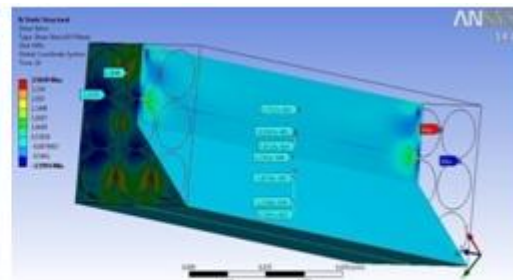


Fig. 4.8. Tensiuni de forfecare pe planul XY pe modelul geometric de tip 1.

Tensiunile von-Mises sunt prezentate în figura 4.8. Tensiunile mari apar pe fibrele solicitate, matricea fiind mai elastică decât fibrele utilizate pentru formarea acestui compozit. Alte regiuni care ies în evidență sunt regiunile de margine ale celulei compozitului, cele care sunt direct implicate în solicitările la care este supus materialul. Tensiunile mari, 29 MPa – 37 MPa, au o tendință de concentrare înspre extremitățile acestei celule de compozit, pe fibre și în vecinătatea lor, cu valori mai mici pe matrice în zona de aplicare a solicitării.

În figura 4.9, se prezintă tensiunile de forfecare în planul XZ; acestea sunt distribuite uniform și fără mari diferențe în zonele de contact între matrice și fibre. Însă în regiunile de margine ale celulei compozitului, unde sunt aplicate presiunile, apar tensiuni de forfecare cu simetrie, în zonele de contact dintre fibre și matrice.

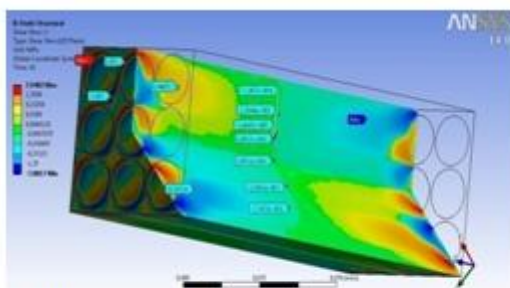


Fig. 4.9. Tensiuni de forfecare în planul XZ, pe modelul geometric de tip 1

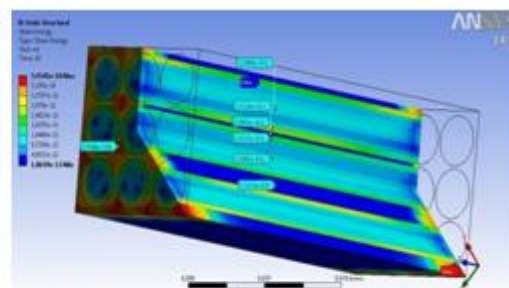


Fig. 4.10. Distribuția energie de deformare pe modelul geometric de tip 1

În figurile 4.9 și 4.10, se prezintă distribuția tensiunilor de forfecare în planul XZ și a energiei de deformare, evidentă pe lungimea fibrelor. Tensiunile de forfecare se distribuie și în matrice, așa cum se vede în planul de simetrie de pe mijlocul geometriei. Cele mai mari tensiuni de forfecare apar pe fibre în regiunea planelor de aplicare a presiunii. Energia de deformare este distribuită relativ uniform în matrice, iar pentru fibre, energia este variabilă: scade treptat din zonele de încărcare spre centrul fibrei.

Pentru geometria de tip 1 se recomandă o aplicare treptată a încărcărilor pe material sau cu o piesă intermediară pentru a evita tensiunile mari din regiunile de margine ale compozitului. De asemenea, din cauza diferențelor mari dintre caracteristicile mecanice ale celor două componente ale compozitului (matrice și fibre) apar tensiuni de forfecare în planele perpendiculare forțelor aplicate. Având în vedere că matricea polimerică nu este rezistentă mecanic, comparativ cu fibrele, se pot utiliza geometrii mai simplificate pentru a evita și a micșora timpul de simulare, dar trebuie să se ia în considerare efectele de margine ale geometriei alese.

4.3.3. Analiza cu MEF la nivel micromecanic cu geometria de tip 2

O altă geometrie definită în zona de interes în interiorul țesăturii din compozit este porțiunea de ondulație a firului dintre urzeală și bătaie. Din formulele de calcul geometric, s-a obținut o rază optimă pentru trecerea firului format din fibre.

Pentru a nu fi diferențe mari între discretizarea cu fibra simplă și cu fibra arcuită, s-a utilizat același tip de discretizare, cu aceiași parametri de intrare. Pentru a simplifica operațiunile cu aceleași materiale, programul ANSYS oferă un modul de lucru WORKBENCH, cu un spațiu de lucru vizual și cu formarea de legături între modulele de lucru.

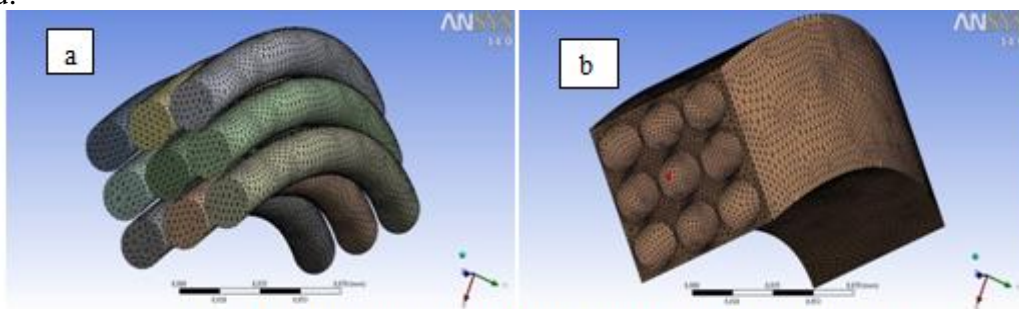


Fig. 4.11. discretizarea celulei compozitului: a. fibrelor; b. matricei

Pentru a efectua o analiză cu MEF cu rezultate bune, este nevoie de o discretizare fină. Mărimea elementelor discretizării depinde de geometria și tipul de solicitare la care este supus modelul. În cazul geometriei de tip 2 s-a realizat o discretizare mai fină din cauza complexității geometriei (figura 4.12 și 4.13).

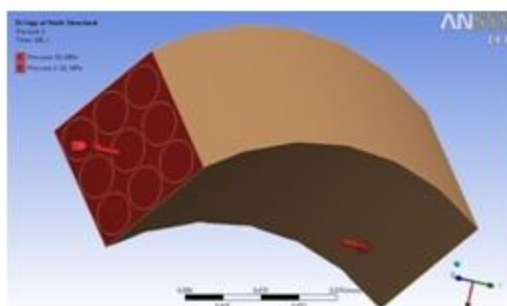


Fig. 4.12. Direcțiile și planele de aplicare ale presiunilor pe geometria de tip 2

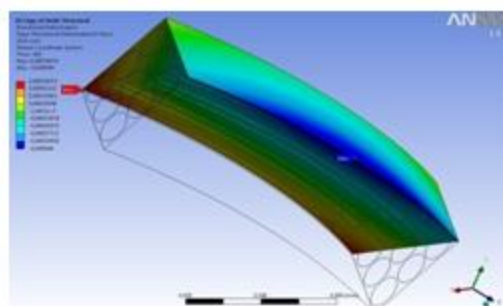


Fig. 4.13. Deformațiile în planul Y pentru geometria de tip 2

În zona de contact dintre fibre și matrice s-a obținut o repartizare a elementelor mai fină pentru a pune în evidență diferențele datorate caracteristicilor mecanice diferite ale celor

două materiale utilizate în modelarea celulei (matricea epoxidică și fibrele de carbon). Numărul de 136065 de elemente și numărul de 266643 de noduri au permis realizarea unei discretizări adecvate pentru o astfel de geometrie. Generarea unui număr mai mare de elemente nu a modificat semnificativ valorile obținute.

Autorul a impus efectuarea a 100 000 subrutine pentru realizarea analizei cu o precizie mai bună rezultatelor.

Zonele de contact dintre matrice și fibre au fost considerate zone BONDED, element care permite o lipire punct cu punct a suprafețelor de contact.

S-a impus și o discretizare mai fină pe zonele de contact dintre fibre și matrice.

Din figura 4.14. și 4.15, deformațiile maxime apar în zona de mijloc a curburii celulei. Forma geometrică permite o deplasare pe direcțiile perpendiculare ale forței aplicate pe material.

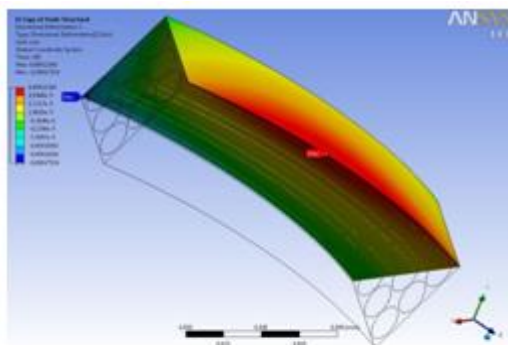


Fig. 4.14. Deformații în planul Z pe direcția Z în celula compozitului

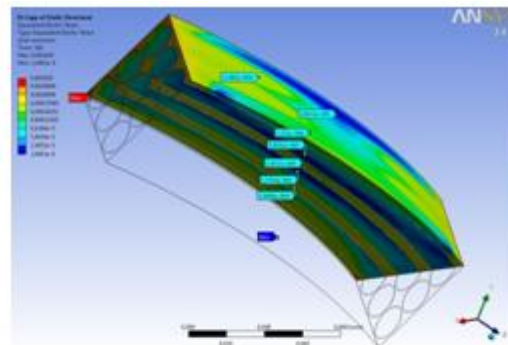


Fig. 4.15. Alungirea relativă a celulei compozitului cu geometrie de tip 2

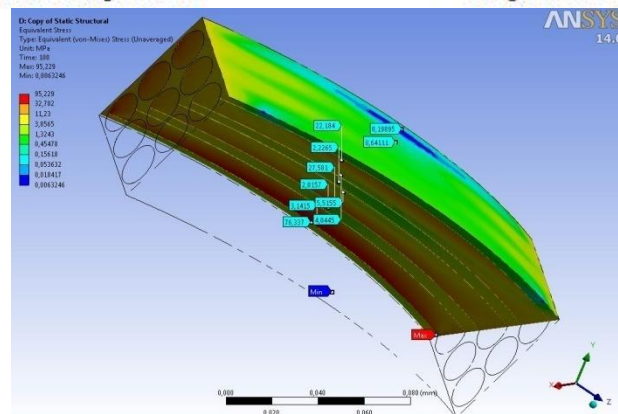


Fig. 4.16. Distribuția tensiunilor von-Mises pentru celula compozitului cu geometrie de tip 2

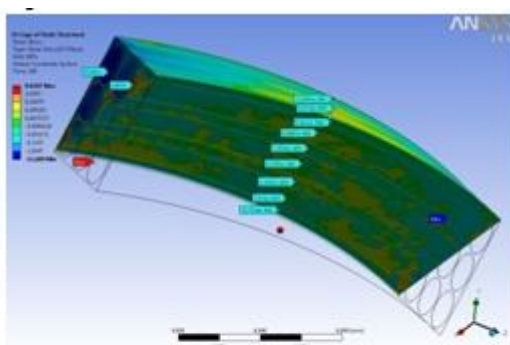


Fig. 4.17. Tensiunile de forfecare pe planul XY, a pentru celula cu geometrie de tip 2.

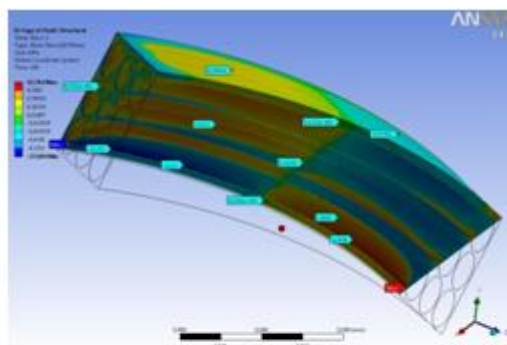


Fig. 4.18. Tensiunile de forfecare în planul XZ a geometriei de tip 2.

Pentru geometria celulei de tip 2, tensiunile von-Mises sunt prezentate în figura 4.18. Similar cu rezultatele obținute pentru deformația relativă, zona critică a materialului este zona

mediană de curbură. Tensiunile apar pe raza interioară a curburii, prin apariția tensiunilor între fibre și matrice. Tensiunile se distribuie pe fibre pe toată lungimea, cu valori mari pe partea exterioară a curburii (17 MPa - 90 MPa). Pe matrice, apar tensiuni mari între fibre, de 2 MPa – 7 MPa, și tensiuni mici spre extremitățile celulei compozitului.

