

CARACTERIZAREA MECANICĂ A MATERIALELOR COMPOZITE RANFORSATE CU FIBRE ȘI PUZDERII LIBERIENE

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea Politehnica Timișoara
în domeniul INGINERIE MECANICĂ
de către

Ing. Maria Silvia Pernevan

Conducător științific: prof.univ.dr.ing. Liviu Marșavina,
prof.univ.dr.ing.Mircea Dreucean

Referenți științifici: prof.univ.dr.ing. Mircea Cristian Dudescu
conf.univ.dr. Cecilia Sîrghie
prof.univ.dr.ing. Nicolae Faur

Ziua susținerii tezei: 17.02.2014

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|---|--|
| 1. Automatică | 9. Inginerie Mecanică |
| 2. Chimie | 10. Știința Calculatoarelor |
| 3. Energetică | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 4. Ingineria Chimică | 12. Ingineria sistemelor |
| 5. Inginerie Civilă | 13. Inginerie energetică |
| 6. Inginerie Electrică | 14. Calculatoare și tehnologia informației |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 15. Ingineria materialelor |
| 8. Inginerie Industrială | 16. Inginerie și Management |

Universitatea Politehnica din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2013

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității Politehnica din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

CUVÂNT ÎNAINTE

Teza de doctorat cu titlul "Caracterizarea mecanică a materialelor compozite ranforsat cu fibre și puzderii liberiene" a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Școlii doctorale a Politehnicii Timișoara -Proiect Burse doctorale (Proiect ID 77265) și a activității derulate la Institutul de Cercetare, Dezvoltare, Inovare în științe tehnice și naturale din cadrul Universității "Aurel Vlaicu" din Arad.

Teza este dedicată studiului proprietăților mecanice ale unor materiale compozite noi pe bază de rășini termoplastice și termorigide ranforsate cu fibre și puzderii de plante liberiene. Materialele au fost realizate în cadrul proiectului: Plantele liberiene-resurse regenerabile strategice pentru economia Europeană –din cadrul Institutului de Cercetare, Dezvoltare, Inovare în științe tehnice și naturale din Arad. Studiul are în vedere atât determinarea pe cale experimentală a proprietăților mecanice ale acestor materiale cât și estimarea pe cale teoretică a unor proprietăți mecanice ale materialelor pe bază de rășini termoplastice și evaluarea apariției fenomenului de degradare mecanică a unuia dintre aceste materiale. Lucrarea face o analiză comparativă a materialelor compozite noi analizate din punct de vedere al proprietăților mecanice ale acestora. Pentru estimarea teoretică a proprietăților mecanice la tracțiune au fost folosite modele micromecanice de calcul. Analiza apariției degradării în materiale este realizată folosind criteriile de degradare propuse de Hashin, cu ajutorul programul de simulare Abaqus.

Lucrarea nu epuizează vasta problematică a studiului materialelor compozite pe bază de polimeri ranforsate cu fibre și puzderii liberiene, ea se dorește a fi un mic aport la studierea comportamentului acestor materiale în vederea identificării posibilităților de utilizare a acestora în diverse domenii în care ele ar putea înlocui cu cât mai mult succes materialele clasice bazate pe resurse neregenerabile sau poluante.

Doresc să îi mulțumesc în mod special conducătorului meu de doctorat, domnului Prof.univ.dr.ing. Liviu Marșavina pentru generozitatea cu care mi-a îndrumat activitatea la doctorat și pentru încrederea pe care mi-a acordat-o pe toată durata activității mele, ajutându-mă să finalizez teza de doctorat. O pioasă aducere aminte fostului meu conducător de doctorat, domnului Prof.univ. dr.ing.Mircea Dreucean care nu mai este printre noi.

Mulumiri doamnei Conf. Univ.dr.ing. Cecilia Sîrghie de la Institutul de Cercetare, Dezvoltare, Inovare în științe tehnice și naturale din Arad pentru sprijinul acordat precum și domnilor ing. Niculina Popa și Prof univ.dr ing. Ioan Marcel Popa de la Universitatea "Gheorghe Asachi" din Iași. Îi mulțumesc domnului Prof. univ. dr. Ing.Riszard Kozlovski de la Institutul de Fibre Naturale Poznan, Polonia pentru îndrumările și sprijinul acordat. Deasemenea îi mulțumesc Conf.univ.dr.ing. Mihaela Popescu de la Universitatea "Politehnica" din Timișoara pentru colaborarea din cei 3 ani de stagiu doctoral. Nu în ultimul rând doresc să le mulțumesc și colegilor de la Institutul de Cercetare, Dezvoltare, Inovare în științe tehnice și naturale din Arad și celor de la școala doctorală din Timișoara.

This work was partially supported by the strategic grant POSDRU 107/1.5/S/77265, inside POSDRU Romania 2007-2013, co-financed by the European Social Fund – Investing in People".

*Părinților mei, Maria și Ioan Pernevan,
Vă mulțumesc pentru sprijinul și încrederea pe care mi le-ați acordat.*

Timișoara, februarie 2014

Maria Silvia Pernevan

Pernevan Maria Silvia

Caracterizarea mecanică a materialelor compozite ranforsate cu fibre și puzderii liberiene

Teze de doctorat ale UPT, Seria 9, Nr. 148, Editura Politehnica, 2014, 184 pagini, 140 figuri, 39 tabele.

ISSN: 1842-4937

ISBN: 978-606-554-793-3

Cuvinte cheie: materiale compozite, fibre și puzderii liberiene, proprietăți mecanice, degradare mecanică, matrice polimerice

Rezumat,

Prin subiectul abordat, teza de doctorat răspunde unor probleme de maximă actualitate privind caracterizarea mecanică a unor materiale compozite pe bază de matrici polimerice ranforsate cu deșeuri de cânepă și in. Studiul are în vedere atât determinarea pe cale experimentală a proprietăților mecanice ale acestor materiale cât și estimarea pe cale teoretică a unor proprietăți mecanice ale materialelor pe bază de rășini termoplastice și evaluarea apariției fenomenului de degradare mecanică a unuia dintre aceste materiale. Tema este tratată în mod interdisciplinar, îmbinând aspecte legate de studiul materialelor, rezistența materialelor, simulare numerică.

CUPRINS

1. Introducere	8
1.1 Generalități	8
1.2 Stadiul actual.....	10
1.3 Justificarea alegerii temei de cercetare.....	14
1.4 Obiectivele cercetării	16
2 Materiale biocompozite pe bază de matrice polimerice ranforsate cu fibre liberiene	18
2.1 Generalități despre materiale biocompozite	18
2.2 Fibre vegetale utilizate în biocompozite polimerice.....	21
2.2.1 Clasificarea fibrelor vegetale	21
2.2.2 Plante liberiene pentru fibre	22
2.2.3 Fibre liberiene utilizate ca elemente de ranforsare în materiale compozite	26
2.2.3.1 Structura și compoziția chimică a fibrelor liberiene.....	27
2.2.3.2 Extragerea și prelucrarea fibrelor liberiene	30
2.2.3.3 Proprietăți mecanice, fizice și tehnologice ale fibrelor liberiene	30
2.3 Matrice polimerice utilizate în fabricarea biocompozitelor.....	32
2.3.1 Clasificarea matricelor polimerice.....	32
2.3.2 Matrice termorigide. Proprietăți fizico-mecanice și tehnologice.....	33
2.3.3 Matrice termoplastice. Proprietăți fizico-mecanice și tehnologice	34
2.3.4 Biopolimerii.....	36
2.4 Interfața fibră- matrice	36
2.5 Tehnologii de fabricare a materialelor compozite	37
2.5.1 Pultruziunea	37
2.5.2 Turnarea prin injecție	38
2.5.3 Turnarea prin presare.....	38
2.5.4 Impregnarea cu rășină a fibrelor înfășurate.....	38
2.6 Proprietăți fizico- mecanice ale biocompozitelor.....	38
3 Modele teoretice de estimare a proprietăților mecanice ale materialelor biocompozite	41
3.1 Regula amestecului –Rule Of Mixture	41
3.2 Modelul micromecanic al lui Halpin-Tsai	41
3.3 Modelul micromecanic modificat al lui Halpin-Tsai.....	42
3.4 Modelul micromecanic al lui Cox.....	43
3.5 Modelul micromecanic al lui Cox Krenkel	46
3.6 Modelul micromecanic al lui Kelly Tyson	46
3.7 Rezultatele calculelor teoretice.....	47
4 Determinarea experimentală a proprietăților mecanice ale unor materiale biocompozite noi pe bază de matrice polimerice ranforsate cu deșeuri de fibre liberiene	54
4.1 Descrierea biocompozitelor studiate.....	54
4.1.1 Materiale biocompozite pe bază de rășini termorigide ranforsate cu deșeuri lignocelulozice de in și cânepă	54

6 Cuprins

4.1.2	Materiale biocompozite pe bază de rășini termoplastice ranforsate cu deșuri lignocelulozice de in și cânepă	60
4.2	Aparatura și metodologia pentru determinarea proprietăților fizico-mecanice ale materialelor biocompozite	68
4.2.1	Aparatura de încercare	68
4.2.2	Metodologia pentru determinarea proprietăților fizico-mecanice ale biocompozitelor studiate	71
4.3	Rezultate experimentale obținute la testarea materialelor biocompozite	75
4.3.1	Proprietăți fizico-mecanice ale materialelor biocompozite pe bază de rășini termorigide ranforsate cu deșuri de in și cânepă	75
4.3.2	Proprietăți fizico-mecanice ale materialelor biocompozite pe bază de rășini termoplastice ranforsate cu deșuri lignocelulozice de in și cânepă	93
4.3.2.1	Proprietăți fizico-mecanice ale materialelor biocompozite termoplastice cu matricea din polipropilena și umplutura din deșuri lignocelulozice de in și cânepă	93
4.3.2.2	Proprietăți fizico-mecanice ale materialelor biocompozite termoplastice cu matricea din polietilenă de joasă densitate (LDPE) și umplutura din puzderii de cânepă sub formă de praf fin (PCPF)	107
4.3.2.3	Proprietăți fizico-mecanice ale unui material biocompozit termoplastic cu matricea din polietilenă de înaltă densitate (HDPE) și umplutură din puzderii de cânepă sub formă de praf fin	109
4.3.2.3.1	Încercări mecanice efectuate pe epruvete confecționate din profilul extrudat	109
4.3.2.3.2	Încercări fizico-mecanice efectuate pe profilul extrudat	117
4.4	Comparații între rezultatele teoretice și cele experimentale obținute pentru proprietățile la tracțiune ale materialelor biocompozite pe bază de rășini termoplastice ranforsate cu deșuri sub formă de fibre scurte de in și cânepă și puzderii de cânepă	120
5	Studiul degradării mecanice a materialelor biocompozite	141
5.1	Generalități	141
5.2	Concepte generale ale degradărilor în lamine unidirecționale	141
5.3	Definirea răspunsului materialului nedegradat	143
5.3.1	Definirea elasticității ortotropice specificând proprietățile mecanice ale materialului	144
5.3.2	Definirea elasticității ortotropice în planul de tensiunilor	145
5.3.3	Definirea elasticității ortotropice specificând termenii matricei de rigiditate elasticitate	146
5.4	Inițierea degradării pentru materiale compozite ranforsate cu fibre	147
5.5	Studiul degradărilor cu programul Abaqus la piesa de tip epruvetă încercată experimental la încovoiere	150
5.5.1	Definirea caracteristicilor materialului încercat	151
5.5.2	Definirea stării de încărcare a materialului încercat de tip epruvetă	151
5.5.3	Rezultate obținute prin simulare pentru materialul încercat de tip epruvetă	152
5.5.4	Influența unor caracteristici ale materialelor asupra fenomenului de degradare pentru materialului încercat de tip epruvetă	155
5.6	Studiul degradărilor cu programul Abaqus la piesele de tip fagure încercate experimental la încovoiere	162
5.6.1	Definirea caracteristicilor materialului încercat	163

5.6.2	Definirea stării de încărcare a materialului de tip fagure încercat la încovoiere.....	163
6	Contribuții personale și concluzii finale, direcții viitoare de cercetare.....	169
6.1	Contribuții personale.....	169
6.2	Concluzii finale.....	170
6.3	Direcții viitoare de cercetare	173
	Bibliografie	174

1. INTRODUCERE

1.1. Generalități

Materialele clasice metalice și nemetalice utilizate ca materii prime în industrie sunt produse în cea mai mare parte din resurse (minereuri, produse petroliere, etc.) neregenerabile, pentru realizarea lor fiind necesar un consum mare de energie. În timpul procesului de fabricație a acestor materiale se emit gaze care sunt toxice pentru mediul ambiant. La sfârșitul ciclului de viață a acestor materiale ele trebuie incinerate sau reciclate, ceea ce presupune un consum suplimentar de energie. Aceste materiale sunt nesustenabile, Christian S.J [2009].

În societatea actuală costul, calitatea și disponibilitatea spre utilizare a materialelor compozite sunt de importanță majoră. Materialele compozite fac parte din categoria materialelor noi, a materialelor ingineresti sau a materialelor avansate. Dintre toate materialele noi, domeniul materialelor compozite se caracterizează printr-o puternică interdisciplinaritate științifică și industrială, implicând un ansamblu de legături cercetare-dezvoltare performante. Există preocupări în domeniul materialelor compozite în toate țările dezvoltate, ca urmare a necesității de a continua procesul de inovare, prin utilizarea unor materiale calitativ superioare și posibil de realizat prin tehnologii eficiente. Diversificarea continuă a materialelor compozite a determinat un interes deosebit pentru realizarea băncilor de date ale noilor materiale care să constituie surse strategice de bază ce furnizează informații tehnologice pentru întreprinderi. Pentru prima dată Japonia a creat o bancă de date, la început pentru materiale ceramice iar mai apoi și pentru materiale compozite. Această acțiune a întâmpinat foarte multe dificultăți deoarece numărul de astfel de materiale creștea rapid iar o standardizare a acestora nu a existat. În aceste condiții a început colaborarea Japoniei cu SUA, Germania și Franța în vederea stabilirii unor bănci comune de date și schimb de informații cum ar fi: CETIM, ENGINEERING MATERIALS, NASA, PASCAL, etc. Dezvoltarea noilor tehnologii în vederea obținerii de materiale compozite a condus la stabilirea unor strategii concretizate prin numeroase programe de cercetare-dezvoltare cum sunt: EUREKA, ERASMUS, VAMAS, ESPRIT, EURAM, etc, Popescu M. [2010]

Biocompozitele se pot defini ca fiind materiale compozite care conțin cel puțin o componentă - elementul de ranforsare sau elementul de legătură (matricea) - de origine biologică. Utilizarea acestor materiale compozite noi elimină impactul pe care utilizarea materialelor compozite pe bază de resurse petrochimice îl are asupra mediului. (Kozlovski R. [1999], Fowler P.A. [2006])

Dintre fibrele organice naturale, ca elemente de ranforsare în materialele biocompozite, cea mai mare pondere o au fibrele vegetale, iar în cadrul acestora fibrele liberiene, datorită avantajelor pe care le prezintă: nivel de poluare scăzut în timpul prelucrării, consum de energie scăzut. De asemenea, cantitatea de CO₂ emisă în timpul procesării compozitelor pe bază de fibre vegetale este neutralizată de consumul de CO₂ al plantelor în timpul creșterii, ba chiar mai mult, plantele purifică atmosfera și au un preț de cost scăzut în comparație cu alte materiale. Ele sunt

resurse regenerabile, sunt sănătoase în exploatare, sunt mai puțin abrazive, motiv pentru care pot fi utilizate ca elemente de ranforsare în biocompozite utilizate ca elemente de antifricțiune, EL-Tayeb N.S., [2008], au densitate scăzută și proprietăți mecanice relativ bune. Culturile de plante liberiene reprezintă o soluție de culturi alternative utile pentru agricultori, deschizând astfel noi perspective de dezvoltare a agriculturii, Narendra R [2005]. Utilizarea materialelor biocompozite crește eficiența energetică și promovează conceptul de durabilitate, Popescu M., Roșu A.R., Pernevan M.S. [2012]. Principalele avantaje în utilizarea materialelor biocompozite pe bază de fibre vegetale în general, în comparație cu cele pe bază de fibre sintetice sunt: avantajul ecologic al biocompozitelor prin utilizarea de componente ecologice și biodegradabile provenite din resurse regenerabile, rezistență și rigiditate specifică (raportate la greutate) superioare, rezistența la oboseală și capacitate de absorbție a energiei la impact raportate la greutate superioare, o rezistență mai bună la coroziune, la foc, acizi, durată de viață mai mare și costurile de întreținere scăzute. De asemenea, au conductivitate electrică scăzută și nu sunt toxice, Dittenber D.B [2012].

Dezavantajul utilizării biocompozitelor pe bază de fibre vegetale constă în faptul că fibrele sunt hidrofile iar fibrele netratate nu au o aderență bună la matricele polimerice, Anandjiwala, [2004].

O serie de companii industriale din Europa, America de Nord și Asia au realizat materiale compozite pe bază de fibre vegetale scurte (obținute din lemn sau din deșeurile rezultate la extragerea fibrelor din tulpinile plantelor liberiene) sau pe bază de fibre lungi provenite din tulpinile unor plante liberiene ca: inul, cânepa, iuta, kenaful, ramia, Wretfors C [2006].

Plantele liberiene sunt resurse anuale de materii prime ce pot fi utilizate în producția de materiale biocompozite polimerice, reprezentând o alternativă viabilă la fibrele sintetice sau minerale utilizate în producerea materialelor compozite (Pernevan M.S. [2011], Pernevan M.S. [2012]). Calitatea fibrelor liberiene obținute din aceste plante depinde de condițiile de creștere a plantelor și de tehnologiile de procesare a acestora (Barkoula N.M. [2010], Bos H [2004], Donnell A.O. [2004]). Aplicațiile biocompozitelor pe bază de fibre liberiene sunt orientate spre industriile auto, aerospațiale, construcții civile, mobilier, apărare, electrocasnice, ambalaje, etc, Bank L.C., [2003].

Cultivarea plantelor liberiene se face atât în scopul obținerii semințelor (ex. inul) cât și a fibrelor utilizate la rândul lor în industria textilă respectiv în realizarea materialelor compozite. Creșterea producției de materiale compozite pe bază de fibre liberiene precum și a altor materiale pe bază de fibre liberiene lungi (materiale textile, frânghii, etc.) a atras atenția cercetătorilor și producătorilor de materiale pentru valorificarea integrală a plantei prin utilizarea atât a fibrelor lungi, cât și a deșeurilor sub formă de fibre scurte și puzderii rezultate ca urmare a extragerii fibrelor lungi. Prin combinarea acestora cu matrici polimerice se obțin materiale biocompozite polimerice cu un preț de cost mai scăzut decât cele pe bază de fibre de sticlă și cu caracteristici mecanice comparabile cu ale acestora, (Holser A.R. [2008], BIOCAMP Project [2008]).

Scopul cercetărilor în domeniul materialelor biocompozite constă în atingerea următoarelor obiective: investigarea caracteristicilor de bază ale biocompozitelor precum și a constituenților acestora; optimizarea materialelor pentru condițiile de funcționare date; dezvoltarea unor tehnologii de fabricare și studiul influenței acestora asupra proprietăților materialului; dezvoltarea unor procedee analitice de determinare a proprietăților materialului și predicția

comportării structurilor în timpul funcționării; dezvoltarea metodelor experimentale de caracterizare a materialelor, analiza tensiunilor, deformațiilor și a defectelor; aprecierea durabilității, ciclului de viață și apariția defectelor, elaborarea unei standardizări specifice, Reußmann T. [2003].

Tehnologiile de fabricație ale materialelor biocompozite pe bază de fibre vegetale sunt tehnologii clasice utilizate la fabricarea materialelor plastice motiv pentru care ele nu necesită costuri suplimentare de fabricare. Dat fiind faptul că procesul de prelucrare este unul dintre factorii importanți în asigurarea calității produsului finit, introducerea automatizării și a controlului adaptiv al proceselor de prelucrare a materialelor compozite este o necesitate din ce în ce mai stringentă. Tendințele pentru anii următori prefigurează o continuare fructuoasă a cercetărilor în acest domeniu, datorită scăderii costurilor componentelor materialelor compozite și ieftinirea proceselor prin introducerea automatizării tehnologiilor. Standardizarea legată de biocompozite pe bază de fibre vegetale este încă în fază incipientă, neexistând până la ora actuală o standardizare unitară a acestor materiale, motiv pentru care este necesară raportarea biocompozitelor la materialele plastice convenționale, Bank L.C [2003].

1.2. Stadiul actual

Obiectivele principale avute în vedere în cadrul cercetărilor privind materialele biocompozite ranforsate cu fibre vegetale sunt legate de: analizarea proprietăților de bază ale constituenților (fibre, matrice) și ale materialelor compozite, analiza interfeței fibră-matrice, studiul orientării fibrelor, dezvoltarea unor tehnologii de fabricare a biocompozitelor, dezvoltarea unor metode analitice de studiu pentru determinarea proprietăților biocompozitelor și a constituenților acestora, dezvoltarea metodelor experimentale de determinare a proprietăților biocompozitelor. Analiza proprietăților de bază ale constituenților (fibre, matrice) este prezentă în majoritatea studiilor legate de biocompozite.

Cercetările legate de fibrele vegetale, iar în cadrul acestora de fibrele liberiene s-au referit la descrierea fibrelor și structura lor, John M.J. [2008], constituenții chimici ai acestora, (Thygesen A. [2006], Sen T. [2011]), proprietățile fizice, mecanice și chimice ale fibrelor, și compararea acestora cu cele ale fibrelor sintetice utilizate ca elemente de ranforsare în materiale compozite și în special cu fibrele de sticlă, (Saha S. [2011], Madsen B. [2010], Mutjé P [2006]) precum și la metodele de tratare a suprafețelor fibrelor, (Doan M.Sc [2006], DiBenedetto A. [1985]).

Defectele naturale ale structurii fibrelor, problemele legate de absorbția de apă a lor (Lampke T. [2001], Wretfors C. [2006], Dhakal H.N. [2007]) precum și cele legate de procesul de fabricație al acestora, Kers J. [2010], duc la analizarea fibrelor ca structuri heterogene, Pan N [1994], cu o distribuție neuniformă a tensiunilor și deformațiilor în fibre. Componentele structurale ale fibrelor vegetale influențează proprietățile mecanice și durabilitatea acestora (Rana A. [2008], Madsen B. [2004]).

Prin utilizarea microstructurilor de fibre ca de exemplu mănunchiurile de fibre cu diametre de 50-100 microni, Thomas S. [2008], sau a prafului fin de in, Singha A. S. [2008], se obțin biocompozite cu rezistențe mecanice ridicate. Există o serie de studii legate de cercetările cu privire la biocompozitele pe bază de nanofibre. Ayse A. [2008], a studiat nanocompozitele biopolimerice pe bază de

biopolimeri din amidon ranforsate cu nanofibre din paie de grâu cu diametru de 10–80 nm și lungimi de câteva sute de nanometri. A fost investigată stabilitatea termică prin analiza termogravimetrică. S-au analizat proprietățile la tracțiune ale compozitului și s-a stabilit că ele sunt semnificativ superioare celor ale matricei. Analiza microscopică a compozitului a arătat o bună dispersie a nanofibrelor. Lusti H.R. [2003] a studiat cu ajutorul simulărilor numerice cu element finit proprietățile termoelastice ale nanocompozitelor pe bază de polimeri, stratificate cu silicați, cu scopul de a înțelege felul în care factorul de formă, fracțiunea de volum și orientarea lamelor influențează proprietățile compozitului. Wan Y.Z. [2009] a determinat proprietățile mecanice ale unui compozit pe bază de rășină din amidon ranforsat cu nanofibre de bacterii biologice și le-a comparat cu cele ale rășinii neranforsate. S-a constatat că biocompozitul are proprietăți mecanice superioare rășinii.

În ceea ce privește cercetările legate de matrice, se evidențiază faptul că la ora actuală cele mai utilizate matrice în fabricarea biocompozitelor în structurile de rezistență sunt matricele termoplastice datorită proprietăților lor mecanice și termice bune. În vederea îmbunătățirii proprietăților matricelor există cercetări privind aditivarea lor cu copolimeri de origine petrochimică sau prin esterificarea grupurilor hidroxilice cu acizi organici (Kozłowski R. [1999], Lampke T. [2001], Karnani R. [1997]).

Din analiza proprietăților fizice, mecanice, chimice și tehnologice ale unor biocompozite pe bază de diverse rășini termoplastice sau termorigide ranforsate cu același tip de element de ranforsare se constată că: biocompozitele pe bază de rășini termoplastice se caracterizează printr-o rezistență la tracțiune mai mare, alungire la rupere mai mare, proces de prelucrare mai eficient decât cele pe bază de rășini termorigide. În schimb materialele biocompozite pe bază de rășini termorigide au avantajul de a putea fi prelucrate la temperaturi mai mici (40-120° C) comparativ cu polipropilena (la 200° C), ceea ce face ca deteriorarea termică a fibrelor să fie mai redusă (Madsen B. [2004], Thygesen A. [2006]).

În mod obișnuit proprietățile compozitului sunt date de către fibre, dar influența mai mare a impactului pe care compozitul îl are asupra mediului o dă matricea. De aceea utilizarea biopolimerilor în fabricarea compozitului elimină acest inconvenient (Miao M. [2008], Cañigueral N. [2009]).

Problema îmbunătățirii aderenței dintre fibrele de ranforsare și matricea polimerică în biocompozitele pe bază de rășini polimerice și fibre liberiene precum și interesul pentru obținerea unor materiale biocompozite ecologice și complet biodegradabile constituie motivul pentru care există preocupări importante spre dezvoltarea biorășinilor termoplastice și termorigide.

Costurile legate de standardizarea și omologarea materialelor biocompozite pe bază de fibre vegetale pot constitui un obstacol considerabil în calea utilizării acestor materiale pe scară largă în practică. Există, prin urmare, nevoia de investiții semnificative în problemele de standardizare și acreditare a acestor materiale precum și în capacitățile de producție, prelucrare și dezvoltarea de noi tehnologii pentru a soluționa aceste inconveniente.

Cercetările legate de biocompozite au vizat în special determinarea factorilor care influențează performanțele biocompozitelor și găsirea metodelor de îmbunătățire a acestora, Fowler P.A. [2010]. Preocupările legate de clasificarea biocompozitelor și a tehnologiilor de fabricare a acestora duc la o mai bună înțelegere a biocompozitelor.

Proprietățile fizico-mecanice ale fibrelor, arhitectura fibrei, care cuprinde geometria fibrei, orientarea fibrei, aranjamentul și fracțiunea de volum a fibrei, precum și interfața fibră-matrice au rol hotărâtor în eficiența procesului de

ranforsare influențând proprietățile compozitului și în special proprietățile mecanice (Sparniniș E [2006], Thygesen A. [2006], Taj S. [2007], Van den Heuvel [1995]).

Studiile cu privire la influența lungimii fibrei și conținutului de fibre asupra proprietăților mecanice ale biocompozitelor termoplastice ranforsate cu fibre scurte de in au indicat faptul că biocompozitele termoplastice ranforsate cu fibre liberene scurte prezintă proprietăți mecanice comparabile cu cele ale compozitelor termoplastice pe bază de fibre de sticlă și sunt recomandate a fi utilizate în aplicații în care se cere o rigiditate mare a materialului pe unitatea de greutate, Avérous L. [2006].

Analizele structurale ale biocompozitelor au arătat că aspectul acestora în ruptură este caracteristic materialelor fragile, Cabral H. [2005]. Biocompozitele ranforsate cu particule sunt mai omogene decât cele ranforsate cu fibre scurte sau lungi. Din testele efectuate pentru determinarea proprietăților fizico-mecanice ale acestora s-a constatat că aceste materiale au rezistența la tracțiune și la uzură mai mari în comparație cu cele ranforsate cu fibre scurte sau lungi, Singha A.S. [2008]. Prin studiile efectuate asupra compozitelor polimerice ranforsate cu nanoparticule (You-Ping Wu [2004], Fereidoon A. [2008], Chi Hoong C. [2013]), și a biocompozitelor ranforsate cu puzderii de cânepă sau in s-a constatat că odată cu reducerea dimensiunilor elementelor de ranforsare proprietățile mecanice ale compozitelor se îmbunătățesc, Singha A. [2008].

Îmbunătățirea performanțelor materialelor compozite pe bază de matrice polimerice ranforsate cu fibre se poate face prin obținerea unor compozite hibride, Department of Defense vol.1 [2002]. Maya J.J. și Sabu T. [2008] au arătat că în cazul biocompozitelor hibride pe bază de rășini polimerice ranforsate cu fibre liberene și fibre sintetice (fibre de sticlă sau de carbon), absorbția de apă este mai redusă decât în cazul biocompozitelor ranforsate cu fibre vegetale. De asemenea, introducerea unor nanotuburi din carbon în materiale compozite pe bază de matrice polimerice ranforsate cu fibre de sticlă duce la obținerea unor compozite hibride cu proprietăți mecanice, electrice și termice foarte bune. Nanotuburile au o suprafață de contact foarte mare cu matricea în comparație cu suprafața de contact a fibrelor de ranforsare ceea ce face ca interfața lor cu matricea să fie mai bună. Au însă tendința de a forma aglomerări de particule. Pentru a utiliza eficient proprietățile lor trebuie realizată o bună dispersie a acestora în matrice și un bun contact cu matricea polimerică. Aceste două probleme de dispersie și umezire, constituie obiecte de studiu în continuare pentru a atinge performanța dorită a nanocompozitelor, Myungsoo K. [2009].

Performanțele mecanice ale biocompozitelor se pot îmbunătăți și prin găsirea unor noi tipuri de fibre vegetale calitativ superioare celor utilizate în prezent, Fowler P.A. [2006].

Un compozit cvasiomogen ranforsat cu fibre nu există nici chiar în teorie. Din acest motiv este necesară o analiză prin metode statistice a cvasieterogenității caracterizate prin distribuția neuniformă a fracțiunilor de volum locale atât a fibrelor cât și a matricei indiferent de formatul distribuției fibrei. Cu alte cuvinte structura cvasieterogenă este o trăsătură inerentă a compozitului ranforsat cu fibre și ea afectează multe proprietăți ale compozitului, Pan N. [1994].

Analiza biocompozitelor 100% naturale din deșeuri de plante din punct de vedere al proprietăților fizico-mecanice, chimice, biologice și ecologice, Zini E. [2011] arată avantajele pe care le au folosirea biopolimerilor în biocompozite. Noile tendințe sunt de utilizare a deșeurilor de fibre în biocompozitele polimerice.

Proprietățile ecologice ale biocompozitelor ranforsate cu fibre liberiene sunt studiate prin cuantificarea potențialului de stocare a carbonului și de emisie a CO₂ și compararea rezultatelor obținute cu cele ale compozitelor pe bază de fibră de sticlă (Pervaiz M. [2003], Joshi S.V. [2004], Drzal L.T. [2003], Mutjé P [2006]).

Proprietățile mecanice ale compozitelor polimerice (atât termoplastice cât și termorigide) ranforsate cu fibre vegetale sunt influențate în principal de adeziunea interfacială între matrice și fibre, Ku H. [2011]. Proprietățile fizico-mecanice ale materialelor compozite armate cu fibre depind de capacitatea matricei polimerice, atât de a transmite tensiunile la fibrele de ranforsare cât și de a proteja fibrele de deteriorări, Jang-K. [1998]. Studiile privind interfața fibră-matrice au analizat mecanismul transferului tensiunilor de la matrice la fibre, rezistența interfeței fibră-matrice, mecanismul desfacerii legăturii fibră-matrice și al creșterii concentratorilor de tensiune după o rupere inițială a fibrei, P.W.J. van den Heuvel [1995], și au arătat că aceasta poate fi îmbunătățită prin modificarea controlată cu aditivi a suprafeței fibrelor respectiv a matricei în materialul compozit (McMahon P.E. [1982], Pracella M [2006]. Funcția unui aditiv (agent de cuplare) este de a îmbunătăți aderența fibră-matrice, iar atunci când este utilizat în cantitate suficientă, Blümelhuber G. [2002] de asemenea, poate servi ca un strat protector (DiBenedetto A. T. [1995], Doan M.Sc. [2006]). Îmbunătățirea legăturii interfaciale fibră-matrice se poate face și prin modificarea lanțurilor polimerice din matrice, Karnani R. [1997]. Arbelaiz, B. [2005] a studiat comportamentul mecanic al biocompozitelor pe bază de polipropilenă ranforsate cu fibre scurte de in, cu și fără agent de compatibilizare. Din analiza făcută se poate observa că prin introducerea anhidridei maleice ca agent de compatibilizare în biocompozit rezistența la tracțiune a acestuia a crescut semnificativ cu aproximativ 10MPa pentru aceeași fracțiune de volum a fibrei.

Procedeul tehnologic de fabricare a biocompozitului are influență asupra proprietăților mecanice ale acestuia. Barkoula N.M. [2010], a arătat că proprietățile mecanice ale biocompozitelor pe bază de polipropilenă ranforsate cu fibre scurte de in sunt influențate atât de adeziunea interfacială fibră-matrice cât și de tehnologia de obținere a acestora. Astfel, prin adăugarea unui copolimer proprietățile mecanice ale biocompozitului s-au îmbunătățit. S-a constatat că rezistența la impact a biocompozitelor obținute prin turnare prin injecție este mai mică decât cea a biocompozitelor obținute prin turnare prin compresie.

Temperatura procesului de prelucrare a compozitului influențează proprietățile mecanice ale acestuia. Shibata S. și alții [2010], au arătat că la un biocompozit pe bază de polipropilenă ranforsat cu fibre de bagasă, o temperatură mai mare de 186°C la turnarea prin injecție a materialului determină scăderea proprietăților la încovoiere și tracțiune a materialului biocompozit. Aspectul SEM a biocompozitului arată că acest lucru se datorează deteriorării fibrelor.

Descrierea pe cale analitică a proprietăților mecanice ale biocompozitelor și ale constituenților acestora se poate realiza fie utilizând diverse modele micromecanice, Decolon C. [2002], fie pe baza calculului statistic al proprietăților, Andersons J. [2008]. Prin modelare numerică, utilizând ecuații constitutive predefinite se pot anticipa proprietățile materialului compozit real. (Reußmann T., [2003], Pan N. [1994]).

Modelele matematice concepute pentru determinarea proprietăților mecanice ale materialele compozite polimerice ranforsate cu fibre vegetale au fost validate experimental cu o bună aproximație (Yunkai Lu [2002], Peng X. Q. [2000], Le Duigou A [2010]). Burgstaller C. [2007] a determinat tensiunea de

forfecare interfacială dintr-un biocompozit pe bază de polipropilenă ranforsat cu fibre de sisal, pe cale analitică, utilizând regula amestecului modificată și pe cale experimentală cu ajutorul testului de smulgere al fibrei. A comparat rezultatele obținute teoretic și experimental și a constatat că există o bună concordanță între acestea. Există numeroase modele care prezic proprietățile materialului compozit. Unele dintre acestea cum sunt modelele lui Mori Tanaka, Eshelby sau Tandon și Weng evaluează tensiunea internă medie în matricea unui material cu incluziuni elipsoidale (Zak G. [2000], Lusti H.R. [2003]).

Formulele lui Halpin-Tsai permit studiul influenței fracțiunii de volum a elementului de ranforsare, Tucker C.L. [1999], a modulelor de elasticitate a componentelor compozitului și a geometriei elementelor de ranforsare asupra modulului de elasticitate al compozitului într-un mod simplu, direct (Halpin J. C. [1996], You-Ping Wu [2004], Fereidoon A. [2008]). Modelarea matematică a proprietăților la tracțiune (rezistența la tracțiune respectiv modulul de elasticitate la tracțiune) a arătat că modul de dispunere a fibrelor în compozit influențează rezultatele teoretice obținute pentru aceste proprietăți, Pernevan M.S., Marșavina L. [2012]. Cele mai bune rezultate teoretice comparativ cu cele experimentale se obțin utilizând formulele lui Kelly Tysson și Cox Krenkel bazate pe regula amestecului (Ku H. [2011], Garkhail S.K, [2000]). You-Ping Wu ș.a. 2004, au determinat modulul de elasticitate longitudinal pentru nanocompozite pe bază de cauciuc natural și silicat din argilă. Interpolarea grafică a adus curba la formă liniară și a determinat factor de corecție al modulului de elasticitate iar pe baza relațiilor lui Halpin Tsai a stabilit o nouă formulă pentru calculul modulului de elasticitate longitudinal pentru materialele respective. Lusti H. R. [2003] a studiat cu ajutorul simulărilor numerice cu element finit proprietățile nanocompozitelor pe bază de polimeri stratificate cu silicați. Scopul a fost de a arăta modul în care morfologia (factorul de formă, fracțiunea de volum și orientarea lamelelor) influențează proprietățile compozitului.