Tensiunile de forfecare în planul XY au o tendință de acționare pe zona interioară a curburii fibrelor și distribuția lor pe matrice cuprinde valori de la -11,60 MPa – 9,6 MPa. Tensiunile maxime și minime apar pe planele de acțiune a presiunilor. În această zonă, tensiunile se distribuie longitudinal pe fibre (figura 4.19).

În figura 4.20 se poate observa tendința de distribuție simetrică a tensiunilor de forfecare în planul XZ. Planul de simetrie poate fi pe linia transversală a zonei de curbură maximă. Valorile obținute pe această geometrie se încadrează între -11,60 MPa – 9,6 MPa, similar celor din planul XY.

Valorile obținute pentru tensiunile de forfecare în planul XY sunt mult mai mici decât tensiunile von-Mises, dar ele au o importanță esențială în rezistența mecanică a unui astfel de compozit.

Aceasta demonstrează că geometria curbată a celulei compozitului nu trebuie ignorată în proiectarea și realizarea compozitului. Zonele de interes, în cazul țesăturilor, sunt trecerile firului între urzeală și bătaie.

Prin urmare, modelarea și simularea la nivel micromecanic a compozitului reprezintă un interes deosebit în continuarea studiului la nivel mezomecanic.

Zonele de curbură prezintă un interes deosebit fiindcă în aceste zone apar tensiuni maxime în material. Datele obținute în urma simulărilor la nivel micromecanic se vor transforma în date de intrare la următorul studiu aplicat materialelor compozite ranforsate cu fibre lungi, la nivel mezomecanic.

4.4. Studiul la nivel mezomecanic al laminelor

Studiul la nivel mezomecanic se ocupă cu analiza interfețelor dintre componentele macro ale compozitului. Componentele de bază ale materialului compozit format în acest studiu sunt matricea polimerică și țesătura.

Din punct de vedere structural, matricea este un polimer termorigid, cu proprietăți bune de aderență la țesătură. Țesăturile sunt plane, cu două tipuri de împletituri (plan-simplă și plan-diagonală).

În această lucrare se reprezintă un fir cu fibre lungi drepte. Țesătura utilizată este plan-simplă și plan-diagonală.

4.4.1. Studiul laminelor cu țesătură plan-simplă

Ca program pentru formarea geometriei firelor s-a utilizat modul GEOMETRY, oferit de ANSYS.

Caracteristicile matricei se importă din datele de intrare ale modelului micromecanic, pentru zona elastică a fibrelor, caracteristicile se extrag din testele primei părți a acestei lucrări de cercetare.

Desenul optim pentru simularea compozitului unei țesături plan-simple este prezentat în figura 4.19. Cu această geometrie (pentru o celulă de compozit) se pot obține tensiuni și deformații de interes pentru aplicații reale. Această celulă este repetitivă în cazul țesăturilor simetrice, utilizând același tipuri de fibre pentru bătaie și urzeală. Între zonele de contact ale bătaiei și urzelii s-a lăsat un spațiu pentru formarea legăturilor dintre matrice și fire în zona de contact dintre fire.

Un alt aspect care reprezintă interes este regiunea "0" care este o regiune în care nu sunt fire, formată între două fire de urzeală și două de bătaie (figura 4.16.3). Zona "0" este un element important în rezistența mecanică a compozitului; cu cât regiunea este mai mare, cu atât tensiunile de forfecare dintre bătaie și urzeală sunt mai mici, dar scade volumul de fibre din compozit, fapt care conduce la scăderea rezistenței mecanice a întregului material.

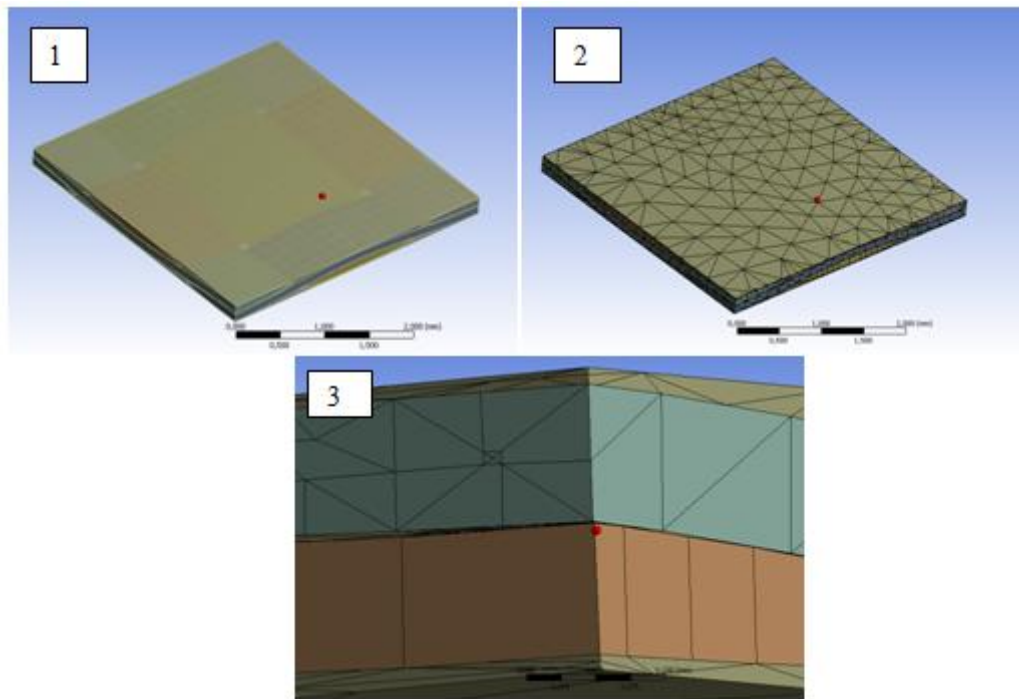


Fig. 4.19 Discretizarea celulei pentru compozitul cu țesătură plan-simplă : 1. Geometria laminei; 2. Discretizarea geometriei; 3. Discretizarea în zona de contact (matrice și fire).

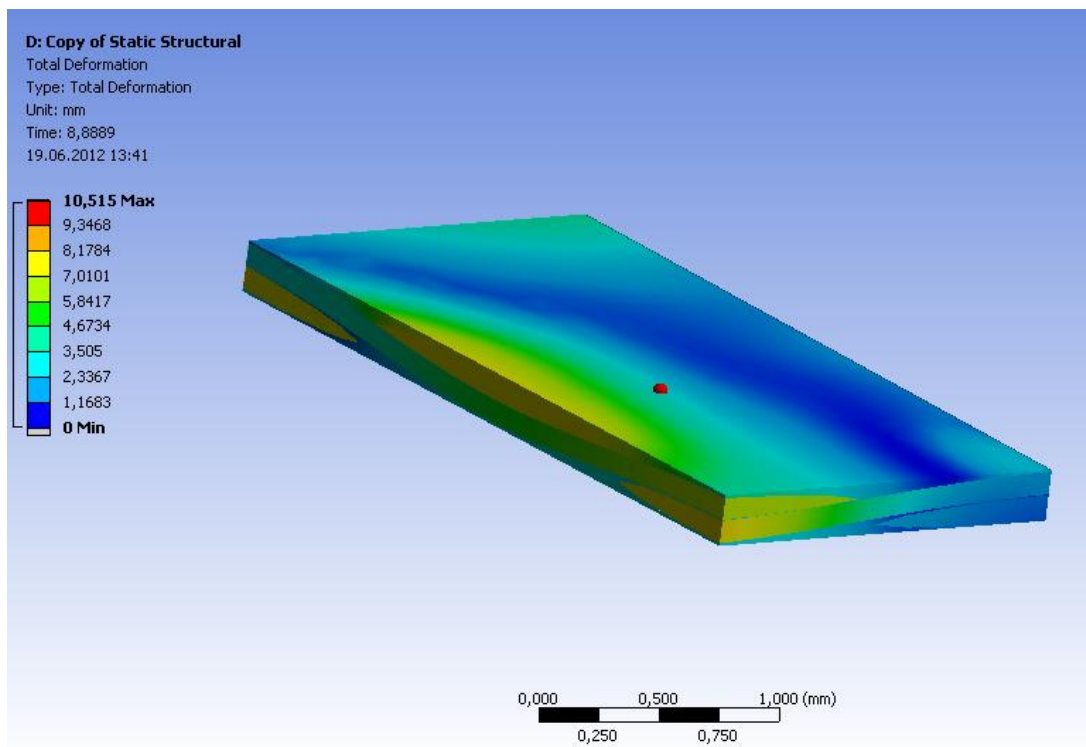


Fig. 4.20. Distribuția deformațiilor în secțiunea celulei compozitului cu țesătură plan-simplă, cu fibră de carbon

Deformarea compozitului la aplicarea unei deplasări a uneia din fețele laterale pe direcția x (fața opusă fiind considerată încastrată) impune o rearanjare a firelor; la un capăt i se impune feței laterale o deplasare de 0,2 mm, iar la celalalt capăt o încastrare; rezultă modificări geometrice pe direcția z pentru firele libere și matrice (figura 4.20). Din graficul obținut în urma aplicării MEF, se observă o creștere a deformației maxime aproape liniară în

timp (deplasarea impusă feței laterale, de 0,2 mm, se realizează cu viteză constantă, în 10 secunde) (figura 4.20).

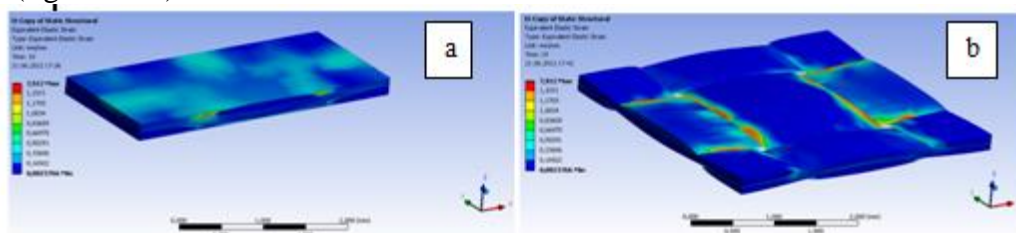


Fig. 4.21. Alungirea relativă a compozitului:

- a. celula compozitului în secțiune; b. celula compozitului cu matricea transparentă

Din analiza rezultatelor pentru alungirea relativă a modelului se observă tendințe de forfecare în zonele de trecere de la un fir la altul (figura 4.21). Aceste delimitări apar prin modificarea amplitudinii firelor din regiunea de acționare a forțelor pe direcția z (figura 4.22).

Curbele alungirii maxime relative a celulei compozitului este dat în figura 4.22. Acest calcul se efectuează pe zona cu alungire maximă. Variația este neregulată având în vedere geometria celulei compozitului. Din valorile obținute în urma analizei cu MEF, se observă o tendință de creștere neliniară (figura 4.22). Se observă și o variație sinusoidală a curbei de valori cu o perioadă de 5 secunde. Timpul total fiind prestabilit de 10 secunde cu obținere de valori cuprinse între 10 sub-etape, acestor sub etape îi corespunde o valoare pe graficul de funcții.

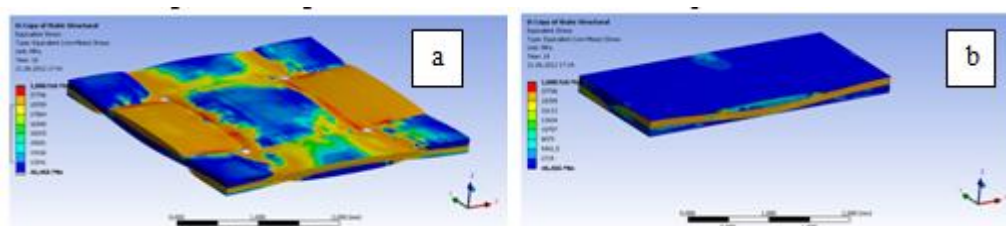


Fig. 4.22. Tensiunea von-Mises pentru compozitul cu țesătură plan-simplă:

- a. celula compozitului cu matricea transparentă; b. celula compozitului în secțiune

4.4.2. Studiul laminelor cu țesătură plan-diagonală al analizei cu MEF

Țesătura plan-diagonală (figura 4.23) este o țesătură mai avansată din punct de vedere geometric, prin forma și tipul de trecere de la urzeală la bătaia țesăturii. Această țesătură se utilizează pentru piese cu dimensiuni mari, care sunt solicitate la tensiuni longitudinale pe direcția firelor. Raportul volumic al fibrelor este asemănător cu cel ale țesăturilor plan-simple, diferența între cele două țesături fiind geometria împletiturii.

Din punct de vedere mecanic, țesătura plan-diagonală este net superioară celei plan-simple, prin formarea unghiului mai mic la trecerea dintre două fire, care are ca rezultat tensiuni de forfecare mai mici față de țesătura plan-simple.

Un dezavantaj al acestor tipuri de țesături este instabilitatea geometrică a structurii. Este foarte greu de prelucrat și de decupat elemente din țesătură înaintea introducerii în matrice. Un alt dezavantaj îl reprezintă tensiunile diferite pe direcția firului; aceste tensiuni sunt mici din cauza razei de curbură mai mare de reformare a țesăturii. Dar posibilitatea de trecere a unui fir peste altul este foarte mare din cauza împletiturii diagonale.

Pentru analiza tensiunilor la solicitarea longitudinală a supra laminei ranforsate cu fibre lungi, este nevoie de stabilirea geometriei țesăturii utilizate. Datele de intrare au fost preluate din analiza micromecanică a compozitului și studiul nondistructiv al țesăturilor (figura 2.20).

Discretizarea este formată pe zone de interes: pentru firele din mijlocul celulei analizate se formează o discretizare mai fină, iar pentru firele din marginile celulei de compozit o discretizare cu elemente mai mari (figurile 4.24.2, 4.25.3). Acest tip de discretizare se efectuează pentru micșorarea timpului de rulare a programului. Similar cazului țesăturii plan-simple, s-a analizat un spațiu între fire pentru a efectua o analiză cât mai apropiată de realitate (figura 4.25.4).

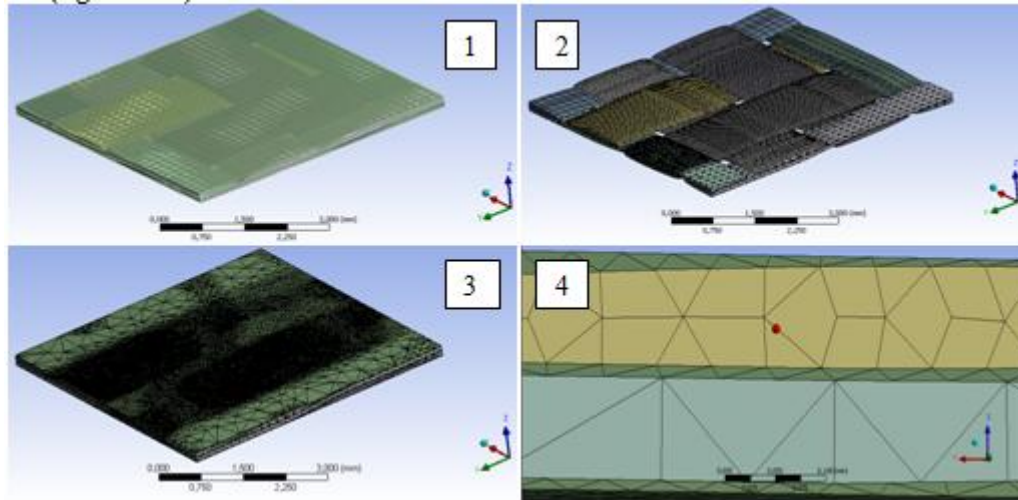


Figura 4.25. Discretizarea geometriei: 1. Geometria laminei; 2. Discretizarea geometriei firelor; 3. Discretizarea matricei 4. Discretizarea în zona de contact între matrice și țesătură

Pentru executarea simulării s-a impus o deplasare a suprafeței "A", iar zona încastrată este pe direcția opusă, cuprinzând elementele de suprafață "B" ale firelor și ale matricei (figura 4.26). Deplasarea impusă elementelor, este de 1 mm, o deplasare preluată din datele experimentale realizate în capitolul 2 al acestui studiu.

Prin analiza cu MEF, rezultatele deformațiilor pe celula sunt reprezentate în figura 4.26. Din studiu se observă că deplasările cele mai mari apar în zonele de margine; aceasta se datorează deplasărilor firelor perpendiculare pe direcția de deplasare (figura 4.26). Un alt element care iese în evidență este zona de centru, în care deplasările elementelor din matrice sunt foarte mici, ceea ce implică tensiuni de forfecare mari pe marginile celulei analizate.

Alungirea relativă a fibrelor și a matricei compozitului este de asemenea influențată de firele care se deplasează și care acționează și asupra firelor staționare perpendiculare pe direcția de deplasare (figura 4.35). Direcția de deplasare este pe y, dar prin simulare se observă o alungire relativă în zonele de margine ale firelor, care se reflectă pe matrice (figura 4.36). Firele au o alungire relativă mai mare în zona de trecere de la o amplitudine la alta.

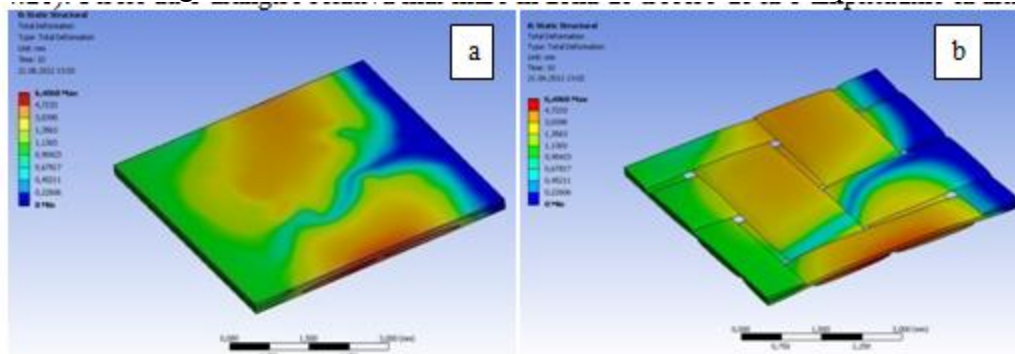


Fig. 4.26. Deplasările celulei compozitului cu țesătură plan-diagonală: a. celula compozitului; b. celula compozitului cu matricea transparentă

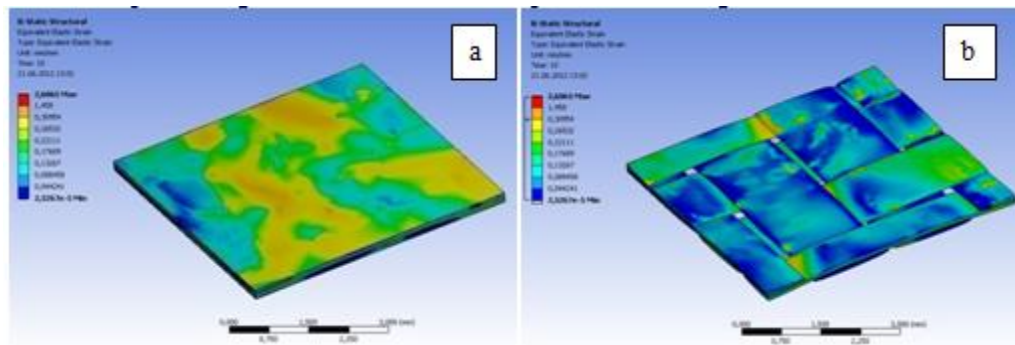


Fig. 4.27. Alungirea relativă celulei compozitului cu țesătură plan-diagonală:
a. celula compozitului; b. celula compozitului cu matricea transparentă

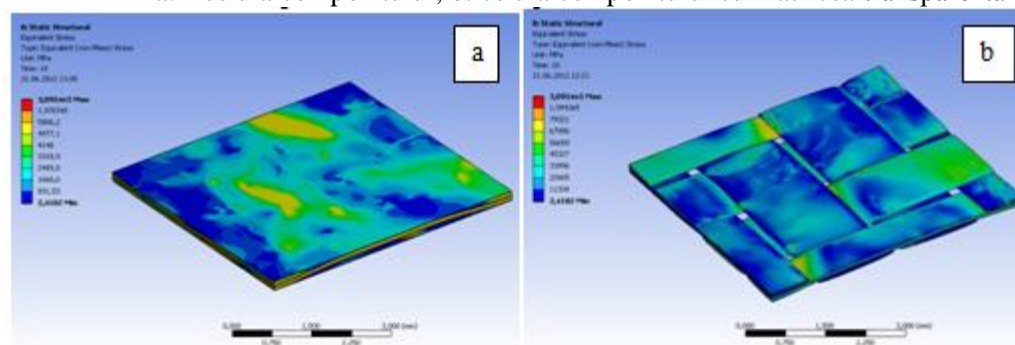


Fig. 4.28. Variația tensiunilor von-Mises în celula compozitului cu țesătură plan-diagonală:
a. celula compozitului; b. celula compozitului cu matricea transparentă

Distribuția tensiunilor von-Mises este similară distribuției deformațiilor relative. Aceste tensiuni sunt mai mari în zonele de tranziție ale firelor (figura 4.28).

4.5.3. Comparația tensiunilor de forfecare în cele două tipuri de țesături alese pentru compozit

Un aspect important în acest studiu este analiza tensiunilor de forfecare asupra firelor din ambele tipuri de țesături. Studiile experimentale asupra acestor două tipuri de țesături, s-au observat tensiuni de forfecare mai mici pentru țesătura plan-diagonală.

Cu ajutorul programului cu elemente finite se pot calcula și evidenția tensiunile de forfecare maxime care apar în interiorul compozitului ranforsat cu cele două tipuri de țesături. Analiza tensiunilor de forfecare se face pe cele trei plane ale compozitului, xy, yz, xz. Pentru planul xy tensiunile de forfecare sunt pe direcția deplasării (figura 4.41).

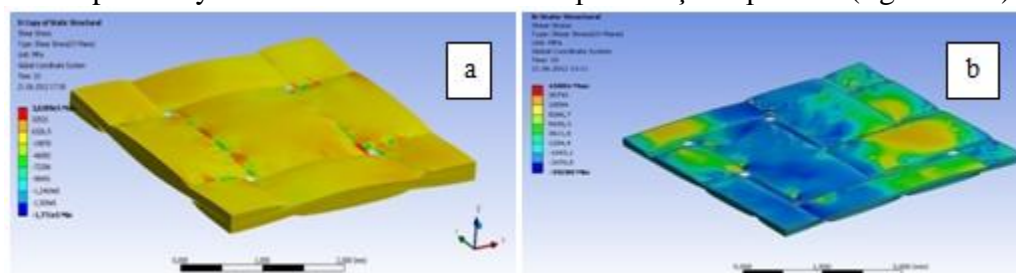


Fig.4.29. Distribuția tensiunilor de forfecare în planul XY
a. celula pentru țesătura plan-simplă cu matricea transparentă; b. celula pentru țesătura plan-diagonală cu matricea transparentă

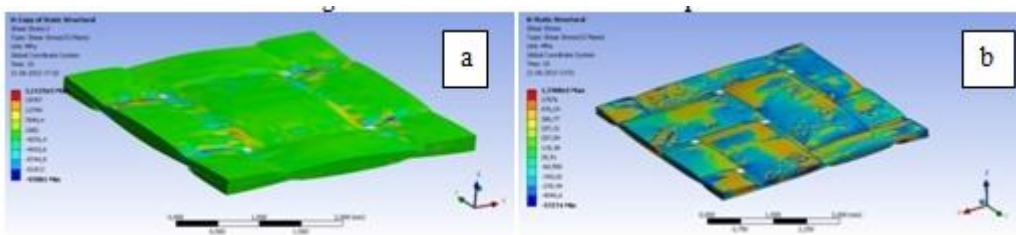


Fig. 4.30. Tensiunile de forfecare în planul YZ

b. celula pentru țesătura plan-simplă cu matricea transparentă; b. celula pentru țesătura plan-diagonală cu matricea transparentă

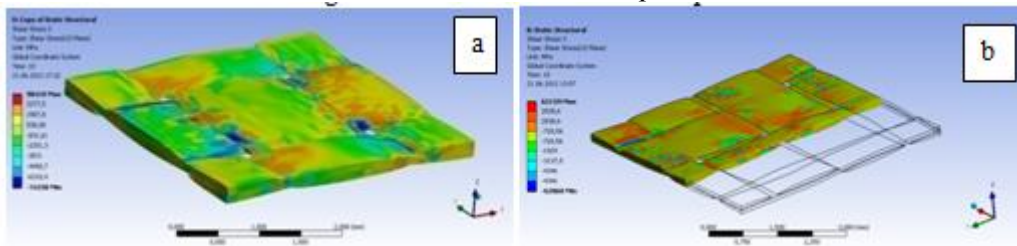


Fig. 4.31. Distribuția tensiunilor de forfecare în planul XZ

a. celula pentru țesătura plan-simplă cu matricea transparentă; b. celula pentru țesătura plan-diagonală cu matricea transparentă

În urma simulării tensiunilor, de forfecare s-au obținut pentru țesătura plan-simplă valori în planele XZ și XY, mult mai mari decât pentru țesătura plan-diagonală. Pentru planul YZ sunt aproximativ egale între ele, valorile sunt similare pentru că pe această direcție tensiunile sunt minime, prin grosimea similară a compozitului. Tendința de reformare a compozitului este aceeași datorită grosimii firelor și a laminei.