1.3. Justificarea alegerii temei de cercetare

În ultimii ani a crescut interesul pe plan mondial pentru creșterea plantelor pentru fibre și în special a plantelor liberiene având în vedere faptul că aceste plante se regenerează anual în comparație cu lemnul (pădurile) care se regenerează după o lungă perioadă de timp iar utilizarea excesivă a acestuia în producția de materiale biocompozite duce la epuizarea stocurilor existente. Datorită creșterii spectaculoase a consumurilor de material, a deficitului de combustibili fosili, a scăderii resurselor de materii prime, și deasemenea, datorită rezultatelor cercetării științifice, a studiilor privind proprietățile mecanice și fizice ale unor materiale, a crescut interesul pentru găsirea unor noi resurse de energie și materiale regenerabile. Tendințele de înlocuire a materialelor clasice cu materiale noi, reciclabile și regenerabile au fost influențate nu numai de factorii de mediu și economici ci și de dorința de a obține materiale cu greutate specifică redusă care să poată fi utilizate în diferite aplicații industriale

Astfel, s-a trecut la realizarea unor materiale noi și anume materiale compozite pe bază de resurse regenerabile anual, la care elementele de ranforsare pe baza de fibre minerale naturale sau de sinteză au fost înlocuite cu fibrele vegetale, iar elementele de legătură pe bază de matrice metalice au fost înlocuite cu matrice polimerice sintetice sau biodegradabile, Keller A. [2001].

La sfârșitul secolului XX, preocupările cercetătorilor legate de găsirea unor noi resurse de materiale și de introducerea în fluxul de fabricație a unor reziduuri de prelucrare a condus la utilizarea deșeurilor sub formă de fibre scurte și puzderii rezultate ca urmare a extragerii fibrelor liberiene, ca materii prime în realizarea unor materiale biocompozite, produse cosmetice, produse chimice sau combustibili.

Dezvoltarea sustenabilă poate fi făcută numai când se utilizează materiale regenerabile sau reciclabile cum ar fi deșeurile rezultate la prelucrarea plantelor pentru fibre, Herrera-Franco P.J. [2005] sau algele marine, Iannace S. [1999].

Deșeurile de plante liberiene cum ar fi cele de cânepă, in și chenaf au fost identificate ca fiind materii prime atractive pentru materialele compozite utilizate în diverse domenii de activitate. Ele sunt ieftine, regenerabile, se găsesc din abundență, au proprietăți specifice bune datorită densității lor scăzute, Holbery J. [2006].

În comparație cu materialele compozite clasice utilizate în construcții, compozitele pe bază de fibre vegetale nu au impact negativ asupra mediului și au conductivitate termică joasă care reduce difuziunea căldurii. În anul 2007 producția la nivelul Uniunii Europene de puzderii de cânepă a fost de 48000 t. În contextul dezvoltării sustenabile, puzderiile de cânepă constituie materia primă din componența compozitelor ușoare, ecologice, utilizate în construcții (beton cu var pe bază de cânepă). Din prelucrarea tulpinilor de cânepă rezultă aproximativ 25% fibre și 75% deșeuri care sunt considerate produse secundare sub formă de fibre scurte și puzderii, Kidalova L. [2011].

Conform directivelor Comisiei Comunității Europene din 3.12.2008 privind gestionarea deșeurilor biologice în Uniunea Europeană, statele membre trebuie să propună obiective naționale proprii în materie de reciclare a deșeurilor biologice. Astfel, utilizarea deșeurilor de la prelucrarea tulpinilor de in și cânepă este o condiție impusă de guvernul Poloniei pentru primirea subvențiilor, Mankovski J. [2008]. În România, activitatea de gestionare a deșeurilor este fundamentată pe OUG 78/2000.

Motivația alegerii acestei teme de cercetare este determinată de cerințele industriei pentru materiale noi, ecologice cu performanțe ridicate în diverse domenii de activitate.

Plantele liberiene sunt resurse anuale de materii prime ce pot fi utilizate în producția de materiale biocompozite polimerice, reprezentând o alternativă viabilă la fibrele din lemn utilizate în producerea materialelor biocompozite deoarece: fibrele de cânepă precum și deșeurile rezultate în urma prelucrării acestora concurează foarte bine cu fibrele de sticlă în ceea ce privește rezistența la tracțiune și rigiditatea acestora. Prin combinarea acestora cu matrice polimerice se obțin materiale biocompozite polimerice cu un preț de cost mai scăzut decât cele pe bază de fibre de sticlă și cu caracteristici mecanice comparabile cu ale acestora.

Utilizarea acestor materiale compozite noi elimină impactul pe care utilizarea materialelor compozite pe bază de resurse petrochimice îl are asupra mediului. În plus dezvoltarea proiectelor de cercetare finanțate din fonduri europene au deschis căi pentru identificarea și evidențierea domeniilor de utilizare a materiilor prime regenerabile. Prin aceasta a crescut interesul asupra folosirii

materiilor prime regenerabile în industrie și s-a procedat la folosirea fibrelor naturale în domeniile tehnice, Reußmann T. [2003].

Materialele compozite ranforsate cu fibre naturale se folosesc în multe domenii din industrie și câștigă importanță concomitent cu creșterea cererii pentru materiale ușoare în industria materialelor de construcții. Premise importante pentru utilizarea din ce în ce mai frecventă a materialelor compozite cu fibre vegetale au apărut odată cu dezvoltarea continuă a tehnicilor de prelucrare ale acestora.

Datorită unor avantaje pe care le prezintă comparativ cu fibrele de sticlă: greutate scăzută (cu 30-40% mai mică comparativ cu cea a fibrei de sticlă), preț de cost mai mic, Zampaloni [2011], nu sunt toxice, au mai bune proprietăți de amortizare și de izolare fonică, fibrele liberiene își găsesc cea mai mare utilitate în industria de autovehicule pentru realizarea părților interioare ale acestora precum și în construcții la fabricarea ușilor, ferestrelor, obiectelor de mobilier, etc. Alte domenii de utilizare a biocompozitelor pe bază de fibre liberiene sunt: industria de apărare, industria aerospațială, electrotehnică (plăci pentru circuite imprimate, rame), industria mobilei (plăci tip panel și plăci aglomerate). De aceea, pentru a răspunde cerințelor în continuă creștere în industria auto și în construcții sunt necesare procese de dezvoltare continuă în domeniul științei materialelor și a tehnologiilor de fabricare a acestor tipuri de materiale noi, Pervaiz M. [2003], Xue Li [2008], Müller D.H. [2003].

Până la ora actuală au rămas neelucidate complet probleme referitoare la materialele biocompozite pe bază de fibre liberiene legate de: orientarea fibrelor în biocompozit, îmbunătățirea proprietăților interfaciale dintre fibre și matrice, elaborarea unor tehnologii noi de extragere și prelucrare a fibrelor în vederea obținerii unor mănunchiuri de fibre cu proprietăți mecanice cât mai ridicate, realizarea de nanocompozite pe bază de nanofibre liberiene, elaborarea unor modele matematice mai dezvoltate pentru descrierea comportamentului mecanic și termic al biocompozitelor.

1.4 Obiectivele cercetării

Obiectivul major al acestei teze a fost acela de a determina proprietățile mecanice ale unor materiale biocompozite noi care au ca elemente de ranforsare deșeurile de plante liberiene sub formă de fibre scurte și puzderii. Aceste deșeurile sunt rezultate în urma extragerii din tulpinile plantelor liberiene a fibrelor lungi. Deșeurile de plante liberiene iar în cadrul acestora puzderiile în special prezintă particularitatea de a avea dimensiuni și forme foarte variate ceea ce impune o cercetare specifică a biocompozitelor ranforsate cu astfel de materiale. Aceste biocompozite noi sunt diversificate atât din punct de vedere al naturii matricei, al naturii și dimensiunilor elementelor de ranforsare, cât și al fracțiunii de volum a elementelor de ranforsare.

De aceea a fost necesară abordarea următoarelor probleme legate de aceste materiale și anume:

- Determinarea experimentală a proprietăților mecanice ale noilor materiale biocompozite

- Verificarea compatibilității ecuațiilor care descriu din punct de vedere teoretic proprietățile mecanice ale compozitelor cu rezultatele experimentale;
- Identificarea cauzelor care duc la eventuale neconcordanțe între rezultatele teoretice și experimentale;
- Îmbunătățirea unor relații analitice pentru determinarea proprietăților acestor materiale pentru ca rezultatele teoretice să fie compatibile cu cele experimentale;
- Simularea numerică a unei structuri dintr-unul din materialele biocompozite testate la solicitări mecanice de rezistență pentru punerea în evidență a apariției degradărilor în materiale în timpul exploatarei;
- Calibrarea unui model de degradare a materialelor biocompozite armate cu deșeuri de fibre liberiene.

2. MATERIALE BIOCOMPOZITE PE BAZĂ DE MATRICE POLIMERICE RANFORSATE CU FIBRE LIBERIENE

2.1. Generalități despre materiale biocompozite

Biocompozitele sunt materiale compozite care conțin cel puțin o componentă - elementul de ranforsare sau elementul de legătură (matricea) - de origine biologică. Utilizarea acestor materiale compozite noi elimină impactul pe care utilizarea materialelor compozite pe bază de resurse petrochimice îl are asupra mediului, Christian S.J. [2009]. O clasificare a biocompozitelor în funcție de: (1) natura matricei - este dată în Fig.2.1; (2) forma și structura biocompozitului - este dată în Fig.2.2;

1) Clasificarea biocompozitelor în funcție de natura matricei,

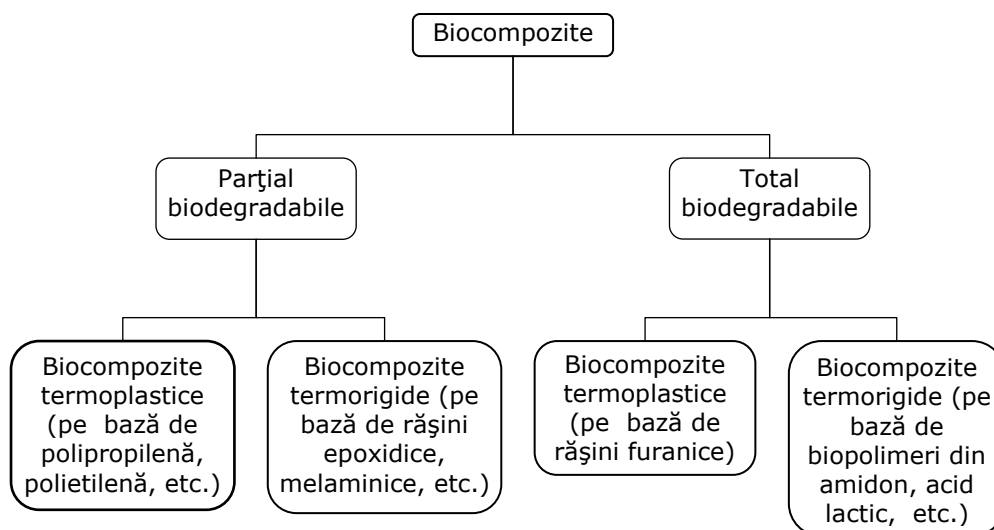


Fig.2.1 Clasificarea biocompozitelor în funcție de natura matricei, Drzal L. [2003]

2) Clasificarea biocompozitelor în funcție de structura lor și natura elementelor de ranforsare

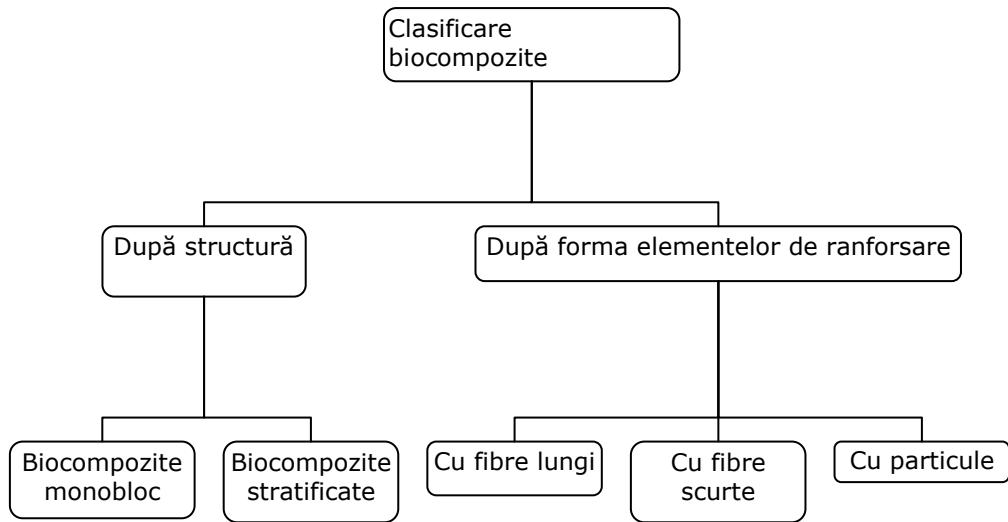
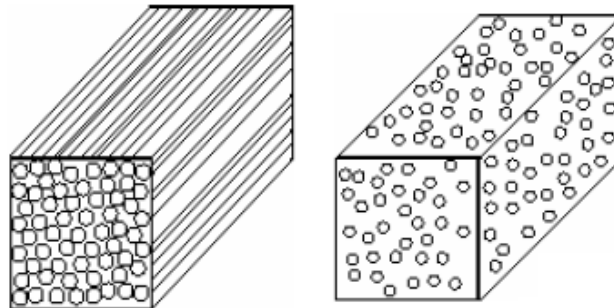
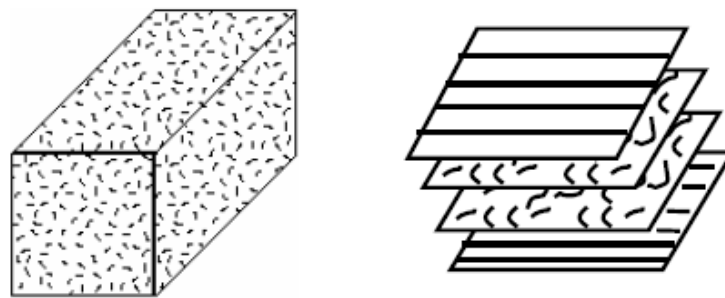


Fig.2.2. Clasificarea biocompozitelor în funcție de structura lor și natura elementelor de ranforsare

O reprezentare schematică a biocompozitelor în funcție de structura lor și natura elementelor de ranforsare este dată în Fig.2.3.



(a) Biocompozite cu fibre lungi (b) Biocompozite cu particule lungi



(c) Biocompozite cu fibre scurte orientate aleator (d) Biocompozite stratificate

Fig.2.3 Diferite forme de compozite: a) biocompozite pe bază de fibre continue, b) biocompozite pe bază de particule, c) biocompozite pe bază de fibre scurte, d) biocompozite stratificate, Ranjan D. [2010]

O fibră continuă (lungă) se caracterizează din punct de vedere geometric ca având un raport foarte mare lungime/diametru (Fig.2.3.a).

Biocompozitele ranforsate cu fibre scurte au fibrele dispuse aleator. (Fig.2.3.c), iar raportul lungime/diametru al fibrei este mic.

Biocompozitele stratificate sunt compozite formate din alternanțe de straturi de fibre și matrice. Ele sunt ortotrope deoarece fibrele sunt orientate în fiecare strat după o anumită direcție. Fiecare strat la rândul lui poate fi orientat după diferite direcții pentru a face compozitul să reziste la sarcini multidirecționale. (Fig.2.3.d.)

Biocompozitele pe bază de particule (granulare) au elementele de ranforsare sub formă de granule obținute din fibre (Fig.2.3.b).

Dintre biocompozitele pe bază de fibre naturale cea mai mare pondere o au cele pe bază de fibre vegetale datorită potențialului ridicat de regenerare a acestora

2.2. Fibre vegetale utilizate în biocompozite polimerice

2.2.1. Clasificarea fibrelor vegetale

Fibrele vegetale se utilizează din ce în ce mai mult ca elemente de rezistență (de ranforsare) în structura materialelor compozite datorită proprietăților lor mecanice, chimice și a faptului că sunt ieftine și pot fi reciclate. Fibrele naturale se clasifică în fibre de natură: vegetală, animală sau minerală. Dintre fibrele naturale cel mai des utilizate în materialele compozite sunt fibrele pe bază de celuloză numite fibre vegetale care la rândul lor se clasifică în: fibre lemnoase sau nelemnoase. Fibrele nelemnoase pot fi subîmpărțite în: fibre liberiene, fibre din frunze, fibre din paie de cereale, semințe, fructe, în funcție de originea lor, în timp ce fibrele lemnoase pot fi împărțite în fibre din lemn moale și fibre din lemn tare. O clasificare a fibrelor vegetale este dată în Fig. 2.4.

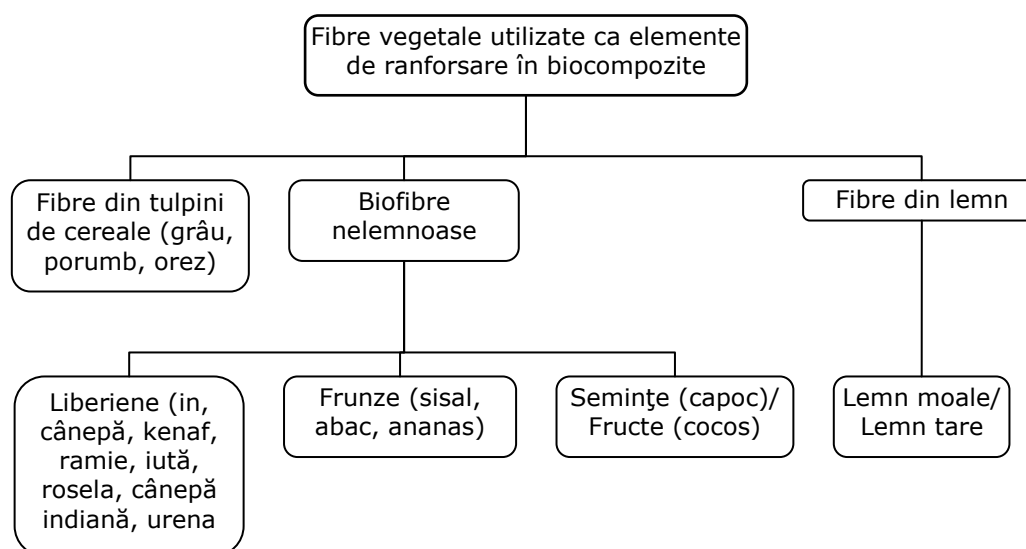


Fig.2.4. Clasificarea fibrelor vegetale

Producția anuală mondială de fibre vegetale în zilele noastre destinată prelucrării acestora este de aproximativ 4 bilioane tone dintre care 60% provin din culturi agricole iar 40% din păduri, comparativ cu producția anuală mondială de oțel care este de aproximativ 0.7 bilioane tone și cea de materiale plastice care este de 0.1 bilioane tone. Primele materiale compozite pe bază de fibre vegetale, au fost fabricate acum 100 de ani. Ele au fost confecționate manual având astfel un cost mai ridicat. După aceea, până în anii 90 ai secolului trecut, utilizarea fibrelor naturale vegetale ca elemente de ranforsare în aplicații tehnice a fost temporar suspendată datorită utilizării pe scară largă a materialelor plastice și fibrelor sintetice. În prezent există un interes major de utilizare a acestor resurse regenerabile în domenii ca: industria de automobile, de avioane, de apărare, construcții civile și industriale, industria mobilei, electrotehnică, etc.

2.2.2. Plante liberiene pentru fibre

Inul (*Linum usitatissimum*) este o planta anuală ce ajunge la înălțime de până la 1,2 m, cu tulpini subțiri (Fig.2.5).



Fig.2.5. Inul (Wikipedia)

Inul este cultivat atât pentru semințe cât și pentru fibre. Diferite părți ale plantei au fost utilizate pentru confecționarea de țesături, vopsele, hârtie, medicamente, plase de pescuit, geluri de păr și săpun. Inul se cultivă în trei forme: in pentru ulei, in pentru fibre și in mixt (pentru ulei și fibre), existând diferențe în ceea ce privește înălțimea (inul pentru fibre este mai înalt) și ramificația tulpinii (inul pentru ulei este puternic ramificat în partea superioară a tulpinii). Plantele de in sunt printre cele mai vechi culturi de plante pentru fibre din lume. Inul a fost utilizat încă din cele mai vechi timpuri de către egipteni pentru producția de țesături. Utilizarea fibrelor de in în procesul de fabricație a țesăturilor în nordul Europei datează din timpuri neolitice. Fibrele de in au rezistență mecanică mai mare decât fibrele de bumbac, dar sunt mai puțin elastice. (Wikipedia)

Producția de in a scăzut în ultimele decade în țările cu tradiție în cultura inului (Rusia și fostele țări sovietice, China, Canada și vestul Europei), însă aceste țări rămân încă mari cultivatoare de in. Datorită faptului că la prelucrarea inului pentru ulei tulpinile plantei (ce constituie deșeuri) rămân ca potențială sursă de fibre în fabricarea materialelor compozite, în provinciile Saskatchewan și Manitoba s-a dezvoltat o puternică industrie de fabricare a compozitelor pe bază de in.

Cânepa (*Cannabis sativa*) (Fig.2.6) este o varietate de canabis, care este cultivată pentru fibre și semințe încă din cele mai vechi timpuri Î.C. Ea a fost cultivată în țările mediteraneene în timpul Evului Mediu. Cânepa a fost una dintre primele plante care au fost cultivate de rasa umană și a fost în prealabil considerată a fi una dintre cele mai importante culturi agricole. Celții au considerat-o a fi o plantă mistică și Regina Elizabeth I a decretat ca toți agricultorii să fie obligați să cultive cânepă pe pământul lor. Până în 1800, cânepa fost folosită pentru a produce frânghii, pânză, ulei de iluminat și medicinal și a fost unul dintre principalele plante cultivate în întreaga Europă de Vest. Guttenberg a tipărit prima Biblie pe hârtie de cânepă. În prezent, fibrele de cânepă sunt folosite pentru fabricarea de bancnote,

frânghii, pânză, hârtie, textile, îmbrăcăminte, produse farmaceutice precum și materiale compozite, Sen T. [2011].

Deși China a fost cel mai mare producător de cânepă de-a lungul anilor, alte țări, precum Australia și Canada și-au reglementat legislația în ceea ce privește cultura de cânepă, devenind la ora actuală țările cele mai mari producătoare de cânepă din lume. În Uniunea Europeană cânepa este cultivată în zilele noastre pe o suprafață de 10000-15000ha, Franța fiind cea mai mare cultivatoare de cânepă, Carus M., [2013].



a) planta de cânepă

b) tulpina de cânepă în secțiune transversală

Fig.2.6. Cânepa (Wikipedia)

Cânepa este o plantă care se cultivă ușor deoarece nu necesită lucrări de fertilizare a solului, de ierbicidare și de alte tratamente în timpul vegetației. Prin urmare, multe dintre problemele ecologice din agricultura legate de tratarea plantei cu substanțe chimice sunt înlăturate. Planta de cânepă crește rapid până la 5 metri înălțime și are frunze dense, care blochează creșterea buruienilor, nemaifiind necesară ierbicidarea terenului pentru următoarea cultură. Spre deosebire de bumbac, cânepa nu necesită multă apă în timpul vegetației, ea fiind rezistentă la secetă datorită rădăcinilor sale adânci. Fibrele de cânepă au un conținut ridicat în celuloză și scăzut în lignină. Ele reprezintă partea cea mai valoroasă a tulpinii de cânepă, și sunt considerate a fi printre fibrele vegetale cu cea mai ridicată rezistență la tracțiune. Rezistența unei fibre singulare de cânepă poate să ajungă până la 2000MPa, Thygesen A. [2006].

Iuta (*Corchorus olitorius*) (Fig.2.7) este o plantă anuală din familia „Malvaceae” care se cultivă în Africa (Egipt, Sudan) și Asia (India, Pakistan, Bangladesh) mai mult pentru fibre ce se obțin din tulpina plantei. S-a utilizat din cele mai vechi timpuri la confecționarea frânghiilor sau a pânzei pentru saci.

Planta are o tulpină ierboasă netedă care atinge 2,50 m înălțime.



Fig.2.7 Iuta (Wikipedia)

Ramia (*Boehmeria nivea*) (Fig.2.8) este o plantă cu flori din familia urzicii, originară din Asia de Est. Este o plantă perenă erbacee în creștere la 1-2.5 m înălțime China este cea mai mare producătoare de ramie. Are o perioadă de vegetație scurtă și se poate cultiva până la de șase ori pe an. Pentru extragerea fibrelor este necesară prelucrarea chimică.



Fig.2.8 Ramia (Wikipedia)

Kenaful (*Hibiscus cannabinus*), (Fig.2.9) este o plantă din familia Malvaceae originară din Asia de Sud. Este o planta erbacee anuală sau bienală, care crește la o înălțime de 1.5-3.5 m, având baza lemnoasă. Fibrele în kenaf se găsesc în învelișul tulpinii (scoartă) și în porțiunea lemnoasă de la bază constituind 40% din volumul plantei. Kenaful este cultivat pentru fibre în țări ca: India, Bangladesh, Statele Unite ale Americii, Indonezia, Malaezia, Africa de Sud, Vietnam, Thailanda, China, India, (Wikipedia).



Fig.2.9. Kenaful (Wikipedia)

Cânepa indiană (*Crotalaria juncea*), (Fig.2.10) este o plantă din familia leguminoaselor (**mazărei**), nefiind specie de cânepă. Este originară din India, și a fost cultivată din timpuri preistorice. Crește la o înălțime de 2,5-3m (Wikipedia).



Fig.2.10. Cânepa indiană - Sunn hemp (Wikipedia)

Urzica (*Urtica dioica*) (Fig.2.11) este o plantă erbacee, perenă este răspândită prin locuri necultivate de la câmpie, deal sau munte, în Europa, nordul Africii, Asia și America de Nord. Tulpina ei poate crește până la 1m înălțime (Wikipedia).



Fig.2.11. Urzica (Wikipedia)

Urena (*Urena lobata*) (Fig.2.12) este o plantă care crește în ținuturile tropicale și subtropicale din întreaga lume. Fibrele obținute din această plantă sunt utilizate în Brazilia în special pentru fabricarea sacilor de cafea (Wikipedia).



Fig.2.12. Urena (Wikipedia)

Rosella (*Hibiscus sabdarifa*) (Fig. 2.13) este o plantă utilizată atât pentru producția de fibre liberiene, cât și în industria alimentară (jeleuri) și în industria farmaceutică datorită multiplelor sale proprietăți curative. Este o plantă anuală sau perenă în funcție de varietate, trăiește în ținuturile tropicale din Africa, Asia sau America și crește la o înălțime de 2-2,5 m.



Fig. 2.13. Rosella (Wikipedia)

Dintre plantele liberiene, urena și urzica sunt plante sălbatice, iar celelalte plante sunt de cultură.

2.2.3. Fibre liberiene utilizate ca elemente de ranforsare în materiale compozite

Cuvântul "liberian" se referă la partea exterioară a tulpinilor acestor plante. Această porțiune fibroasă, puternic vascularizată cuprinde între 10 și 40% din masa tulpinii în funcție de speciile de plante liberiene. Fibrele liberiene sunt fibre naturale vegetale colectate din liberul (tulpina) plantelor liberiene. În principiu, din cauza cantităților reduse de plante liberiene sălbatice (cum este urzica) ele sunt deocamdată mai puțin utilizate în practică, Reußmann T.[2003]. Fibrele liberiene se

remarcă pentru rezistența legăturilor din interiorul fibrelor, de-a lungul acestora. Plantele liberiene sunt caracterizate de mănunchiurile de fibra lungă, puternică ce cuprinde partea exterioară a tulpinii. Restul de tulpină din interiorul acestei porțiuni este un alt tip de material fibros, care are nume diferite în funcție de speciile selectate. Acest material din interiorul tulpinii este cunoscut sub numele de deșeuri atunci când se referă la in și cânepă, bază sau miez atunci când se referă la kenaf.

2.2.3.1. Structura și compoziția chimică a fibrelor liberiene

Proprietățile mecanice și fizice ale fibrelor liberiene depind de structura și compoziția chimică a acestora, de tipul de fibre și de condițiile de creștere. O reprezentare la nivel macroscopic și microscopic în secțiune a tulpinilor de plante liberiene este prezentată în Fig.2.14. Structura fibrelor liberiene constă din fibre elementare care au o formă poliedrală și sunt legate între ele printr-o față de pectină. Fibrele elementare sunt celule de plante singulare care constau din fibriloare orientate de celuloză cristalină și hemiceluloză amorfă. Fibriloarele de celuloză cristalină (microfibrile) din peretele celulei sunt orientate la unghiuri între 5° și 10° față de axa longitudinală ceea ce îi conferă fibrei o rezistență la rupere ridicată. Eficiența ranforsării fibrelor este legată de natura și cristalinitatea celulozei. Principalele componente ale fibrelor liberiene sunt: celuloza cristalină, hemiceluloza amorfă, lignina, pectina și cerurile. Componentele structurale ale fibrelor (celuloza, hemiceluloza, lignina și pectina) influențează proprietățile mecanice și durabilitatea fibrelor. Proprietățile constituenților determină proprietățile generale ale fibrelor. Astfel, hemiceluloza este responsabilă de biodegradarea, microabsorbția și degradarea termică a fibrei. Lignina conferă fibrei stabilitate termică și rigiditate. Pectina leagă mănunchiurile de fibre împreună și le conferă flexibilitate. Cerurile din fibrele vegetale influențează, în general, adeziunea fibrei și caracteristicile capacității de înmuiere. În timpul extracției fibrelor, sunt eliminate cele mai multe de ceruri de suprafață și alte substanțe ne-celulozice. Atunci când aceste fibre sunt utilizate ca armătură pentru compozite, iar îndepărtarea cerii de la suprafață și decojirea fac suprafața fibrelor mai aspră și îmbunătățește adeziunea fibrelor la matricea polimerică, Rana A [2008], John M.J [2008].

Compoziția chimică, cristalinitatea, proprietățile de suprafață, forma secțiunii transversale, lungimea, rezistența și rigiditatea fibrelor liberiene și a fibrelor vegetale în general variază de la fibră la fibră. Mai mult decât atât proprietățile mecanice ale fibrelor liberiene sunt influențate de condițiile de creștere, de depozitare și de recoltare ale plantelor. Din acest motiv aplicarea teoriilor tradiționale ale materialelor compozite la biocompozite pe bază de fibre vegetale în general este mai dificil de realizat.

Structura fibrei liberiene este pluricelulară, se prezintă sub formă de fascicule fibroase alcătuite din fibre elementare sudate unele de altele printr-o membrană –lamelă mediană. Fibrele liberiene pot fi considerate ca fiind la rândul lor materiale compozite care constau dintr-o multitudine de fibriloare de celuloză încorporate într-o matrice din lignină. Fibriloarele de celuloză sunt aliniat de-a lungul lungimii fibrei ceea ce asigură rigiditatea fibrei și o rezistență la tracțiune și la încovoire ridicate. Peretele celular din fibră nu este o membrană omogenă. Fiecare fibrilă are o structură stratificată complexă constând dintr-un perete primar subțire care este primul strat depus în timpul creșterii celulei care înconjoară peretele secundar. Peretele secundar este alcătuit din trei straturi și grosimea

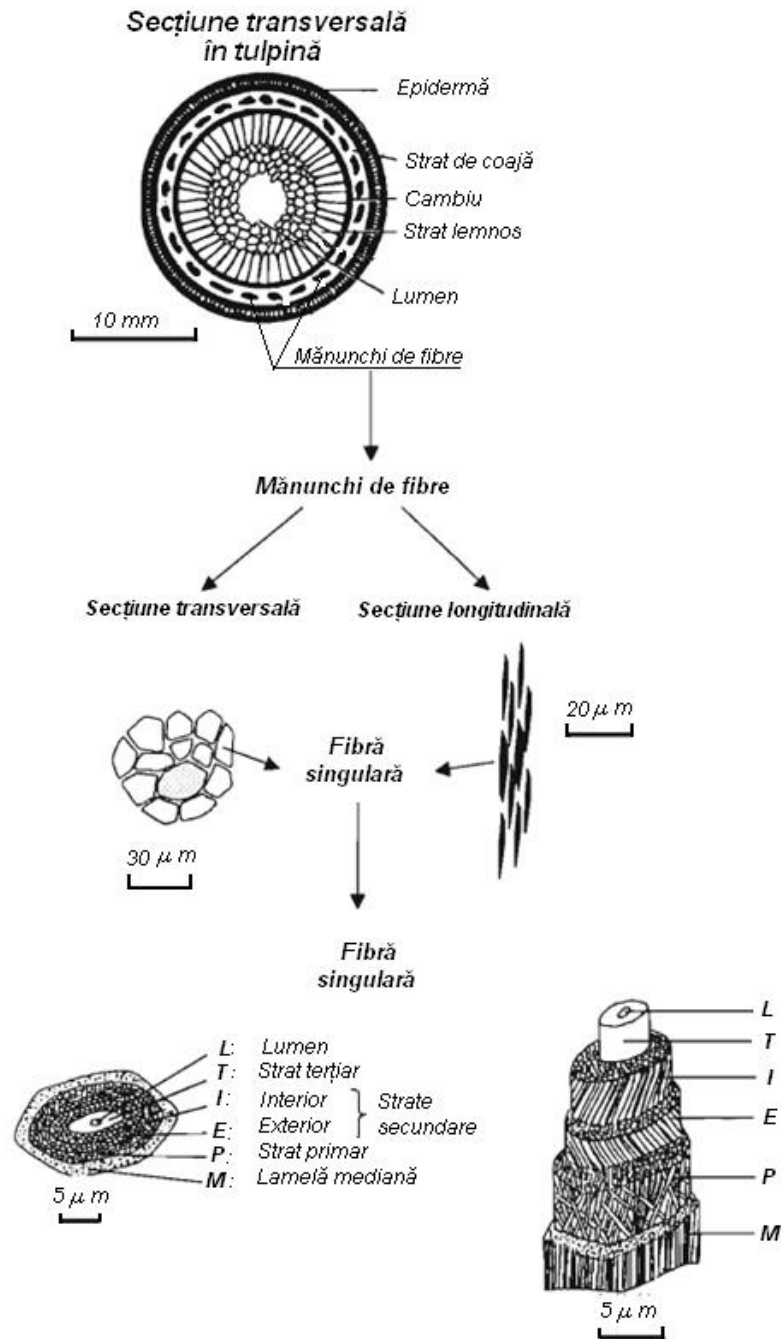


Fig.2.14 . Aspectul la macroscară, microscară și nanoscară a tulpinilor de plante liberiene, Keller A [2001]

stratului din mijloc determină proprietățile mecanice ale fibrei. Stratul din mijloc constă dintr-o serie de microfibre celulare înfășurate elicoidal și formate din molecule de celuloză cu lanț lung. Unghiul dintre axa fibrei și microfibră se numește unghi microfibrilar.

Valoarea caracteristică a acestui parametru variază de la o fibră la alta și determină proprietățile mecanice ale fibrei. Diametrul unei microfibre este de 10-30 nm. Fiecare microfibră este alcătuită din 30-100 molecule de celuloză care determină rezistența mecanică a microfibreii. Peretele celular al microfibreii este alcătuit din hemiceluloză, lignină și pectină. Moleculele de hemiceluloză sunt legate de celuloză prin intermediul hidrogenului formând rețeaua hemiceluloză-celuloză care este considerată a fi componenta structurală principală a celulei fibrei. Rețeaua de lignină acționează ca un agent de cuplare și crește rigiditatea compozitului hemiceluloză-celuloză. Cantitatea mare de grupuri hidroxilice în celuloză conferă fibrelor vegetale proprietăți hidrofile ceea ce face ca acestea să aibă rezistență mică la absorbția de umiditate, Xue Li [2008]

Structura, unghiul microfibrilar, dimensiunile celulei, defectele și compoziția chimică a fibrei sunt cele mai importante variabile care determină proprietățile globale ale fibrelor, Walter T [2006]. În general, rezistența la tracțiune și modulul de elasticitate longitudinal al fibrei cresc odată cu creșterea conținutului de celuloză din fibră. Unghiul microfibrilar determină rigiditatea fibrei. Fibrele vegetale sunt mai ductile dacă microfibrele au o orientare în spirală față de axă, Pernevan M.S., Dreucean M., Popescu M. [2011]. Dacă microfibrele sunt orientate paralel cu axa fibrei atunci fibrele vor fi rigide, inflexibile și vor avea rezistența la tracțiune mai ridicată. Fibrele liberiene se dezvoltă în mănunchiuri de fibre paralele cu tulpina. Mănunchiurile de fibre sunt alcătuite din mai multe celule. Lățimea fibrelor elementare variază între 50-100 μm pentru fibrele tehnice până la 4-10 μm pentru micro fibre. Fibrele liberiene constau din micro-fibre cu diametre de ordinul nanometrilor. Aceste celule sunt legate printr-o matrice organică, formând mănunchiuri de fibre cu un diametru de aproximativ 50-100 microni. Compoziția chimică, conținutul de umiditate și unghiul microfibrilar al unor fibre liberiene este prezentată în Tab.2.1.

Tabelul 2.1. Compoziția chimică, conținutul de umiditate și unghiul microfibrilar al unor fibre liberiene, Wretfors C.[2006], Xue Li [2008], **Pernevan M.S**, Marșavina L. ș.a. [2011]

Fibra	Celuloză [%]	Hemiceluloză [%]	Lignină [%]	Pectină [%]	Ceară [%]	Unghi microfibrilar [°]
In	71	18.6-20.6	2.2	2.3	1.5	5-10
Câneapă	70-74	17.9-22.4	3.7-5.7	0.9	0.8	2-6.2
Puzderii de câneapă	48	18	27	4		-
Kenaf	45-57	21.5	8-13	3-5	2-5	-
Ramie	58.6-76.2	13.1-16.7	0.6-0.7	1.9		7.5
Iută	61-71.5	13.6-20.4	12-13	0.2	0.5-2	8

2.2.3.2. Extragerea și prelucrarea fibrelor liberiene

Separarea fibrelor liberiene de tulpinile lemnoase ale plantelor se realizează prin procese mecanice, chimice sau biologice. Fibrele liberiene sunt extrase din tulpină folosind următoarele metode: (a) prin topire (în apă și atmosferică); (b) prin metode mecanice și (c) prin metode chimice.

(a) *Topirea în apă și topirea atmosferică* sunt procesele tradiționale pentru a extrage fibrele din plante și care folosește bacterii și ciuperci ce acționează asupra ligninei și pectinei din tulpină pentru separarea fibrelor. Bacteriile, cum ar fi *Bacillus Amylobacter* și *Cladosporium Berbarum*, și ciuperci, cum ar fi *Rhizomucor Pusillus* și *Lateritium Fusarium*, se dovedesc a fi cele mai eficiente în capacitatea lor de a ataca substanțele noncelulozice și a separa fibrele de miez. Deși prin topirea atmosferică rezultă fibre de calitate mai bună, această metodă este mai puțin utilizată deoarece necesită o durată relativ mai mare de prelucrare.

(b) *Metodele mecanice* constau în zdrobirea tulpinilor și melițare rezultând fuiorul și câlții

(c) *Metodele chimice* sunt metode mai frecvent utilizate și constau în topirea ușoară cu acizi și enzime pentru extragerea fibrelor. Hidroxidul de sodiu este produsul chimic cel mai frecvent utilizat pentru extracția fibrelor. Acizii, cum ar fi acidul sulfuric și acidul oxalic, în combinație cu un detergent de asemenea, au fost utilizați pentru extragerea fibrelor din tulpină. Concentrația chimică, temperatura și durata de tratament sunt principalii factori care determină calitatea fibrelor extrase chimic. Pentru extragerea fibrelor cu ajutorul enzimelor sunt utilizate o combinație de enzime, cum ar fi pectinazele, hemicelulazele și celulazele, iar mai nou multienzimele complexe, în general cu un tratament pre sau post chimic, Rho D. [2008].

2.2.3.3. Proprietăți mecanice, fizice și tehnologice ale fibrelor liberiene

Fibrele liberiene sunt de fapt caracterizate prin aceiași parametri și proprietăți ca toate celelalte fibre. Cu toate acestea, datorită originii naturale (vegetale) pe care o au ele prezintă o variabilitate cu mult mai mare a diferiților parametri decât omoloagele lor sintetice. Compoziția chimică, cristalinitatea, proprietățile de suprafață, diametrul, forma secțiunii transversale, lungimea, rezistența și rigiditatea variază de la fibră la fibră. Mai mult decât atât, proprietățile mecanice depind de condițiile de creștere (climatice), recoltare și condițiile de prelucrare. Acest lucru impune două probleme: caracterizarea calității fibrelor și dificultăți în aplicarea teoriilor tradiționale de compozit. Pentru a măsura rezistența la tracțiune și modulul de elasticitate longitudinal al fibrei singulare este utilizată metoda determinării rezistenței la tracțiune a unei singure fibre (SFT) conform ASTM D 3379-75. Pentru determinarea rezistenței la compresiune se utilizează metoda buclei de testare conform ASTM D 695 -02. Datele experimentale obținute au arătat că rezistența la compresiune a fibrei de in este de aproximativ 80% din rezistența la tracțiune a acesteia.

În timpul procesului de fabricare a materialelor compozite ranforsate cu fibre liberiene, sunt permise doar perioade scurte de expunere la temperaturi ridicate.

În timpul procesului de fabricare a materialelor biocompozite trebuie să fie evitate temperaturi mai mari de 180° C pentru a preveni degradarea fibrelor.

Fibrele liberiene au un grad mare de neuniformitate, ceea ce influențează proprietățile lor, cum ar fi: compoziția chimică, cristalinitatea, proprietățile de suprafață, geometria, rezistența și rigiditatea. Fibrele de in și cânepă sunt considerate ca fiind dintre cele mai puternice bio-fibre liberiene. În Tab.2.2 sunt prezentate proprietăți fizico- mecanice ale unor fibre liberiene comparativ cu fibrele sintetice. Valorile sunt prezentate ca valori medii, dar în realitate sunt diferențe mari între valorile măsurate, cel puțin pentru fibrele liberiene din in, cânepă și iută. Fibrele de cânepă prezintă cea mai mare rezistență și rigiditate dintre toate fibrele vegetale. Fibrele liberiene, comparativ cu fibrele sintetice și de carbon au o densitate mult mai mică. De aceea, cercetările în domeniul materialelor biocompozite au cunoscut în ultimul deceniu o reală ascensiune prin realizarea biocompozitelor pe bază de fibre liberiene care au o proprietăți mecanice bune, comparabile cu cele ale fibrelor sintetice.

Tab.2.2. Proprietăți mecanice și fizice ale unor fibre liberiene comparativ cu fibrele sintetice. Bledzki A. [2002], Dittenber D.B. [2012], Bjurenstedt A. [2004], Carus M. [2013], Isopescu D. [2012]

	Densitate ρ [kg/m ³]	Rezistența la rupere σ_{tmax} [MPa]	Modulul de elasticitate longitudinal E [MPa]	Modulul de elasticitate specific (E/densitate)	Lungirea Specifică la rupere ϵ_r [%]	Preț €/kg
Fibra de sticlă	2550	2400	73000	29	3	1.5
Fibra de carbon	1400	4000	230000- 240000	164-171	1.4-1.8	-
Fibra de in	1400	550-900	70000	26-40	1.2-1.6	0.5- 0.7
Fibra de cânepă	1480	800- 1500	30000-80000	47	1.6	0.5
Fibra de iută	1460	400-800	10000-30000	7-21	1.8	-
Fibra de ramie	1500	500	44000	29	2	-
Fibra de lemn		8-42	7000-20000			

Cea mai mare problemă pe care o prezintă fibrele vegetale în general respectiv fibrele liberiene o constituie natura lor hidrofilică care face ca adeziunea interfacială dintre acestea și matricea polimerică să fie redusă. Din acest motiv fibrele liberiene trebuie tratate chimic înainte de fabricarea compozitului sau în timpul procesului de fabricare a acestuia. Tratamentul chimic poate fi cu soluție de NaOH (mercerizarea), cu silan, cu acid acrilic, cu permanganat. Rolul acestor compuși chimici constă în modificarea grupurilor hidroxilice de la suprafața fibrei și îmbunătățirea aderenței fibră-matrice. (Doan M.Sc,2006)

2.3. Matrice polimerice utilizate în fabricarea biocompozitelor

În materialele compozite pe bază de fibre vegetale matricea materialului compozit este un polimer care are următoarele roluri: produce o barieră în fața aversiunii mediului ambiant (protejează materialul compozit de radiații ultraviolete și de umiditatea mediului ambiant), preia încărcările propriu-zise ale compozitului și transferă tensiunile la fibre, ține legătura dintre fibre, dă și stabilizează forma structurii compozitului, Harris.B [1999]

Combinăția optimă dintre proprietățile fibrei și cele ale matricei ar trebui să satisfacă un set de cerințe operaționale și de fabricație, care, uneori, au un caracter contradictoriu și nu au fost încă pe deplin rezolvate la compozitele existente. Mai întâi de toate, rigiditatea matricei ar trebui să corespundă rigidității fibrelor și să fie suficient de mare pentru a asigura preluarea uniformă a sarcinilor de către fibre. Fibrele sunt de obicei caracterizate prin neuniformități ale proprietăților lor mecanice, neuniformități care ar putea să se amplifice ca urmare a deteriorărilor fibrelor cauzate de tehnologia de prelucrare a compozitului. Ruperea fibrelor mai slabe sau deteriorarea acestora nu trebuie să conducă la ruperea materialului compozit. Matricea trebuie să redistribuie în mod egal încărcarea fibrelor. O condiție necesară pentru o înaltă performanță a compozitului o reprezintă gradul de aderență dintre fibre și matrice care poate fi realizată prin selectarea unor combinații corecte ale materialelor: fibre și matrice. În primul rând, o matrice lichidă ar trebui să aibă vâscozitate suficient de scăzută pentru a permite matricei să pătrundă printre rețeaua de fibre. În al doilea rând, suprafața fibrei ar trebui să aibă hidrofilitate bună cu matricea. În al treilea rând, vâscozitatea matricei ar trebui să fie suficient de mare pentru a da consistența compozitului. Procesul de fabricație care trebuie să asigure calitatea corespunzătoare a materialului rezultat nu ar trebui să impună temperaturi și presiuni ridicate de lucru. De aceea, alegerea matricei în realizarea unui biocompozit se face în funcție de condițiile impuse în exploatarea acestuia (rezistența la temperaturi ridicate, proprietățile mecanice impuse), culoarea (transparente sau opace), aderența cu fibrele de ranforsare, de tehnologia și costul de fabricație ale acestuia, Riedel U [2003], Christian S.J [2009], Nillson T [2006]. Printre avantajele materialelor (matricelor) polimerice se pot enumera: densități reduse, rezistență bună la coroziune, conductivitate termică redusă, conductivitate electrică redusă, efecte estetice de culoare, transluciditate. Ca dezavantaj se poate menționa rezistența la tracțiune transversală scăzută, Ranjan D [2010].

2.3.1. Clasificarea matricelor polimerice

Matricele utilizate în materiale biocompozite sunt matrice polimerice (rășini) termorigide sau termoplastice care la rândul lor pot fi sintetice sau de natură organică.

Cercetările legate de materialele biocompozite din ultima perioadă s-au axat cu precădere pe înlocuirea matricelor sintetice cu matrice obținute din materiale ecologice, numite biopolimeri. Biopolimerii sunt polimeri la care componenții de bază sunt alcătuiți din surse reciclabile. Acest lucru presupune extragerea materialelor pentru biopolimeri din resurse naturale, biodegradabile și regenerabile. Astfel s-au

obținut biomatrice termoplastice pe bază de uleiuri vegetale, derivați de zahăr, amidon sau celuloză. De asemenea s-au obținut biomatrice termorigide pe bază de rășini furanice din deșeuri lemnoase, Doan M. [2006].

O clasificare a materialelor ce pot fi folosite ca matrice în realizarea materialelor compozite este prezentată în Fig.2.15.

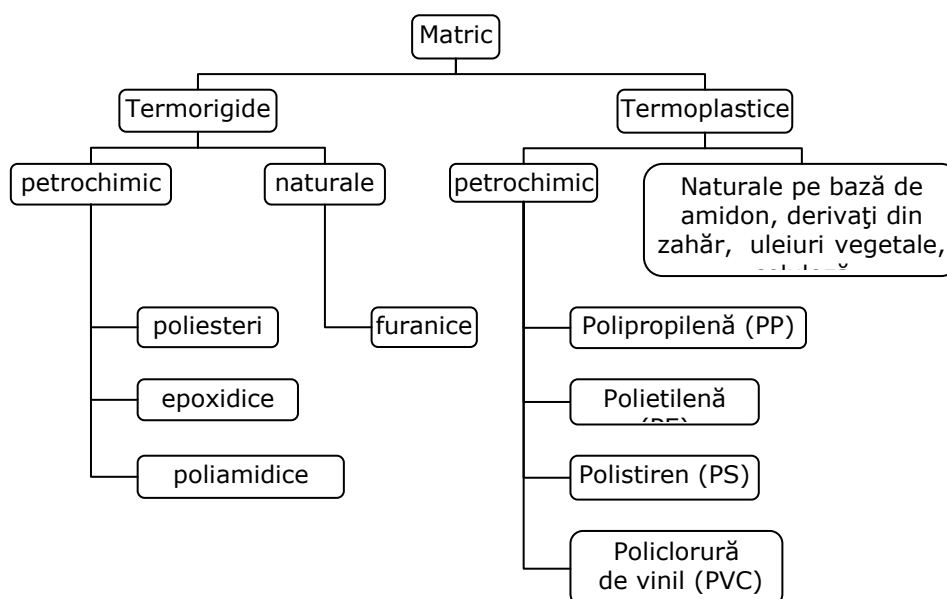


Fig.2.15. Clasificarea matricelor utilizate în biocompozite, Sedlacik G. [2003]

2.3.2. Matrice termorigide. Proprietăți fizico-mecanice și tehnologice

Rășinile termorigide sunt în stare neprelucrată lichide sau vâscoase. Se prelucrează fără să fie încălzite în prealabil, și ulterior sunt solidificate cu ajutorul unor întăritori. Materialele termorigide nu sunt fuzibile. Ele au în general o rezistență mai mare la temperatură decât cele termoplastice dar sunt mai fragile, sunt rezistente la coroziune și la temperaturi ridicate, Department Of Defense Vol2 [2002]. Polimerii termorigizi sunt materiale utilizate pe scară largă în fabricarea materialelor compozite și ele includ: poliesteri, rășini epoxidice, rășini poliamidice și rășini furanice. Proprietățile la tracțiune ale rășinilor termorigide sunt prezentate în Tab.2.3.

Tab.2.3. Proprietăți la tracțiune ale rășinilor termorigide (Vasiliev V,2001)

Rășini polimerice termorigide	Rezistența la tracțiune σ_{tmax} [MPa]	Modulul de elasticitate longitudinal E[MPa]
Epoxidice	60-90	2400-4200
Poliesterul	30-70	2800-3800
Formaldehidice	40-70	7000-11000
Poliamidă	55-110	3200

Polimerii termorigizi se găsesc în mod obișnuit sub formă lichidă la temperatura mediului ambiant. În vederea solidificării polimerului și a inițierii legăturilor încrucișate polimerul este încălzit și aditivat cu substanțe de întărire. Întărirea se produce atunci când lanțurile polimerice sunt legate rigid unul de celălalt iar materialul nu mai curge. O încălzire ulterioară a matricei termorigide nu o mai transformă în stare lichidă, Ratna D [2009]. Polimerii termorigizi sunt utilizați frecvent în fabricarea compozitelor datorită faptului că proprietățile lor mecanice nu se înrăutățesc la temperaturi înalte. Polimerul termorigid este turnat în matriță peste fibre, după care amestecul este încălzit în vederea fabricării compozitului. Materialele compozite pe bază de rășini termorigide au avantajul că temperatura de prelucrare a acestora fiind mai mică ($<120^{\circ}\text{C}$) comparativ cu polipropilena care trebuie prelucrată prin încălzire la 200°C , degradările fibrelor datorită temperaturii vor fi reduse, Madsen B. [2004].

2.3.3. Matrice termoplastice. Proprietăți fizico-mecanice și tehnologice.

Rășinile termoplastice sunt polimeri care necesită să fie încălziti în timpul procesului tehnologic. După răcire, ele își mențin forma și pot fi reîncălziți fără schimbări semnificative ale proprietăților lor. Rășinile termoplastice ca: polietilena (PE), polipropilena (PP), policarbonatul (PC), polistirenul (PS) sunt cele mai utilizate rășini termoplastice în fabricarea materialelor biocompozite. Matricele termoplastice pot fi topite și solidificate de mai multe ori.

Pentru fabricarea compozitului matricea termoplastică este încălzită la o temperatură mai mare decât temperatura de topire până când începe să curgă. Ea curge în jurul suprafeței fibrelor și se leagă de aceste suprafețe după care urmează răcirea compozitului. În funcție de viteza de răcire și de proprietățile de cristalizare a polimerului matricea termoplastică în stare solidă poate fi cristalină, amorfă sau combinație de cristalin-amorf. Forma cristalină are o structură organizată și tinde să arate un comportament rigid pe când forma amorfă are o structură mai dezorganizată și un comportament mai puțin rigid, Christian S.J [2009].

Polietilenă (PE) este un produs din material sintetic, termoplastic utilizat în produse de consum (peste 60 de milioane de tone produse la nivel mondial în fiecare an), Wikipedia [2007]. În funcție de densitatea acesteia, polietilena se clasifică în două categorii: polietilena de joasă densitate (LDPE) și polietilena de înaltă densitate (HDPE). LDPE are rezistența la tracțiune scăzută și este rezistentă la umiditate și la agenți chimici.

Polietilena de înaltă densitate (HDPE) are densitatea și rezistența la tracțiune mai ridicată decât LDPE și este utilizată pe scară largă în fabricarea compozitelor cu ranforsări din fibre vegetale.

2.3 – Matrice polimerice utilizate în fabricarea biocompozitelor 35

Polipropilena (PP) are mai multe proprietăți remarcabile cum ar fi greutatea redusă, rezistența termică, duritate, luciul de suprafață, rezistență la produse chimice, rigiditate, stabilitate dimensională, etc. Aceste proprietăți determină utilizarea polipropilenei în confecționarea unor produse cum sunt: piese și accesorii auto, jucării, articole sportive, etc, Rana A [2008]. Polipropilena (PP) datorită densității scăzute (cca 900 kg/m³) și a capacității de prelucrare bune se evidențiază printr-un raport preț/rendament foarte bun. De aceea în ultimii 30 de ani a fost cea mai des folosită substanță ca matrice termoplastice pentru realizarea diferitelor tipuri de materiale compozite. Domeniile care utilizează cel mai mult PP sunt cele legate de: fabricarea materialelor de ambalaj (40%), industria de automobile, electronică (20%) industria textilă (20%). Polipropilena este des denumită ecologică deoarece datorită densității sale reduse, este mult folosită în construcția de mașini reducând greutatea acestora și totodată contribuind la reducerea consumului de carburanți. Cele mai importante proprietăți care fac ca PP să fie uneori mai des folosită decât PE sunt: densitate redusă, rezistența la agenții chimici, uleiuri și săruri, rezistență la tracțiune ridicată și duritatea ridicată. Dilatarea termică, stabilitatea la oxidare la temperaturi ridicate sunt reduse iar reziliența este de asemenea redusă. În Tab. 2.5 sunt prezentate proprietăți mecanice la tracțiune ale unor matrice termoplastice.

Tab.2.5 Proprietăți mecanice la tracțiune ale unor matrice termoplastice, Vasilev V. [2001]

Matrice polimerice termoplastice	Rezistența la tracțiune σ_{tmax} [MPa]	Modulul de elasticitate longitudinal E [MPa]
Polietilenă	20-45	6000-8500
Polistiren	35-45	3000
Poliester	60	2500
Teflon	5-35	3500

În Tab.2.6 sunt prezentate proprietăți fizico-mecanice ale unor matrice termoplastice ce sunt utilizate mai mult în realizarea materialelor biocompozite.

Tab.2.6 Proprietăți mecanice și fizice ale polipropilenei (PP), polietilenei de înaltă densitate (HDPE) și polietilenei de joasă densitate (LDPE) (Rana A,2008), (Lampke T,2009)

Matrice polimerice termorigide	Densitate ρ [kg/m ³]	Rezistența la tracțiune σ_{tmax} [MPa]	Modulul de elasticitate longitudinal E [MPa]
Polipropilena (PP)	920	26-41.4	95-1776
Polietilena de înaltă densitate (HDPE)	925	14.5-38	413-1490
Polietilena de joasă densitate (LDPE)	1000	4-78.36	55-380

Dintre avantajele materialelor termoplastice față de materialele termorigide se pot enumera: posibilitatea de a fi retopite și ușurința în prelucrare.

2.3.4. Biopolimerii

În general, biopolimerii sunt obținuți prin sinteza chimică în principal a unor componente de polimeri naturali numite monomeri. Polimerii naturali cum sunt amidonul și celuloza sunt modificate fizic și chimic pentru a fi folosiți în realizarea biorășinilor termoplastice (acidul polilactic PLA derivat din porumb, acidul poliglicolic PGA, polihidroxibutiratul PHB). În cazul acidului polilactic structura amidonului devine termoplastică prin utilizarea unor aditivi ca glicerolul sau apa. Rășinile furanice sunt biopolimeri termorigizi rezistenți la temperaturi ridicate și foc, cu costuri de fabricație reduse, BIOCOMP Project [2008].

Utilizarea acestor biopolimeri reprezintă o alternativă viabilă la polimerii sintetici deoarece sunt biodegradabili și ecologici. Biopolimerii se pot obține fie din plante de cultură fie din lemn. Biopolimerii pe bază de esteri de celuloză extrasă din copaci sau bumbac sunt considerați de asemenea ca fiind un substitut al rășinilor pe bază de produse petroliere. Polimerii pe bază de amidon sunt extrași în special din porumb, grâu sau cartofi. Polimerii pe bază de proteine și uleiuri din soia sunt utilizate de asemenea în fabricarea biocompozitelor, John M. [2008].

În Tabelul 2.8 sunt prezentate unele proprietăți mecanice și fizice ale câtorva biopolimeri utilizați în materiale compozite cu ranforsări de fibre vegetale.

Tabel 2.8 Proprietăți mecanice și fizice ale câtorva biopolimeri utilizați în materiale compozite cu ranforsări de fibre vegetale, Wretfors C. [2006]

Biopolimerul	Densitatea ρ [kg/m ³]	Rezistența la tracțiune σ_t [MPa]	Modulul de elasticitate longitud. E [MPa]	Lungirea specifică ϵ [%]	Temperatura de topire T [°C]
acidul polilactic (PLA)	1210-1250	21-60	350-3500	2.5-6	150-162
acidul poliglicolic (PGA)	1500-1707	60-100	6000-7000	3.5-4.5	220-233
polihidroxibutiratul (PHB)	1180-1262	40	5000-8000	5-15	168-182

Deoarece tehnologia de fabricare a biopolimerilor presupune costuri ridicate, cele mai utilizate matrice în fabricarea biocompozitelor la ora actuală rămân rășinile sintetice.

2.4. Interfața fibră-matrice

Aspectul fizico-chimic al interfeței fibră-matrice în compozit este un subiect dificil iar cercetările legate de această problemă sunt încă departe de a fi elucidate. Există teorii ale legăturii dintre fibră și matrice precum și metode analitice pentru a caracteriza această interfață. Natura sau originea aderenței dintre fibre și matrice este discutată în termeni de teorii de adeziune. Există metode analitice, care au fost concepute pentru a caracteriza proprietățile de suprafață ale fibrelor și interfeței fibre-matrice în compozit, Jang-Kio [1998]. Mecanismul de transmitere a tensiunilor la interfață în compozitele polimerice este complex. Trebuie să se facă distincție între tensiunile normale active la interfață și tensiunile de forfecare (tangțiale). Forța de tracțiune este transmisă fibrelor prin intermediul tensiunilor de forfecare

de-a lungul direcției de orientare a fibrelor. Interfața între fibre și matrice este considerată adesea datorită influenței majore pe care o are asupra caracteristicilor compozitului, ca o componentă a compozitului. Toate fibrele vegetale sunt hidrofile, iar matricele polimerice sunt hidrofobe. Această discrepanță între natura fibrei și a matricei poate duce la o aderență slabă între fibre și matrice, și prin aceasta la o interfață necorespunzătoare între aceste componente. Rezistența legăturii interfaciale depinde de mulți parametri: energia de rupere a suprafeței de contact dintre fibră și matrice, legăturile chimice dintre fibră și matrice și rugozitatea fibrei, Vasiliev V.[2001]. Îmbunătățind aderența (legătura) dintre fibre și matrice se obțin valori ridicate ale rezistențelor și rigidității compozitului. O îmbunătățire a legăturii fibre-matrice în cazul materialelor compozite termoplastice ranforsate cu fibre se poate realiza aplicând diferite tratamente (fizice, chimice sau mecanice) fibrelor sau modificând compoziția chimică a matricei prin adăugarea unor agenți de compatibilizare în compozit cum ar fi: anhidrida maleică (în cazul polipropilenei, respectiv alcali sau silani în cazul rășinilor epoxidice), (Sedlacik G. [2003], Department of Defense Vol.3 [2002])

Măsurarea adeziunii interfaciale dintre fibre și matrice se face prin testul de smulgere al fibrei din matrice și prin testul de fragmentare al fibrei. Testul de smulgere constă în extragerea unei fibre singulare încorporată pe jumătate în matrice prin aplicarea unei forțe de tragere la capătul liber al fibrei. Cunoscând modulele de elasticitate ale fibrei și matricei, precum și geometria fibrei dată de lungimea și diametrul acesteia se poate determina rezistența interfacială, Cañigüeral N. [2009].

Testul de fragmentare al fibrei constă în solicitarea la întindere a unei epruvete de tracțiune în care o singură fibră este introdusă completă în matrice pe direcție axială, (Bjurenstedt A [2004], Department of Defense Vol.1 [2002])

2.5. Tehnologii de fabricare a materialelor biocompozite

Tehnologiile de fabricare a materialelor biocompozite sunt aceleași tehnologii ca și cele utilizate în prelucrarea materialelor plastice. Cele mai frecvent utilizate tehnologii sunt: turnarea sub presiune, presarea, extrudarea și injecția.

2.5.1. Pultruziunea

Pultruziunea este un proces continuu de fabricare a profilurilor de materiale compozite de orice lungime. Fibrele impregnate sunt trase printr-un orificiu încălzit care este modelat în conformitate cu secțiunea transversală dorită a produsului.

Profilul rezultat rămâne în formă până la uscarea rășinii. Avantajele metodei constau în: fabricarea pieselor cu pereți subțiri și de lungime mare cu o mare varietate de forme în secțiune transversală și posibilitatea obținerii unui grad înalt de automatizare.

Dezavantajul constă în limitarea posibilității de variație a formei piesei în secțiune transversală.

2.5.2. Turnarea prin injecție

Turnarea prin injecție constă în amestecarea fibrelor cu matricea sub formă de granule, încălzirea amestecului și conducerea acestuia prin intermediul unui șurub conducător în cavitatea unei matrițe de turnare unde este răcit luând forma interiorului matriței.

2.5.3. Turnarea prin presare

Turnarea prin presare este un proces discontinuu. Fibrele și matricea sunt aranjate și laminate manual într-o matriță mobilă după care aceasta este preîncălzită și apoi introdusă într-o presă unde este presată.

2.5.4. Impregnarea cu rășină a fibrelor înfășurate

Metoda constă în înfășurarea fibrelor continue sau a țesăturilor pe un dorn de rotație și impregnarea acestuia cu materialul rășinii. Impregnarea cu rășină se poate face atât înainte cât și după înfășurarea fibrelor. După răcirea compozitului dornul este extras. Metoda se pretează pentru fabricarea containerelor și în general a pieselor cu cavități mari, Rijskwijk K. [2001].

2.6. Proprietăți fizico- mecanice ale biocompozitelor

Performanța unui material compozit este analizată prin prisma proprietăților sale fizice, chimice și mecanice. Aceste informații sunt esențiale pentru selectarea materialului într-o aplicație dată, precum și pentru proiectarea unei structuri din materialul selectat. Proprietățile mecanice și fizice ale materialului se determină prin efectuarea testelor în condiții de laborator controlate. Natura ortotropă a compozitelor armate cu fibre a condus la dezvoltarea unor metode de testare standard, care sunt adesea diferite de cele utilizate pentru materiale izotrope tradiționale. Proprietăți mecanice statice, cum ar fi proprietățile de tracțiune, compresiune, încovoiere și forfecare ale unui material compozit sunt date de bază în proiectarea structurilor mecanice confecționate din acel material.

Proprietățile mecanice ale materialelor compozite în general depind de: natura matricei, natura fibrei, dimensiunile fibrei, orientarea fibrei în matrice, proprietățile interfeței matrice-fibră. Prin realizarea de materiale biocompozite combinând eficient elementele menționate mai sus se obține o multitudine de materiale cu tot atâtea proprietăți mecanice specifice fiecăruia dintre ele.

Absorbția de umiditate

Absorbția de umiditate a materialelor biocompozite crește cu creșterea fracțiunii de volum a fibrei datorită măririi creșterii golurilor și a conținutului de celuloză. Comportamentul la absorbția apă a biocompozitelor se modifică la temperaturi ridicate Dhakal H.N [2006]. S-a constatat că prin expunerea la umezeală sub

acțiunea radiațiilor ultraviolete a unui biocompozit pe bază de polipropilenă ranforsat cu puzderii de cânepă, rezistența la tracțiune și rezistența la impact a materialului au scăzut iar rigiditatea acestuia a crescut Popa M.I., Pernevan S, și alții [2013].

Densitatea

Densitatea materialelor biocompozite pe bază de matrice polimerice ranforsate cu fibre vegetale este mai mică decât densitatea materialelor compozite polimerice ranforsate cu fibre de sticlă. Densitatea fibrelor vegetale este de aproximativ 1400 kg/m^3 iar densitatea fibrei de sticlă este de 2500 kg/m^3 . Densitatea biocompozitelor fabricate prin turnare prin compresie este mai mare decât a celor fabricate prin celelalte metode (injecție sau pultruziune), datorită faptului că la turnarea prin compresie se elimină mai eficient golurile de aer din compozit, Tungjitpornkull S. [2009].

Proprietățile mecanice

Rezistența maximă la tracțiune a biocompozitelor pe bază de fibre vegetale poate atinge valori de până la 223 MPa, rezistența la încovoiere de 254 MPa obținute pentru un biocompozit pe bază de rășină polilactică ranforsat cu fibre de kenaf cu lungimea fibrei 500mm și diametrul fibrei între 50-150 μm iar modulele de elasticitate longitudinal la tracțiune respectiv încovoiere ating valori de până la 30GPa respectiv 50 GPa pentru acest compozit, Shinji Ochi [2008].

Proprietățile mecanice ale unui biocompozit depind de o serie de factori cum ar fi conținutul de fibre/matrice, tipul de fibră, forma și dimensiunile fibrei, adeziunea interfacială fibre-matrice, Pernevan M.S., Marșavina L. ș.a [2012], tehnologia de prelucrare. Dhakal H. și alții [2007] au constatat că pentru un biocompozit pe bază de poliester nesaturat ranforsat cu fibre de cânepă, la aceeași fracțiune de volum a fibrei în compozit rezistența la tracțiune și rezistența la încovoiere a acestuia scad cu până aproximativ 15% dacă acel compozit este imersat în apă. Deformația la încovoiere crește în cazul biocompozitului imersat în apă.

Agenții de compatibilizare introduși în matrice în timpul procesului de fabricație au rolul de a îmbunătăți proprietățile mecanice ale biocompozitelor. Arbelaiz, B, și alții [2005] într-un studiu făcut asupra materialelor biocompozite pe bază de PP ranforsate cu fibre scurte de in au arătat că proprietățile mecanice ale acestora (rezistența la tracțiune, respectiv încovoiere, modulele de elasticitate la tracțiune și încovoiere precum și energia de rupere la impact au crescut cu creșterea procentului agentului de compatibilizare, astfel încât valorile acestora au ajuns să se dubleze pentru aceeași fracțiune de volum a fibrei în cazul biocompozitului modificat cu agent de compatibilizare față de biocompozitul nemodificat cu agentul de compatibilizare. S-au obținut valori ale rezistențelor la tracțiune și încovoiere de 55 MPa respectiv 90 MPa în cazul biocompozitului modificat față de 20 MPa pentru rezistența la tracțiune respectiv 40 MPa pentru rezistența la încovoiere în cazul biocompozitului nemodificat cu agentul de compatibilizare.

În vederea obținerii biocompozitelor 100% naturale cu proprietăți mecanice ridicate, biorășini pe bază de amidon au fost ranforsate cu microfibre sau nanofibre din deșeuri agricole (paie de grâu). Diametrul nanofibrelor a fost de ordinul 10-80nm și lungimea de câteva sute de nm. Din analiza modulului de elasticitate la tracțiune pentru nanocompozitele pe bază de rășină polilactică din amidon (TPS) ranforsate cu fracțiuni de volum de 2%, 5%, 10% NF (nanofibre din paie de grâu) s-a constatat că o creștere a fracțiunii de volum de la 2% la 10% a nanofibrelor duce la o creștere a modulului de elasticitate cu 145 %, Ayse A. [2008].

Proprietățile mecanice ale biocompozitului sunt influențate de tehnologiile de fabricare ale acestora. Rezistența la impact a biocompozitelor fabricate prin injecție este mai mică decât cea a biocompozitelor obținute prin turnare prin compresie. Khan M.N. [2012] și alții au determinat proprietățile mecanice ale unor biocompozite de tip sandwich pe bază de PP ranforsate cu fibre scurte de iută și a unor compozite de același tip ranforsate cu fibre de sticlă și au ajuns la concluzia conform datelor obținute (Tabelul 2.9) că proprietățile mecanice ale celor două tipuri de materiale sunt foarte asemănătoare. Din acest motiv biocompozitele pe bază de fibră de iută pot înlocui compozitele polimerice ranforsate cu fibre de sticlă.

Tabel 2.9 Proprietățile mecanice ale unor materiale compozite pe bază de PP ranforsate cu fibre scurte de iută respectiv fibre de sticlă, Khan M.N. [2012]

Material	Rezistența la tracțiune σ_t [MPa]	Modulul lui de elasticitate E [MPa]	Rezistența la încovoiere σ_i [MPa]	Modulul de elasticitate la încovoiere E_i [MPa]	Rezistența la impact a_{cu} [kJ/m²]
PP+Fibre de sticlă scurte-20%	31	790	36	1265	18.5
PP+Fibre scurte de iută-20%	32	850	38	1685	18

3. MODELE TEORETICE DE ESTIMARE A PROPRIETĂȚILOR MECANICE ALE MATERIALELOR BIOCOMPOZITE

Proprietățile mecanice ale unui material biocompozit pot fi prezise cu ajutorul modelelor micromecanice bazate pe proprietățile mecanice ale materialelor componente ale compozitului, pe geometria și fracțiunea de volum a elementelor de ranforsare. Toate modelele se bazează pe regula amestecului, fiecare dintre ele punând în evidență anumite particularități ale biocompozitului.

3.1. Regula amestecului – Rule of Mixture

Regula amestecului este cea mai simplă metodă teoretică de estimare a proprietăților materialelor compozite și se bazează pe ipoteza că deformația matricei este egală cu deformația fibrei în timpul solicitării materialului compozit în direcția fibrei, Virk A.S. [2010]. Se exprimă prin relația:

$$X = X_f \cdot V_f + X_m(1 - V_f), \quad (3.1)$$

unde X poate fi una din următoarele caracteristici: densitatea, modulul de elasticitate, modulul de forfecare, rezistența la tracțiune, rezistența la compresiune, forfecare.

3.2. Modelul micromecanic al lui Halpin-Tsai

Unul dintre cele mai importante modele micromecanice de predicție a modulelor de elasticitate longitudinal, transversal și al modulului de forfecare în materialele compozite este modelul lui Halpin-Tsai. Acest model se bazează pe modelul lui Hermans și Hill care a fost conceput pentru biocompozite ranforsate cu fibre lungi, continue. Halpin și Tsai au dezvoltat modelul pentru compozite cu fibre scurte unidireționale. Relațiile lui Halpin-Tsai sunt următoarele, (Lusti H.R. [2003], Maya J.J. [2008], Myungsoo K. [2009], Nilson T. [2006]):

$$\frac{P}{P_m} = \frac{1 + \xi \cdot \eta \cdot V_f}{1 - \eta \cdot V_f}, \quad (3.2)$$

unde P reprezintă unul dintre modulele compozitului descrise în tabelul 3.1, iar η are următoarea expresie:

$$\eta = \frac{\frac{P_f}{E_m} - 1}{\frac{P_f}{E_m} + \xi}, \quad (3.3)$$

Tab.3.1. Semnificația mărimilor din relațiile (3.2) și (3.3) Tucker C. [1999]

P	P _f	P _m	ξ	Comentariu
E ₁₁	E _f	E _m	2(l/d)	Modulul de elasticitate longitudinal
E ₂₂	E _f	E _m	2	Modulul de elasticitate transversal
G ₁₂	G _f	G _m	1	Modulul de forfecare longitudinal

unde $E_{f,m}$ reprezintă modulul de elasticitate al fibrei respectiv al matricei, $V_{f,m}$ este fracțiunea de volum a fibrei respectiv a matricei din compozit, ξ este un parametru care depinde de geometria fibrei, și este numit parametru de eficiență a ranforsării, l și d reprezintă lungimea respectiv diametrul fibrei. Variația lui ξ arată că dimensiunile elementelor de ranforsare influențează rigiditatea materialului. În cazul compozitelor ranforsate cu fibre scurte aliniate, ξ poate fi exprimat, Fereidoon A. [2008]:

$$\xi = 2 \cdot \frac{l}{d} + 40V_f^{10}, \quad (3.4)$$

În literatura de specialitate se întâlnesc o varietate de ecuații empirice pentru calculul lui ξ care depind de forma particulelor și de modulul de elasticitate care se dorește a fi prezis. Dacă se dorește estimarea modulului de elasticitate longitudinal și fibrele au forme rectangulare sau cilindrice, ξ se calculează folosind următoarele relații:

$$\xi = 2 \cdot \frac{l}{t} \text{ în cazul fibrelor de secțiune pătrată}$$

sau

$$\xi = 2 \cdot \frac{l}{d} \text{ în cazul fibrelor de secțiune circulară}$$

unde t și d reprezintă latura pătratului respectiv diametrul secțiunii fibrei Ku H. [2011]. Ku H. și alții [2011] recomandă pentru calculul modulului de elasticitate transversal E_2 , o valoare pentru $\xi = 0.5$.