4.6. Validarea simulării

După efectuarea unui analize cu elemente finite a materialului compozit se recomandă validarea prin metode experimentale. Din studiile anterioare s-au ales date pentru validarea ambelor tipuri de modele, pentru țesătura plan-simplă și cea plan-diagonală. Încercările au fost efectuate la tracțiune, conform standardului SR EN ISO 527-4; laminele au fost testate la temperatura camerei.

În urma testelor s-au obținut rezultatele prezentate în tabelul 4.5.

Tabelul 4.5

Compozit	Valorile experimentale ale tensiunilor maxime (MPa)	Valori obținute în analiza cu MEF a tensiunilor (MPa)	Diferență relativă (%)
Țesătură plan-simplă	285,31	331,36	16,14
Țesătură plan-diagonală	462,92	518,59	12,35

În urma simulării s-au obținut rezultate estimative ale variațiilor tensiunilor maxime, și prin compararea cu valorilor experimentale obținute pentru tensiunile maxime, s-a obținut o diferență relativă maximă de maxim 16% pentru ambele tipuri de țesături. Diferența poate apărea în timpul măsurărilor (din cauza erorilor de măsurare), din cauza defectelor din materialul compozit format, datelor de intrare în analiza cu MEF, datelor de intrare ale geometriei compozitului etc. Tensiunile estimate sunt valorile de pe firele care sunt supuse aceleiași deplasări impuse.

Din punct de vedere constructiv, se pot relua simulările și se pot restrânge diferențele prin reinițializarea datelor de intrare ale materialelor folosite.

5. COMPORTAMENTUL MECANIC AL PSEUDO-COMPOZITULUI FORMAT CU MAI MULTE STRATURI DE ȚESĂTURĂ, ARANJATE LA DIFERITE UNGHIURI

Pentru acest studiu, s-a ales materialul compozit ranforsat cu fibre lungi. Ca materiale de bază au fost alese matricea epoxidică EPIPHEN 4020 și țesătura plan-simplă, formată din fibre de sticlă lungi.

Pentru o caracterizare amplă a unui compozit este nevoie de studiile la nivel micro- și macro mecanic al laminatului. Pentru studiul la nivel mezo-mecanic s-au efectuat mai multe etape de studiu al laminelor, prin determinarea proprietăților mecanice prezentate în capitolele anterioare.

În urma testelor efectuate pe laminele formate, s-a creat o clasă de materiale pseudo-laminate [147]. Materialele pseudo-laminate sunt materialele cu mai multe straturi de aditivi și/sau ranforsanți, dar cu o aceeași matrice inserată în toate straturile. Din punct de vedere constructiv, aceste laminate sunt o familie aparte a laminatelor și au o comportare total diferită de un laminat simplu [148]. Stratificarea în pseudo-laminate este influențată de țesăturile utilizate pentru formarea compozitului [149]. Matricea utilizată este, și ea, determinantă în direcționarea anumitor proprietăți ale compozitului. Rășinile epoxidice sunt materiale cu o bună stabilitate chimică, dar este foarte greu de asamblat două rășini epoxidice după polimerizare prin legături mecanice [150]. Suprafețele materialelor obținute prin tehnologia de laborator propusă de autor sunt foarte bune și de aceea utilizarea acesteia s-a dovedit eficace, deși este o metodă de formare mai simplă.

Pentru a efectua un studiu asupra unui laminat este necesar să se facă combinații ale unghiurilor dintre firele laminelor. Cele mai semnificative unghiuri sunt cele pentru care se obțin proprietățile mecanice maxime și minime pentru lamine; aceste unghiuri sunt 0° , 90° și

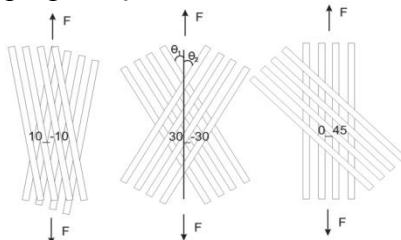


Fig. 5.1. Aranjarea firelor lungi în laminat

45° . S-au prelucrat, deci, laminate cu două straturi, cu unghiuri diferite ale țesăturilor, respectiv 0_90, 0_0, 0_45. Un alt set de unghiuri care ar reprezenta interes sunt unghiurile medii, prin combinarea lor cu unghiurile similare, dar negative, pentru a forma un compozit cu tensionare cvasi-omogenă (figura 5.1). Aceste combinații de unghiuri sunt 10_-10, 10_10, 10_-15, 10_-15, 20_-20 și 30_-30.

Laminatul a fost format cu plăci de dimensiuni 180 mm x 180 mm x 0,48 mm. Grosimea a fost obținută prin aplicarea unei forțe de apăsare pe matriță pentru a elimina surplusul de rășină epoxidică. După extragerea plăcilor de laminat, compozitul a fost supus unui tratament termic recomandat de producătorul de rășină.

După aplicarea tratamentului termic, s-a extras câte un set de 5 epruvete din fiecare placă, cu ajutorul mașinii de debitat cu jet de apă WJM 4000, din laboratorul de la Departamentul Organe de Mașini și Grafică al Universității „Dunărea de Jos” din Galați, fără utilizarea abrazivului de tăiere, cu o viteză de tăiere de 30 mm/min.

Epruvetele au fost decupate și au dimensiuni conform standardului SR EN ISO537-4. Standardul stabilește și condițiile de încercare pentru determinarea proprietăților de tracțiune ale materialelor plastice compozite armate cu fibre izotrope și ortotrope. Viteza de testare a epruvetelor este de 1mm/min.

Valorile prezentate sunt mediile a cinci teste efectuate în aceleași condiții. Rezultatele obținute în urma testelor sunt prezentate în diagrama din figura 5.2.

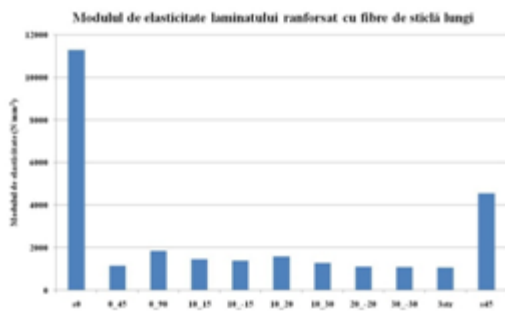


Fig. 5.2. Modulul de elasticitate a clasei de compozite formate

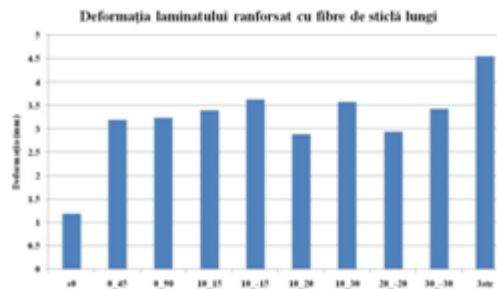


Fig. 5.3. Deformația la tracțiune a clasei de compozite formate din două rânduri de țesătură.

Modulul de elasticitate longitudinal are o tendință de descreștere odată cu creșterea sumei unghiurilor formate de direcția firelor și direcția forței de tracțiune, pentru fiecare din cele două lamine. Pentru compozitul cu trei straturi (codificat 3str în figurile care urmează) s-au obținut valori ale modulului de elasticitate longitudinal similare cu valorile laminelor având țesăturile cu unghiurile egale în modul, dar opuse. Pentru unghiurile opuse (20_-20, 30_-30), s-a obținut o valoare a modulului de elasticitate foarte apropiată de cele obținute în cazul unghiurilor orientate în aceeași direcție, ceea ce duce la concluzia că materialele au un comportament stabil din punct de vedere elastic.

Analizând valorile experimentale, a rezultat că deformația maximă a compozitului format din două straturi (figura 5.3) este similară, indiferent de unghiul format între firele celor două lamine ale compozitului, ca referință considerându-se valorile pentru compozitul cu unghiul 0° (codificare s0), cu o singură lamină. Pentru lamina cu unghiul de 0_45°, deformația maximă a epruvetelor este în jurul valorilor de 3,0 mm.

Pentru un laminat format din două lamine, materialul compozit este mai elastic, având o deformație mai mare decât deformația compozitului cel cu o singură lamină, în aceleași condiții de testare. Pentru laminatul cu trei straturi, se observă, de asemenea, o deformație mai mare față de valoarea care caracterizează un laminat format din două lamine cu unghiuri diferite.

Un element important în studiul mecanic al compozitelor laminate ranforsate cu fibre lungi este reprezentat de tensiunea maximă la tracțiune a materialului. Tensiunea maximă este calculată ca raportul dintre forța maximă aplicată compozitului și aria secțiunii transversale inițiale a epruvetei de testare la tracțiune.

Din punct de vedere constructiv, s-au format laminate cu o grosime dublă, respectiv triplă, prin suprapunerea mai multor straturi. Pentru a efectua o comparație între rezultatele obținute pentru o lamină și compozitul format cu mai multe straturi, s-au comparat tensiunile obținute din prima etapă a studiului cu cele obținute experimental pentru compozitele multi-strat (figura 5.4). Din grafic se observă o tendință similară cazului deformației și modulului de elasticitate longitudinal; cu cât suma unghiurilor dintre lamine este mai mare, cu atât rezistența maximă a compozitului este mai mică. Dar această valoare nu este mai mică decât valoarea minimă obținută pentru lamina având unghiul de 45° între fire și direcția forței de tracțiune.

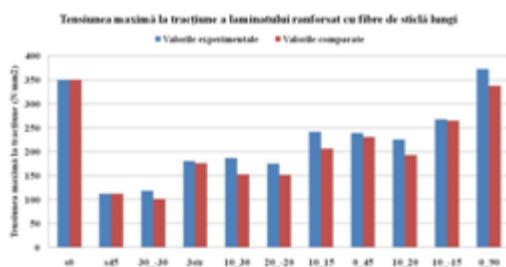


Fig. 5.4. Tensiunea maximă la tracțiune a clasei de compozite formate din două rânduri de țesătură

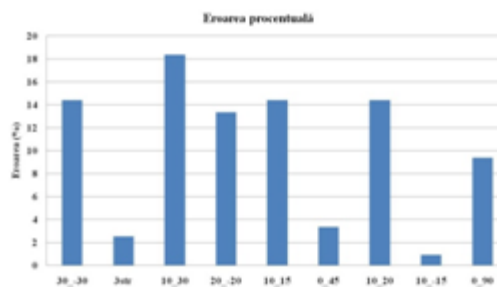


Fig. 5.5. Eroarea tensiunilor maxime la tracțiune a clasei de compozite formate din două rânduri de țesătură

Prin aplicarea calculelor propuse de Ishai [1, 13, 14], s-au obținut valori teoretice a tensiunilor maxime pentru compozitele cu două lamine cu orientări diferite față de direcția de aplicare a forței. Eroarea obținută pentru valorile estimate s-au obținut pentru laminele 10_30, aceste erori pot rezulta din erorile de măsurare sau din erorile formării materialului (figura 5.5).



Fig. 5.6. Procesul de cedare a laminatului format cu două straturi de țesătură, pentru compozitele 10_30, -20_20.

În cazul laminelor formate pentru acest studiu, deformația celor două materiale rigide participante (fibrele de sticlă și matricea epoxidică), este foarte mică.

Un alt aspect important care trebuie luat în considerare în studiul clasei de laminate formate este următorul: materialul poate fi considerat ca o lamină formată din mai multe straturi de țesătură. Pentru compozitele cu două lamine, diferențele între deformații sunt de aproximativ 0,5 mm, ceea ce reprezintă aproape 16% din valoarea de 3,00 mm.

Prin natura materialelor utilizate în formarea compozitelor, acest tip de combinare a materialelor, a rezultat că nu sunt recomandate pentru rezistențe mari pe o singură direcție, dar au o rezistență mare la temperaturi ridicate și o rezistență mare pentru medii corosive. Pot avea rezistențe apropiate ca valoare pe anumite direcții de solicitare a compozitului.

5.2. Analiza rezultatelor experimentale

Unghiul de aranjare a laminelor în compozitul laminat are o influență mare asupra caracteristicilor mecanice ale materialului format. Din punct de vedere mecanic, laminele introduse în compozit la diferite unghiuri formate între fire și direcția forței de tracțiune, duc la o stabilitate dimensională a compozitului și la o omogenizare a rezultatelor, indiferent de direcția de acționare a forței externe.