3.3. Modelul micromecanic modificat al lui Halpin-Tsai

Nielsen a modificat ecuațiile lui Halpin-Tsai Virk A.S. [2010], Tucker C. [1999], Yunkai Lu. [2002] în scopul de a determina modulul de elasticitate și rezistența la tracțiune a compozitelor ranforsate cu fibre discontinue, dispuse aleator. El a introdus fracțiunea de volum maximă a ranforsării φ_{\max} pentru cazul în care fibrele sunt dispuse aleator în compozit.

$$E = E_m \left(\frac{1 + \xi \cdot \eta \cdot V_f}{1 - \eta \cdot \psi \cdot V_f} \right), \quad (3.5)$$

$$\sigma = \sigma_m \left(\frac{1 + \xi \cdot \eta^* \cdot V_f}{1 - \eta^* \cdot \psi \cdot V_f} \right), \quad (3.6)$$

cu

$$\eta^* = \frac{\frac{\sigma_f}{\sigma_m} - 1}{\frac{\sigma_f}{\sigma_m} + \xi}, \quad (3.7)$$

unde

$$\psi = 1 + \frac{1 - \varphi_{\max}}{\varphi_{\max}^2} \cdot V_f. \quad (3.8)$$

Valoarea lui φ_{\max} este 0.82

3.4. Modelul micromecanic al lui Cox

Cox utilizează factorul de eficiență al lungimii fibrei η_l în ecuația "regula-amestecului" pentru determinarea rigidității compozitelor ranforsate cu fibre scurte, și pentru a stabili influența lungimii fibrei asupra proprietăților mecanice ale biocompozitului. Atunci când un compozit ranforsat cu fibre scurte este sub o tensiune uniaxială, deplasările axiale din fibre și matrice vor fi diferite din cauza diferenței în proprietățile la tracțiune ale acestor două componente (O'Gara J.F.,2010). Acest lucru înseamnă că tensiunea interfacială dintre fibre și matrice este influențată de lungimea fibrei (Bos H,2004), (Reußmann T.,2003).

Modelul micromecanic folosit pentru a prezice modulul de elasticitate al compozitului este definit:

$$E = \eta_l \cdot E_f \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f), \quad (3.9)$$

cu

$$\eta_l = 1 - \frac{\tanh\left(\frac{\beta \cdot l}{2}\right)}{\frac{\beta \cdot l}{2}}, \quad (3.10)$$

și

$$\beta = \frac{1}{r} \cdot \sqrt{\frac{G_m}{E_f} \left(\frac{2}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \right)}, \quad (3.11)$$

unde r este raza fibrei, G_m este modulul la forfecare a matricei și R este distanța dintre centrele fibrelor conform lui Cox (Fig.3.1.a) sau jumătate din distanța dintre centrele a două fibre învecinate în cazul modelului de aranjare a fibrelor în matrice hexagonală (Fig.3.1.b) sau pătratică (Fig.3.1.c).

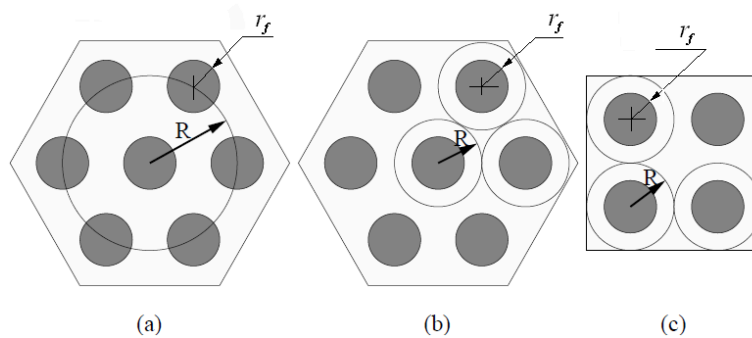


Fig.3.1. Modele de aranjare a fibrelor în matricea compozitului
a) modelul lui Cox, b) modelul hexagonal, c) modelul pătratic

Expresia lui R este:

$$R = r_f \cdot \sqrt{\frac{K_r}{V_f}}, \quad (3.12)$$

în care K_r este factorul de distribuție a fibrelor în matricea compozitului și are diferite expresii în funcție de aranjamentul fibrelor în compozit.

Pentru aranjamentul hexagonal al fibrelor după modelul lui Cox (Fig.3.1.a), (Kalaprasad G.[1997], Reußmann T. [2003]) expresia lui K_r este:

$$K_r = \frac{2\pi}{\sqrt{3}}, \quad (3.13)$$

Pentru aranjamentul hexagonal al fibrelor după modelul hexagonal (Fig.3.1.b), expresia lui K_r este:

$$K_r = 2\pi/2\sqrt{3}, \quad (3.14)$$

Pentru aranjamentul patric al fibrelor:

$$K_r = \pi/4, \quad (3.15)$$

Valoarea maximă a fracțiunii de volum a fibrelor în compozit este influențată de modul de aranjare a fibrelor în matrice și de orientarea acestora, (Pernevan M.S., Marșavina L., Sârghie C., Pernevan I. [2011]). Pentru a descrie o distribuție cu un grad mai mic de uniformitate a distribuției fibrelor în matrice, s-a propus un model de distribuție pătratic centrat (Fig.3.2).

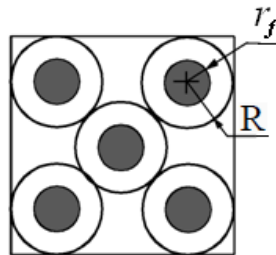


Fig.3.2. Modelul de aranjare a fibrelor în compozit pătratic centrat

În cazul acestei distribuții, din considerente geometrice similare cu cele pentru aranjamentele anterioare K_r va avea expresia:

$$K_r = \frac{5 \cdot \pi}{4 \cdot (1 + \sqrt{2})^2}, \quad (3.16)$$

Modulul la forfecare G_m al matricei se determină cunoscând modulul de elasticitate al matricei E_m și coeficientul lui Poisson pentru matrice ν_m cu relația:

$$G_m = \frac{E_m}{2 \cdot (1 + \nu)}, \quad (3.17)$$

Conform modelului lui Cox, rezistența la tracțiune a compozitului are expresia:

$$\sigma = \eta_{\parallel} \cdot \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m(1 - V_f). \quad (3.18)$$

În Tab. 3.2. sunt trecute expresiile și valorile coeficientului K_r pentru diferite moduri de dispunere a fibrelor în matricea materialului.

Tabelul 3.2. Expresiile și valorile coeficientului K_r pentru diferite modele de aranjare a fibrelor în matricea compozitului

Modelul	K_r (expresie analitică)	K_r (valoare)
Cox	$2\pi/\sqrt{3}$	3.627
Hexagonal	$2\pi/2 \cdot \sqrt{3}$	0.907
Pătratic	$\pi/4$	0.785
Pătratic centrat	$5\pi/4 \cdot (1 + \sqrt{2})^2$	0.674

3.5. Modelul micromecanic al lui Cox Krenkel

Teoria lui Cox a fost extinsă de către Krenkel care a adăugat factorul de orientare al fibrei în ecuația regulii amestecului:

$$E = \eta_0 \cdot \eta_l \cdot E_f \cdot V_f + E_m(1 - V_f), \quad (3.19)$$

unde η_0 este factorul de orientare al fibrei, Garkhail S.K. [2000]

$$\sigma = \eta_0 \cdot \eta_l \cdot \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m(1 - V_f). \quad (3.20)$$

Pentru dispunerea în plan a fibrelor $\eta_0=3/8$, iar pentru dispunerea spațială a fibrelor $\eta_0=1/5$.

3.6. Modelul micromecanic al lui Kelly și Tyson

Kelly și Tyson au extins modelul "regula-amestecului" dezvoltat de către Cox și Krenkel pentru predicția rezistenței la tracțiune și a rigidității compozitelor ranforsate cu fibre scurte (Bos H., 2004):

$$\sigma = \eta_0 \cdot \eta_{ls} \cdot \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m(1 - V_f), \quad (3.21)$$

$$E = \eta_0 \cdot \eta_{le} \cdot E_f \cdot V_f + \sigma_m(1 - V_f), \quad (3.22)$$

unde η_{ls} și η_{le} reprezintă factorul de eficiență al lungimii fibrei dezvoltat de către Kelly și Tyson pentru rezistența la tracțiune respectiv rigiditatea compozitului. Curtis, Bowyer și Bader (Kalaprasad G. [1997], Yunkai Lu. [2002]) au introdus factorul de eficiență al lungimii fibrei în ecuația regulii amestecului pentru compozite termoplastice ranforsate cu fibre scurte ca fiind o funcție de lungimea critică a fibrei. Lungimea critică a fibrei L_c , este lungimea fibrei corespunzătoare punctului la care deformația fibrei este egală cu deformația matricei.

$$L_c = \frac{\sigma_f \cdot r}{2\tau}, \quad (3.23)$$

unde τ reprezintă rezistența la forfecare dintre fibră și matrice care de obicei se determină experimental. Determinarea experimentală a lungimii critice a fibrei și a rezistenței la forfecare interfaciale este dificil de a se realiza. Presupunând că există o adeziune bună între fibre și matrice, $\tau = \tau_m$, în conformitate cu O'Gara J.F [2010], τ poate fi calculat în funcție de rezistența la tracțiune σ_m a matricei ca fiind: $\tau = \tau_m = \sigma_m / \sqrt{3}$

Pentru $l > L_c$:

$$\eta_{ls} = 1 - \frac{s_c}{2s}, \quad (3.24)$$

și, pentru $l < L_c$:

$$\eta_{ls} = \frac{s}{2s_c}, \quad (3.25)$$

Parametrul s este numit raportul de formă al fibrei, $s=l/d$ iar parametrul s_c este numit raportul critic de formă al fibrei, $s_c=l_c/d$:

$$\eta_{IE} = 1 - \frac{\tanh(\beta \cdot s)}{\beta \cdot s} \quad (3.26)$$

unde β are semnificația din relația (3.11).

3.7. Rezultatele calculelor teoretice

Pe baza modelelor micromecanice de calcul prezentate anterior s-au determinat pe cale analitică, proprietățile la tracțiune ale unor materiale compozite pe bază de polipropilenă (PP) cu sau fără agent de compatibilizare (AC) ranforsate cu deșeuri de fibre liberiene sub formă de: fibre scurte de in și cânepă (FSIC), puzderii măcinate de cânepă (PMC), sau puzderii de cânepă sub formă de praf fin (PCPF).

Materialele biocompozite analizate în cadrul acestui studiu sunt următoarele:

- biocompozit proba 1FP (57%PP+3%AC+40%FSIC)
- biocompozit proba 2FP (77%PP+3%AC+20%FSIC)
- biocompozit proba 1PP (57%PP+3%AC+40%PMC)
- biocompozit proba 2PP (77%PP+3%AC+20%PMC)
- biocompozit proba P2 (40% PPJ700+60% PCPF)
- biocompozit proba P3 (57% PP J 700+ 3% AC+ 40% PCPF)
- biocompozit proba P4 (77%PP J 700+ 3%AC + 20% PCPF)
- biocompozit 15%HDPE+75%PCPF+4%AC+4%pigmenți+2%aditivi omogenizare

Calcululele au constat în determinarea rezistenței la tracțiune și a modulului de elasticitate longitudinal cu ajutorul modelelor micromecanice luând în considerare cele patru moduri diferite de distribuție a elementelor de ranforsare în matrice: modelul pătrat centrat, modelul pătrat, modelul hexagonal și modelul lui Cox, exemplificate prin coeficientul K_r . Calculele s-au efectuat, de asemenea, pentru fiecare model micromecanic în parte, luând în considerare proprietățile mecanice la tracțiune ale polipropilenei, ale elementelor de ranforsare, precum și dimensiunile lor (d_f -diametrul fibrei, l_f -lungimea fibrei). Calculele s-au efectuat cu ajutorul programului Mathcad.

Deoarece deșeurile de plante liberiene au un conținut ridicat de lignină în comparație cu fibrele extrase, reprezentând partea lemnoasă a tulpinilor acestor plante (Pernevan M.S, Marșavina L, Radu D, Popa M, Sirghie C. [2013], Thygesen A.

[2006]), calculele s-au efectuat pentru două valori ale modului de elasticitate longitudinal al fibrei: $E_f=3 \cdot 10^4$ MPa (corespunzător fibrelor de in și cânepă) și $E_f=2 \cdot 10^4$ MPa (corespunzător lemnului) Bank L.K. [2003]. Pentru coeficientul lui Poisson ν al compozitului s-a luat $\nu=0.35$.

Modelele micromecanice ale lui Kelly Tyson și Cox Krenkel presupun că aranjamentul fibrelor în matrice este ordonat, după un anumit model geometric, iar în modelul lui Halpin Tsai se consideră că dispunerea este aleatoare, calculele pentru modelele Kelly Tyson și Cox Krenkel s-au trecut în tabele separat față de cele după modelul Halpin Tsai.

Rezultatele calculelor teoretice pentru estimarea proprietăților mecanice ale biocompozitelor cu modelele micromecanice ale lui Kelly Tyson și Cox Krenkel sunt trecute în tabele 3.3, 3.4, 3.5 și 3.6, iar cele cu modelul lui Halpin Tsai modificat în tabele 3.7, 3.8, 3.9 și 3.10.

Tabelul 3.3. Rezultatele teoretice a proprietăților mecanice la tracțiune obținute prin relațiile de calcul ale lui Kelly Tyson și Cox Krenkel pentru biocompozitul pe bază de PP ranforsat cu fibre scurte in și cânepă (probele 1FP și 2FP), $l_f=3$ mm, $d_f=0.2$ mm.

Biocompozit proba	Frațiunea de volum a fibrei V_f	Rezistența la tracțiune fibră σ_f [MPa]	Rezistența la tracțiune matrice σ_m [MPa]	Modul de elasticitate longitudinal fibră E_f [MPa]	Modul de elasticitate longitudinal matrice E_m [MPa]	K_f	Valori teoretice pentru compozit Kelly Tyson		Valori teoretice pentru compozit Cox Krenkel	
							Rezistența la tracțiune $\sigma_{t \max}$ [Mpa]	Rezistența la tracțiune $\sigma_{t \max}$ [Mpa] Modul de elasticitate longitudinal E [MPa]	Rezistența la tracțiune $\sigma_{t \max}$ [Mpa]	Modul de elasticitate longitudinal E [MPa]
2FP	0.2	$6 \cdot 10^4$	28.6	$3 \cdot 10^4 / 2 \cdot 10^4$	1368.5	0.674	32.79	1956/ 1710	40.11/ 41.34	1956/ 1710
						0.785		1936/ 1699	39.7/ 41.01	1936/ 1699
						0.907		1918/ 1689	39.34/ 40.71	1918/ 1689
						3.628		1782/ 1612	36.61/ 38.39	1782/ 1612
1FP	0.4	$6 \cdot 10^4$	28.6	$3 \cdot 10^4 / 2 \cdot 10^4$	1368.5	0.674	36.9	2777/ 2179	56.27/ 57.9	2777/ 2179
						0.785		2716/ 2146	55.05/ 56.91	2716/ 2146
						0.907		2664/ 2118	54.03/ 56.07	2664/ 2118
						3.628		2317/ 1925	47.07/ 50.28	2317/ 1925

Tabelul 3.4. Rezultatele teoretice a proprietăților mecanice la tracțiune obținute prin relațiile de calcul ale lui Kelly Tyson și Cox Krenkel pentru biocompozitul pe bază de PP ranforsat cu puzderii măcinată de cânepă (probele 1PP și 2PP), $l_f=1\text{mm}$, $d_f=0.18\text{mm}$

Biocompozit proba	Frațiunea de volum a fibrei V_f	Rezistența la tracțiune fibră σ_f [MPa]	Rezistența la tracțiune matrice σ_m [MPa]	Modul de elasticitate longitudinal fibră E_f [MPa]	Modul de elasticitate longitudinal matrice E_m [MPa]	K_r	Valori teoretice pentru compozit Kelly Tyson		Valori teoretice pentru compozit Cox Krenkel	
							Rezistența la tracțiune $\sigma_{t \max}$ [Mpa]	Rezistența la tracțiune $\sigma_{t \max}$ [Mpa] Modul de elasticitate longitudinal E [MPa]	Rezistența la tracțiune $\sigma_{t \max}$ [Mpa]	Modul de elasticitate longitudinal E [MPa]
2PP	0.2	$6 \cdot 10^4$	28.6	$3 \cdot 10^4 / 2 \cdot 10^4$	1368.5	0.674	26.55	1503/ 1435	31.05/ 33.09	1503/ 1435
						0.785		1475/ 1415	30.48/ 32.48	1475/ 1415
						0.907		1451/ 1398	30.01/ 31.98	1451/ 1398
						3.628		1318/ 1296	27.35/ 28.92	1318/ 1296
1PP	0.4	$6 \cdot 10^4$	28.6	$3 \cdot 10^4 / 2 \cdot 10^4$	1368.5	0.674	24.5	2064/ 1777	42.02/ 45.85	2064/ 1777
						0.785		1935/ 1698	39.44/ 43.47	1935/ 1698
						0.907		1836/ 1635	37.46/ 41.57	1836/ 1635
						3.628		1371/ 1305	28.15/ 31.68	1371/ 1305

Tabelul 3.5. Rezultatele teoretice a proprietăților mecanice la tracțiune obținute prin relațiile de calcul ale lui Kelly Tyson și Cox Krenkel pentru biocompozit pe bază de PP ranforsat cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin (probele P2, P3 și P4), $l_f=0.015\text{mm}$, $d_f=0.005\text{mm}$.

Biocompozit proba	Fracțiunea de volum a fibrei V_f	Rezistența la tracțiune fibră σ_f [MPa]	Rezistența la tracțiune matrice σ_m [MPa]	Modul de elasticitate longitudinal fibră E_f [MPa]	Modul de elasticitate longitudinal matrice E_m [MPa]	K_r	Valori teoretice pentru compozit Kelly Tyson		Valori teoretice pentru compozit Cox Krenkel	
							Rezistența la tracțiune $\sigma_{t,max}$ [Mpa]	Rezistența la tracțiune $\sigma_{t,max}$ [Mpa] Modul de elasticitate longitudinal E [MPa]	Rezistența la tracțiune $\sigma_{t,max}$ [Mpa]	Modul de elasticitate longitudinal E [MPa]
P4	0.2	$6 \cdot 10^2$	28.6	$3 \cdot 10^4 / 2 \cdot 10^4$	1368.5	0.674	24.86	1282/ 1169	26.22/ 27.5	1262/ 1249
						0.785		1246/ 1235	25.9/ 27.1	1246/ 1235
						0.907		1233/ 1226	25.65/ 26.77	1233/ 1225
						3.628		1172/ 1169	24.43/ 25.12	1172/ 1169
P3	0.4	$6 \cdot 10^2$	28.6	$3 \cdot 10^4 / 2 \cdot 10^4$	1368.5	0.674	21.12	1458/ 1372	29.9/ 33.68	1458/ 1372
						0.785		1352/ 1290	27.78/ 31.24	1352/ 1290
						0.907		1280/ 1233	26.33/ 29.51	1280/ 1233
						3.628		1020/ 1010	26.22/ 27.5	1262/ 1249
P2	0.6	$6 \cdot 10^2$	28.6	$3 \cdot 10^4 / 2 \cdot 10^4$	1368.5	0.674	17.38	2605/ 2097	52.6/ 57.92	2605/ 2097
						0.785		1979/ 1709	40.08/ 46.28	1979/ 1709
						0.907		1662/ 1490	33.73/ 39.71	1662/ 1490
						3.628		904.8/ 884.7	18.59/ 21.56	904.8/ 884.7

Tabelul 3.6. Rezultatele teoretice a proprietăților mecanice la tracțiune obținute prin relațiile de calcul ale lui Kelly Tyson pentru biocompozitul cu 75% puzderii de cânepă sub formă de praf fin ;15% măcinatură de HDPE;4% agent de cuplare antidhrida maleică; 4% pigmenti; 2% aditivi de omogenizare-lubrefiere $l_f=0.015\text{mm}$, $d_f=0.005\text{mm}$

Biocompozit proba	Frațiunea de volum a fibrei V_f	Rezistența la tracțiune fibră σ_f [MPa]	Rezistența la tracțiune matrice σ_m [MPa]	Modul de elasticitate longitudinal fibră E_f [MPa]	Modul de elasticitate longitudinal matrice E_m [MPa]	K_r	Valori teoretice pentru compozit Kelly Tyson		Valori teoretice pentru compozit Cox Krenkel	
							Rezistența la tracțiune $\sigma_{t \max}$ [Mpa]	Modul de elasticitate longitudinal E [MPa]	Rezistența la tracțiune $\sigma_{t \max}$ [Mpa]	Modul de elasticitate longitudinal E [MPa]
75% PCPF+ 15% HDPE+ 10%AC	0.75	$6 \cdot 10^2$	31	$3 \cdot 10^4 /$ $2 \cdot 10^4$	1260	0.674	15.8	7062/ 3691	142/ 109	7062/ 3691
						0.785		3533/ 2616	72.11/ 76.79	3533/ 2616
						0.907		2357/ 1930	48.6/ 56.20	2357/ 1930
						3.628		781/ 754	17.08/ 20.93	781/ 754

Tabelul 3.7. Rezultatele teoretice a proprietăților mecanice la tracțiune obținute prin relațiile de calcul ale lui Halpin Tsai modificat pentru biocompozitul pe bază de PP ranforsat cu fibre scurte în și cânepă (probele 1FP și 2FP), $l_f=3\text{mm}$, $d_f=0.2\text{mm}$.

Biocompozit proba	Frațiunea de volum a fibrei V_f	Rezistența la tracțiune fibră σ_f [MPa]	Rezistența la tracțiune matrice σ_m [MPa]	Modul de elasticitate longitudinal fibră E_f [MPa]	Modul de elasticitate longitudinal matrice E_m [MPa]	Valori teoretice		
						Halpin Tsai modificat		Halpin Tsai nemodificat
						Rezistența la tracțiune $\sigma_{t, \max}$ [Mpa]	Modulul de elasticitate longitudinal E [MPa]	Modulul de elasticitate longitudinal E [MPa]
2FP	0.2	$6 \cdot 10^2$	28.6	$3 \cdot 10^4 /$ $2 \cdot 10^4$	1368.5	104	5111/ 4140	11380/ 11080
1FP	0.4	$6 \cdot 10^2$	28.6	$3 \cdot 10^4 /$ $2 \cdot 10^4$	1368.5	193	9720/ 7377	27560/ 26570

Tabelul 3.8. Rezultatele teoretice a proprietăților mecanice la tracțiune obținute prin relațiile de calcul ale lui Halpin Tsai modificat pentru biocompozitul pe bază de PP ranforsat cu puzderii măcinate de cânepă (probele 1PP și 2PP), $l_f=1\text{mm}$, $d_f=0.18\text{mm}$

Biocompozit proba	Frațiunea de volum a fibrei V_f	Rezistența la tracțiune fibră σ_f [MPa]	Rezistența la tracțiune matrice σ_m [MPa]	Modul de elasticitate longitudinal fibră E_f [MPa]	Modul de elasticitate longitudinal matrice E_m [MPa]	Valori teoretice pentru compozit		
						Halpin Tsai modificat		Halpin Tsai nemodificat
						Rezistența la tracțiune $\sigma_{t, \max}$ [Mpa]	Modulul de elasticitate longitudinal E [MPa]	Modulul de elasticitate longitudinal E [MPa]
2PP	0.2	$6 \cdot 10^2$	28.6	$3 \cdot 10^4 /$ $2 \cdot 10^4$	1368.5	77.8	3802/ 3352	5278 /5164
1PP	0.4	$6 \cdot 10^2$	28.6	$3 \cdot 10^4 /$ $2 \cdot 10^4$	1368.5	143	7256/ 5991	11600/ 11210

Tabelul 3.9. Rezultatele teoretice a proprietăților mecanice la tracțiune obținute prin relațiile de calcul ale lui Halpin Tsai modificat pentru biocompozitul pe bază de PP ranforsat cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin (probele P2, P3 și P4), $l_f=0.015\text{mm}$, $d_f=0.005\text{mm}$

Biocompozit proba	Frațiunea de volum a fibrei V_f	Rezistența la tracțiune fibră σ_f [MPa]	Rezistența la tracțiune matrice σ_m [MPa]	Modul de elasticitate longitudinal fibră E_f [MPa]	Modul de elasticitate longitudinal matrice E_m [MPa]	Valori teoretice pentru compozit		
						Halpin Tsai modificat		Halpin Tsai nemodificat
						Rezistența la tracțiune $\sigma_{t,max}$ [Mpa]	Modul de elasticitate longitudinal E [MPa]	Modul de elasticitate longitudinal E [MPa]
P4	0.2	$6 \cdot 10^2$	28.6	$3 \cdot 10^4 /$ $2 \cdot 10^4$	1368.5	63.41	3086/ 2850	3628/ 3562
P3	0.4	$6 \cdot 10^2$	28.6	$3 \cdot 10^4 /$ $2 \cdot 10^4$	1368.5	113	5731/ 5000	7284/ 7058
P2	0.6	$6 \cdot 10^2$	28.6	$3 \cdot 10^4 /$ $2 \cdot 10^4$	1368.5	188	10580/ 8558	14200/ 13510

Tabelul 3.10. Rezultatele teoretice a proprietăților mecanice la tracțiune obținute prin relațiile de calcul ale lui Halpin Tsai modificat pentru biocompozitul cu 75% puzderii de cânepă sub formă de praf fin ;15% măcinatură de HDPE;4% agent de cuplare antidhrida maleică; 4% pigment; 2% aditivi de omogenizare-lubrefiere $l_f=0.015\text{mm}$, $d_f=0.005\text{mm}$

Biocompozit	Frațiunea de volum a fibrei V_f	Rezistența la tracțiune fibră σ_f [MPa]	Rezistența la tracțiune matrice σ_m [MPa]	Modul de elasticitate longitudinal fibră E_f [MPa]	Modul de elasticitate longitudinal matrice E_m [MPa]	Valori teoretice pentru compozit		
						Halpin Tsai modificat		Halpin Tsai nemodificat
						Rezistența la tracțiune σ [Mpa]	Modul de elasticitate longitudinal E [MPa]	Modul de elasticitate longitudinal E [MPa]
75%PCPF+ 15%HDPE+ 10%AC	0.75	$6 \cdot 10^2$	31	$3 \cdot 10^4 /$ $2 \cdot 10^4$	1260	288	18010/ 13200	23770/ 22110

Concluzii

Se constată că atât pentru rezistența la tracțiune cât și pentru modulul de elasticitate longitudinal valorile de calcul obținute cu modelele Kelly Tyson și Cox Krenkel sunt mai apropiate între ele și diferă mult de cele obținute cu modelul Halpin Tsai. Diferențele apar din faptul că modelele Kelly Tyson și Cox Krenkel țin cont de mai multe elemente care determină proprietățile intrinseci ale compozitului cum ar fi interfața fibră- matrice, geometria fibrelor și a dispunerii acestora în compozit.

4. DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A PROPRIETĂȚILOR MECANICE ALE UNOR MATERIALE BIOCUMPOZITE NOI PE BAZĂ DE MATRICE POLIMERICE RANFORSATE CU DEȘURI DE FIBRE LIBERIENE

4.1. Descrierea biocompozitelor studiate

4.1.1 Materiale biocompozite pe bază de rășini termorigide ranforsate cu deșuri lignocelulozice de in și cânepă

Materialele biocompozite pe bază de rășini polimerice analizate au fost de trei categorii: (i) materiale biocompozite termorigide 100% naturale pe bază de rășini furanice; (ii) materiale biocompozite termorigide cu matricea din rășini ureo-formaldehidice și deșuri lignocelulozice din in și cânepă; (iii) materiale biocompozite termorigide cu matricea din rășini melamino-formaldehidice și umplutură din puzderii de cânepă

Materiale biocompozite termorigide 100% naturale pe bază de biorășini furanice

Elemente de ranforsare - sunt deșeurile lignocelulozice rezultate la prelucrarea plantelor de in și cânepă, care se prezintă sub formă de :

a.) amestecuri de fibre scurte de in și cânepă (deșuri fibroase). Pentru a putea fi folosite la obținerea biocompozitelor, deșeurile fibroase sunt supuse unui proces de mărunțire și uniformizare la lungimi între 3 și 5mm și grosimi < 0,5 mm.

b.) puzderii de cânepă măcinate rezultate în procesul de obținere a fuiorului de cânepă, care au fost măcinate obținându-se următoarele dimensiuni: lungimi < 3mm și grosimi < 0.5mm.

Matricea materialului- s-au utilizat rășini furanice Biorez 031201S-1B-XXXII. Rășinile furanice au fost obținute din deșuri lemnoase pentru a realiza compozite 100 % naturale. Ca elemente de legătură dintre matrice și fibre (puzderii), s-a utilizat lignina din paie (100-SA), lignina din in obținută din deșuri de in de la UTI Iași și o lignină-Pb2000 sub formă de praf de culoare maro cu caracteristici termoadezive și temperatură coborâtă de înmuiere care permite coborârea temperaturii de polimerizare (termosetare), protejând astfel componenta lemnoasă din compozit.

Tehnologia de prelucrare

Metoda de obținere a compozitelor cuprinde următoarele faze:

(i) pentru realizarea semifabricatelor sub formă de granule: amestecarea componentelor, uscarea, prepolimerizarea, și măcinarea materialului prepolimer obținut, rezultând granulele prepolimerice

(ii) pentru realizarea produsului finit: termopresarea granulelor prepolimerice în matrită

Metoda este prezentată schematic în figura 4.1, iar aspectul morfologic al biocompozitului (prepolimer) rezultat sub formă de granule după măcinare este dat în Fig. 4.2.

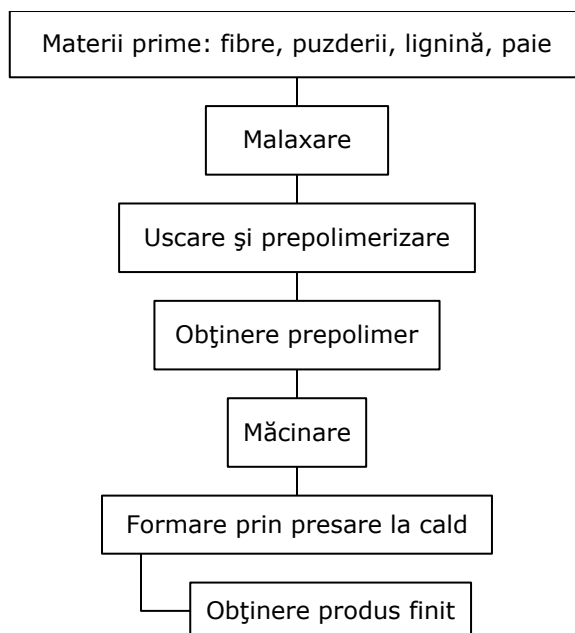


Fig.4.1.Schema de realizare a compozitelor pe bază de polimeri termoreactivi



Fig.4.2. Granule prepolimerice din biocompozit 100% natural pe bază de biorășini termoreactive ranforsate cu puzderii măcinate de cânepă

Compozițiile materialului

Proba 1	40%RF+40%puzderii măcinate de cânepă+20%Lignina din paie
Proba 2	40%RF+40%puzderii măcinate de cânepă+20%Lignina din in
Proba 3	40%RF + 40%fibre scurte in și cânepă + 20%Lignina din paie
Proba1RF	45%RF + 40%puzderii măcinate de cânepă + 15%Lignina din paie
Proba 2RF	45%RF+40%puzderii măcinate de cânepă +15%Lignina Pb2000
Proba 3RF	45%RF+40%fibre scurte in și cânepă + 15%Lignina din paie
Proba 4RF.	45%RF+40%fibre scurte in și cânepă + 15%Lignina Pb 2000.

Aceste biocompozite pot fi prelucrate prin tehnica presării la cald în piese pentru industria electrotehnică, înlocuind fenoplastele (bachelita).

Materiale biocompozite termorigide cu matricea din rășini ureo-formaldehidice și deșeuri lignocelulozice din in și cânepă

Elemente de ranforsare folosite: fibre scurte de in și cânepă cu lungimi între 3-5mm și grosimi <0,5mm sau puzderii măcinate de cânepă cu lungimi < 3mm și grosimi < 0,5mm

Matricea utilizată: Rășină ureo-formaldehidică Urelit R de la VIROMET Victoria; se mai utilizează un întăritor IR pentru inițierea reacției de polimerizare format din: clorură de amoniu și hexametilen tetraamină;

Tehnologia de prelucrare:

(i) pentru realizarea semifabricatelor sub formă de granule: se dizolvă întăritorul în apă, apoi se introduce în rășină și se omogenizează, după care se amestecă cu fibrele scurte de in și cânepă respectiv cu puzderiile de cânepă. Urmează apoi amestecarea componentelor, uscarea, prepolimerizarea, și măcinarea materialului prepolimer obținut, rezultând granulele prepolimerice.

(ii) pentru realizarea produsului finit: termopresarea granulelor prepolimerice în matrice

În figura 4.3 sunt prezentate rondele din biocompozite pe bază de rășini formaldehidice și urelit ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă obținute prin termopresare.

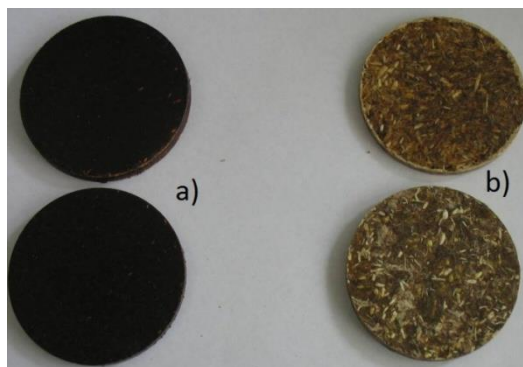


Fig.4.3. Plăcuțe din biocompozite din rășini furanice (probele a) respectiv urelit (probele b), ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă

Compozițiile materialelor

Proba1UF	51%Urelit+puzderii măcinate de cânepă46%+ 3% (apă+ întăritor)
Proba2UF	48%Urelit+puzderii măcinate de cânepă44%+8% (apă+ întăritor)
Proba3UF	51%Urelit+fibre scurte de in și cânepă 46%+3% (apă+întăritor)
Proba4UF	48%Urelit+fibre scurte de in și cânepă 44%+8% (apă +întăritor)

Materiale biocompozite termorigide cu matricea din rășini melamino-formaldehidice și umplutură din puzderii de cânepă (Proba I.A și I.B)

Rășinile melamino-formaldehidice sunt utilizate în mod curent la obținerea de plăci cu umpluturi lemnoase cu rezistența ridicată la umiditate, tip PAL, MDF, etc, pentru industria mobilei sau în construcții. Cercetările au urmărit realizarea de compozite pe bază de puzderii de cânepă măcinate, rășini melamino-formaldehidice și aditivi din care să se poată obține prin presare la cald plăci tip PAL sau MDF. Noutatea cercetărilor o reprezintă utilizarea puzderiilor de cânepă la obținerea biocompozitelor cu rășini melamino-formaldehidice în scopul valorificării superioare a deșeurilor rezultate la prelucrarea plantelor tehnice.

Elemente de ranforsare folosite: puzderii de cânepă sub formă de:

(I) Puzderii de cânepă nemăcinate cu dimensiunile: lungimea de 3-20 mm și diametrul de 2-3mm (proba I.B.1)

(II) Puzderii de cânepă măcinate: lungime particulă=0.5-3mm, diametru particulă=0.5-1mm (proba I.B.2)

(III) Praf grosier de puzderii cu următoarele dimensiuni: lungimea de 0.5-1mm și grosimea de 0.3-0.5mm (proba I.A.1)

(IV). Praf fin de puzderii cu următoarele dimensiuni: lungimea de 0.1-0.2mm și grosimea de 0.05-0.2mm (proba I.A.2)

Matricea utilizată: Rășina melamino- formaldehidică tip KRONOCOL SM10 și un întăritor KRONOCOL CH1-clorură de amoniu, pudră albă solubilă în apă. Acesta are rolul de a iniția procesul de polimerizare al rășinii în procesul de termopresare a compozitului.