Proprietățile mecanice ale compozitelor laminate ranforsate cu fibre lungi, se pot estima prin utilizarea caracteristicilor mecanice pentru fiecare lamină introdusă în laminat. Precizarea tensiunilor maxime ale compozitului se poate face cu erori maxime de 18%, în această fază de obținere a materialelor la scară de laborator. Aceste erori se pot micșora prin reducerea erorilor de măsurare, îmbunătățirea condițiilor de formare și testare a compozitelor.

Ruperea materialelor ranforsate cu fibre de sticlă lungi se face pe direcția laminei cu unghiul cel mai mic, iar în cazul aplicării a două lamine opuse din punct de vedere al unghiurilor, cedarea compozitului se face aproape perpendicular pe direcția de acționare a forței de tracțiune.

6. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

6.1. Concluzii generale

Compozitele polimerice au o tendință fermă de înlocuirea a materialelor clasice (metalice, ceramice etc.) utilizate în industrie. O astfel de afirmație este necesar să se bazeze pe demonstrarea calităților materialelor polimerice în domeniul lor de utilizare. Caracterizarea mecanică se efectuează pe trei niveluri, micro-mecanic, mezo-mecanic și macro-mecanic, pentru a evidenția procese specifice fiecăruia. Proprietățile mecanice ale materialelor compozite se pot determina prin testare sau prin analiza cu elemente finite.

În urma analizării rezultatelor cercetărilor experimentale prezentate în acest studiu se pot extrage următoarele concluzii.

- Compozitele formate cu țesăturile supuse unui tratament chimic suplimentar propus de autor au un comportament mecanic mai stabil decât compozitele formate cu țesăturile tratate de producător. Timpul de aplicarea tratamentului trebuie să fie optim astfel încât rășina polimerizată să dea o stabilitate dimensională a țesăturii și să nu influențeze negativ compozitul final.

- Utilizarea fibrelor într-un compozit crește rezistența maximă la tracțiune, dar trebuie ținut cont și de raportul volumic dintre matricea epoxidică utilizată și aditiv, de raportul volumic dintre matrice și fibre, de natura lor și de aranjarea lor în compozit. La compozitele polimerice cu matrice epoxidică și ranforsate cu țesătură, matricea nu trebuie să depășească 0,01 mm din grosimea țesăturii.

- Unghiul format între direcția firelor țesăturii și direcția forței de tracțiune influențează caracteristicile mecanice ale compozitului. Valorile acestor unghiuri, cuprinse între 20°-70° sunt valori critice. Pentru aceste unghiuri valorile tensiunilor maxime sunt influențate doar de caracteristicile mecanice ale matricei.

- Pulberile de argilă și talc cu concentrațiile utilizate de autor au o influență negativă asupra caracteristicilor mecanice ale compozitelor formate. La concentrații masice mari de peste 15% argilă și 15% talc, valorile tensiunii la rupere sunt foarte mici față de valorile tensiunii la rupere a matricei neaditivate cu pulberi.

- Viteza de testare la tracțiune a laminelor formate pentru acest studiu nu are o influență semnificativă asupra caracteristicilor mecanice pentru intervalul 2-15 mm/min.

- Pentru calculul coeficientului lui Poisson, pentru laminele formate, sunt necesare măsurarea consecutivă a deformațiilor pe planele de referință xy și yx. Aceste deformații se pot măsura prin microscopie optică în timpul aplicării unei forțe de tracțiune. Pentru geometria laminei studiate este suficient măsurarea coeficientului lui Poisson doar în planul xy; celelalte două plane, yz și xz, au deformații nesemnificative datorită grosimii mici de 0,4 mm. Pentru calculul coeficientului lui Poisson pe epruvetele conform standardului SR EN ISO 527-4, este suficientă utilizarea unei camere foto digitale cu o rezoluție minimă de 5 MPx și a unui pseudocod realizat de autor.

- În urma rezultatelor experimentale, pentru unghiul de 15° pentru țesătura mixtă cu fibre aramidice și fibre de carbon, respectiv 20° pentru țesătura cu fibre de carbon, coeficientul lui Poisson are valori mari, similare elastomerilor, datorată aranjării firelor pe direcția tensionării materialului compozit, a efectelor de margine (micro-detașări ale firelor din matrice la marginea epruvetei, micro-fisurări ale matricei, nu neapărat vizibile pe suprafața epruvetei etc.).

- Diferențele mari dintre valorile rezultatelor experimentale ale materialelor compozite formate cu un singur strat, s-au obținut pentru unghiurile de 0° și 90° . Acest lucru este datorat geometriei de aranjare a firelor în compozit. Țesătura plan-simplă are un unghi de trecere a firelor mai mare decât țesătura plan-diagonală, ceea ce determină tensiuni de forfecare mai mici la aplicarea unei forțe de tracțiune pentru firele împletite plan-diagonal.

- Pentru generarea modelelor cu elemente finite sunt necesare următoarele etape prestabilite: stabilirea geometriei ansamblului, stabilirea zonelor de contact, tipul de aplicare a sarcinilor externe asupra ansamblului, zona de aplicare a sarcinilor, stabilirea zonelor critice din datele experimentale și stabilirea unei discretizări fine în zona de interes etc. Aceste elemente duc la valori rezultate din simulare apropiate de valorile experimentale.

- Geometria firelor depinde direct de grosimea fibrei; cu cât fibra are o secțiune transversală mai mare, cu atât grosimea firului este direct proporțională cu grosimea fibrelor; numărul de fibre cuprinse în fir depinde direct de geometria țesăturii, fibrei și firului. Deci, țesăturile au o influență directă asupra ariei secțiunii firului; cu cât firele sunt mai distanțate, cu atât lungimea de undă a firului este mai mare și unghiul de trecere este mai mic.

- Din punct de vedere geometric, țesăturile plan-simple se pot analiza pe o singură celulă care să conțină doar intersecția între două fire consecutive pe ambele direcții. Pentru țesăturile plan-diagonale, celula pentru discretizare are nevoie de un set de minim 4 fire consecutive pe ambele direcții.

- Tensiunile de forfecare apar în zonele de trecere dintre urzeală și bătaie, pentru ambele țesături, dar pentru țesătura plan-simplă acestea sunt mai mari datorită unghiului de trecere mai mare dintre cele două fire. Pentru tensiunile calculate cu ajutorul analizei cu MEF, s-au obținut rezultate foarte apropiate față de rezultatele experimentale.

- Prin compararea rezultatelor experimentale cu cele din analiza cu MEF, diferențele obținute sunt de 16% pentru țesătura plan-simplă și 12% pentru țesătura plan-diagonală, diferențe datorate datelor de intrare a analizei cu MEF, erorilor de măsurare, neuniformității distribuției firelor etc.

- Unghiul de aranjare al laminelor în compozitul laminat are o influență mare asupra caracteristicilor mecanice ale materialului format. Din punct de vedere mecanic, laminele stratificate într-un compozit la diferite unghiuri dintre țesătură și direcția forței, testate și formate în acest studiu, conduce compozitul la o stabilitate dimensională.

- Proprietățile mecanice a compozitelor laminate ranforsate cu țesătură se pot estima prin aplicarea caracteristicilor mecanice pentru fiecare lamină utilizată în laminat. Prezicerea tensiunilor maxime a compozitului se pot obține date cu erori maxime de 18%. Aceste erori se pot micșora prin reducerea erorilor de măsurare, implicarea condițiilor de testare a compozitelor.

Pentru a forma un material polimeric compozit este suficient realizarea unui studiu amplu pe părțile componente a materialului. De asemenea se pot realiza și simula diferite structuri cu geometrii complexe ale compozitului, cu ajutorul programului cu modelarea elementelor finite, ANSYS, acest program permite tendințe diferite de testare în diferite condiții. Un alt mod de testare a compozitului este formarea compozitului obținerea datelor experimentale.

6.2. Contribuții personale în formarea materialelor compozite și în testarea și simularea acestora

În urma desfășurării cercetărilor asupra comportamentului mecanic a compozitelor polimerice se evidențiază următoarele contribuții originale ale autorului lucrării:

- Realizarea unei documentații la zi asupra comportării mecanice a compozitelor polimerice termorigide.

- Pe baza documentației studiate au fost proiectate compozite cu matrice epoxidică aditivată cu pulbere de argilă și talc, și ranforsate cu țesături cu fibre aramidice-carbon, cu țesături cu fibre de carbon.
- Elaborarea unei metode originale de formare ale materialelor compozite.
- Realizarea unor materiale compozite, pornind de la rețetele originale ale autorului.
- Conceperea unei metodologii de testare ale materialelor compozite ranforsate cu țesături.
- Obținerea și analiza unui set de date experimentale referitoare la proprietățile mecanice a compozitelor formate.
- Realizarea și validarea rezultatelor modelării cu elemente finite a celulelor de compozit cu țesătură plan-simplă și plan-diagonală.
- Formarea și testarea pseudo-compozitelor ranforsate cu mai multe straturi de țesătură.
- Publicarea la conferințe internaționale și în reviste de specialitate a unui număr de 27 lucrări științifice pe subiectul tezei, dintre care 6 ca prim autor:
 - Lucrări indexate ISI – 5;
 - Lucrări indexate BDI – 4;
 - Lucrări publicate la conferințe internaționale – 18.

6.3. Direcții viitoare de cercetare

Domeniul cercetat reprezintă interes în diferite domenii de aplicații, de aceea se pot menționa câteva direcții de cercetare:

- extinderea domeniului de studiu mecanic prin utilizarea mai multor tipuri de rășini termorigide și utilizarea mai multor tipuri de țesături, cu diferite combinații de fibre;
- aplicarea de noi tipuri de tratamente pe materialele de armare pentru îmbunătățirea caracteristicilor mecanice;
- lărgirea domeniului de studiu prin testarea materialelor formate la mai multe tipuri de solicitări (compresiune, delaminare etc.);
- realizarea de noi geometrii pentru analiza cu MEF, a pseudo-compozitului format cu mai multe straturi de țesătură;
- extinderea domeniului de studiu pentru compozitul laminat, prin combinarea mai multor tipuri de țesături, cu diferite combinații de fibre.

BIBLIOGRAFIE

- [1] **V. Vasiliev, E. Morozov**, *Mechanics and Analysis of Composite Materials*, 0080427022nd ed., Elsevier, 2001.
- [2] **R. Jones**, *Mechanics of Composite Materials*, 2nd ed., Taylor & Francis, Ed., 2004.
- [3] **Autar Kaw**, *Mechanics of composite materials*, 2nd ed., Taylor & Francis Group, Ed., 2006.
- [4] **I. N. Reddy**, *Mechanics of laminated composite plates and shells : theory and analysis*, 2nd ed., CRC Press, 2004.
- [5] **G. Voyiadjis, P. Kattan**, *Mechanics of Composite Materials with MATLAB*, Springer Berlin, 2005.
- [6] **J. M. Hodgkinson**, *Mechanical testing of advanced fibre composites*, CRC Press, 2000.
- [7] **C., Freti, F. Andreoli**, *Man-Made Fibres, Reference Books of Textile Technologies*, Fondazione ACIMIT, 2004.
- [8] **D.L.C., Deborah**, *Composite Materials Science and Applications*, Springer, 2010.
- [9] **J.A., Brydson**, *Plastics Materials*, Butterworth&Heinemann, 1999.
- [10] **D., F., Adams**, *Composite Materials: Testing, Design, and Acceptance Criteria*, American Society for Testing and Materials, 2002.
- [11] **F.A., Carlsson, L.A., Pipes, R.B Adams**, *Experimental Characterization of Advanced Composite Materials*, CRC Press LLC, 2002.
- [12] **A.K., Vegt**, *From Polymers to Plastics*, Delft University Press, 2006.
- [13] **E., Negruț, C., Gheorghiu, H., Hadăr, A. Alămoreanu**, *Studiul caracteristicilor și metodelor de calcul adecvate materialelor compozite*, Contract M. C. T., 1992.
- [14] **A. Hadăr**, *Structuri din compozite stratificate*, Editura Academiei și Editura AGIR, 2002.
- [15] **C.A., Harper**, *Modern Plastics Handbook*, McGraw-Hill, 2000.
- [16] **G. Staab**, *Laminar Composites*, 1st ed., Butterworth-Heinemann, 1999.
- [17] **A., Mortensen, A., Kellya**, *Concise Encyclopedia of Composite Materials*, Elsevier, 2007.
- [18] **F., Tsai, L., Prakash, V., Rajendran, A.M., Dandekar, D.P., Yuan**, *Spall Strength of Glass Fiber Reinforced Polymer Composites*, International Journal of Solids Structures, vol. Vol 44, no. 24, pp. pp 7731-7747, 2007.
- [19] **J.R., Sierakowski, R.L., Vinson**, *The Behavior of Structures Composed of Composite Materials*, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [20] **D., Hoa, S. V., Tsai, S. W., Gay**, *Composite Materials – Design and Applications*, CRC Press, 2003.
- [21] **M., Sherburn**, *Geometric and Mechanical Modelling of Textiles*, University of Nottingham, 2007.
- [22] **David J., Steigmann Ray W. Ogden**, *Mechanics and Electrodynamics of Magneto- and Electro-elastic Materials*, Springer, 2011.
- [23] **R., A., Ryntz**, *Coatings Of Polymers And Plastics*, CRC Press, 2003.
- [24] **G., Heinrich, M., Klüppel, T., A., Vilgis**, *Reinforcement of Polymer Nano-Composites: Theory, Experiments and Applications*, 2009.
- [25] **K., Friedrich**, *Polymer Composites: From Nano- to Macro-Scale*, Springer, 2005.
- [26] **D., Yogi Goswami, F., Kreith**, *Handbook of Mechanical Engineering*, CRC Press,

2005.

- [27] **B., Harris**, *Engineerin Composite Materials*, The Institute of Materials, London, 1999.
- [28] **B., P., Grady**, *Carbon Nanotube-Polymer Composites: Manufacture, Properties, and Applications*, Wiley, 2011.
- [29] **F. C., Campbell**, *Manufacturing Processes for Advanced Composites*, Elsevier Science, 2004.
- [30] **S., Y., Yu**, *Science and Engineering of Short Fibre Reinforced Polymer Composites*, CRC Press, 2009.
- [31] **H., Harders, M., Baeker, J., Roesler**, *Mechanical Behaviour of Engineering Materials: Metals, Ceramics, Polymers, and Composites*, Springer, 2007.
- [32] **Yiu-Wing Mai, Jang-Kyo Kim**, *Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites*, Elsevier Science, 1998.
- [33] **G., Tomescu, M., Novac, O., A., Iovu, H., Roșca, I.D., Ivănuș, G., Hubca**, *Materiale compozite*, Editura Tehnică, 1999.
- [34] **C., Arlt, S., Aranda, U., Riedel, G., Ziegmann, S., Duwea**, *A detailed thermal analysis of nanocomposites filled with SiO₂, AlN or boehmite at varied contents and a review of selected rules of mixture*, Composites Science and Technology, pp. 41-47, 2012.
- [35] **H., Rokni D.T., Abbas S. Milani, R., J. Seethaler, R. A., Meisam Omid**, *Prediction of the mechanical characteristics of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites using a new form of the rule of mixtures*, Carbon , vol. 48, pp. 3218-3228, 2010.
- [36] **Pu Zhanga, Fan Yangb Yiming Fua**, *Interlaminar stress distribution of composite laminated plates with functionally graded fiber volume fraction*, Materials & Design, vol. 31, pp. 2904–2915, 2010.
- [37] **Z., Wei, L., Cheng, W., O., Wong L., H., Yam**, *Numerical analysis of multi-layer composite plates with internal delamination*, Computers and Structures, vol. 82, pp. pp. 627–637, 2004.
- [38] **B., N., Singh, M. K., Pandit M., D., V., H., Kishore**, *Nonlinear static analysis of smart laminated composite plate*, Aerospace Science and Technology, vol. 15, pp. pp. 224-235, 2011.
- [39] **B., Pradhan, R., R., Das**, *Adhesion failure analyse sofbonded tubular single lapjoints in laminated fibre reinforced plastic composites*, International Journalof Adhesion&Adhesives, vol. 30, pp. pp. 425-438, 2010.
- [40] **J., N., Reddy**, *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells.Theory and Analysis*, CRC Press LLC, 2003.
- [41] **L., Mouritz, A.P., Bannister, M., Tong**, *3D Fibre Reinforced Polymer Composites*, ELSEVIER, 2002.
- [42] **D.N., Pelegri, A.A., Kedlaya**, *Failure prediction of Graphite/Epoxy Laminates with Induced Intermittent Load Surge During Fatigue*, Acta Materialia, vol. 50, pp. pp.4813 – 4821, 2002.
- [43] **L., S., Xanthis, A., Benjeddou, A., Nasedkin, P., Bondarev**, *Mathematical modelling and finite element simulation of smart tubular composites*, Computers and Structures, vol. 84, pp. 2385–2395, 2006.
- [44] **Dae-Yong Park, Sang-Youl Lee**, *Buckling analysis of laminated composite plates containing delaminations using the enhanced assumed strain solid element*, Solids and Structures, vol. 44, pp. pp. 8006–8027, 2007.

- [45] **Qing-Hua Qin, Hongwei Zhou, Hui Miao, Huaiwen Wang**, *Damage Progress Simulation in Unidirectional Composites by Extended Finite Element Method (XFEM)*, Advanced Materials Research, vol. 152-153, pp. 73-76, 2011.
- [46] **J., A., Nairn**, *Fracture mechanics of composites with residual stresses, imperfect interfaces, and traction-loaded cracks*, Composites Science and Technology, vol. 61, pp. pp. 2159-2167, 2000.
- [47] **C., Linder F., Armero**, *New finite elements with embedded strong discontinuities in the finite deformation range*, Computer Methods Application Mechanical Engineering, vol. 197, pp. pp. 3138–3170, 2008.
- [48] **J., Nairn**, *Matrix Microcracking in Composites*, Polymer Matrix Composites, vol. 2, pp. 50-79, 2000.
- [49] **N., Coutellier, D., Muzic, M., Berg-Pollack, A., Cai, Y., Zimmermann, A., Depoorter**, *Damage Evolution in a Filled Epoxy Resin*, Acta materialia, vol. 54, pp. 927-934, 2006.
- [50] **U., Fischer, F., Sandler, J.K.W., Altstadt, V., Weimer, C., Buchs, W., Beier**, *Mechanical Performance of Carbon Fiber-Reinforced Composites Based on Stitched Preforms*, Composites Part A: applied science and manufacturing, vol. 38, pp. 1655-1663, 2007.
- [51] **V., V., Qian, D., Liu, Y., Mokashi**, *A Study on the Tensile Response and Fracture in Carbon Nanotube-Based Composites Using Molecular Mechanics*, Composites Science and Technology, vol. 67, pp. 530-540, 2007.
- [52] **W., Ruijter, A., C., Long, I., A., Jones J., J., Crookston**, *Modelling mechanical performance including damage development for textile composites using a grid based finite element method with adaptive mesh refinement*, 8th International Conference on Textile Composites, vol. 8, pp. pp. T09-01-T09-6, 2006.
- [53] **E., V., Honein, R., A., Dibo, P., N., Ayoub H., G., Rai**, *THE INFLUENCE OF FIBER WAVINESS ON THE CRITICAL BUCKLING LOAD OF MULTILAYERED COMPOSITES*, Interface Design of Polymer Matrix Composites – Mechanics, Chemistry, Modelling and Manufacturing, pp. 249-255, 2008.
- [54] **P., K., Mallick**, *Fiber-Reinforced Composites. Materials, Manufacturing, and Design*, CRC Press, 2008.
- [55] **F., N., Lauge**, *Composite Materials. Properties as Influence by Phase Geometry*, Springer, 2005.
- [56] **J., J., M., Decker, P., Ishikawa, T., Northolt, M., G., Picken, S., J., Schlatmann, R., Baltussen**, *Polymeric and Inorganic Fibers*, Advances in Polymer Science, 2005.
- [57] **J., L., Leblanc**, *Polymers and Short Fibers*, Filled Polymers. Science and Industrial Applications, pp. 339–410, 2009.
- [58] **M. Morgan**, *Carbon Fibers and Their Composites*, CRC Press, 2005.
- [59] **B., Imad, A., Benseddiq, N., Benmedakhene, S., Maazouzc, A., Mouhmid**, *A study of the Mechanical Behaviour of a Glass Fibre Reinforced Polyamide 6,6: Experimental Investigation*, Polymer Testing, vol. 25, pp. pp.544-552, 2006.
- [60] **E., W., Flick**, *Plastics Additives an Industrial Guide*, Noyes Publications, 2001.
- [61] **M., A., Gauthier, W., Martinez-Alonso, A., Tascon, J., M., D., Montes-Mor**, *Mechanical Properties of High-Strength Carbon Fibres. Validation of an End-Effect Model for Describing Experimental Data*, Carbon, vol. 42, no. 7, pp. pp.1275-1278, 2004.
- [62] **S., Ke-zhi, L., Ling-jun, G., Quan-ming, G., Feng-tao, L., Farhan**, *Effect of density*

- and fibre orientation on the ablation behaviour of Carbon-Carbon Composites*, New Carbon Materials, vol. 25, no. 3, pp. pp.161-167, 2010.
- [63] **H.-D., Kim, S.-W., Lee.Y.-O., Rokugo, K., Yun**, *Tensile Behavior of Synthetic Fiber-Reinforced Strain-Hardening Cement-Based Composite (SHCC) After Freezing and Thawing Exposure*, Cold Regions Science and Technology, vol. 67, no. 1-2, pp. pp.49-57, 2011.
- [64] **M., S., Unnikrishnan, K., C., Narayanan, S., Sebastian**, *Viscoelastic Properties of Kevlar-29 Fabric Tape Strength Member*, Mechanics of Materials, vol. 40, no. 11, pp. pp.949-960, 2008.
- [65] **K. T., Lu,J., Varadan,V. K., Chang, F. K., Tu,J. P., Lam, P. M., Lau**, *Multi-functional materials and structures*, Advanced materials Research, vol. 47-50, 2008.
- [66] **R.J. Day, A. Nesbitt, D., Bakavos D., A. Papargyris**, *Comparison of the mechanical and physical properties of a carbon fibre epoxy composite manufactured by resin transfer moulding using conventional and microwave heating*, Composites Science and Technology, vol. 68, pp. pp. 21–46, 2009.
- [67] **Hojung Yang, Jyongsik Jang**, *The effect of surface treatment on the performance improvement of carbon fiber/polybenzoxazine composites*, JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE, vol. 35, pp. pp. 2297 – 2303, 2000.
- [68] **Zhong Zhang, Hui Zhang**, *Comparison of short carbon fibre surface treatments on epoxy composites II. Enhancement of the wear resistance*, Composites Science and Technology, vol. 64, pp. pp. 2031–2038, 2004.
- [69] **Baoyan Zhangb, Fenghui Shib, Min Li, Zuoguang Zhanga, Yizhuo Gua Zhishuang Dai**, *Effect of heat treatment on carbon fiber surface properties and fibers/epoxy interfacial adhesion*, Applied Surface Science, vol. 257, pp. pp. 8457– 8461, 2011.
- [70] **M., R., Garnich V., M., K., Akula**, *Effective ply and constituent elastic properties for cracked laminates*, Composites: Part B , vol. 43, pp. pp. 2143–2151, 2012.
- [71] **J., M., Bielsa, A., Chiminelli, J., Cuartero, S., Serrano, N., Tolosana, R., Guzman de Villoria, A., Miravete**, *3D mesomechanical analysis of three-axial braided composite materials*, Composites Science and Technology, vol. 66, pp. 2954–2964, 2006.
- [72] **Q., H., Qin**, *Trefftz finite element method and its applications*, Applied Mechanics Reviews, vol. 58(5), pp. 316-337, 2005.
- [73] **K., Reifsnider, S., Ogihira**, *Characterization of nonlinear behavior in woven composite laminates*, Applied Composite Materials, vol. 9, pp. 249-263, 2002.
- [74] **Wei Xu, Weiqi Yan, Jianping Geng**, *Application of the Finite Element Method in Implant Dentistry*, Springer, 2008.
- [75] **Qing-Hua Qin**, *Formulation of hybrid Trefftz finite element method for elastoplasticity*, Applied Mathematical Modelling, vol. 29, pp. pp. 235–252, 2005.
- [76] **L., Karger, R., Rolfes, K., Rohwer, A., Wetzel**, *Evaluation of two finite element formulations for a rapid 3D stress analysis of sandwich structures*, Computers and Structures, vol. 83, pp. pp. 1537–1545, 2005.
- [77] **Qing-Hau Qin, Qing-Sheng Yang**, *Fiber interaction and effective elasto-plastic properties of short-fiber composites*, Composite Structures, vol. 54, pp. pp. 523-528, 2001.
- [78] **G., Karami A., R., Setoodeh**, *Static, free vibration and buckling analysis of anisotropic thick laminated composite plates on distributed and point elastic supports using a 3-D layer-wise FEM*, Engineering Structures, vol. 26, pp. pp. 211–220, 2004.