Tehnologia de prelucrare

Metoda de obținere a compozitelor cuprinde următoarele faze:

(i) pentru realizarea semifabricatelor sub formă de granule: amestecarea componentelor, uscarea, prepolimerizarea, și măcinarea materialului prepolimer obținut, rezultând granulele prepolimerice

(ii) pentru realizarea produsului finit: termopresarea granulelor prepolimerice în matrită

Schema tehnologică de principiu pentru realizarea compozitelor cu rășini melamino-formaldehidice la faza de laborator este prezentată în figura 4.4

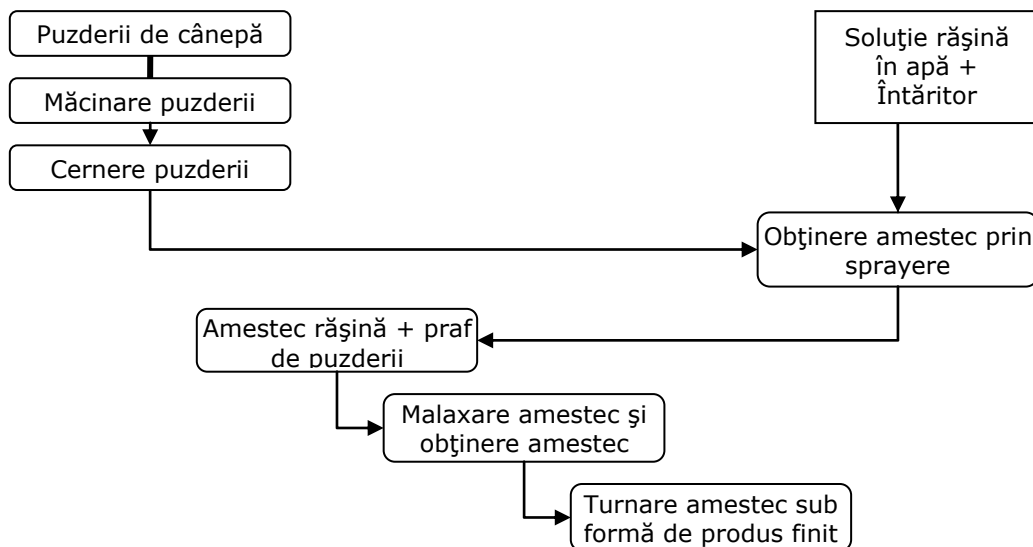


Fig.4.4. Schema tehnologică de principiu pentru realizarea biocompozitelor pe bază de rășini melamino-formaldehidice și puzderii de cânepă la faza de laborator

Compoziția materialelor

Proba I.A - 83% puzderii de cânepă(I.A.1- praf grosier,I.A.2 -praf fin), 17% rășini melamino formaldehidice

Proba I.B - 87%puzderii de cânepă(I.B.1- nemăcinate, I.B.2-măcinate), 13% rășini melamino-formaldehidice

Biocompozite pe bază de rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu 83% puzderii de cânepă (Probele I.A.1 si I.A.2)

Dimensiunile puzderiilor:

(i) *praf grosier*: lungime particulă=0.5-1mm, diametru particulă=0.3-0.5mm

(ii)*praf fin*: lungime particulă=0.1-0.2mm, diametru particulă=0.05-0.2mm

S-au obținut astfel două tipuri de materiale biocompozite pe bază de rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu 83% puzderii de cânepă:

-materiale proba I.A.1 ranforsate cu praf grosier de puzderii

-materiale proba I.A.2 ranforsate cu praf fin de puzderii

Biocompozitul din plăcuțe, după termopresare are urmatoarea compoziție: 83% praf de puzderii fin sau grosier, si 17% rășină. Plăcuțele din praf de puzderii de cânepă fin sau grosier obținute din biocompozitele pe bază de rășini melamino-formaldehidice sunt prezentate în figura 4.5.

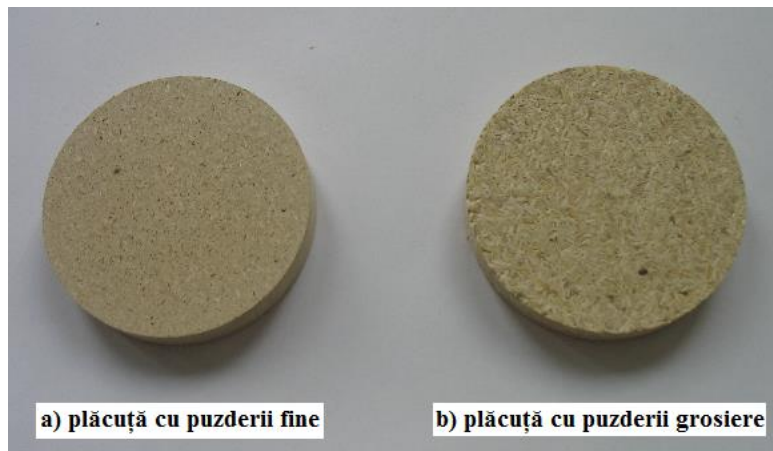


Fig. 4.5. Plăcuțe din biocompozite pe bază de rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu 83% puzderii de cânepă

Biocompozitul pe bază de rășini melamino-formaldehidice ranforsat cu 83% puzderii de cânepă în stare măcinată sub formă de granule este prezentat în figura 4.6.



Fig.4.6. Amestec compozit cu puzderii de cânepă și rășină melamino-formaldehidică

Materiale biocompozite termorigide cu matricea din rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu 87% puzderii de cânepă (Probele I.B.1 și I.B.2)

Dimensiunile puzderiilor:

(i) *puzderii nemăcinate:* lungime particulă 3-20mm, diametru 2-3mm

(ii) *puzderii măcinate:* lungime particulă=0.5-3mm, diametru particulă=0.5-1mm

S-au obținut astfel două tipuri de materiale biocompozite pe bază de rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu 87% puzderii de cânepă:

-materiale proba I.B.1 ranforsate cu puzderii nemăcinate

-materiale proba I.B.2 ranforsate cu puzderii măcinate

Materialele biocompozite formate din 87% puzderii de cânepă și 13% rășini melamino-formaldehidice, au fost reproduse la scară lărgită prin experimentări realizate la SC ICECON SA Bucuresti. S-au executat două variante de plăci tip PAL (figura 4.7) cu dimensiunile de 500x500x5mm cu puzderii nemăcinate (proba 1) și cu puzderii măcinate (proba 2) astfel încât să fie acoperite mai multe domenii de utilizare, ca de exemplu: în construcții pentru realizarea de panouri pentru placare pereți interiori, de finisaj, pentru fețe de uși interioare în medii cu aceeași temperatură și umiditate sau cu umiditate diferită ; în construcția de mobilier.



Fig. 4.7. Plăci biocompozite cu 87% puzderii de cânepă nemăcinate (proba B 1) și 87% puzderii măcinate (proba B2) pe bază de rășini melamino-formaldehidice(13%)

4.1.2 Materiale biocompozite pe bază de rășini termoplastice ranforsate cu deșeurii lignocelulozice de in și cânepă

Materialele biocompozite pe bază de rășini termoplastice analizate au fost de trei categorii: (i) materiale biocompozite termoplastice cu matricea din polipropilena și umplutură din deșeurii lignocelulozice de in și cânepă; (ii) materiale biocompozite termoplastice cu matricea din LDPE ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin; (iii) materiale biocompozite termoplastice cu matricea din HDPE ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin.

Materiale biocompozite termoplastice cu matricea din polipropilena și umplutura din deșeurii lignocelulozice de in și cânepă

Biocompozite cu matricea din polipropilenă (PP), agent de compatibilizare (AC) și umplutură din deșeurii rezultate din prelucrarea plantelor de in și cânepă sub formă de fibre scurte de in și cânepă (FSIC) respectiv puzderii măcinate de cânepă (PMC) - Probele 1FP, 1PP, 2FP, 2PP

Materii prime utilizate:

Elemente de ranforsare: sunt deșeurile rezultate la prelucrarea plantelor de in și cânepă, care se prezintă sub formă de :

(i) amestecuri de fibre scurte de in și cânepă (deșeuri fibroase). Pentru a putea fi folosite la obținerea biocompozitelor, deșeurile fibroase sunt supuse unui proces de mărunțire și uniformizare la lungimi între 3 și 5mm și grosimi < 0,5 mm.(materialele 1FP și 2FP)

(ii) puzderii de cânepă rezultate în procesul de obținere a fuiorului de cânepă, care au fost măcinate obținându-se următoarele dimensiuni: lungimi < 3mm și grosimi < 0.5mm (puzderii măcinate- materialele 1PP și 2PP).

Materiale utilizate ca matrice - s-a utilizat ca rășină polipropilenă tip J700 de la Petromidia, , iar ca agent de compatibilizare Licocene PP-MA 6452 - copolimer polipropilenă-anhidridă maleică

Tehnologia de prelucrare pentru materialul biocompozit cu matricea din polipropilenă, agent de compatibilizare și umplutură din deșeuri rezultate din prelucrarea plantelor de in și cânepă sub formă de fibre scurte de in și cânepă (materialele 1FP și 2FP) și puzderii măcinate de cânepă (materialele 1PP și 2PP)

Cele trei componente (PP, fibre (puzderii) și compatibilizatorul) au fost amestecate într-un mixer Brabender. Epruvetele pentru încercările mecanice au fost obținute prin presare.

Compoziții ale materialului

Proba 1PP.: -PP J 700-57%, -Puzderii măcinate de cânepa 40%, -Licocene PP-MA-3%

Proba 1FP.: -PP J700 -57%; -Fibră scurtă din deșeu de in și cânepă -40%; -Licocene PP-MA-3%

Proba 2PP.: -PP J700-77%; -Puzderii măcinate de cânepă 20%;-Licocene PP-MA-3%;

Proba 2FP.: -PP J700 -77%;-Fibră scurtă din deșeu de in și cânepă -20%;-Licocene PP-MA-3%

Aspectul microscopic al biocompozitelor pe bază de PP ranforsate cu puzderii măcinate de cânepă respectiv fibre scurte de in și cânepă rezultat în urma analizei cu microscopul optic tip Motic este dat în figurile 4.8, 4.9 și 4.10.

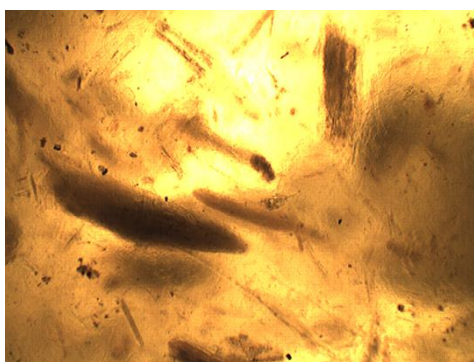


Fig.4.8 Aspectul microscopic al biocompozitului de la proba 2PP

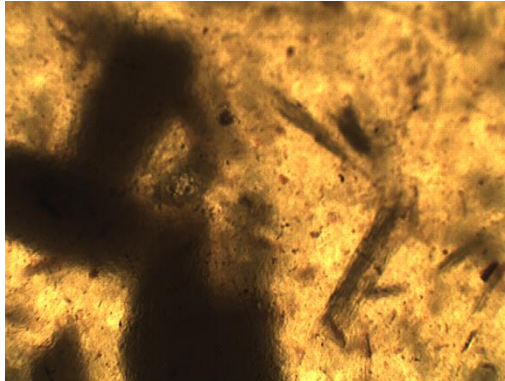


Fig.4.9 Aspectul microscopic al biocompozitului de la proba 1FP

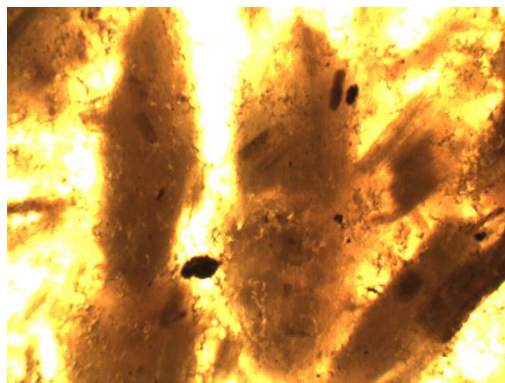


Fig.4.10 Aspectul microscopic al biocompozitului de la proba 1PP

Se constată că în cadrul aceluiași material biocompozit, atât puzderiile de cânepă (probele 1PP și 2PP) cât și fibrele scurte de in și cânepă (proba 1FP) au forme neregulate și dimensiuni diferite.

Biocompozitul cu matricea din polipropilenă și umplutură din praf fin de puzderii de cânepă (Probele 1,2,3,4)

Materii prime utilizate:

Elemente de ranforsare

–praf de puzderii de cânepă rezultate în procesul de obținere a fuiorului de cânepă. Puzderiile au fost măcinate într-o primă fază la lungimi de 3 mm și grosimi sub 0,5 mm după care au fost supuse ulterior unui nou proces de măcinare obținându-se puzderii sub formă de praf fin (figura 4.11) cu următoarele dimensiuni medii: lungime =13-15 μm ; latimea =5-9.3 μm

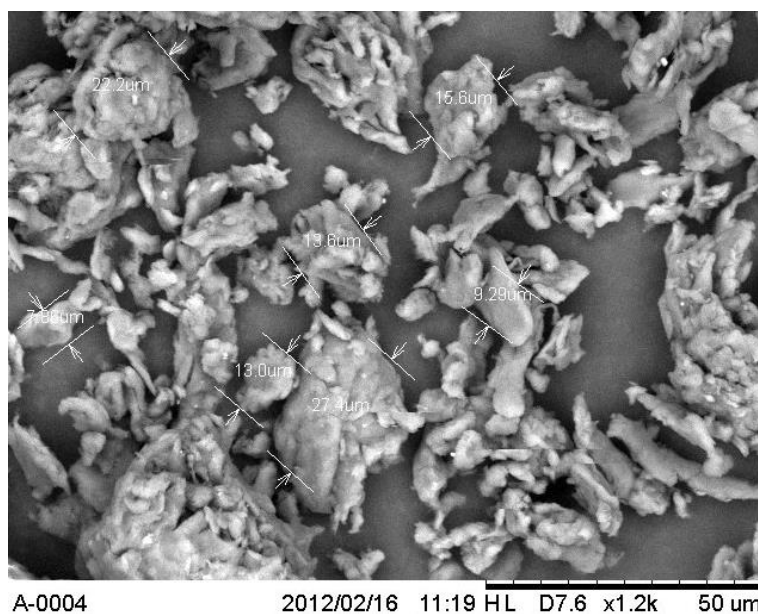


Fig.4.11. Aspectul microscopic al prafului fin din puzderii cânepă

Materiale utilizate ca matrice

(i) S-a utilizat ca rășină polipropilenă tip J700 de la Petromidia, , iar ca agent de compatibilizare Licocene PP-MA 6452 - copolimer polipropilenă-anhidridă maleică (Propylene-Maleic Anhydride Graft Copolymer);

(ii) Agent de compatibilizare (PP-g-MA) între polipropilenă și fibrele naturale - un copolimer Licocene PP MA 6452 fine grain.

Tehnologia de prelucrare pentru materialele biocompozite pe bază de PP ranforsate cu praf fin de puzderii de cânepă (materialul II.B)

Cele trei componente: granule de PP, praful de puzderii și granule de compatibilizator Licocene PP-MA au fost amestecate într-un mixer Brabender 30 ETH Compozitul se scoate sub formă de topitură, se așează pe o placă metalică pentru răcire. În stare plastică se toarnă în matricele de obținere a epruvetelor. Epruvetele pentru încercările mecanice au fost obținute prin presare, Schema procesului tehnologic de obținere a granulelor de biocompozit cu matricea formată din 37%PP, 3% agent de compatibilizare și 60% puzderii măcinate sub formă de praf fin rezultate în urma prelucrării cânepii este prezentată în figura 4.12

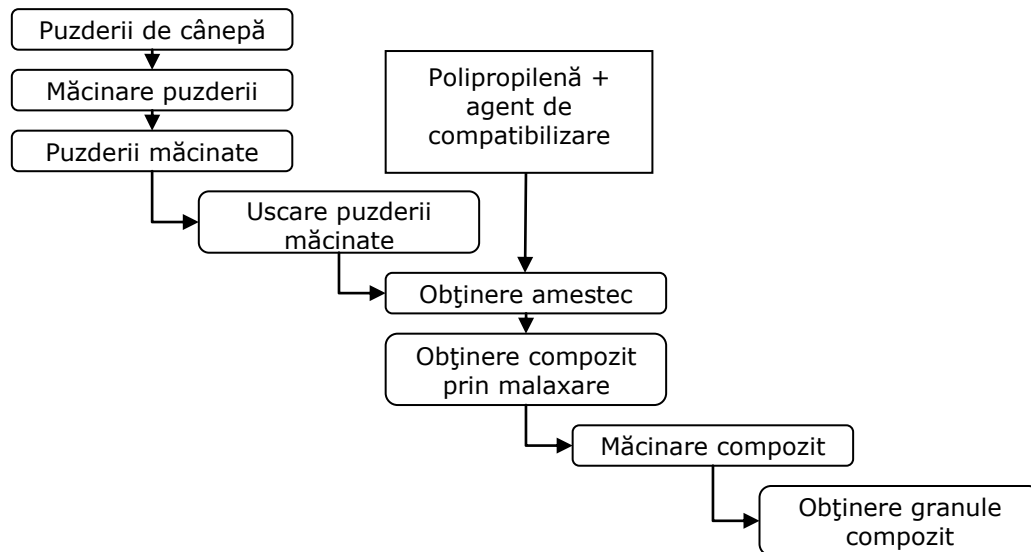


Fig. 4.12. Schema tehnologică pentru obținerea granulelor de compozit pe bază de polipropilenă și puzderii de cânepă la faza de laborator

Pentru obținerea la scară industrială a produselor din biocompozite pe bază de PP ranforsate cu deșeuri de cânepă, se utilizează ca materii prime granule din biocompozit care ulterior se prelucrează prin procedeele clasice utilizate în cazul materialelor plastice: turnare, extrudare, injectare. Granulele de compozit sunt prezentate în figura 4.13.



Fig.4.13.Granule compozite din PP și puzderii de cânepă sub formă de praf fin
Compoziții ale materialului compozit pe bază de PP ranforsat cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin (Probele 1,2,3,4)

Proba 1 (P1): -PP J 700-37%; -praf fin de puzderii de cânepă-60%; -Licocene PP-MA-3%;

Proba 2 (P2): -PP J700 -40%; - praf fin de puzderii de cânepă -60%;

Proba 3 (P3): -PP J 700- 57%, praf fin de puzderii de cânepă-40%; Licocene PP-MA -3%

Proba 4 (P4):-PPJ700- 77%, praf fin de puzderii de cânepă-20%; Licocene PP-MA - 3%

Caracteristicile granulelor de compozit pe bază de PP ranforsate cu puzderii din cânepă sunt:

Dimensiunea particulelor (granulelor): <10 mm;

Densitate ~ 1,14 g/cm³;

Absorbție de umiditate 0.45%

Punctul de înmuiere ~ 169-170°C;

Culoare : maro deschis;

Temperatura de prelucrare prin extrudare~ 175 °C.

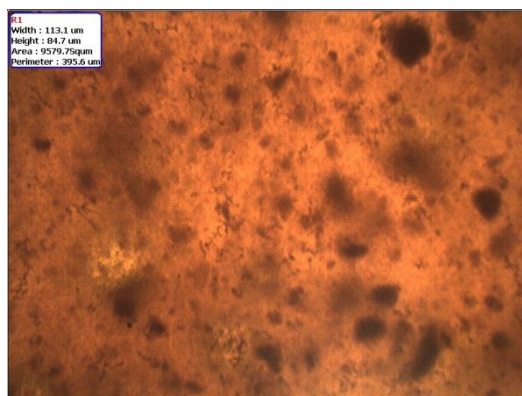


Fig.4.14 Aspectul microscopic al biocompozitului de la proba P2 (PPJ700-40%,60%praf fin puzderii de cânepă)

Aspectul microscopic al biocompozitului de la proba P2 arată că acesta are o structură omogenă.

Materiale biocompozite termoplastice cu matricea din LDPE si umplutura din puzderii de cânepă sub formă de praf fin (Probele 3 și 4)

Materii prime utilizate:

Elemente de ranforsare –praf fin de puzderii de cânepă (aceleași ca și la materialul II.B)

Materiale utilizate ca matrice:

(i) Granule de polietilenă de joasă densitate LDPE tip A22FMA/002

(ii) Agent de compatibilizare (PP-g-MA) - un copolimer sub numele de Licocene PP MA 6452 fine grain

Tehnologia de prelucrare : (aceleași ca și la materialul II.B)

Compozitii ale materialului compozit pe bază de LDPE ranforsat cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin

Proba 3.: -LDPE-37%; praf fin de puzderii de cânepă -60%;-Licocene PP-MA-3%;

Proba 4.: - LDPE-40%; praf fin de puzderii de cânepă -60%;

Materiale biocompozite din puzderii de cânepă sub formă de praf fin și matricea din HDPE;

Materii prime utilizate:

Elemente de ranforsare - Puzderiile de cânepă au fost macinate cu o moara cu ciocanele rezultind particule lemnoase cu dimensiuni cuprinse între 50-160 μm (diametru de 50-80 μm (0.05-0.08mm) și lungimea de 100-160 μm (0.1-0.16mm)). (Puzderii sub formă de praf fin).

Materiale utilizate ca matrice

(I) Măcinatură de HDPE cu un indice de fluiditate de 0.5-2g/10min și dimensiuni de 0.5-2 mm.

(II) Agent de cuplare între HDPE și particulele lemnoase: PE funcționalizată cu anhidridă maleică (SCONA TPP 8112FA) sub formă de pulbere și conținut în anhidridă maleică.

(III) Pigmenți pentru colorare

(IV) Ceruri lubrefiante care asigură curgerea optimă în extruder a amestecului compozit. Aceste ceruri sunt pe bază de polietilenă modificată și micronizată (Licowax PE 520),

Tehnologia de fabricație a profilelor compozite

Instalația utilizată pentru obținerea pardoselilor pentru terase cu un conținut lemnos mai mare de 70%, printr-un proces de extrudare directă a amestecului compozit este formată din două extrudere paralele:

-un extruder cu un melc pentru topirea HDPE care lucrează la temperaturi cuprinse între 160-190⁰C distribuită pe trei zone încălzite electric;

-un extruder cu doi melci pentru amestecarea topiturii de polimer cu praful de puzderii de cânepă, agentul de cuplare, pigmenții pentru colorare, cerurile fluidizante, omogenizarea amestecului format și extruderea acestuia printr-un cap de extrudare specific profilului propus. Extruderul are cinci zone de încălzire și omogenizare; După capul de extrudare urmează două zone de preluare și răcire a profilului:

-Zona de preluare a profilului format cuprinde două părți: un tunel de calibrare și stabilizare a formei, prezent la nivelul capului de extrudare; acesta are rolul de a menține forma profilului și de a răci profilul întărindu-l, obținându-se astfel o formă stabilă rigidă. Lungimea acestei zone este de cca 2m.

-Zona de răcire avansată în care profilul stabilizat este răcit. Răcirea se face cu aer rece sau cu apă răcită în funcție de viteza de extrudare. Această zonă are o lungime de cca 10m. După răcire are loc tăierea profilului la lungimea dorită; mașina de tăiat este în continuarea zonelor de răcire și este comandată automat.

-Instalația de periere a profilului rezultat are rolul de a forma o suprafață rugoasă pe una din părțile profilului, asemănătoare lemnului, care nu permite alunecarea în timpul deplasării pe terasele realizate din aceste profile.

Tehnologia de fabricație cuprinde următoarele etape:

- a. *Măcinarea* puzderiilor de cânepă cu o moară cu ciocănele rezultând puzderii cu dimensiuni cuprinse între 50-160 μm . (diametru de 0.05-0.08mm și lungimea de 0.10-0.16mm)
- b. *Uscarea produsului măcinat*
- c. *Topirea HDPE* în extruderul cu un melc și transportul acesteia în extruderul cu doi melci;
- d. *Dozarea* în pâlnia dozatoare ce alimentează extruderul cu doi melci, a puzderiei măcinate și a aditivilor
- e. *Amestecarea* în extruderul cu doi melci, a topiturii de PEHD cu puzderia lemnoasă și aditivi și omogenizarea amestecului format;
- f. *Extruderea* amestecului compozit prin capul de extrudare cu forma profilului stabilit anterior;
- g. *Stabilizarea* profilului din amestec compozit și răcirea acestuia;
- h. *Tăierea* profilului la lungimea dorită de beneficiar;
- i. *Perierea* profilului pe o parte sau pe ambele părți funcție de solicitarea beneficiarului.

Compoziția biocompozitelor din puzderii de cânepă sub formă de praf fin și deșeuri măcinate de HDPE

Amestecul compozit realizat în extruder cu ajutorul dozatoarelor și a sistemului de topire și de omogenizare este format din:

- 75% puzderii de cânepă sub formă de praf fin;
- 15% măcinatură de HDPE;
- 4% agent de cuplare;
- 4% pigmenti;
- 2% aditivi de omogenizare-lubrefiere.

Produse rezultate:

S-au obținut profile lungi din materiale compozite prin extruderea unui amestec compozit format din puzderii de cânepă și deșeuri măcinate de HDPE și aditivi, utilizând o instalație de obținere și prelucrare compozite cu umplutură lemnoasă WPC (wood polymer composite) la SC Raficon Trade SRL Buzau. S-au realizat, profile din compozite polimerice cu 75% puzderii de cânepă și 15% HDPE și 10% aditivi. Profilele au 1500mm lungime, 145mm lățime și 25 mm grosime, cu greutatea de 2.6kg/m liniar, care pot fi considerate produse finite.

O imagine foto a acestor profile compozite este prezentată în figura 4.15. Profilele se prezintă sub formă de plăci celulare cu două suprafețe de montaj, una lisă și celalaltă cu strițiuni antialunecare. Secțiunea acestora este aproximativ

dreptunghiulară, cu degajări laterale simetrice ce permit prinderea printr-o clemă de șina de susținere. Pentru mărirea coeficientului de frecare, după extrudare, scândurile sunt supuse perierii sau șlefuirii pe fața superioară. Au aspect natural de lemn, rezistență excepțională la intemperii, mucegaiuri și insecte, nu se fisurează, nu se așchiază, nu putrezesc, sunt antiderapante (chiar și umede), necesită întreținere minimă, sunt reciclabile, ecologice. De asemenea prezintă caracteristici fizico-mecanice superioare plăcilor similare realizate din lemn.

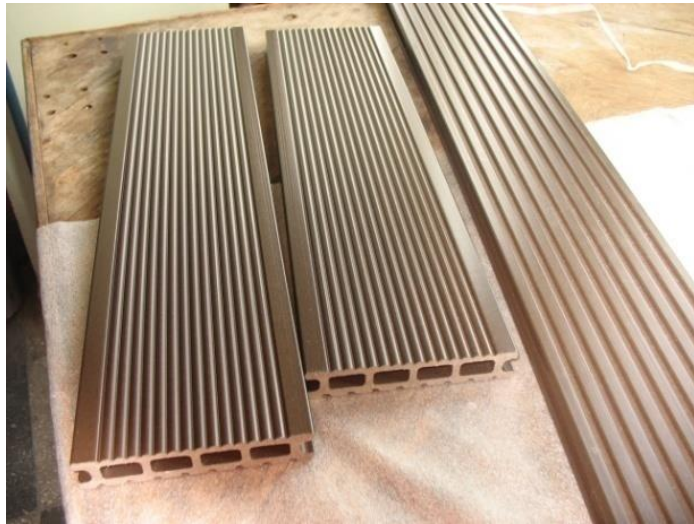


Fig.4.15. Profile compozite obtinute din deșeuri de PEHD cu 75% puzderii de cânepă

4.2. Aparatura și metodologia pentru determinarea proprietăților fizico-mecanice ale materialelor biocompozite

S-au efectuat teste la tracțiune, încovoiere, impact, compresiune, duritate, analize SEM (a suprafețelor materialelor în ruptură), îmbătrânire, testul de absorbție a umezelii și a apei. Materialele au fost testate la laboratorul Institutului "Petru Poni" din Iași și în laboratorul de încercări din cadrul UPT și ISIM Timișoara.

4.2.1 Aparatura de încercare

Aparat pentru determinarea rezistenței la încovoiere prin șoc (impact) Charpy

Aparatul pentru determinarea rezistenței la șoc este produs de firma CEAST-Italia din cadrul laboratorului "Petru Poni" din Iași (figura 4.16) permite realizarea încercării la impact IZOD, CHARPY. Energia maximă a ciocanului este de 15 J.



Figura 4.16. Aparat pentru determinarea rezistenței la impact Charpy produs de firma CEAST – Italia

Aparat pentru determinarea durității

S-a determinat duritatea prin metoda Vickers pe un aparat produs de firma Shimadzu- Japonia (figura 4.17).



Fig. 4.17. Aparat pentru determinarea duritatii Vickers (Shimadzu, Japonia)

Aparat pentru analiza suprafeței materialelor în ruptură

Caracteristicile morfologice ale suprafețelor în ruptură a materialelor compozite au fost determinate cu ajutorul microscopiei electronice cu baleaj (SEM). Probele uscate au fost immobilizate pe un suport de aluminiu folosind un adeziv pe bază de argint. Imaginile SEM au fost obținute cu un microscop electronic VEGA II TESCAN, cu tensiune de 30 KV (figura 4.18).



Fig.4.18. Microscop electronic cu baleaj VEGA II Tescan pentru determinarea structurii morfologice ale suprafețelor materialelor compozite

Aparate pentru determinarea rezistenței la tracțiune, compresiune și încovoiere

(i) -aparat, produs de firma Instron (figura 4.19) este din seria 53482, interval de măsurare (1-5) kN, clasa exactitate 1 cu o viteză de tragere de 30 mm/min. Controlul, înregistrarea și analiza datelor sistemului de testare se efectuează prin intermediul unui program de software INSTRON conceput special pentru acest tip de testări – Bluehill Lite.



Fig.4.19. Aparat INSTRON pentru determinarea rezistenței la tracțiune

(ii) –mașina de încercat Zwick/Roell Z005 la Laboratorul de Rezistența Materialelor din cadrul UPT, prezentat în figura 4.20, la care viteza de încercare a fost 5mm/min pentru tracțiune, respectiv 2 mm/min.pentru încovoiere.



Fig.4.20. Mașina de încercat Zwick/Roell Z005 pentru determinarea rezistenței la tracțiune și a rezistenței la încovoiere

Aparat pentru determinarea absorbției de umiditate și a comportamentului la îmbătrânire

Aparatul (figura 4.21) este controlat de un procesor ale cărui funcții pot fi accesate cu ușurință de pe panoul frontal de comandă



Fig. 4.21. Camera climatică Angelantoni Industrie (Italia), model CH 250 E pentru determinarea capacității de absorbție a umidității și a comportamentului la îmbătrânire

Este prevăzută cu interfața RS232 ce permite conectarea la PC și / sau la imprimantă. Camera climatică permite studiul fenomenelor de îmbătrânire a materialelor polimere sub influența umidității, temperaturii și a radiațiilor UV.

4.2.2 Metodologia pentru determinarea proprietăților fizico-mecanice ale biocompozitelor studiate

Determinarea durității Vickers - conform SR EN ISO 6507-1-2006 _Condiții de lucru: Forța de apăsare = 2,942 N; timp de acțiune = 12 secunde; Se măsoară amprenta de duritate prin crearea unei deformări permanente în suprafața probei, cu ajutorul aparatului Vickers (figura 4.17):

$$HV = 0.1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (4.1)$$

F – sarcina aplicată (N)

d – media lungimii diagonalei amprentei (mm)

Determinarea rezistenței la încovoiere prin șoc (testul la impact) a biocompozitelor prin metoda Charpy – s-a efectuat conform standardului SR EN ISO 179/2001 cu ajutorul ciocanului Charpy (figura 4.16).

Rezistența la impact s-a determinat conform standardului cu formula:

$$a_{CU} = W_B \cdot 10^3 / b \cdot h \quad [J/m^2] \quad (4.2)$$

unde h este grosimea epruvetei [m], b este lățimea epruvetei [m], W_B este energia la momentul ruperii exprimată în [J].
S-au utilizat epruvete necrestate cu lățimea $b=10\text{mm}$ și grosimea $h=4\text{mm}$ (figura 4.22).



Fig.4.22. Epruvetele din biocompozite pentru încercarea la impact

Determinarea proprietăților la încovoiere - s-a realizat conform ASTM D 790-03 respectiv SR EN ISO178-2003.

Tensiunea la încovoiere s-a calculat cu relația:

$$\sigma_i = \frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times d^2}, \text{ [MPa]} \quad (4.3)$$

Unde P reprezintă forța de încercare [N], L reprezintă distanța între reazeme a epruvetei [mm] iar d și b reprezintă grosimea respectiv lățimea epruvetei [mm]. Pentru calculul rezistenței la încovoiere $\sigma_{i \max}$ în relația (4.3) se consideră valoarea maximă P_{\max} a forței P

Deformația la rupere la încovoiere pe suprafața exterioară (întinsă) a barei ε_f se calculează cu relația:

$$\varepsilon_f = \frac{6 D_{\max} d}{L^2}, \text{ [-]} \quad (4.4)$$

unde D_{\max} reprezintă săgeata la încovoiere corespunzătoare forței P_{\max} .

Modulul de elasticitate la încovoiere E_f s-a calculat în conformitate cu ASTM D 790-03/SR EN ISO178-2003 care definește modulul de elasticitate drept pantă a unei coarde pe curba σ_i - ε_i între valori determinate ale lui ε_i și s-a calculat conform relației:

$$E_f = \frac{\sigma_{i2} - \sigma_{i1}}{\varepsilon_{i2} - \varepsilon_{i1}}, \text{ [MPa]} \quad (4.5)$$

în care $\sigma_{i2,1}$ reprezintă tensiunile la încovoiere corespunzătoare punctelor de pe graficul σ_i - ε_i obținute prin intersecția graficului cu o dreaptă secantă oarecare iar $\varepsilon_{i2,1}$ [mm/mm] reprezintă deformațiile la încovoiere pe suprafața exterioară (întinsă) a barei corespunzătoare acelor puncte.

Determinarea proprietăților la tracțiune s-a realizat conform SR EN ISO 527-2:1996/ ASTM D638. Viteza de încercare 5mm/min.

Tensiunea σ_t la tracțiune într-o secțiune epruvetei se calculează cunoscând aria secțiunii transversale inițiale a piesei și forța la tracțiune cu relația:

$$\sigma_t = \frac{F}{A}, [\text{MPa}] \quad (4.6)$$

unde:

F - forța la tracțiune [N]

A - aria secțiunii transversale inițiale a piesei [mm²]

Rezistența la tracțiune $\sigma_{t \max}$ reprezintă valoarea maximă a tensiunii din secțiunea epruvetei solicitată la tracțiune corespunzătoare forței maxime F_{\max} de solicitare.

Lungirea epruvetei Δl reprezintă diferența dintre lungimea l [mm] după deformare corespunzătoare unei forțe F și lungimea inițială l_0 [mm] înainte de deformare pe porțiunea de măsurare:

$$\Delta l = l - l_0, [\text{mm}] \quad (4.7)$$

Lungirea ultimă Δl_u este lungirea epruvetei corespunzătoare forței maxime

Lungirea specifică ε se determină cu relația:

$$\varepsilon = \Delta l / l_0, [\text{mm}] \quad (4.8)$$

Alungirea la rupere (lungirea specifică la rupere) ε_r reprezintă lungirea specifică ce corespunde forței maxime

Modulul de elasticitate longitudinal se determină cu relația:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}, [\text{MPa}] \quad (4.9)$$

unde $\sigma_{2,1}$ și sunt valorile rezistenței la tracțiune corespunzătoare lungirilor specifice de $\varepsilon_2=0,0025$ respectiv $\varepsilon_1=0,0005$

Au fost utilizate epruvete tip 5B cu lățimea de 10mm și grosimea de 1mm. În figura 4.23 sunt prezentate epruvete încercate la tracțiune.

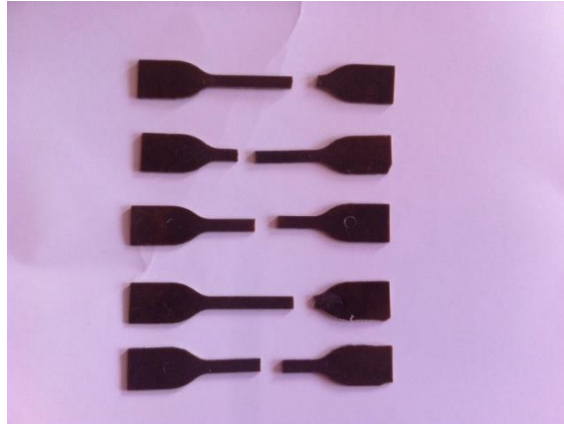


Fig. 4.23. Epruvete testate la tracțiune

Determinarea proprietăților la compresiune - s-a realizat conform ASTM 695-02/2002. Viteza de încercare 5mm/min.

Tensiunea σ_c la compresiune într-o secțiune a unei piese solicitată la compresiune se calculează cunoscând aria secțiunii transversale inițiale a piesei și forța la compresiune, cu relația:

$$\sigma_c = \frac{F}{a \times b}, [\text{MPa}] \quad (4.10)$$

unde:

F = forța la compresiune [N]

a ,b = lungimea respectiv lățimea inițială a epruvetei în secțiune transversală [mm].

Rezistența la compresiune $\sigma_{c\max}$ [MPa] s-a calculat cunoscând aria secțiunii inițiale a epruvetei (axb) și forța maximă Fmax[N] la compresiune cu relația:

$$\sigma_{c\max} = \frac{F_{\max}}{a \times b} \quad (4.11)$$

Scurtarea Δl_c [mm] la compresiune reprezintă diferența dintre lungimea inițială l_0 înainte de deformare și lungimea finală l după deformare pe porțiunea de măsurare a acesteia:

$$\Delta l_c = l_0 - l, [\text{mm}] \quad (4.12)$$

Scurtarea specifică A_c se determină cu relația:

$$A_c = \Delta l / l_0 \quad (4.13)$$

Determinarea absorbției de apă - s-a realizat conform SR EN ISO 62:1999. Materialele au fost menținute în atmosfera de vapori de apă saturați. S-a măsurat grosimea materialelor t_1 înainte de imersare și după imersare t_2 . Capacitatea de absorbție s-a determinat cu relația:

$$c = 100(t_2 - t_1)/t_1, [\%] \quad (4.14)$$

Determinarea gradului de umflare în grosime după imersia în apă -s-a realizat conform SR EN 317:2002. S-au confecționat epruvete cu dimensiuni de 50x50mm, s-au condiționat la masă constantă și s-au măsurat grosimea epruvetelor. S-au menținut epruvetele imersate în apă la 200°C timp de 24 ore, apoi s-a măsurat grosimea fiecărei epruvete. S-a calculat umflarea în grosime G_t , a fiecărei epruvete, în [%]

$$G_t = (t_2 - t_1)/t_1 \times 100, [\%] \quad (4.15)$$

$t_{1,2}$ = grosimea inițială (înainte de imersie) respectiv finală (după imersie)

Comportarea la îmbătrânire a materialelor compozite - s-a realizat conform ISO 188 (2007). S-a studiat îmbătrânirea compozitelor utilizând camera de climatizare Angelantoni Industry (figura 4.21). Parametrii de funcționare

- domeniul de temperatură: -30 ... + 170 °C;
- domeniul de umiditate relativă: 10 ... 95%.

Procesul de îmbătrânire forțată a compozitelor a fost studiat în scopul determinării modului de comportament al acestora sub influența factorilor de mediu (temperatură, umiditate, radiații ultraviolete) în vederea stabilirii condițiilor de utilizare a compozitelor în natură. Îmbătrânirea materialelor compozite are loc în condiții controlate ai factorilor de mediu menționați anterior. Probele au fost expuse la lumina unei lămpi de mercur în condiții determinate de temperatură și umiditate, timpul de expunere fiind între 300 ore și 600ore. La sfârșitul fiecărei perioade de expunere s-au determinat caracteristicile mecanice ale acestuia care apoi au fost comparate cu acelea determinate inițial.

Determinarea densității compozitelor

Pentru determinarea densității s-au decupat probe din compozit la care li s-au determinat volumul V [m^3] și masa m [kg]. Densitatea ρ s-a calculat cu formula:

$$\rho = \frac{m}{V}, [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (4.16)$$

4.3. Rezultate experimentale obținute la testarea materialelor biocompozite

4.3.1. Proprietăți fizico-mecanice ale materialelor biocompozite pe bază de rășini termorigide ranforsate cu deșuri de in și cânepă

Proprietăți fizico-mecanice ale materialelor biocompozite 100% naturale pe bază de biorășini furanice:

Energia la impact W_B , rezistența la impact, duritatea și densitatea biocompozitelor sunt prezentate în Tab. 4.1. Analiza SEM a compozitului s-a realizat pentru proba 4RF și este prezentată în Fig. 4.24

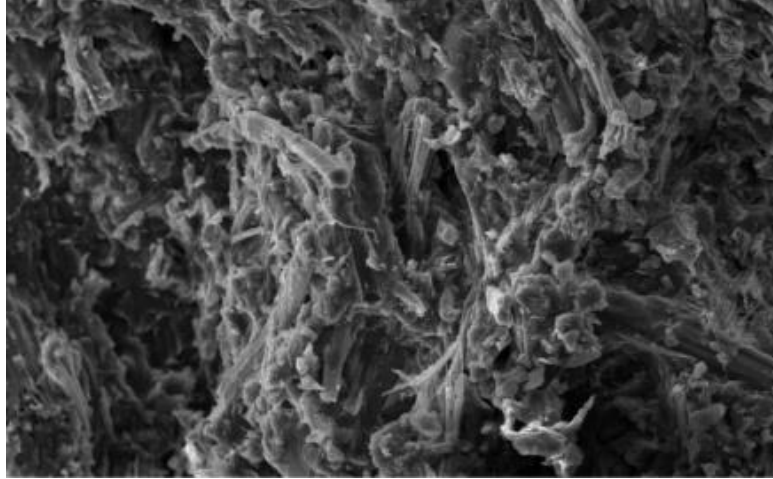


Fig. 4.24. Aspectul SEM în ruptură al biocompozitului 100% natural de la proba 4RF pe bază de rășini furanice 45%RF+40%fibre scurte de in și cânepă +15%Lignină Pb 2000

Tabelul 4.1 Proprietăți fizico mecanice ale materialelor biocompozite 100 % naturale pe bază de rășini furanice (RF) tip BIOREZ (termorigide) ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă respectiv cu deșeuri de cânepă

Proba	Compoziția	Energia la impact W_B [J]	Rezistența la impact a_{cu} [kJ/m ²]	Duritate Vickers HV [HV]	Densitate ρ [kg/m ³]
Proba 1	40%RF+40% puzderii măcinate de cânepă+20%Lignina din paie	0.118	3.47	22.4	1360
Proba 2	40%RF+40%puzderii măcinate de cânepă +20%Lignina din in	0.124	4.42	33.6	1350
Proba 3	40%RF + 40%fibre scurte in și cânepă + 20%Lignina din paie	0.125	4.52	98.5	1400
Proba 1RF	45%RF + 40%puzderii măcinate cânepă + 15%Lignina din paie	0.126	4.57	32.3	1350
Proba 2RF	45%RF+40%puzderii măcinate cânepă +15%Lignina Pb2000	0.136	5.4	32.6	1370
Proba 3RF	45%RF+40%fibre scurte in și cânepă + 15%Lignina din paie	0.131	4.92	103.5	1350
Proba 4RF.	45%RF+40%fibre scurte in și cânepă + 15%Lignina Pb 2000.	0.139	5.8	139.5	1360

În Fig. 4.25 este prezentată diagrama comparativă cu privire la densitățile materialelor compozite pe bază de rășini furanice ranforsate cu puzderii de cânepă sau fibre scurte de in și cânepă.

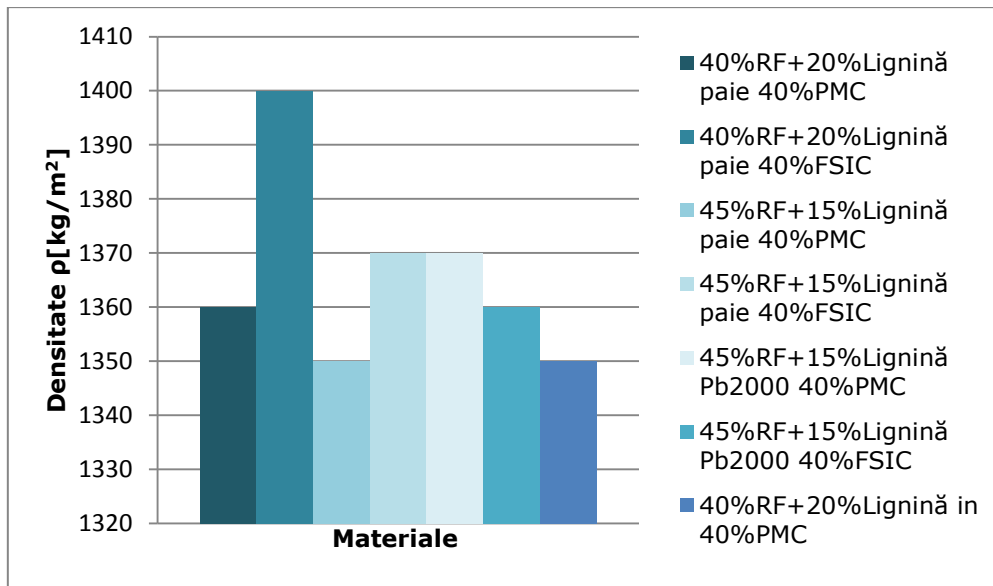


Fig. 4.25. Valorile densităților materialelor compozite pe bază de rășini furanice ranforsate cu puzderii de cânepă sau fibre scurte de in și cânepă

În Fig. 4.26 este prezentată diagrama comparativă cu privire la duritățile materialelor compozite pe bază de rășini furanice ranforsate cu puzderii de cânepă sau fibre scurte de in și cânepă

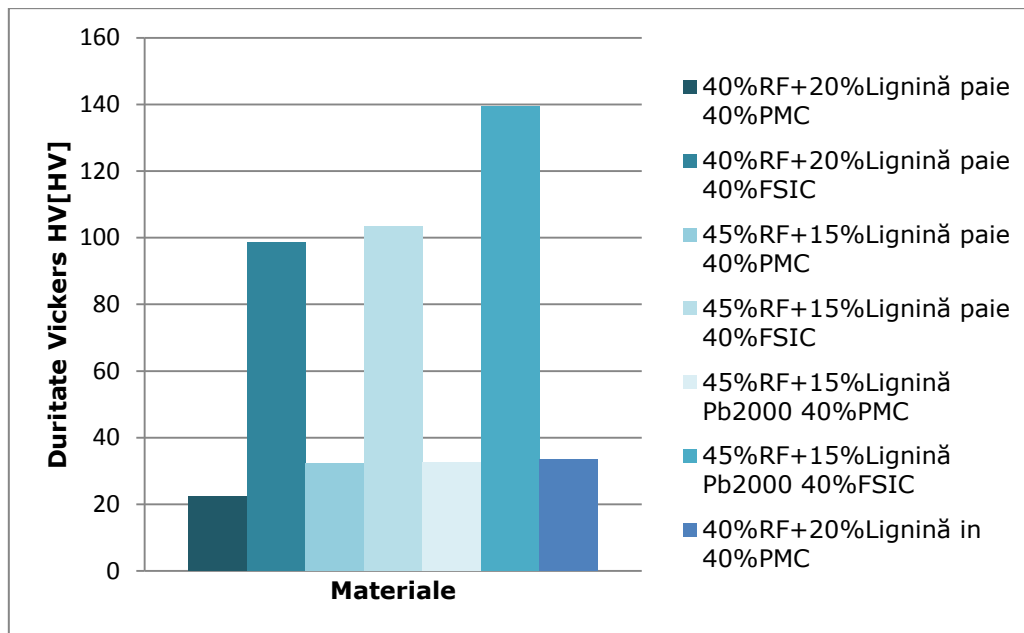


Fig. 4.26. Valorile durităților materialelor compozite pe bază de rășini furanice ranforsate cu puzderii de cânepă sau fibre scurte de in și cânepă

În Fig. 4.27 este prezentată diagrama comparativă cu privire la rezistențele la impact ale materialelor compozite pe bază de rășini furanice ranforsate cu puzderii de cânepă sau fibre scurte de in și cânepă

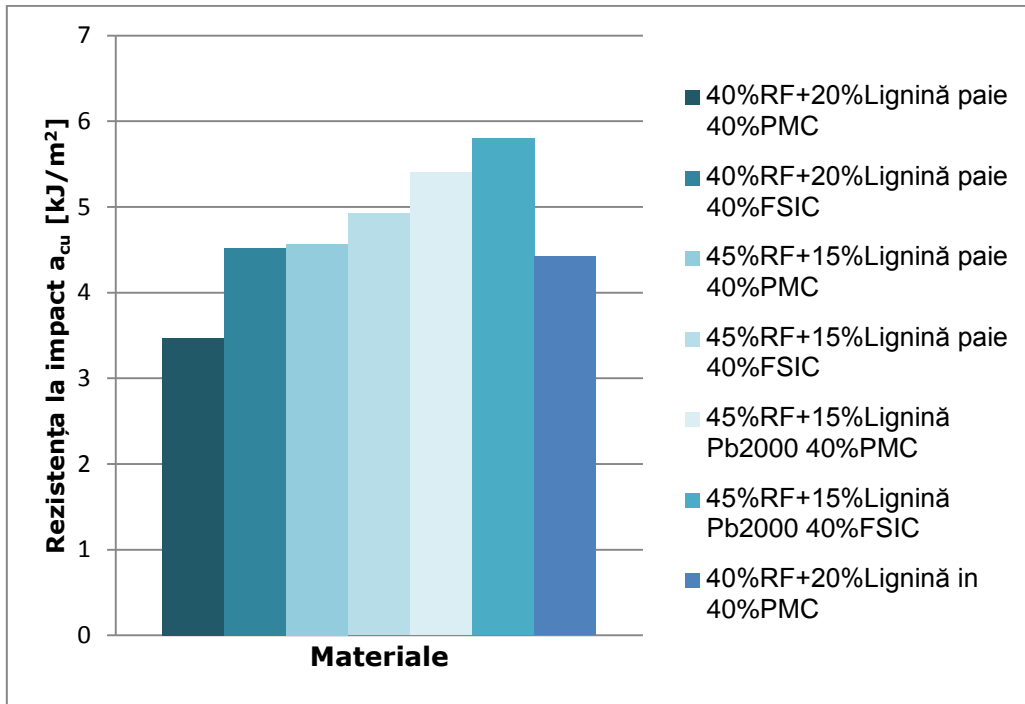


Fig. 4.27. Valorile rezistențelor la impact ale materialelor compozite pe bază de rășini furanice ranforsate cu puzderii de cânepă sau fibre scurte de in și cânepă

Concluzii

Analizând rezultatele prezentate în figura 4.25 se observă că materialele compozite pe bază de rășini furanice ranforsate cu deșeuri de fibre liberiene au densități joase (aproximativ 1370 kg/m²). Dintre acestea cele mai mari densități le prezintă materialele ranforsate cu fibre scurte iar cele mai scăzute densități le prezintă materialele ranforsate cu puzderii măcinate de cânepă. Din punct de vedere al durității Vickers (Fig. 4.26), se observă că materialele compozite pe bază de rășini furanice ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă au duritatea Vickers mai ridicată (aproximativ 100HV) decât cele ranforsate cu puzderii de cânepă (aproximativ 30HV). Se observă că odată cu creșterea conținutului elementului de ranforsare în compozit, duritatea acestuia devine mai mare. Pentru aceeași fracțiune de volum a elementului de ranforsare biocompozitele ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă au duritate mai mare decât cele ranforsate cu puzderii nemăcinate. Din figura 4.27 se observă că cea mai mică rezistență la impact o au materialele ranforsate cu puzderii măcinate de cânepă, aproximativ 3.5kJ/m² iar cea mai ridicată rezistență la impact o au cele realizate din 45% rășini furanice, 40% fibre scurte de in și cânepă și 15% lignină Pb 2000. Biocompozitele pe bază de rășini furanice aditivate cu lignină de paie au proprietățile la impact mai scăzute decât cele aditivate cu lignină de in sau lignină Pb2000. Aceste compozite pot înlocui bakelita la obținerea unor

piese în industria electrotehnică. Din analiza SEM se observă o structură compactă a biocompozitului.

Proprietăți fizico-mecanice ale materialelor biocompozite cu matricea din rășini ureo-formaldehidice și fibre scurte de in și cânepă respectiv puzderii măcinate de cânepă

Proprietăți fizico-mecanice ale biocompozitelor cu Urelit R + fibre scurte de in și cânepă/puzderii măcinate de cânepă

Rezultatele experimentale referitoare la proprietățile fizico-mecanice ale compozitelor cu Urelit R + fibre scurte de in și cânepă/ puzderii măcinate de cânepă sunt prezentate în tabelul 4.2. Pentru proba 4UF s-a determinat aspectul SEM în ruptură (Fig. 4.28)

Tabelul 4.2. Proprietățile fizico-mecanice ale compozitelor cu Urelit R ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă (FSIC) respectiv cu puzderii măcinate de cânepă (PMC)

Proba	Compoziția	Energia la impact W_B [J]	Rezistența la impact a_{cu} [kJ/m ²]	Duritate Vickers HV [HV]	Densitate ρ [kg/m ³]
Proba1U F	51%Urelit + 46%PMC+ 3% (apă+ întăritor)	0.118	4.76	59.5	1300
Proba2U F	48%Urelit + 44%PMC + 8%(apă+ întăritor)	0.139	5.91	195.6	1390
Proba3U F	51%Urelit + 46%FSIC + 3%(apă+întăritor)	0.126	5.58	60.4	1320
Proba4U F	48%Urelit+44%FSIC+ 8%(apă +întăritor)	0.161	7.56	102.1	1400

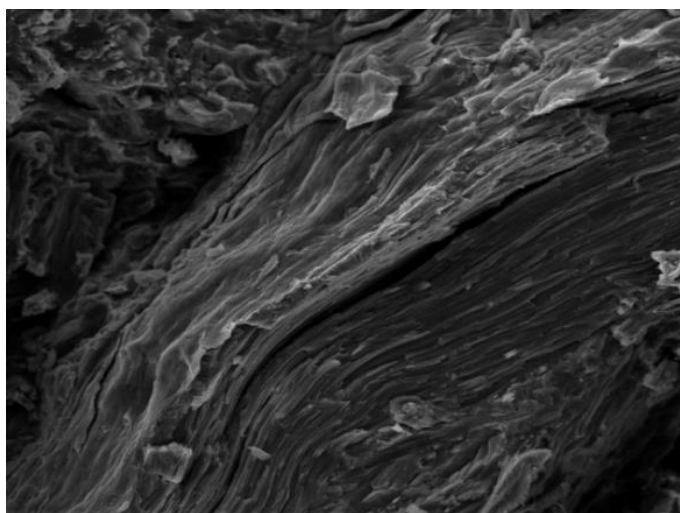


Fig. 4.28. Aspectul SEM în ruptură al compozitului pe bază de rășină urelit ranforsat cu fibre scurte de in și cânepă de compoziție: 48%Urelit+44%fibre scurte in și cânepă + 8% apă +întăritor (proba 4 UF)

Din analiza SEM în ruptură a compozitului pe bază de urelit ranforsat cu fibre scurte de in și cânepă (Fig.4.28) se observă că acesta are în ruptură o structură compactă.

În Fig. 4.29 este prezentată diagrama comparativă cu privire la densitățile materialelor compozite pe bază de rășini ureo-formaldehidice (Urelit) ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă respectiv puzderii măcinate de cânepă

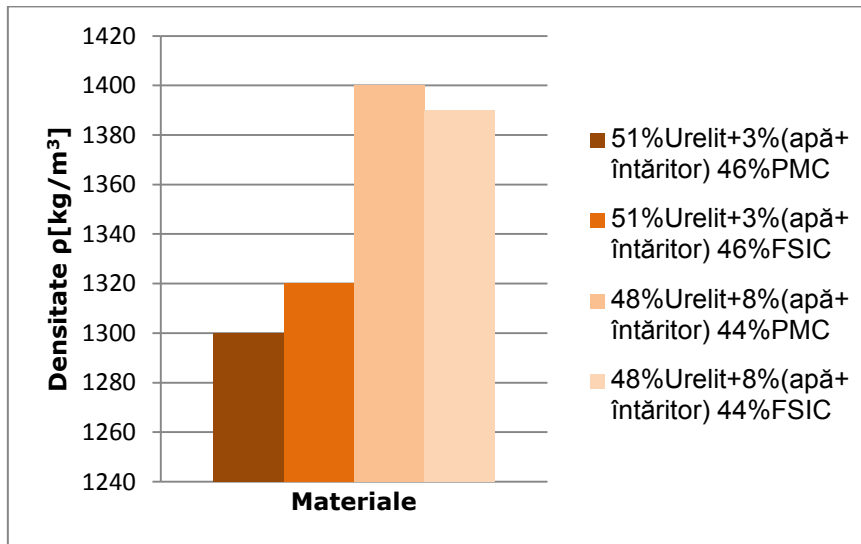


Fig. 4.29. Valorile densităților materialelor compozite pe bază de rășini ureo-formaldehidice (Urelit) ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă respectiv puzderii măcinate de cânepă

Din analiza densității materialelor compozite pe bază de urelit ranforsate cu deșeuri de fibre liberiene din in și cânepă analizate, se observă că aceste materiale prezintă densități mici (Fig. 4.29) cuprinse între 1300 kg/m³ și 1400kg/m³. De asemenea se constată că densitatea materialelor compozite pe bază de urelit ranforsate cu puzderii măcinate de cânepă este mai joasă decât a celor ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă. Creșterea conținutului de întăritor și scăderea fracțiunii de volum a elementelor de ranforsare duce la creșterea densității acestor materiale.

În Fig.4.30 este prezentată diagrama comparativă cu privire la duritățile materialelor compozite pe bază de rășini ureo-formaldehidice (Urelit) ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă respectiv puzderii măcinate de cânepă.

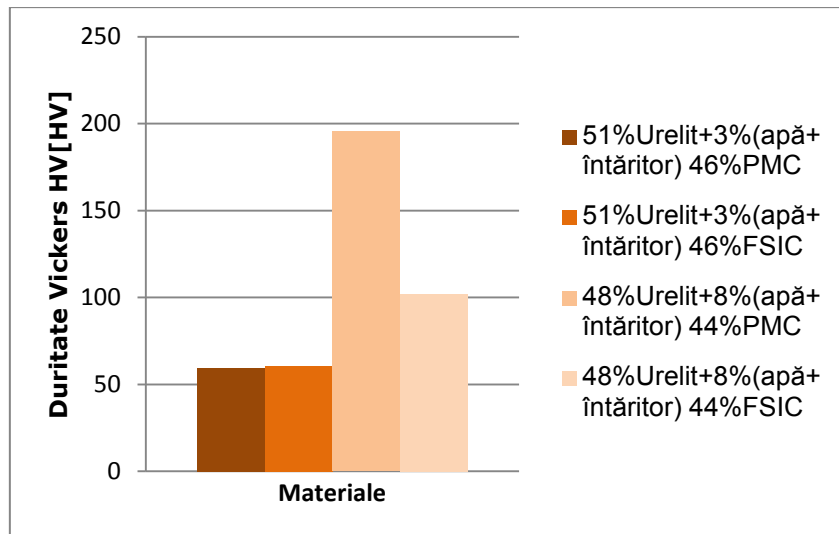


Fig.4.30. Valorile durităților materialelor compozite pe bază de rășini ureo-formaldehidice (Urelit) ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă respectiv puzderii măcinată de cânepă

Din analiza durității materialelor compozite pe bază de urelit ranforsate cu deșeuri de fibre liberiene din in și cânepă analizate, se observă că aceste materiale prezintă durități mici (Fig. 4.30) de aproximativ 60 HV. Duritatea acestor materiale crește cu creșterea conținutului de întăritor din rășină și scăderea conținutului de elemente de ranforsare.

În Fig.4.31 este prezentată diagrama comparativă cu privire la rezistențele la impact ale materialelor compozite pe bază de rășini ureo-formaldehidice (Urelit) ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă respectiv puzderii măcinată de cânepă

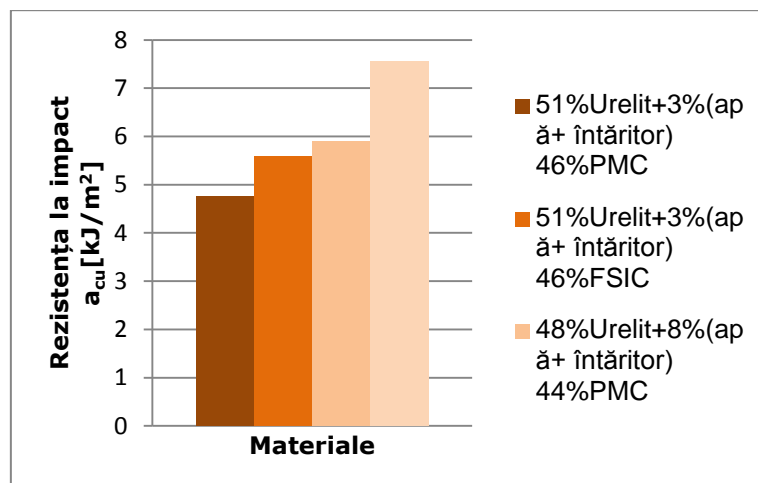


Fig.4.31 Valorile rezistențelor la impact ale materialelor compozite pe bază de rășini ureo-formaldehidice (Urelit) ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă respectiv puzderii măcinată de cânepă

Din diagrama prezentată în Fig. 4.31 se constată că materialele compozite pe bază de urelit ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă respectiv puzderii de cânepă au rezistență la impact scăzută. Valorile rezistenței la impact sunt cuprinse între 4.7kJ/m^2 și 7.6kJ/m^2 . Cu creșterea conținutului de element de ranforsare rezistența la impact scade. De asemenea, la aceeași fracțiune de volum a elementului de ranforsare compozitele ranforsate cu puzderii au rezistențe la impact mai mici decât cele ranforsate cu fibre. Creșterea conținutului de întăritor din rășină duce la creșterea valorilor rezistenței la impact.

Concluzii

Din analiza caracteristicilor fizico-mecanice ale materialelor biocompozite pe bază de urelit ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă respectiv cu puzderii măcinate de cânepă se constată că:

- aceste materiale prezintă o structură compactă
- materialele prezintă densitate scăzută; densitatea materialelor compozite pe bază de urelit ranforsate cu puzderii măcinate de cânepă este mai joasă decât a celor ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă; acest lucru se explică prin faptul că puzderiile de cânepă au densitate mai mică decât fibrele scurte de in și cânepă. Creșterea conținutului de întăritor și scăderea fracțiunii de volum a elementelor de ranforsare duce la creșterea densității acestor materiale.
- duritatea materialelor este mică; ea crește cu creșterea conținutului de întăritor din rășină și scăderea conținutului de elemente de ranforsare.
- proprietățile la impact a acestor materiale (energia și rezistența la impact) sunt joase. Cu creșterea conținutului de element de ranforsare rezistența respectiv energia la impact scad. De asemenea, la aceeași fracțiune de volum a elementului de ranforsare compozitele ranforsate cu puzderii de cânepă au proprietăți la impact mai mici decât cele ranforsate cu fibre de in și cânepă. Acest lucru poate fi explicat prin faptul că puzderiile au un conținut mai ridicat de lignină decât fibrele iar lignina aderă mai greu la polimerul matricei. Creșterea conținutului de întăritor din rășină duce la creșterea valorilor energiei respectiv rezistenței la impact.
- din analiza proprietăților fizico-mecanice ale compozitelor pe bază de rășini ureo-formaldehidice ranforsate cu puzderii de cânepă respectiv fibre scurte de in și cânepă pot fi utilizate în industria mobilei pentru obținerea de scânduri, plăci, placaje, etc;

Proprietăți fizico-mecanice ale materialelor biocompozite termorigide cu matricea din rășini melamino-formaldehidice și umplutura din puzderii de cânepă

Proprietăți fizico-mecanice ale biocompozitului din rășini melamino-formaldehidice ranforsat cu 83% puzderii de cânepă (probele I.A.1 și I.A.2)

Biompozitele obținute din rășini melamino-formaldehidice, după presare, au un conținut de 83% din puzderii sub formă de praf fin sau praf grosier, 17% rășină cu următoarele dimensiuni ale puzderiilor:

(i) *praf grosier* : lungime particulă = $0.5-1\text{mm}$, diametru particulă $0.3-0.5\text{mm}$ pentru proba I.A.1

(i) *praf fin*: lungime particulă = $0.1-0.2\text{mm}$, diametru particulă = $0.05-0.2\text{mm}$ proba I.A.2

Acestea au fost caracterizate prin următoarele analize fizico-mecanice:

- testul de absorbție a apei – Proba I.A1

- testul de umflare în grosime după imersia în apă – Proba I.A1
- testul la încovoiere prin șoc (testul la impact Charpy) – Proba I.A1
- testul la încovoiere Proba I.A1, Proba I.A2

Testul de absorbție a apei s-a realizat pe epruvete din materialul I.A.1 și a avut ca scop determinarea capacității de absorbție a apei ale cărei valori sunt trecute în tabelul 4.3.

Testul de umflare în grosime după imersia în apă s-a realizat pe epruvete din materialul I.A.1 și a avut ca scop determinarea gradului de umflare în grosime după imersia în apă ale cărei valori sunt trecute în tabelul 4.3.

Tabelul 4.3. Capacitatea de umflare și capacitatea de absorbție a apei a biocompozitelor cu rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu 83% puzderii de cânepă sub formă de praf grosier, 17%rășini melamino - formaldehidice (Proba I.A1)

Proba	Gradul de umflare în grosime Gt [%]	Capacitatea de absorbție a apei c [%]
Proba 1	17	7.5
Proba 2	16.2	7.4
Proba 3	15.7	8.2
Proba 4	16.3	7.3
Proba 5	14.5	7.5
Proba 6	16.8	7.9
Valori medii	16.08	7.63

Concluzii

Pe baza datelor din Tab.4.3 se constată că materialul compozit pe bază de 17% rășină melamino-formaldehidică ranforsat cu 83% puzderii de cânepă sub formă de praf grosier are un grad de umflare în grosime după imersia în apă de 14-17% și o capacitate de absorbție a apei cuprinsă între 7.3-8.2 %.

Testul la impact

S-au testat la impact un număr de 9 epruvete realizate din materialul compozit pe bază de 17% rășină melamino-formaldehidică ranforsat cu 83% puzderii de cânepă sub formă de praf grosier. Aspectul unei epruvete după încercarea la impact este prezentată în Fig.4.32. Rezultatele încercării la impact sunt prezentate în tabelul 4.4.



Fig.4.32. Epruvetă încercată la impact pentru materialul cu 83% puzderii de cânepă (praf grosier) și 17%rășini melamino – formaldehidice

Din aspectul epruvetei în ruptură se observă că materialul este fragil.

Tabelul 4.4. Proprietăți mecanice la impact pentru biocompozitele pe bază de rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu 83% puzderii de cânepă sub formă de praf grosier (Proba I.A.1)

Nr. epruvetă	Lățimea b [mm]	Grosimea h [mm]	Energia la rupere W_B [J]	Rezistența la impact a_{cu} [kJ/m ²]
1	6.44	3.77	0.05	2.060
2	5.9	4.1	0.08	3.304
3	6.34	3.9	0.08	3.200
4	5.97	3.96	0.06	2.520
5	6.36	3.9	0.05	2.000
6	6.19	3.76	0.07	2.940
7	6.17	4.06	0.07	2.793
8	6.02	3.78	0.06	2.580
9	6.21	4.16	0.05	1.900
Valori medii			0.06	2.6

În diagrama din Fig.4.33 se prezintă domeniul valorilor limită ale rezistenței la impact pentru materialul compozit pe bază de 17% rășini melamino-formaldehidice ranforsat cu 83% puzderii măcinate sub formă de praf grosier.

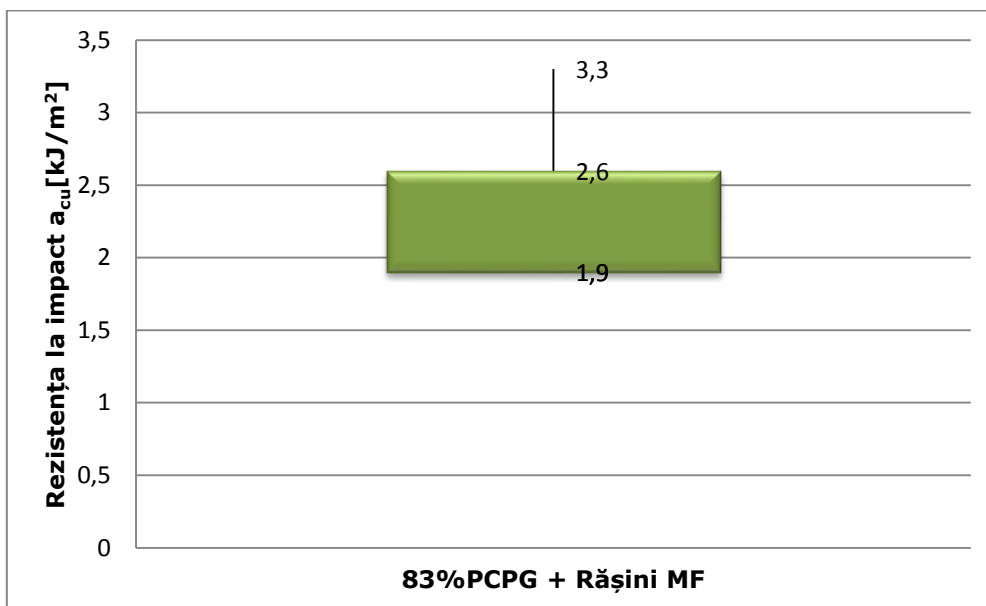


Fig.4.33. Domeniul valorilor limită ale rezistenței la impact pentru materialul compozit pe bază de 17% rășini melamino-formaldehidice ranforsat cu 83% puzderii măcinate sub formă de praf grosier

Concluzii

Din analiza rezultatelor obținute și pe baza diagramei din Fig.4.33 se constată că valoarea medie a rezistenței la impact a biocompozitului este de 2.6 kJ/m², ea variind între 1.9 și 3.3 kJ/m². Datele arată că materialul biocompozit încercat are energia și rezistența la impact scăzute, deci materialul este fragil și nu poate să preia șocuri mari la încovoiere.

Încercarea la încovoiere

Proba I.A.1 - $V_f=83\%$, $V_m=17\%$.

Matrice: rășină melamino-formaldehidică -17%

Element de ranforsare: praf grosier de puzderii de cânepă - 83%

Proba I. A.2- $V_f=83\%$, $V_m=17\%$.

Matrice: rășină melamino-formaldehidică -17%

Element de ranforsare: praf fin de puzderii de cânepă - 83%

Distanța între reazeme pentru cele două tipuri de epruvete este $L=36\text{mm}$.

Aspectul epruvetelor utilizate pentru încercarea la încovoiere este prezentat în Fig. 4.34 pentru materialul compozit pe bază de rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu 83% puzderii de cânepă sub formă de praf grosier (Proba I.A.1), respectiv în Fig.4.35 pentru materialul compozit pe bază de rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu 83% puzderii de cânepă sub formă de praf fin (Proba I.A.2).

Rezultatele încercărilor la încovoiere pentru materialele de la proba I.A.1 și I.A.2 sunt prezentate în tabelele 4.5 respectiv 4.6.



Fig.4.34. Epruvete pentru încercarea la încovoiere realizate din materialul compozit pe bază de 17% rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu 83% puzderii de cânepă sub formă de praf grosier (PCPG), proba I.A.1

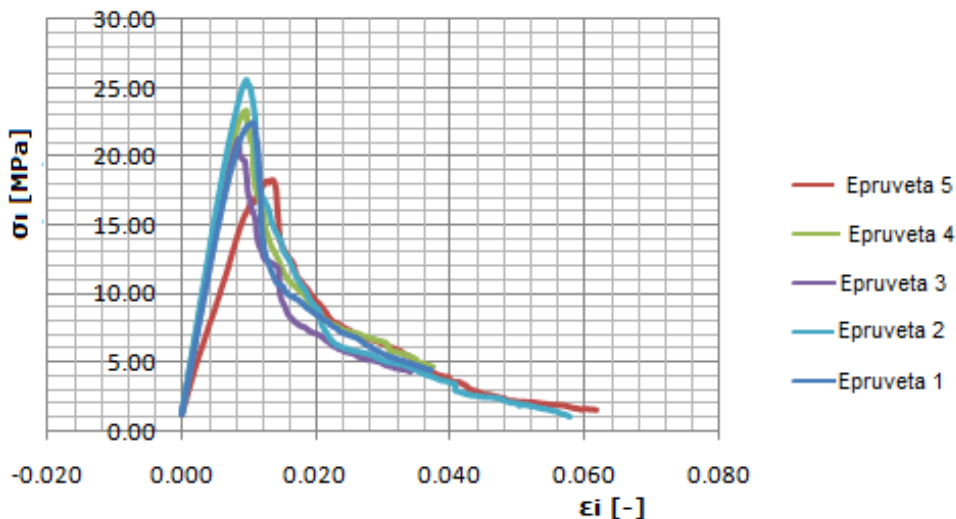


Fig.4.35 Epruvete pentru încercarea la încovoiere realizate din materialul compozit pe bază de 17% rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu 83% puzderii de cânepă sub formă de praf fin (PCPF), Proba I.A.2

Tabelul 4.5. Proprietățile la încovoiere ale materialului biocompozit din proba I.A.1(83%PCPG+17% rășină melamino-formaldehidică)

Nr epruvetă Proba I.A.1	Săgeata maximă la încovoiere D_{max} [mm]	Forța max P_{max} [N]	Rezistența la încovoiere $\sigma_{i max}$ [MPa]
1	1.06	19.67	22.42
2	0.88	21.72	25.63
3	0.76	18.52	21.3
4	0.88	19.42	23.31
5	1.15	15.47	18.26
Valori medii	0.94	18.96	22.18

Curbele caracteristice la încovoiere $\sigma_i - \epsilon_i$ corespunzătoare epruvetelor din proba I.A.1 (83% puzderii praf grosier) sunt prezentate în figura 4.36.