- [79] **S., Oller, O., Salomon, E., Onate, F., Rastellini,** *Composite materials non-linear modelling for long fibre-reinforced laminates Continuum basis, computational aspects and validations*, Computers and Structures, vol. 86, pp. pp. 879–896, 2008.
- [80] **A., Chiminelli, B., Garcia, M., Lizaranzu, M., A., Jimenez J., A., Garcia,** *Characterization and material model definition of toughened adhesives for finite element analysis*, Adhesion & Adhesives, vol. 31, pp. pp. 182–192, 2011.
- [81] **T., Miller, S., Yim, D., Kachlakev,** *Finite element modelig of reinforced concrete structures strengthened with FRP laminates*, Oregon Department of Transportation, 2001.
- [82] **M., Rao, R., Chandra Raju, B., Krishna Murty, N., Kumar Sivaji Babu,** *Micromechanical analysis of FRP hybrid composite lamina for in-plane transverse loading*, Engeering and Materials Sciences, vol. 15, pp. pp. 382-390, 2008.
- [83] **L., Guven, E., Madenci,** *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS*, Springer, 2005.
- [84] **S., Moaveni,** *Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS*, Prentice Hall, 2007.
- [85] **Y., Nakasone, S., Yoshimoto, Tadeusz Stolarski,** *Engineering Analysis with ANSYS Software*, Butte rworth-Heine mann, 2007.
- [86] **V., Nassehi,** *Practical Aspects of Finite Element Modelling of Polymer Processing*, Wiley, 2002.
- [87] **J., Narasimha, R., Ozden, O., Ochoa,** *Finite Element Analysis of Composite Laminates*, Kluver Academic Publishing, 1992.
- [88] **G., A., Maugin, R., V., Goldstein,** *Surface Waves in Anisotropic and Laminated Bodies and Defects Detection*, Springer, 2004.
- [89] **Z., C., Xi, G. R., Liu,** *Elastic Waves in Anisotropic Laminates*, CRC Press, 2001.
- [90] **R., T., Haftka, P., Hajela Zafer Gordal,** *Design and Optimization of Laminated Composite Materials*, Wiley-Interscience, 1999.
- [91] **D., Weinberg, S., Ragionieri,** *Finite element implementation of advanced failure criteria for composites*, Reinforced Plastics and Composites, vol. 20, pp. 147-165, 2001.
- [92] **A., Puck,** *Analysis of Failure in Fiber Polymer Laminates*, Springer, 2008.
- [93] **S., Zaretsky, E., Grossman, E., Wagner, H., D., Katz,** *Dynamic Tensile Strength of Organic Fiber-Reinforced Epoxy Micro-Composites*, Composites Science and Technology, vol. 45, pp. 1177-1183, 2004.
- [94] **V., P., W., Yuan, J., Lee, S.-H., Shim,** *A Techinque for Rapid Two-Stage Dynamic Tensile Loading of PolymersA Techinque for Rapid Two-Stage Dynamic Tensile Loading of Polymers*, Experimental Mechanics, vol. 41, pp. 122 – 127, 2001.
- [95] **Y., M, Kulakov, V., L., Tarnopolskii,** *Tests Methods for Composites*, Mechanics of Composite, vol. 37, pp. pp.431 – 448, 2001.
- [96] **N., K., Zemtsov, M., P., Zarazovskii, M., N., Kucher,** *Deformation Behavior and Strength of Unidirectional Carbon Fiber Laminates*, Mechanics of Composite Materials, vol. 42, pp. pp. 407-418, 2006.
- [97] **N.K., Zemtsov, M.P., Zarazovskii, M.N., Kucher,** *Deformation of Laminated Epoxy Composites Reinforced with High-Strength Fibers*, Strength of Materials, vol. 38, pp. pp.27 – 38, 2006.
- [98] **Sanjeevamurthy, G., Rangasrinivas Girisha C.,** *Tensile Properties of Natural Fiber-Reinforced Epoxy-Hybrid Composites*, International Journal of Modern Engineering

- Research , vol. 2, pp. pp-471-474, 2012.
- [99] **L., Minak, G., Morri, A., Ceschini,** *Tensile and Fatigue Properties of the AA 6061/20 vol.% Al₂O₃p and AA7005/10 vol.% Al₂O₃p Composites*, Composites Science and Technology, vol. 66, pp. pp.333-342, 2006.
- [100] **M., A., Atallah, A., Suter, U., W., Osman,** *Influence of Excessive Filler Coating on the Tensile Properties of LDPE–Calcium Carbonate Composites*, Polymer, vol. 45, pp. pp.1177-1183, 2004.
- [101] **B., C., Ray** *Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites*, Glass and carbon fibers reinforced epoxy composites, vol. 298, pp. 111-117, 2006.
- [102] **T., S., Srivatsan, D., Bhattacharyya, Ming Qiu Zhang, M., M. P. Ho Alan K., T., Lau,** *On the Influence of Carbon Nanotubes and Processing on Tensile Response and Fracture Behavior of a Magnesium Alloy*, Advanced Materials Research , vol. 410, pp. pp.133-141, 2011.
- [103] **Lin Ye, Youhong Tang, Ye Luc Dong Wang,** *Monitoring of delamination onset and growth during Mode I and Mode II interlaminar fracture tests using guided waves*, Composites Science and Technology, vol. 72, pp. 145–151, 2012.
- [104] **S., B., Cheikh, R., B., Brahim,** *Influence of Fibre Orientation and Volume Fraction on the Tensile Properties of Unidirectional Alfa-Polyester Composite*, Composites Science and Technology, vol. 67, pp. 140-147, 2007.
- [105] **M., Jamal Omid, Mahmood M. Shokrieh,** *Tension behavior of unidirectional glass/epoxy composites under Tension behavior of unidirectional glass/epoxy composites under*, Composite Structures, vol. 88, pp. 595–601, 2009.
- [106] **C., Long,** *Design and manufacture of textile composites*, Woodhead publishing Limited, 2005.
- [107] **D., C., Tandon, G., P., Zoghi, M., Foster,** *Evaluation of Failure Behavior of Transversely Loaded Unidirectional Model Composites*, Experimental Mechanics, vol. 46, pp. 217 – 243, 2006.
- [108] **L., Ivanov, D., Lomov, S., Verpoest, I., Gorbatikh,** *On Modelling of Damage Evolution in Textile Composites on Meso-Level via Property Degradation Approach*, Composites Part A: applied science and manufacturing, vol. 38, pp. 2433-2442, 2007.
- [109] **C., K., Costello, G., A., Shield,** *The effect of wire rope mechanics on material properties of cord composites: an elasticity approach*, pp. 9-15, 1999.
- [110] **Jinhua Wang,** *Predictive Modelling and Experimental Measurementt of Composite Forming Behaviour*, The University of Nottingham, 2008.
- [111] **Y., Lapusta, W., Wagner, J., Harich,** *3D FE-modeling of surface and anisotropy effects during micro-buckling 3D FE-modeling of surface and anisotropy effects during micro-buckling*, Composite Structures, vol. 80, pp. 551–555, 2009.
- [112] **V., V., Bolotin,** *Mechanics of Delaminations in Laminate Composite Structures*, Mechanics of Composite Materials, vol. 37, pp. pp.367-380, 2001.
- [113] **S., K., Dahlstrom, J., Karlsson, T., Magnusson, A., Walter,** *A Study of the Relation Between the Mechanical Properties and the Adhesion Level in a Laminated Packaging Material*, Mechanics of Composite Materials, vol. 40, pp. pp.367-380, 2004.
- [114] **R., T., Schapery, R., A., Bocchieri,** *Time-Dependent Deformation and Damage Growth in a Rubber-Toughened Fiber Composite*, Mechanics of Time-Dependent, vol. 8, pp. pp.137 – 167, 2004.
- [115] **Bîrsan, I.-G., Andrei, G., Ungureanu, V., Roman, I., Circiumaru, A.,** *Wear*

Behavior of Fabric Reinforced Epoxy Based Composites, Proceedings V International Scientific Conference BALTRIB'2009, 2009.

- [116] **Bria, V., Roman, I., Ungureanu, V., Cîrciumaru, A., Bîrsan, I.G.**, *Thermal Properties of Particulate Epoxy Composites*, Proceedings of the 3rd Symposium With International Participation Durability and Reliability of Mechanical Systems, pp. 319-321, 2010.
- [117] **Bria, V., Bîrsan, I., G., Cîrciumaru, A., Ungureanu V.**, *Electrical Conductivity of Fabric Reinforced Ferrite Filled Epoxy Composites*, Proceedings of the 8th Youth Symposium on Experimental Solid Mechanics, p. 8, 2009.
- [118] **Bîrsan, I., G., Roman, I., Bria, V., Ungureanu, V., Cîrciumaru, A.**, *Starch – Epoxy Composites*, Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium “Intelligent Manufacturing & Automation: Power of Knowledge and Creativity”, vol. 22, pp. 285-286, 2011.
- [119] **Bîrsan, I., G., Cîrciumaru, A., Bria, V., Ungureanu, V.**, *Tribological and Electrical Properties of Filled Epoxy Reinforced Composites*, Tribology in Industry, vol. 31, pp. 33-36, 2009.
- [120] **Bîrsan, I.G., Cîrciumaru, A., Andrei, G., Dima, D., Diaconu, N., Ungureanu, V., Bria, V., Postolache, I.**, *Fabric Reinforced Epoxy Composites*, Annals of DAAAM for 2009 & Proceedings of the 20th International DAAAM Symposium, 2009.
- [121] **Roman, I., Bria, V., Ungureanu, V., Bîrsan, I.G., Cîrciumaru, A.**, *Tribological Analysis of Fabric Reinforced Composites*, Proceedings of the 7th International Scientific Conference Research and Development of Mechanical Elements and Systems, pp. 359-362, 2011.
- [122] **Bria, V., Bîrsan, I.G., Cîrciumaru, A., Ungureanu, V., Roman, I.**, *Tribological Characterization of Particulate Composites*, Proceedings of the ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, 2010.
- [123] **Bîrsan, I.G., Cîrciumaru, A., Bria, V., Roman, I., Ungureanu, V.**, *Mechanical Characterization of Fiber Fabrics*, Proceedings of the ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, 2010.
- [124] **Ungureanu, V., Roman, I., Bria, V., Bîrsan, I.G., Cîrciumaru, A.**, *Tribological comparison of some particulate composites*, Proceedings of the 12th International Conference on Tribology, pp. 190-193, 2011.
- [125] **Bria, A., Cîrciumaru, I. G., Bîrsan, V., Ungureanu, V.**, *Fabric Reinforced Filled Epoxy Composites*, Tribology, pp. pp. 132-135, 2009.
- [126] **Ungureanu, V., Roman, I., Bria, V., Bîrsan, I., G., Cîrciumaru, A.**, *Physical Properties of Clay-Talc/Epoxy Composites*, Proceedings of the 7th International Scientific Conference Research and Development of Mechanical Elements and Systems, pp. 363-366, 2011.
- [127] **Ungureanu, V., Bria, V., Roman, I., Bîrsan, I., G., Cîrciumaru, A.**, *Mechanical analysis of fabric reinforced epoxy laminae*, International Conference POLYMER COMPOSITES 2011, pp. 127-130, 2011.
- [128] **Ungureanu, V., Roman, I., Bria, V., Cîrciumaru, A., Bîrsan, I., G.**, *A Qualitative Study of Failure Mechanisms for Fabric Reinforced Laminae*, Proceedings of 10th International Conference, Research and Development in Mechanical Industry RaDMI, vol. 10, 2011.
- [129] **Bria, V., Ungureanu, V., Roman, I., Cîrciumaru, A., Bîrsan, I., G.**, *A Mechanical Analysis of Fabric Reinforced Plies*, Proceedings of 10th International Conference, vol. 10, 2011.