Fig. 4.36. Curbele caracteristice $\sigma_i - \epsilon_i$ corespunzătoare epruvetelor din proba I.A.1 (83%PCPG+17% rășină melamino-formaldehidică)

Rezultatele testelor la încovoiere sunt prezentate în tabelul 4.6

Tabelul 4.6. Proprietățile la încovoiere ale materialului biocompozit din proba I.A.2 (83%PCPF+7% rășini melamino-formaldehidice)

Nr epruvetă Proba I.A.2	Săgeata maximă la încovoiere D_{max} [mm]	Forța max P_{max} [N]	Rezistența la încovoiere $\sigma_{i max}$ [MPa]
1	1.05	18.33	24.38
2	1.13	21.44	30.66
3	1.15	21.25	29.11
4	1.17	21.85	28.4
5	1.12	15.41	16.95
6	1.06	23.69	31.98
Valori medii	1.11	20.32	26.91

Curbele caracteristice la încovoiere $\sigma_i - \varepsilon_i$ corespunzătoare epruvetelor din proba I.A.2 (87%puzderii praf fin) sunt prezentate în figura 4.37.

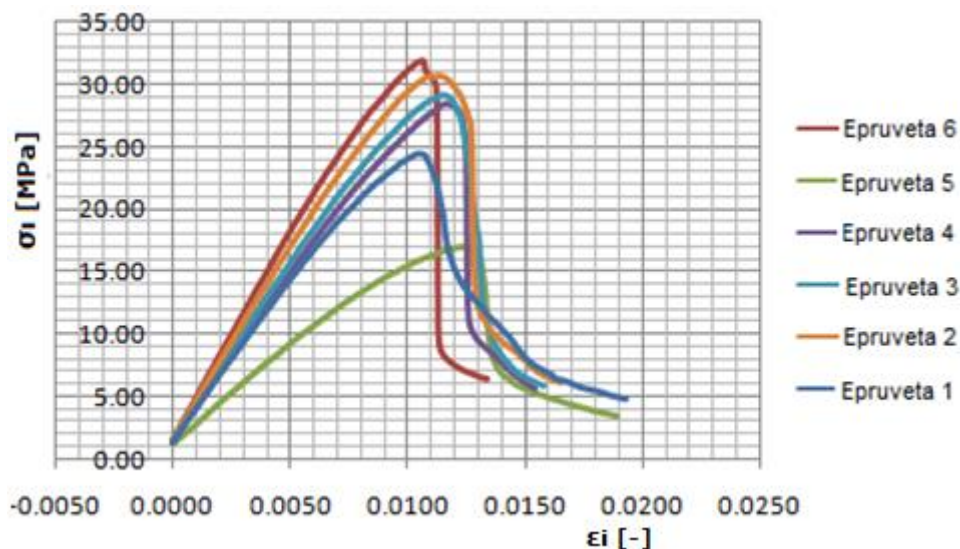


Fig.4.37. Curbele caracteristice $\sigma_i - \varepsilon_i$ corespunzătoare epruvetelor din proba I.A.2 (83%PCPF+7% rășini melamino-formaldehidice)

În Fig.4.38 este prezentat domeniul valorilor limită ale rezistenței la încovoiere pentru materialele compozite pe bază de 17% rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu 83% puzderii de cânepă sub formă de praf grosier (PCPG) respectiv 83% puzderii de cânepă sub formă de praf fin(PCPF).

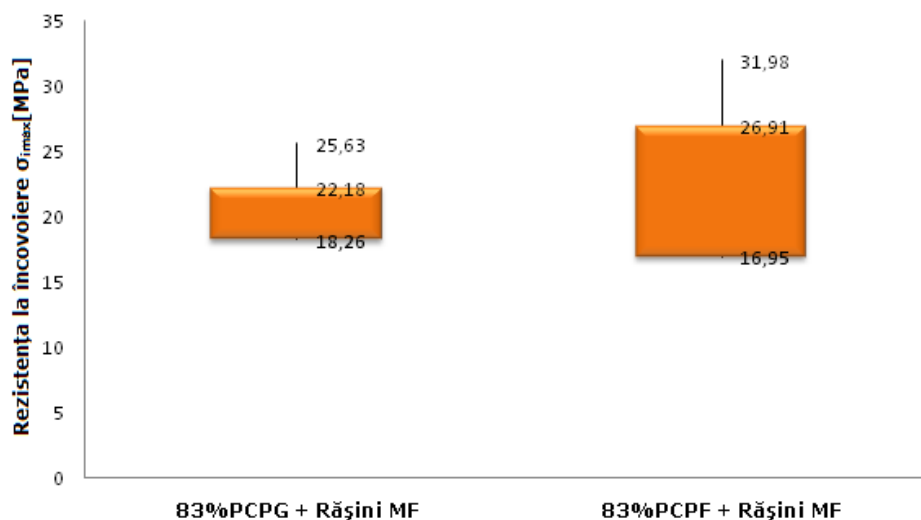


Fig.4.38. Domeniul valorilor limită ale rezistenței la încovoiere pentru materialele compozite pe bază de 17% rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu 83% puzderii de cânepă sub formă de praf grosier (PCPG).

Din analiza graficelor prezentate în Fig.4.36 și Fig.4.37 se constată că în cazul materialelor compozite pe bază de 17% rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu 83% puzderii de cânepă, Curbele caracteristice $\sigma_i - \epsilon_i$ prezintă porțiuni liniare, ceea ce arată că la începutul solicitării tensiunea variază liniar cu deformația. După atingerea valorilor maxime, tensiunile la încovoiere scad brusc, deci materialele se comportă ca și cum ar fi casante. Din Fig.4.38 se observă că pentru materialele compozite pe bază de 17% rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu 83% puzderii de cânepă sub formă de praf fin (PCPF), valoarea medie a rezistenței la încovoiere este de 26.91MPa aceasta variind între 16.95 și 31.98 MPa iar pentru materialele compozite pe bază de 17% rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu 83% puzderii de cânepă sub formă de praf grosier (PCPG) valoarea medie a rezistenței la încovoiere este de 22.18 MPa aceasta variind între 18.26 și 25.63 MPa. Se observă că materialele pe bază de rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin au rezistențele la încovoiere mai mari decât cele ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf grosier. Acest lucru se explică prin faptul că în cazul puzderiilor cu granulație fină există o mai bună omogenizare a acestora în materialul matricei (Pernevan M.S., Sârghie C., Popescu M., Marșavina L. [2012]).

Concluzii

Rezultatele obținute în acest studiu arată că materialele compozite pe bază de 17% rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu 83% puzderii de cânepă prezintă următoarele caracteristici:

- în ruptură au aspectul unor materiale fragile
- au rezistența la impact mică (2.6 kJ/m^2) motiv pentru care nu pot prelua șocuri la încovoiere
- din analiza tensiunilor la încovoiere rezultă că aceste materiale se comportă ca niște materiale casante
- se observă că proprietățile mecanice la încovoiere pentru materialul biocompozit cu granulație fină sunt mai bune decât în cazul biocompozitului cu granulație grosieră. Acest lucru se explică prin faptul că în cazul biocompozitului de la proba I.A.2 cu granulație fină există o omogenizare mai bună a elementului de ranforsare în masa matricei, ceea ce determină o aderență mai bună a matricei la elementul de ranforsare.

Proprietăți fizico-mecanice ale biocompozitelor pe bază de rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu 87% puzderii de cânepă

Materialele biocompozite formate din puzderii de cânepă și rășini melamino-formaldehidice au fost realizate la SC ICECON SA București. S-au realizat două variante de plăci tip PAL (Fig. 4.7) cu dimensiunile de 500x500x5mm cu puzderii nemăcinate (proba I.B.1) și cu puzderii măcinate (proba I.B.2) astfel încât să fie acoperite mai multe domenii de utilizare, ca de exemplu:

- în domeniul construcțiilor pentru realizarea de panouri pentru placare pereți interiori, de finisaj, pentru fețe de uși interioare în medii cu aceeași temperatură și umiditate sau cu umiditate diferită.
- în domeniul industriei mobilei.

S-au efectuat următoarele analize fizico-mecanice:

Gradul de umflare în grosime după imersia în apă s-a determinat pentru câte 3 probe din materialele I.B.1 (13%rășină melamino-formaldeh.+87%PNC) și I.B.2

(13%rășină melamino-formaldeh.+87%PMC). Rezultatele testelor sunt trecute în Tab. 4.8.

Tabelul 4.8. Gradul de umflare în grosime a biocompozitelor cu 87% puzderii cânepă și 13% rășină melamino-formaldehidică (probele I.B1-puzderii cânepă nemăcinată - PNC) și I.B2-puzderii cânepă măcinată - PMC)

Număr probă	Nr epruvetă	Umflare în grosime G_t [%]
I.B1 (13%rășină melamino-formaldeh.+87%PNC)	1	38.4
	2	43.1
	3	45.5
Valori medii		42.3
I.B.2 (13%rășină melamino-formaldeh.+87%PMC)	1	39.3
	2	41.8
	3	37.1
Valori medii		39.4

Din analiza rezultatelor prezentate în tabelele 4.3 și 4.8 se poate face o comparație cu privire la gradul de umflare în grosime a materialelor compozite pe bază de rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu puzderii de cânepă (Fig.4.39)

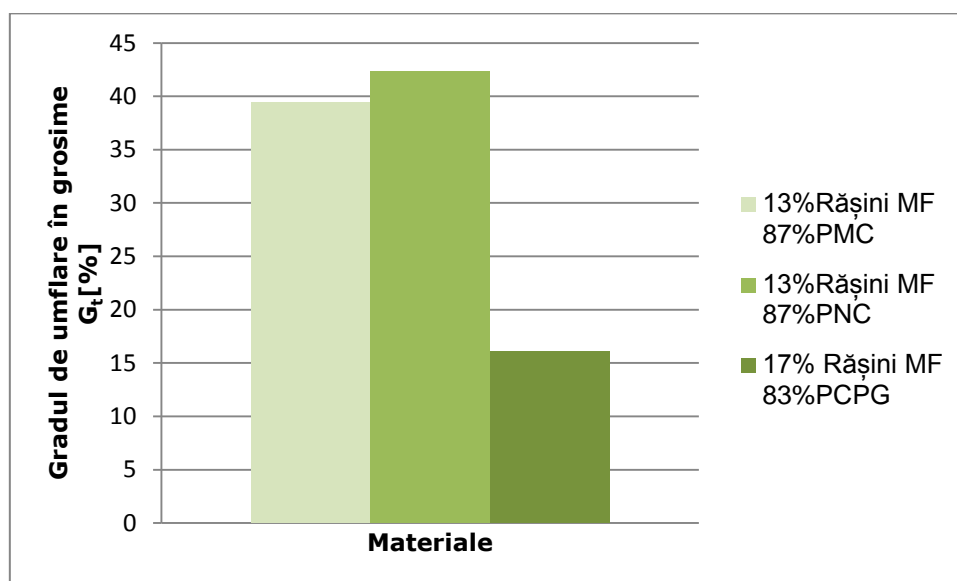


Fig.4.39. Gradul de umflare în grosime a materialelor compozite pe bază de rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu puzderii de cânepă (PMC-puzderii măcinată cânepă, PNC-puzderii nemăcinată cânepă, PCPG-puzderii cânepă praf grosier)

Concluzii

Din Fig.4.39 se observă că la aproximativ aceeași fracțiune de volum a elementului de ranforsare materialele compozite pe bază de rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu puzderii de cânepă nemăcinată sau măcinată prezintă un grad de umflare în grosime după imersia în apă cu mult mai mare față de materialele compozite ranforsate cu puzderii sub formă de praf grosier. Acest lucru se explică prin faptul că la puzderiile sub formă de praf suprafața de absorbție a apei

este mai mică decât în cazul puzderiilor măcinate sau nemăcinate. Odată cu scăderea conținutului de puzderii din compozit, gradul de umflare în grosime al materialului scade.

Testul la încovoiere – s-a efectuat pentru biocompozitul de la proba I.B.2 cu 87% puzderii de cânepă măcinate și 13% rășină melamino-formaldehidică). Aspectul epruvetelor înainte de încercare este arătat în Fig. 4.40 iar rezultatele testelor în Tab.4.9



Fig. 4.40 Epruvetele încercate la încovoiere din material biocompozit pe bază de rășină melamino-formaldehidică (13%) ranforsat cu 87% puzderii măcinate de cânepă

Tabelul 4.9. Proprietățile mecanice ale biocompozitului la încovoiere pentru proba I.B.2 (87% puzderii cânepă măcinate 13% rășini melamino-formaldehidice)

Nr epruvetă	Săgeata max D_{max} [mm]	Forța max P_{max} [N]	Rezistența la încovoiere σ_i max [MPa]	Modulul de elasticitate la încovoiere E_F [MPa]
1	2.11	126.81	18.04	2926.47
2	2.77	170.00	24.19	2929.11
3	2.56	183.62	26.30	3715.55
4	2.46	158.90	21.81	2597.29
5	2.28	131.01	17.04	2543.96
6	2.76	169.46	22.41	2829.66
Medii	2.49	156.63	21.63	2923.67

În figura 4.41 sunt prezentate curbele caracteristice la încovoiere σ_i - ε_i corespunzătoare epruvetelor din proba I.B.2.

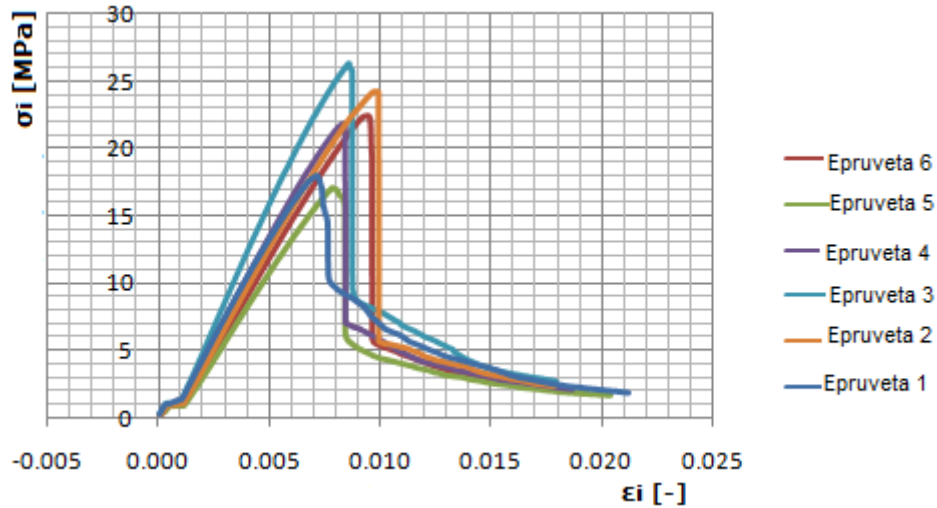


Fig. 4.41. Curbele caracteristice la încovoiere $\sigma_i - \epsilon_i$ pentru biocompozitul pe bază de 13% rășini melamino-formaldehydice ranforsat cu 87% puzderii de cânepă măcinate (proba I.B.2)

În Fig. 4.42 este prezentat domeniul valorilor limită ale rezistenței la încovoiere pentru materialele compozite pe bază de 13% rășini melamino-formaldehydice ranforsate cu 87% puzderii de cânepă sub formă de puzderii măcinate.

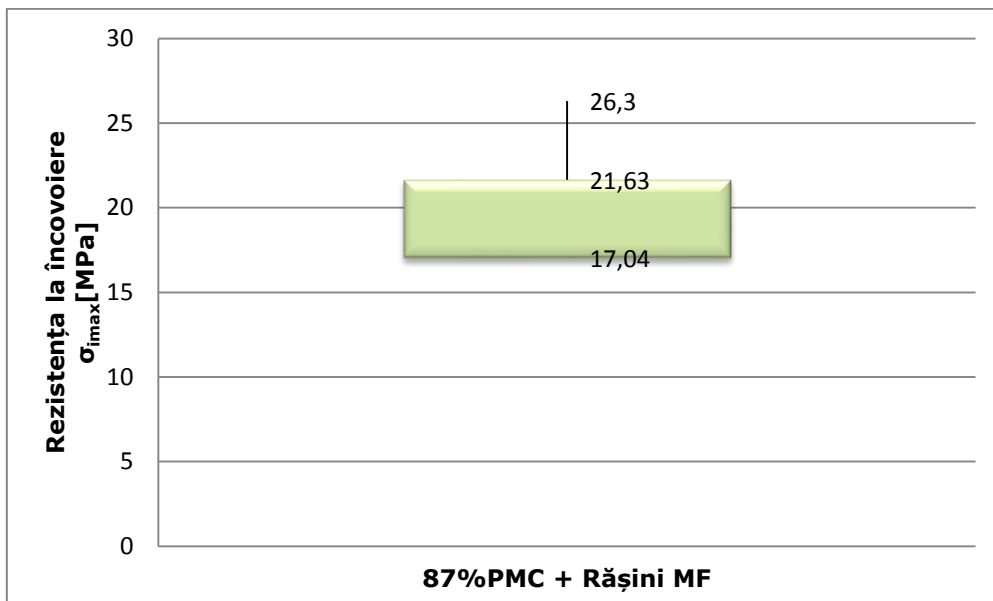


Fig. 4.42. Domeniul valorilor limită ale rezistenței la încovoiere pentru materialele compozite pe bază de 13% rășini melamino-formaldehydice ranforsate cu 87% puzderii de cânepă măcinate (PMC).

În Fig.4.43 este prezentat domeniul valorilor limită ale modului de elasticitate la încovoiere pentru materialele compozite pe bază de 13% rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu 87% puzderii de cânepă măcinate.

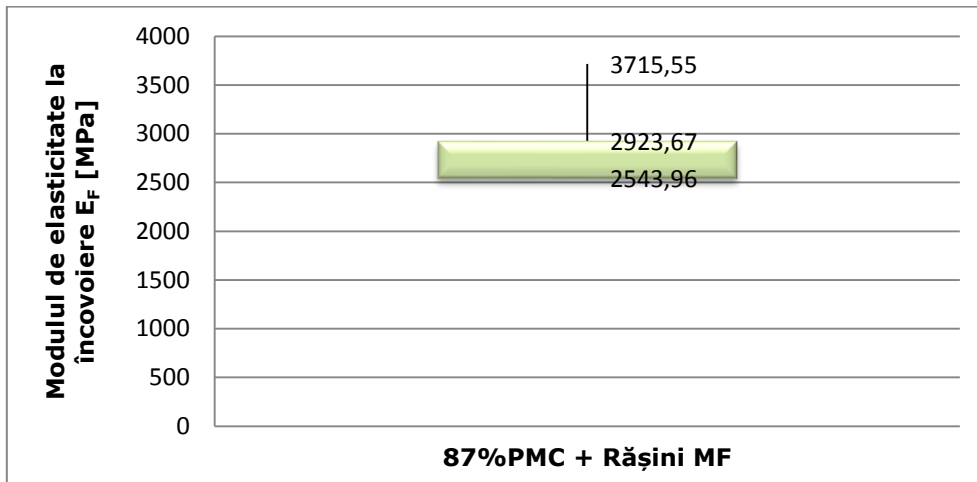


Fig. 4.43. Domeniul valorilor limită ale modului de elasticitate la încovoiere pentru materialele compozite pe bază de 13% rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu 87% puzderii de cânepă măcinate(PMC)

În Fig. 4.44. este prezentată o diagramă comparativă cu privire rezistențele la încovoiere ale materialelor compozite pe bază de rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu puzderii de cânepă (PMC-puzderii măcinate cânepă, PCPF-puzderii cânepă praf fin, PCPG-puzderii cânepă praf grosier)

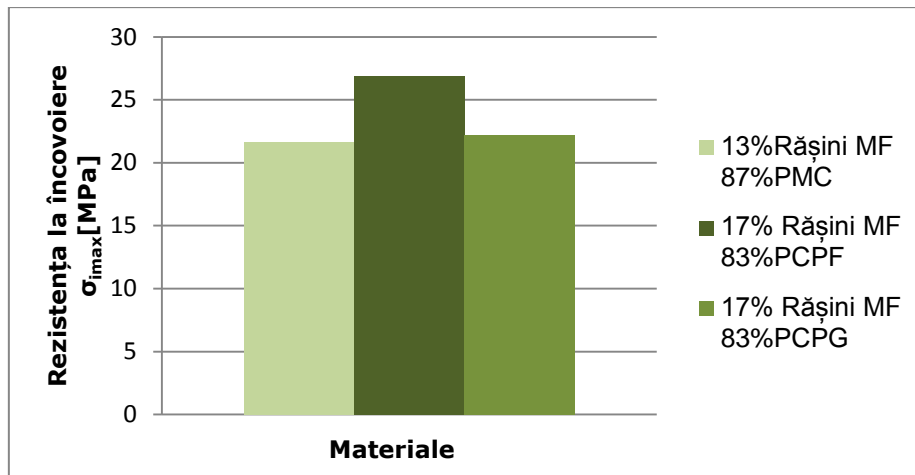


Fig. 4.44. Diagramă comparativă cu privire la rezistența la încovoiere a materialelor compozite pe bază de rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu puzderii de cânepă (PMC-puzderii măcinate cânepă, PCPF-puzderii de cânepă praf fin, PCPG-puzderii cânepă praf grosier)

Concluzii

Din analiza graficelor prezentate în Fig.4.41 se constată că în cazul materialelor compozite pe bază de 13% rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu 87% puzderii de cânepă măcinate, curbele caracteristice $\sigma_i - \varepsilon_i$ prezintă porțiuni cvasiliniare, ceea ce arată că la începutul solicitării tensiunea variază liniar cu deformația. La începutul solicitării graficele prezintă un mic palier aproape orizontal asemănător unei zone de curgere. Acest lucru poate avea explicația în faptul că la fracțiuni de volum mari, particulele de praf de puzderii de cânepă formează aglomerări în compozit, care, încă de la începutul solicitării tind să se reazeze în masa matricei acestuia. După atingerea valorilor maxime, tensiunile la încovoiere scad brusc, deci materialele se comportă ca și cum ar fi casante. Din Fig. 4.42 și 4.43 se observă că valoarea medie a rezistenței la încovoiere pentru proba I.B.2 (87% puzderii cânepă măcinate 13% rășini melamino-formaldehidice) este de 21.63MPa iar media modulului de elasticitate la încovoiere este 2923.67 MPa. Din Fig.4.44 se deduce că la aceeași fracțiune de volum a elementului de ranforsare (83%) materialele compozite pe bază de rășini melamino-formaldehidice ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin au rezistența la încovoiere mai ridicată decât cele ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf grosier. La aproximativ aceeași fracțiune de volum de puzderii 87% și 83%) materialele compozite ranforsate cu puzderii măcinate de cânepă au rezistența la încovoiere mai mică decât cele ranforsate cu puzderii sub formă de praf.

4.3.2 Proprietăți fizico-mecanice ale materialelor biocompozite pe bază de rășini termoplastice ranforsate cu deșuri lignocelulozice de in și cânepă

4.3.2.1. Proprietăți fizico-mecanice ale materialelor biocompozite termoplastice cu matricea din polipropilena și umplutura din deșuri lignocelulozice de in și cânepă

Proprietăți fizico-mecanice ale materialelor compozite pe bază de PP, agent de compatibilizare (AC) și umplutură din deșuri rezultate din prelucrarea plantelor de in și cânepă sub formă de fibre scurte de in și cânepă (FSIC) respectiv puzderii măcinate de cânepă (PMC) - probele 1FP, 1PP, 2FP, 2PP

Proprietățile fizico-mecanice ale materialelor compozite pe bază de PP și umplutură din deșuri rezultate din prelucrarea plantelor de in și cânepă sub formă de fibre scurte și puzderii măcinate de cânepă sunt prezentate în Tab. 4.10.

În Fig.4.45 este prezentat aspectul SEM în ruptură a compozitului pe bază de 60% PP ranforsat cu 40% FSIC (fibre scurte in și cânepă).

În Fig.4.46 sunt prezentate epruvetele de tip 5B folosite pentru încercarea la tracțiune a materialului compozit (de la proba 2PP) pe bază de PP ranforsat cu 20% PMC (puzderii măcinate de cânepă).

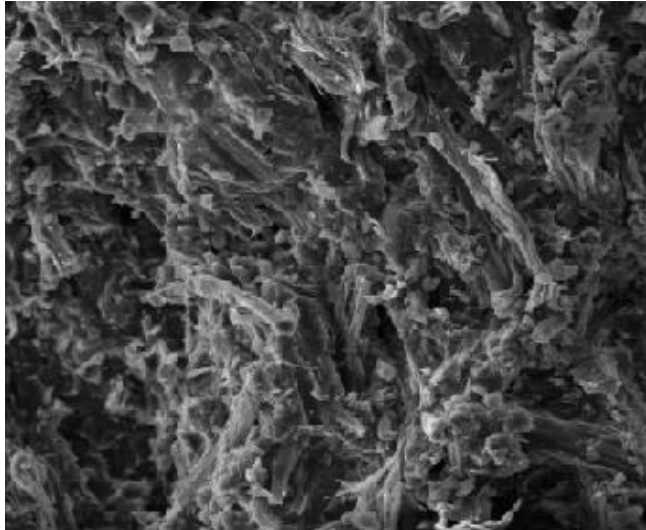


Fig. 4.45. Aspectul SEM în ruptură a compozitelor de la proba 1FP(57%PP+3%AC+ 40%FSIC)

Din aspectul SEM în ruptură a materialului compozit (proba 1FP) pe bază de polipropilenă (PP) ranforsat cu 40% fibre scurte de in și cânepă (FSIC) se observă că materialul are o structură compactă

Tabelul 4.10. Proprietatile fizico-mecanice ale compozitelor termoplastice ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă / puzderii măcinate de cânepă (materiale II.A)

Material	Modulul de elasticit. longitud E [MPa]	Rezistența la tracțiune σ_{tmax} [MPa]	Lungirea ultimă Δl_u [mm]	Energia de impact W_B [J]	Rezistența la impact a_{cu} [KJ/m ²]	Duritate Vickers HV [HV]
PP	1368.5	28.6	6.5	0.67	17.63	14.8
Proba 1PP (57%PP+3%AC +40% PMC)	1723.6	26.2	0.92	0.28	7.17	14.3
Proba 1FP (57%PP+3%AC + 40%FSIC)	1896.8	32.3	1.04	0.39	8.33	14.8
Proba 2PP (77%PP+3%AC + 20% PMC)	1413.8	27.9	1.37	0.33	8.24	14.7
Proba 2FP (77%PP+3%AC +20%FSIC)	1706.1	31.9	1.48	0.38	11.81	14.3

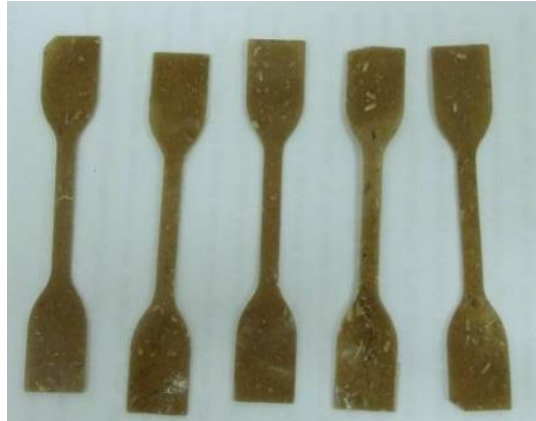


Fig.4.46 Epruvetele folosite pentru încercarea la tracțiune a materialului compozit de la proba 2PP (77%PP+3%AC+ 20% PMC) .

În Fig.4.47 este prezentată o diagramă comparativă cu privire la duritățile materialelor compozite de la probele 1FP, 1PP, 2FP, 2PP și PP.

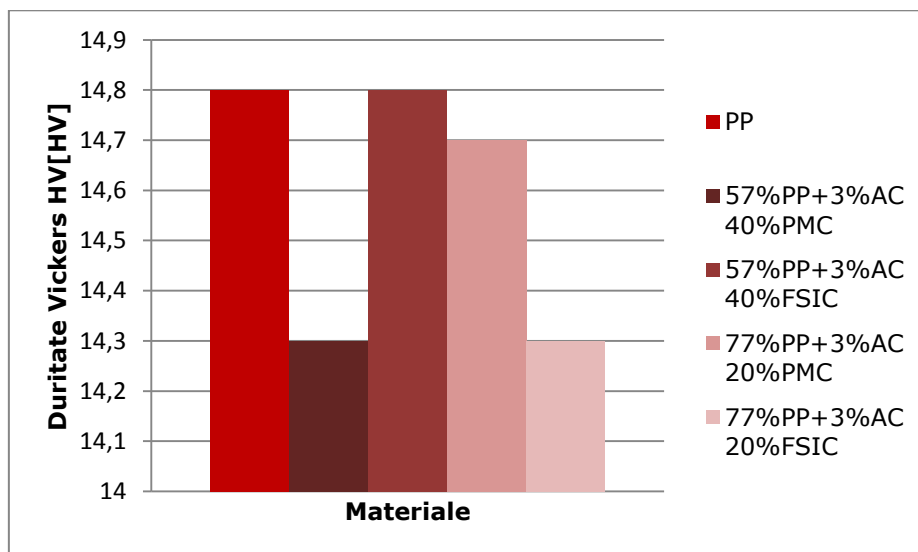


Fig.4.47. Valorile durităților materialelor compozite de la probele 1PP(57%PP+3%AC+40%PMC), 1FP(57%PP+3%AC+40%FSIC), 2PP(77%PP+3%AC+20%PMC), 2FP(77%PP+3%AC+20%FSIC) și PP(100%PP)

Din diagrama 4.47 se observă că pentru materialele compozite analizate valorile durității Vickers sunt mici, ele variind între 14.3 și 14.8HV de unde se poate trage concluzia că duritatea Vickers a acestor materiale nu variază mult de la un material la altul. Ușoarele variații ale valorilor durității Vickers pentru aceste materiale se reflectă prin scăderea durității cu creșterea conținutului de PMC și creșterea durității cu creșterea conținutului de FSIC din compozit. Acest lucru se poate explica prin structura celulară diferită a puzderiilor față de fibre.

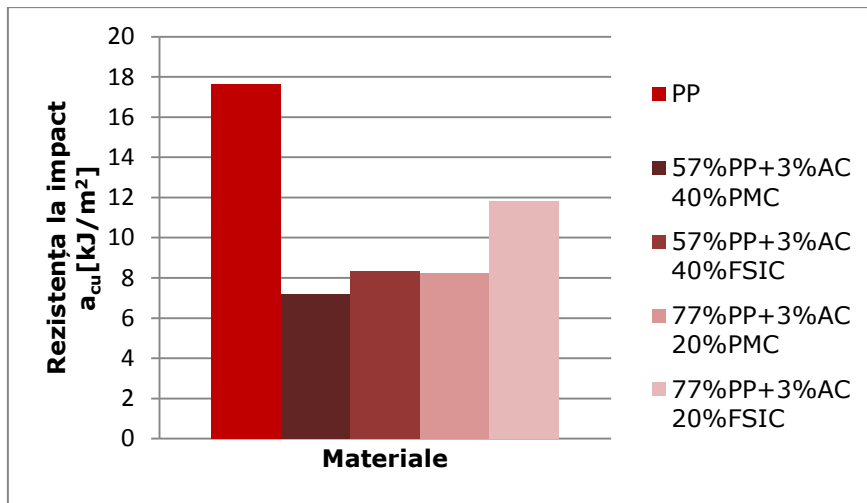


Fig.4.48. Valorile rezistențelor la impact ale materialelor compozite de la probele 1PP(57%PP+3%AC+40%PMC), 1FP(57%PP+3%AC+40%FSIC), 2PP(77%PP+3%AC+20%PMC), 2FP(77%PP+3%AC+20%FSIC) și PP(100%PP)

Din diagrama 4.48 se observă că pentru materialele compozite analizate valorile rezistențelor la impact sunt scăzute (maxim 12 kJ/m²), mai mici decât cea a polipropilenei. Materialele compozite ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă prezintă valori ale rezistențelor la impact mai ridicate decât cele ranforsate cu puzderii măcinată de cânepă.

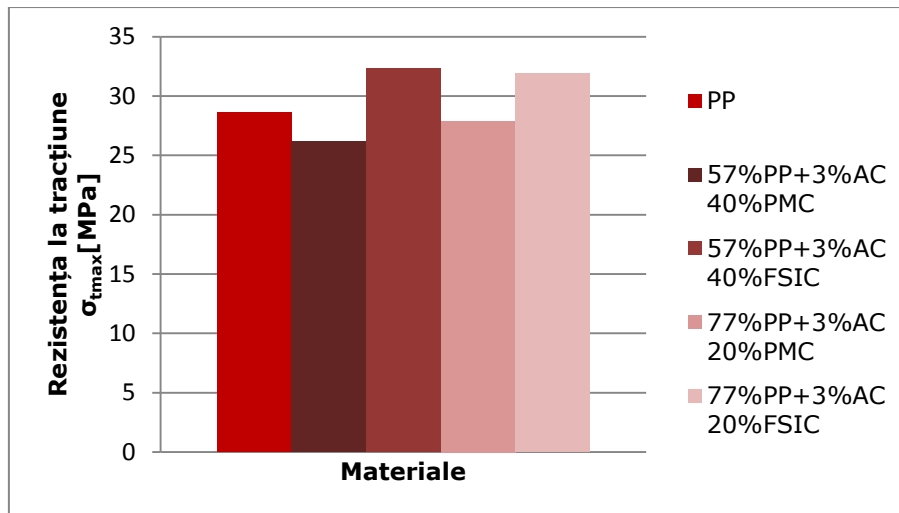


Fig.4.49. Valorile rezistențelor la tracțiune ale materialelor compozite de la probele 1PP(57%PP+3%AC+40%PMC), 1FP(57%PP+3%AC+40%FSIC), 2PP(77%PP+3%AC+20%PMC), 2FP(77%PP+3%AC+20%FSIC) și PP(100%PP)

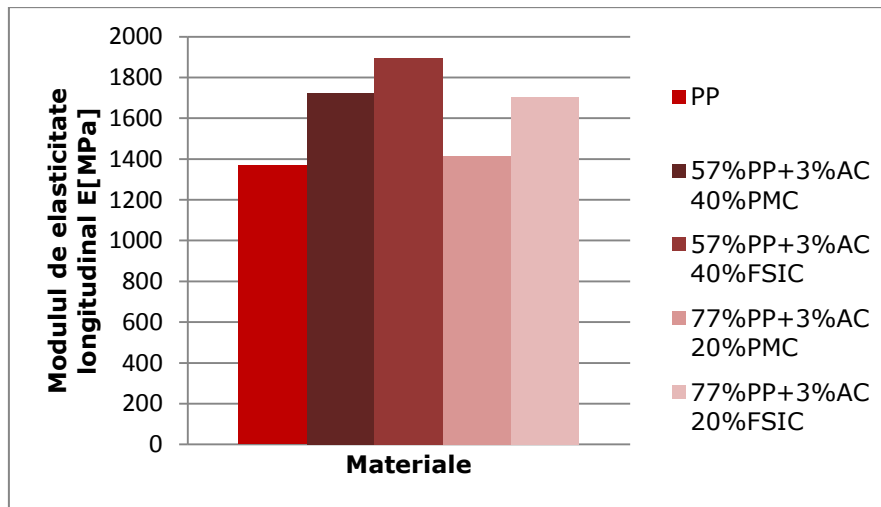


Fig.4.50. Valorile modulului de elasticitate longitudinal al materialelor compozite de la probele 1PP(57%PP+3%AC+40%PMC), 1FP(57%PP+3%AC+40%FSIC), 2PP(77%PP+3%AC+20%PMC), 2FP(77%PP+3%AC+20%FSIC) și PP(100%PP)

Din analiza datelor prezentate în Fig.4.49 se constată că valorile rezistenței la tracțiune a materialelor compozite pe bază de PP ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă este mai mare decât valorile rezistenței la tracțiune ale polipropilenei pure (28.6MPa) și a materialelor ranforsate cu puzderii măcinate. Cu creșterea fracțiunii de volum a elementelor de ranforsare (FSIC) de la 20% la 40% rezistența la tracțiune crește de la 31.9MPa la 32.3MPa.