- [130] **Roman I., Ungureanu, V., Bria, V., Cîrciumaru, A., Bîrsan, I., G.,** *Strach Epoxy Composites a Study of Starch Amount Influence*, Proceedings of the 12th International Conference on Tribology – SERBIATRIB'11, pp. 181-184, 2011.
- [131] **Roman I., Ungureanu, V., Bria, V., Cîrciumaru, A., Bîrsan, I., G.,** *Electrical and thermal karakterization of fabric reinforced laminae*, International Conference Polymer composites 2011, pp. 131-134, 2011.
- [132] **Roman I., Bria, V., Ungureanu, V., Cîrciumaru, A., Bîrsan, I., G.,** *Physical Properties of Starch Filled Epoxy Composites*, Proceedings of 10th International Conference, Research and Development in Mechanical Industry RaDMI, vol. 10, 2011.
- [133] **V., Bria, A., Cîrciumaru, I., G., Bîrsan, V., Ungureanu,** *Fabric reinforced filled epoxy composites*, , Galati, 2010, pp. 22-26.
- [134] **V., Roman, I., Postolache, I., Ungureanu, V., Bîrsan, I., G., Cîrciumaru, A., Bria,** *Mechanical Properties of Filled Epoxy Based Reinforced Composites*, roceedings of the International Conference NewTech 2009, The Annals of “Dunarea de Jos” University Galati, pp. 315-318, 2009.
- [135] **V. Bria, V. Ungureanu, A. Cîrciumaru, I.-G. Bîrsan, I. Roman,** *Physical Properties of Starch Filled Epoxy Composites*, pp. 355-358, 2011.
- [136] **Bîrsan I., G., Cîrciumaru, A., Bria, V., Roman, I., Ungureanu, V.,** *Some Mechanical Properties of Reinforced Filled Epoxy Composites*, Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium, vol. 21, pp. 379-380, 2010.
- [137] **Bria V., Bîrsan, I., G., Cîrciumaru, A., Ungureanu, V.,** *A Technique to Obtain High Filled Epoxy Composites*, Proceedings of the 13th International Conference, Modern Tehnologies, Quality and Innovation, pp. 2066-3919, 2009.
- [138] **Bria V., Roman, I., Ungureanu, V., Cîrciumaru, A., Birsan, I.G.,** *Thermal Properties of Particulate Epoxy Composites*, Fiability & Durability, no. 5, pp. 47-50, 2010.
- [139] **Ungureanu V., Bria, V., Roman, I., Birsan, I.G., Cîrciumaru, A.,** *Some properties of starch filled epoxy*, International Conference POLYMER COMPOSITES 2011, pp. 123-126, 2011.
- [140] **Ungureanu V., Bria, V., Postolache, I., Cîrciumaru, A., Birsan, I., G.,** *Bending Properties of Fabric Reinforced Composites With Stratified Filled Epoxi Matrix*, Proceedings of the 3rd Symposium With International Participation Durability and Reliability of Mechanical Systems, pp. 323-326, 2010.
- [141] **Bîrsan, I., G., Bria, V., Ungureanu, V., Cîrciumaru A.,** *Termo-Mechanical and Electricals Properties of Filled Epoxy Reinforced Composites*, Conference Proceedings of the 12th International Conference, Mechanics and Technology of Composite Materials, pp. 159-164, 2009.
- [142] **Bîrsan, I., G., Bria, V., Ungureanu, V., Cîrciumaru A.,** *Tailoring the Interface for Fabric Based Epoxy Composites*, Proceedings of the 13th International Conference, Modern Tehnologies, Quality and Innovation, pp. 2066-3919, 2009.
- [143] **A., Kallivretaki, D., Domvoglu, C., Provatidis Savvas Vassiliadis,** *Mechanical Analysis of Woven Fabrics:The State of the Art*, Advances in Modern Woven Fabrics Technology, pp. 42-64, 2010.
- [144] **V., Ungureanu, V., Roman, I., Bîrsan, I.G., Cîrciumaru, A., Bria,** *Mechanical Properties of Fabric Reinforced Composites*, Proceedings of the 7th International Scientific Conference Research and Development of Mechanical Elements and Systems, pp. 355-358, 2011.
- [145] CHDK in brief, disponibil on-line (3.05.2012)
http://chdk.wikia.com/wiki/CHDK_in_Brief

- [146] **Alva Peled Zvi Cohen**, *Controlled telescopic reinforcement system of fabric–cement composites — Durability concerns*, Cement and Concrete Research, vol. 40, pp. 1495–1506, 2010.
- [147] **G. Kress, B. Schläpfer**, *A pseudo strength function for the generation of local laminate reinforcement doublers*, international conference on composite materials, 2012.
- [148] **F. Y. Belal, S.M. Sapuan M. A. Maleque**, *Mechanical properties study of pseudo-stem banana fiber reinforced epoxy composite*, The Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 32, pp. 359-365, 2006.
- [149] **M., Khatibzadeh**, *The Strength of Angle-Ply Laminates and Composites with Misaligned Fibres*, Canada, 1997.
- [150] **J., Lemaitre, F., A. Leckie, D., Sherman**, *The mechanical behavior of an alumina carbon/epoxy laminate*, Acta Metallurgica et Materialia, vol. 43, pp. pp. 4483–4493, 1995.

Lista de lucrări publicate de către autorul lucrării

Lucrări publicate în proceedings-uri și reviste indexate ISI

1. Cîrciumaru, A., Bîrsan, I.G., Bria, V., **Ungureanu, V.**, *Tailoring the Interface for Fabric Based Epoxy Composites*, Proceedings of the 13th International Conference, Modern Tehnologies, Quality and Innovation, Romania, Iasi, pp.163-166, ISSN: 2066-3919, 2009.
2. Bria, V., Bîrsan, I.G., Cîrciumaru, A., **Ungureanu, V.**, *A Technique to Obtain High Filled Epoxy Composites*, Proceedings of the 13th International Conference, Modern Tehnologies, Quality and Innovation, Romania, Iasi, pp.91-94, ISSN: 2066-3919, 2009.
3. Bîrsan, I.G., Cîrciumaru, A., Bria, V., Roman, I., **Ungureanu, V.**, *Mechanical Characterization of Fiber Fabrics*, Proceedings of the ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Istanbul, Turkey 2010, ISBN 978-0-7918-3877-8, 2010.
4. Bria, V., Bîrsan, I.G., Cîrciumaru, A., **Ungureanu, V.**, Roman, I., *Tribological Characterization of Particulate Composites*, Proceedings of the ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Istanbul, Turkey 2010, ISBN 978-0-7918-3877-8, 2010.
5. Bîrsan, I.-G., Andrei, G., **Ungureanu, V.**, Roman, I., Cîrciumaru, A., *Wear Behavior of Fabric Reinforced Epoxy Based Composites*, Proceedings V International Scientific Conference BALTTTRIB'2009, Kaunas, Lithuania, ISSN 1822-8801, pp. 170-174, 2009.

Lucrări publicate în reviste indexate BDI

1. Bria, V., Roman, I., Postolache, I., **Ungureanu, V.**, Bîrsan, I.G., Cîrciumaru, A., *Mechanical Properties of Filled Epoxy Based Reinforced Composites*, Proceedings of the International Conference NewTech 2009, The Annals of "Dunarea de Jos" University Galati, pp. 315-318, ISSN 1221-4566.
2. Bîrsan, I.G., Cîrciumaru, A., Bria, V., **Ungureanu, V.**, *Tribological and Electrical Properties of Filled Epoxy Reinforced Composites*, Tribology in Industry, vol. 31, No.1&2, pp. 33-36, 2009, ISSN 0354-8996.
3. Bria, V., Cîrciumaru, A., Bîrsan, I.G., **Ungureanu, V.**, *Fabric Reinforced Filled Epoxy Composites*, Tribology, Fascicle VIII, 2009 (XV), Issue 2, pp. 132-135, ISSN 1221-4590.
1. Bria, V., Roman, I., **Ungureanu, V.**, Cîrciumaru, A., Bîrsan, I.G., *Thermal Properties of Particulate Epoxy Composites*, Fiability & Durability, Issue: 1(5)/2010, pp. 47-50, ISSN 1844-640X.

Lucrări publicate în proceedings-uri și reviste ale conferințelor naționale și internaționale

1. V., Bria, A., Cîrciumaru, I.-G., Bîrsan, **V., Ungureanu**, *Fabric Reinforced Filled Epoxy Composites*, International Conference on Diagnosis and Prediction in Mechanical Engineering Systems (DIPRE'09), Galati, Romania, ISBN 978-606-8008-33-2.
2. **V.Ungureanu**, V. Bria, I. Roman, I.-G. Bîrsan, A. Cîrciumaru, Some properties of starch filled epoxy, Polymer Composites 2011 International Conference, Plzen, Czech Republic, ISBN 978-80-7043-984-5, pag.123-126, April 27-28, 2011.
3. **V.Ungureanu**, V. Bria, I. Roman, I.-G. Bîrsan, A. Cîrciumaru, Mechanical analysis of fabric reinforced epoxy laminae, Polymer Composites 2011 International Conference, Plzen, Czech Republic, ISBN 978-80-7043-984-5, pag.127-130, April 27-28,

2011.

4. I. Roman, **V.Ungureanu**, V. Bria, A. Circiumaru, I.-G. Birsan, Electrical and thermal characterization of fabric reinforced laminae, Polymer Composites 2011 International Conference, Plzen, Czech Republic, ISBN 978-80-7043-984-5, pag.131-134, April 27-28, 2011
5. V. Bria, **V.Ungureanu**, I. Roman, I.-G. Birsan, A. Circiumaru, Mechanical properties of fabric reinforced composites, The 7th International Scientific Conference Research and Development of Mechanical Elements and System, Zlatibor, Republic of Serbia, pag. 355-358, April 27-28, 2011
6. I. Roman, V. Bria, **V.Ungureanu**, A. Circiumaru, I.-G. Birsan, Tribological analysis of fabric reinforced composites, The 7th International Scientific Conference Research and Development of Mechanical Elements and System, Zlatibor, Republic of Serbia, pag. 359-362, April 27-28, 2011.
7. **V.Ungureanu**, I. Roman, V. Bria, I.-G. Birsan, A. Circiumaru, Physical properties of clay-talc/epoxy composites, The 7th International Scientific Conference Research and Development of Mechanical Elements and System, Zlatibor, Republic of Serbia, pag. 363-366, April 27-28, 2011
8. I. Roman, **V.Ungureanu**, V. Bria, A. Circiumaru, I.-G. Birsan, Starch epoxy composites a study of starch amount influence, 12th International Conference on Tribology SERBIATRIB '11, Kragujevac, Republic of Serbia, pag. 181-184, May 11-13, 2011.
9. **V.Ungureanu**, I. Roman, V. Bria, I.-G. Birsan, A. Circiumaru, Tribological comparison of some particulate composites, 12th International Conference on Tribology SERBIATRIB '11, Kragujevac, Republic of Serbia, pag. 190-193, May 11-13, 2011.
10. **V. Ungureanu**, I. Roman, V. Bria, A. Cîrciumaru, I.-G. Bîrsan, *A Qualitative Study of Failure Mechanisms for Fabric Reinforced Laminae*, Proceedings of 10th International Conference, Research and Development in Mechanical Industry - RaDMI 2011, Soko Banja, Serbia, ISBN 978-86-6075-018-3, Date: SEP 15-18, 2011.
11. I. Roman, V. Bria, **V. Ungureanu**, A. Cîrciumaru, I.-G. Bîrsan, *Physical Properties of Starch Filled Epoxy Composites*, Proceedings of 10th International Conference, Research and Development in Mechanical Industry - RaDMI 2011, Soko Banja, Serbia, ISBN 978-86-6075-018-3, Date: SEP 15-18, 2011.
12. I.-G., Birsan, G., Andrei, **V..Ungureanu**, I., Roman, A., Circumaru, *Wear Behavior of Fabric Reinforced Epoxy Based Composites*, Proceedings V International Scientific Conference BALTTTRIB'2009, Kaunas, Lithuania, ISSN 1822-8801
13. I.-G., Birsan, A., Circiumaru, G., Andrei, D., Dima, N., Diaconu, **V..Ungureanu**, V., Bria, I., Postolache, *Fabric Reinforced Epoxy Composites*, Annals of DAAAM for 2009 & Proceedings of the 20th International DAAAM Symposium, Vienna, Austria, ISSN 1726-9679
14. V., Bria, A., Circiumaru, I. G., Birsan, **V., Ungureanu**, *Fabric Reinforced Filled Epoxy Composites*, Tribology, Fascicle VIII, 2009 (XV), Issue 2, pp. 132-135, ISSN 1221-4590
15. **V.. Ungureanu**, V., Bria, I., Postolache, A., Circiumaru, I. G., Birsan, *Bending Properties of Fabric Reinforced Composites With Stratified Filled Epoxy Matrix*, Proceedings of the 3rd Symposium With International Participation Durability and Reliability of Mechanical Systems, Targu-Jiu, Romania, 2010, pp. 323-326, ISBN 978-973-144-350-8.
16. V., Bria, I., Roman, **V., Ungureanu**, A., Circiumaru, I. G., Birsan, *Thermal Properties of Particulate Epoxy Composites*, Proceedings of the 3rd Symposium With International Participation Durability and Reliability of Mechanical Systems, Targu-Jiu, Romania, 2010, pp. 319-321, ISBN 978-973-144-350-8
17. I. G., Birsan, A., Circiumaru, V., Bria, I., Roman, **V., Ungureanu**, *Some Mechanical Properties of Reinforced Filled Epoxy Composites*, Annals of DAAAM for 2010

& Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium, Zadar, Croatia, 2010, pp. 379-380, ISSN 1726-9679

18. Birsan, I.G., Roman, I., Bria, **V., Ungureanu**, V., Circiumaru, A., *Starch – Epoxy Composites*, Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium “Intelligent Manufacturing & Automation: Power of Knowledge and Creativity”, 23-26th November 2011, Viena, Austria, pp. 285-286, ISSN 1726-9679, 2011.