Din analiza datelor prezentate în Fig.4.50 se constată că valorile modulului de elasticitate longitudinal a materialelor compozite pe bază de PP ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă este mai mare decât cele ale polipropilenei pure (1368MPa) și a materialelor ranforsate cu puzderii măcinate de cânepă. Cu creșterea fracțiunii de volum a elementelor de ranforsare de la 20% la 40% modulul de elasticitate longitudinal crește de la 1412MPa la 1724MPa pentru compozitele ranforsate cu PMC respectiv de la 1706MPa la 1897MPa pentru cele ranforsate cu FSIC.

Concluzii

Proprietățile fizico-mecanice pentru materialele compozite pe bază de PP ranforsate cu FSIC sunt superioare față de compozitele ranforsate cu PMC. Acest lucru se explică prin faptul că puzderiile de cânepă au un conținut ridicat de lignină, iar lignina aderă greu la rășina polimerică. Duritatea compozitelor este joasă, ea variază puțin cu fracțiunea de volum a elementelor de ranforsare, rămânând aproape constantă. Se constată că odată cu creșterea fracțiunii de volum a elementelor de ranforsare, rezistența la tracțiune a acestora crește, ea fiind celei corespunzătoare PP 100%. Analiza SEM în ruptură a materialelor compozite pe bază de PP ranforsate cu FSIC arată că acestea au o structură compactă. Pe baza acestor proprietăți, materialele compozite pe bază de PP ranforsate cu FSIC pot fi utilizate la obținerea diferitelor repere pentru interioare auto.

Proprietăți fizico-mecanice ale materialelor compozite pe bază de PP ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin (PCPF) - material II.1.B

Materialele compozite analizate sunt pe bază de polipropilenă (PP) cu sau fără agent de compatibilizare (AC), ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin de lungime =13-15 μm și latimea =5-9.3 μm . Ele au fost caracterizate prin analize fizico-mecanice: duritate, teste la impact, teste la tracțiune, teste la încovoiere. Caracteristicile fizico-mecanice ale compozitelor (materialele II.1.B.) cu și fără agent de compatibilizare sunt prezentate în tabelul 4.11. În Fig.4.51 sunt prezentate epruvetele testate la tracțiune de la probele P3 și P4 din aceste materiale.



a) Biocompozit proba P4

b) biocompozit proba P3

Fig.4.51. Epruvete încercate la tracțiune pentru biocompozitele a) Proba P4 (77%PP J 700 + 3%AC + 20%PCPF); și b) Proba P3 (57% PP J 700 +3%AC + 40%PCPF)

În Fig.4.52 sunt prezentate epruvetele testate la încovoiere din materialul de la proba P3.



Fig.4.52. Epruvete încercate la încovoiere pentru materialul P3(57% PP J 700 + 3% PP-MA + 40% PCPF)

Tabelul 4.11. Caracteristicile fizico-mecanice ale compozitelor pe bază de polipropilenă (PP) ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin (PCPF), materialele II.1.B. cu și fără agent de compatibilizare (AC)

Proba/ analiza	Duritate HV [HV]	Densitate ρ [kg/m ³]	Energia la impact W_B [J]	Rezistența la impact a_{cu} [kJ/m ²]	Modul elasticitate longitudinal E [MPa]	Rezistența la tracțiune, σ_{tmax} [MPa]	Lungirea ultimă Δl_u [mm]	Lungirea specifică la rupere ϵ_r [-]	Rezistența la încovoiere $\sigma_{i, max}$ [MPa]	Modulul de elasticitate la încovoiere E_f [MPa]
PP	14.8	946	0.67	17.6	1368.5	28.6	6.5	0.22		
P1 (37%PP J700+ 3% AC +60% PCPF)	19.57	1140	0.18	4.42	2870	28.87	0.29	0.01	51.71	3332
P2 (40% PPJ700+ 60% PCPF)	16.75	1160			1990	23.23	0.84	0.028		
P3 (57% PP J 700+ 3% AC+ 40% PCPF)	14.3		0,22	5.36	1137	32.59	1.14	0.038	40.83	1625
P4 (77%PP J 700+ 3%AC + 20% PCPF)	14.7		0.39	9.36	800	28.88	1.56	0.052	44.91	1545

În figura 4.53 sunt prezentate curbele caracteristice la tracțiune σ_t - ϵ pentru 5 epruvete confecționate din biocompozitul de la proba P3 (57%PP J 700+3%AC+40%PCPF)

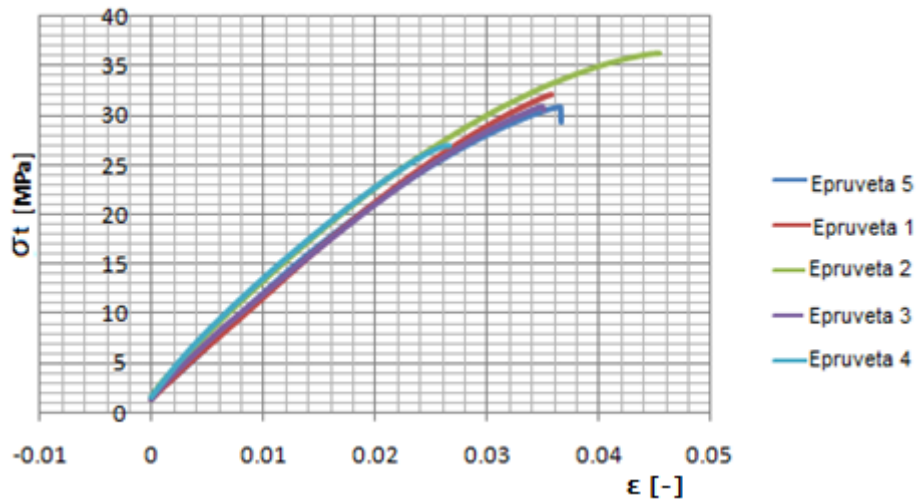


Fig.4.53. Curbele caracteristice la tracțiune σ_t - ϵ pentru biocompozitul de la proba P3 (57% PP J 700+3%AC+40%PCPF)

În figura 4.54 sunt prezentate curbele caracteristice σ_t - ϵ pentru 7 epruvete din biocompozitul de la proba P4 (77%PPJ 700+3%AC+20% PCPF).

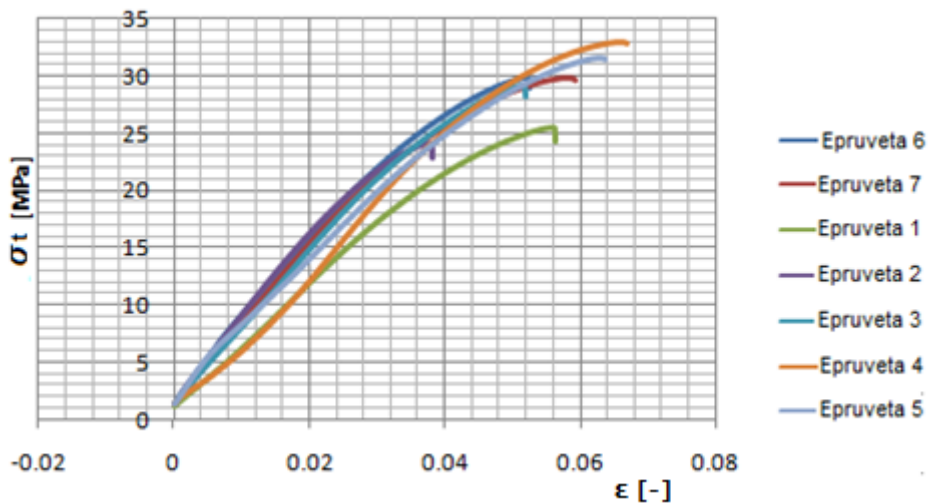


Fig. 4.54. Curbele caracteristice la tracțiune σ_t - ϵ pentru biocompozitul de la proba P4 (77%PPJ 700+3%AC+20% PCPF).

Din curbele caracteristice la tracțiune σ_t - ϵ prezentate în Fig. 4.53 și 4.54 se constată că acestea sunt curbe continue fără discontinuități până la zona de rupere. Ele prezintă porțiuni cvasiliniare, ceea ce arată că aceste materiale se comportă la tracțiune atât ca niște materiale plastice cât și ca materiale lemnoase.

În figura 4.55 sunt prezentate curbele caracteristice la încovoiere σ_i - ϵ_i pentru biocompozitul de la proba P1 (37% PP și 3% PP-MA, 60% puzderii de cânepă sub formă de praf fin).

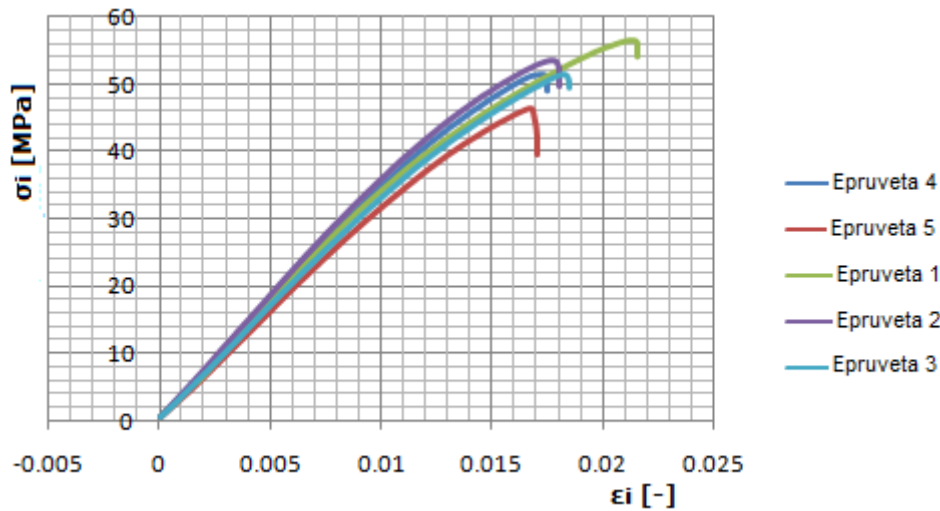


Figura 4.55. Curbele caracteristice la încovoiere $\sigma_i - \epsilon_i$ pentru biocompozitul de la proba P1 (37%PPJ 700+3%AC+60% PCPF)

În figura 4.56 sunt prezentate curbele caracteristice la încovoiere $\sigma_i - \epsilon_i$ pentru biocompozitul de la proba P3 (57% PP și 3% PP-MA, 40% puzderii de cânepă sub formă de praf fin)

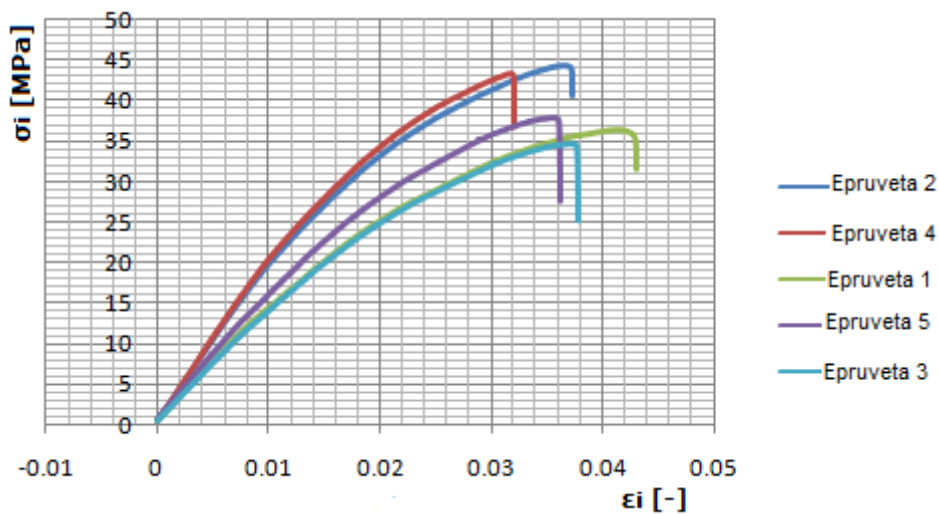


Fig. 4.56. Curbele caracteristice la încovoiere $\sigma_i - \epsilon_i$ pentru biocompozitul de la proba P3 (57%PPJ 700+3%AC+40% PCPF)

În figura 4.57 sunt prezentate curbele caracteristice $\sigma_i - \epsilon_i$ pentru biocompozitul de la proba P4 (77% PP și 3% PP-MA, 20% puzderii de cânepă sub formă de praf fin)

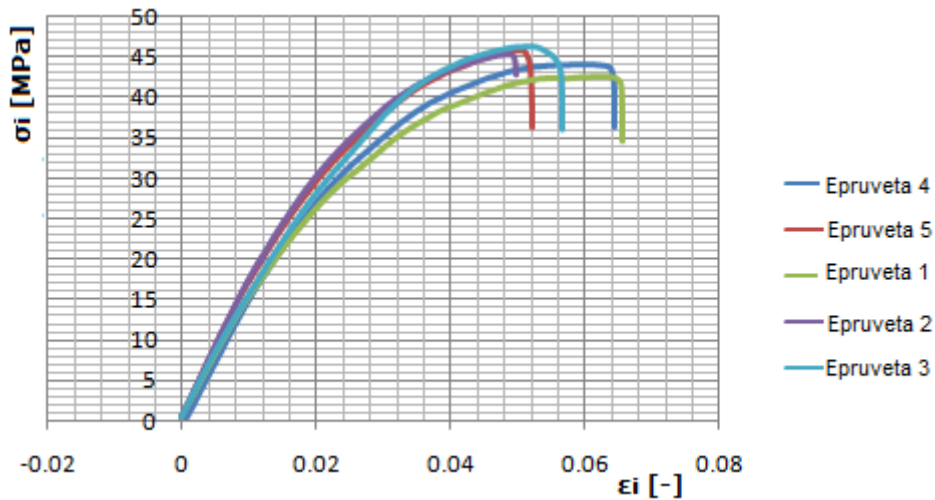


Fig. 4.57. Curbele caracteristice la încovoiere σ_i - ϵ_i pentru biocompozitul de la proba P4 (77%PPJ 700+3%AC+20% PCPF)

Din analiza graficelor din Fig. 4.55, 4.56, 4.57 se constată că la materialele cu conținut redus de puzderii curbele caracteristice σ_i - ϵ_i (Fig.4.57) prezintă zone liniare reduse, din acest punct de vedere materialele comportându-se ca niște materiale plastice. La materialele compozite cu conținut ridicat de puzderii de cânepă, curbele caracteristice σ_i - ϵ_i prezintă porțiuni liniare mai mari (Fig.4.55). Ruperea materialelor se produce brusc fără deformații plastice prealabile.

În Fig. 4.58 este prezentată o diagramă comparativă cu privire la densitățile materialelor compozite pe bază de polipropilenă ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin (probele P1, P2, P3 și P4) și a polipropilenei (proba PP).

În Fig. 4.59 este prezentată o diagramă comparativă cu privire la durițțile Vickers ale materialelor compozite pe bază de polipropilenă ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin (probele P1, P2, P3 și P4) și a polipropilenei (proba PP).

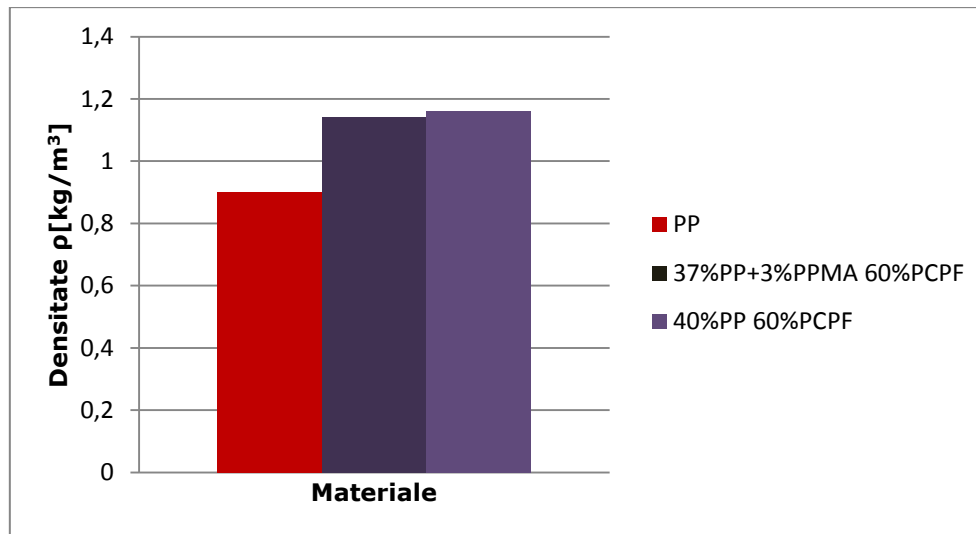


Fig.4.58. Valorile densităților materialelor compozite de la proba P1(37%PPJ 700+3%AC+60% PCPF), proba P2(60%PPJ 700 +40% PCPF) și a polipropilenei (proba PP).

Din analiza datelor din Fig.4.58 se constată că densitățile materialelor compozite pe bază de polipropilenă ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin sunt mici de valori apropiate de cea a polipropilenei.

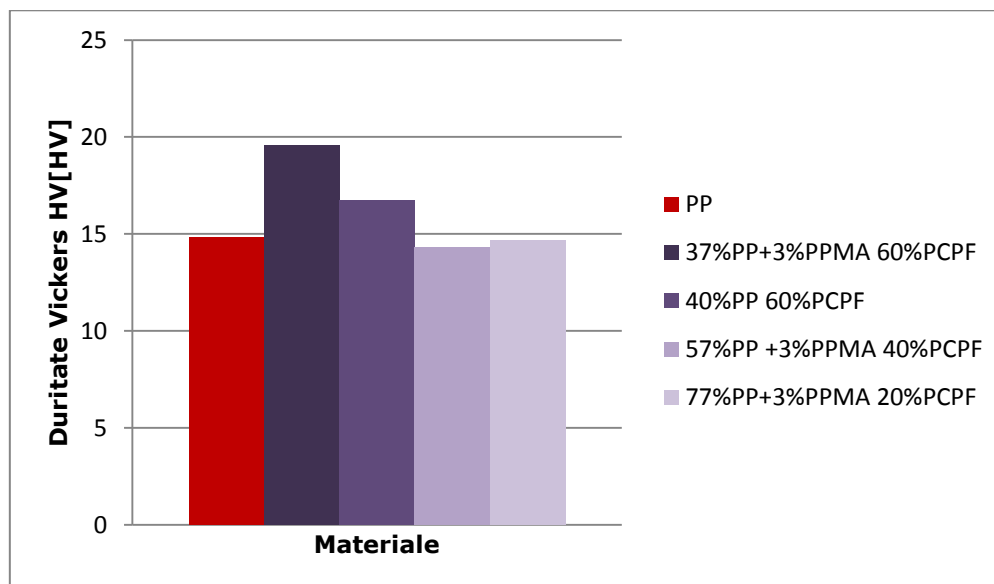


Fig.4.59. Valorile durităților Vickers ale materialelor compozite de la probele P1(37%PPJ 700+3%AC+60% PCPF), P2(40%PPJ 700 +60% PCPF), P3(57%PPJ 700 + 3%AC+40% PCPF), P4(77%PPJ 700+3%AC+20% PCPF) și a polipropilenei (proba PP).

Din analiza datelor din Fig.4.59 se constată că duritățile Vickers ale materialelor compozite pe bază de polipropilenă ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin au valori joase (15HV) aproximativ egale cu cea a polipropilenei și variază nesemnificativ cu conținutul de puzderii. Duritatea este mai mare la biocompozitul de la proba P1 cu conținut de 60% puzderii și agent de compatibilizare, de unde se poate deduce că o cantitate mică de agent de compatibilizare introdusă în material duce la creșterea durității acestuia.

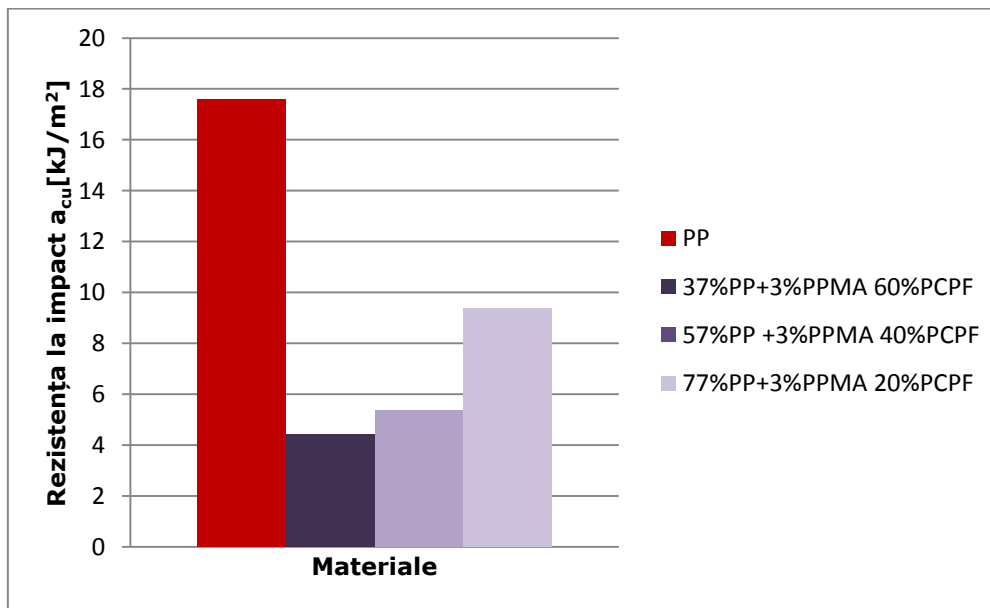


Fig.4.60. Valorile rezistențelor la impact ale materialelor compozite de la probele P1(37%PPJ 700+3%AC+60% PCPF), P2(40%PPJ 700 +60% PCPF), P3(57%PPJ 700 + 3%AC+40% PCPF), P4(77%PPJ 700+3%AC+20% PCPF) și a polipropilenei (proba PP).

Din analiza datelor din Fig. 4.60 se constată că materialele compozite pe bază de polipropilenă ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin au rezistențele la impact scăzute în comparație cu polipropilena. Valorile rezistenței la impact a compozitului scad odată cu creșterea fracțiunii de volum a puzderiilor.

În Fig.4.61 este prezentată o diagramă comparativă cu privire la duritățile Vickers ale materialelor compozite pe bază de polipropilenă ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin (probele P1, P2, P3 și P4) și a polipropilenei (proba PP).

În Fig.4.62 este prezentată o diagramă comparativă cu privire la modulele de elasticitate longitudinale ale materialelor compozite pe bază de polipropilenă ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin (probele P1, P2, P3 și P4) și a polipropilenei (proba PP).

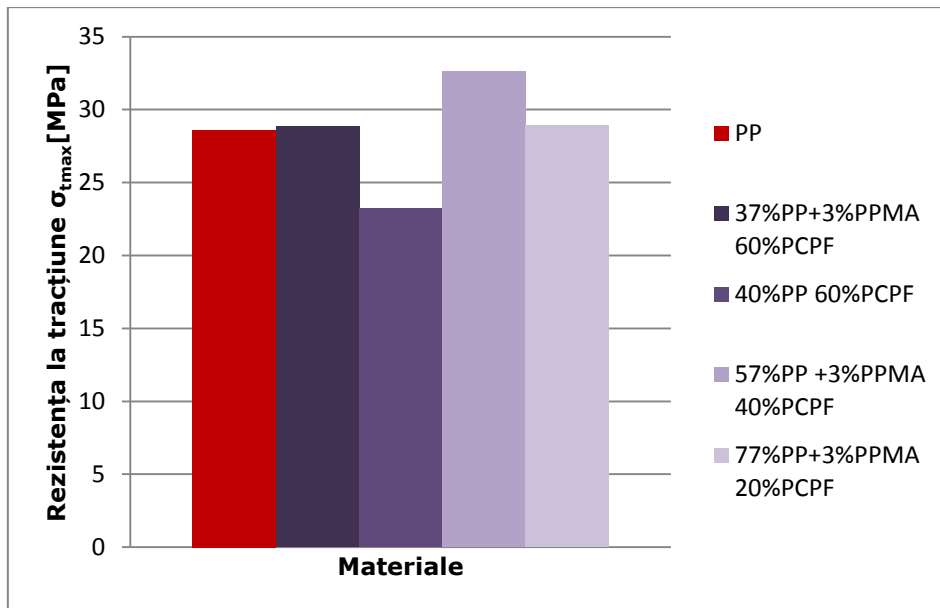


Fig.4.61. Valorile rezistențelor la tracțiune ale materialelor compozite pe bază de polipropilenă ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praful fin, probele P1(37%PPJ 700+3%AC+60% PCPF), P2(40%PPJ 700 +60% PCPF), P3(57%PPJ 700 + 3%AC+40% PCPF), P4(77%PPJ 700+3%AC+20% PCPF) și polipropilena (proba PP).

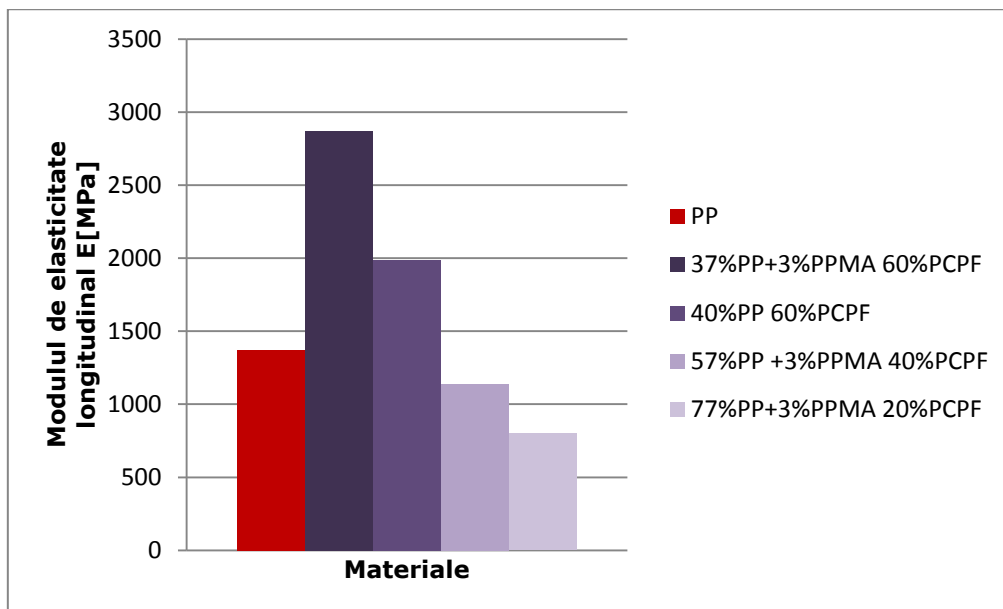


Fig.4.62. Valorile modulelor de elasticitate longitudinale ale materialelor compozite pe bază de polipropilenă ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praful fin, probele P1(37%PPJ 700+3%AC+60% PCPF), P2(40%PPJ 700 +60% PCPF), P3(57%PPJ 700 + 3%AC+40% PCPF), P4(77%PPJ 700+3%AC+20% PCPF) și polipropilena (proba PP).

Din Fig.4.61 se constată că rezistența la tracțiune a materialelor compozite pe bază de PP ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin crește cu creșterea fracțiunii de volum a puzderiilor până la o anumită valoare (40% puzderii) după care scade.

Din Fig.4.62 se observă că modulul de elasticitate longitudinal al compozitelor crește cu creșterea fracțiunii de volum a puzderiilor, deci rigiditatea compozitului crește.

În figurile 4.63 și 4.64 sunt prezentate diagrame comparative cu privire la modulele de elasticitate la încovoiere respectiv rezistențele la încovoiere pentru materialele compozite de la probele P1(37%PPJ 700+3%AC+60% PCPF), P3(57%PPJ 700 + 3%AC+40% PCPF) și P4(77%PPJ 700+3%AC+20% PCPF).

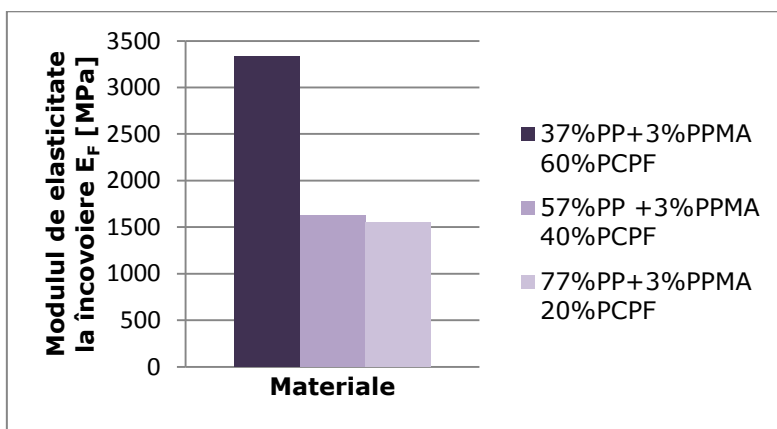


Fig.4.63. Valorile modulelor de elasticitate la încovoiere ale materialelor compozite pe bază de polipropilenă ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin, probele P1(37%PPJ 700+3%AC+60% PCPF), P2(40%PPJ 700 +60% PCPF), P3(57%PPJ 700 + 3%AC+40% PCPF), P4(77%PPJ 700+3%AC+20% PCPF) și polipropilena (proba PP).

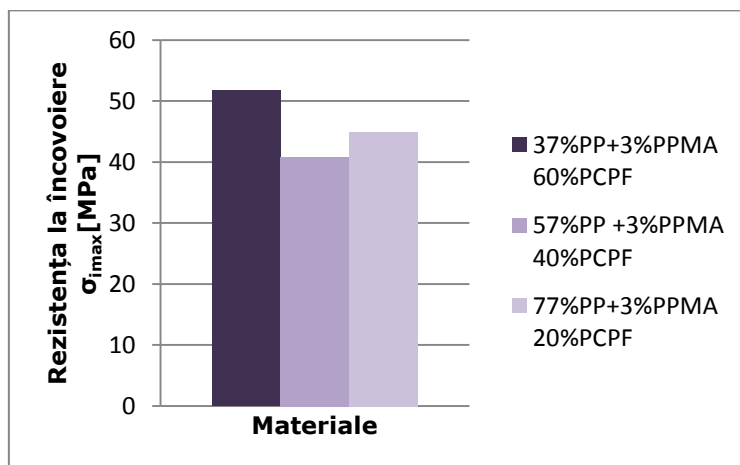


Fig.4.64. Valorile rezistențelor la încovoiere ale materialelor compozite pe bază de polipropilenă ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin, probele P1(37%PPJ 700+3%AC+60% PCPF), P2(40%PPJ 700 +60% PCPF), P3(57%PPJ 700 + 3%AC+40% PCPF), P4(77%PPJ 700+3%AC+20% PCPF) și polipropilena (proba PP).

Din analiza diagramelor prezentate în Fig. 4.63 și 4.64 se constată că la materialele compozite pe bază de PP ranforsate cu PCPF atât rezistența la încovoiere cât și modulul de elasticitate la încovoiere cresc cu creșterea fracțiunii de volum a puzderiilor de la 20% la 40%.

Concluzii:

Curbele caracteristice la tracțiune σ_t - ϵ pentru materialele compozite pe bază de polipropilenă ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin sunt curbe fără discontinuități până la zona de rupere care prezintă porțiuni cvasiliniare, ceea ce arată că aceste materiale se comportă la tracțiune atât ca materialele plastice cât și ca materialele pe bază de lemn.

Curbele caracteristice la încovoiere σ_f - ϵ_f prezintă porțiuni liniare reduse la materialele compozite cu conținut scăzut de puzderii de cânepă și porțiuni liniare mai mari la materialele compozite cu conținut ridicat de puzderii. Ruperea materialelor se produce brusc fără deformații plastice prealabile.

Duritățile Vickers ale materialelor compozite pe bază de polipropilenă ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin au valori joase (15HV) aproximativ egale cu cea a polipropilenei și variază nesemnificativ cu conținutul de puzderii. Duritatea este mai mare la biocompozitul de la proba P1 cu conținut de 60% puzderii și agent de compatibilizare, de unde se poate deduce că o cantitate mică de agent de compatibilizare introdusă în material duce la creșterea durității acestuia.

Materialele compozite pe bază de polipropilenă ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin au rezistențele la impact scăzute în comparație cu polipropilena. Valorile rezistenței la impact a compozitului scad odată cu creșterea fracțiunii de volum a puzderiilor.

Rezistența la tracțiune a materialelor compozite pe bază de PP ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin crește cu creșterea fracțiunii de volum a puzderiilor până la o anumită valoare (40% puzderii) după care scade.

Atât rezistența la încovoiere cât și modulul de elasticitate la încovoiere al acestor materiale cresc cu creșterea fracțiunii de volum a puzderiilor

4.3.2.2. Proprietăți fizico-mecanice ale materialelor biocompozite termoplastice cu matricea din polietilenă de joasă densitate (LDPE) și umplutură din puzderii de cânepă sub formă de praf fin (PCPF)

Materialele compozite au fost caracterizate prin analize structurale (SEM) și prin analize fizico-mecanice: densitate, absorbție de umiditate, rezistență la impact Charpy, duritatea materialului, comportarea la îmbătrânire, rezistența la tracțiune.

În tabelul 4.12 sunt trecute proprietățile fizico-mecanice ale materialului pe bază de LDPE ranforsat cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin (PCPF), iar în tabelul 4.13 (A, B și C) sunt prezentate caracteristicile fizico-mecanice la îmbătrânire ale materialelor pe bază de LDPE ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin.

Tabelul 4.12. Proprietățile fizico-mecanice ale materialului pe bază de LDPE ranforsat cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin (PCPF)

Proba/analiza	Densitatea ρ [kg/m ³]	Absorbția de apă c [%]	Energia la impact W_B [J]	Rezistența la impact, a_{cu} [kJ/m ²]	Modul de elasticitate longitudinal E [MPa]	Rezistența la tracțiune σ_{tmax} [MPa]
1LDPE (37% LDPE, 3% PP-MA, 60% PCPF)	1.32	0.46	0.460	12.12	648.91	13.17
2LDPE (40% LDPE, 60% PCPF)	1.31	0.43	0.402	10.52	575.76	8.43

Tabelul 4.13 (A, B și C) Caracteristicile fizico-mecanice la îmbătrânire ale materialelor pe bază de LDPE ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin (PCPF)

A. initial

Material	Energia la impact W_B [J]	Rezistența la impact, a_{cu} [kJ/m ²]	Modul de elasticitate longitudinal E [MPa]	Rezistența la tracțiune σ_{tmax} [MPa]	Lungirea ultimă Δl_u [mm]
1LDPE (37% LDPE, 3% PP-MA 60% PCPF)	0.460	12.12	648.91	14.37	2.04
2LDPE (40% LDPE, 60% PCPF)	0.402	10.52	575.76	8.43	2.47

B. dupa 300 h

Material	Energia la impact W_B [J]	Rezistența la impact, a_{cu} [kJ/m ²]	Modul de elasticitate longitudinal E [MPa]	Rezistența la tracțiune σ_{tmax} [MPa]	Lungirea ultimă Δl_u [mm]
1LDPE (37% LDPE, 3% PP-MA 60% PCPF)	0.39	10.09	645.83	14.26	1.84
2LDPE (40% LDPE, 60% PCPF)	0.374	9.257	544.51	8.35	0.84

C. după 600 h

Material	Energia la impact W_b [J]	Rezistența la impact, a_{cu} [kJ/m ²]	Modul de elasticitate longitudinal E [MPa]	Rezistența la tracțiune σ_{tmax} [MPa]	Lungimea ultimă Δl_u [mm]
1LDPE (37% LDPE, 3% PP-MA 60% PCPF)	0.26	9.79	632.58	13.65	1.84
2LDPE (40% LDPE, 60% PCPF)	0.23	6.337	509.16	8	2.27

Concluzii

Din analiza rezultatelor prezentate în tabelul 4.12 rezultă că pentru aceeași fracțiune de volum a elementului de ranforsare (60%PCPF) proprietățile mecanice ale materialului pe bază de LDPE ranforsat cu PCPF cu agent de compatibilizare (proba 1LDPE) sunt superioare proprietăților mecanice ale materialului fără agent de compatibilizare (proba 2LDPE). Modulul de elasticitate longitudinal prezintă valori joase (575-649MPa) pentru ambele tipuri de materiale deci materialele prezintă o bună deformabilitate. Rezistența la tracțiune a materialelor analizate este scăzută (8-13MPa). Se observă o scădere a caracteristicilor fizico-mecanice cu creșterea timpilor de îmbătrânire datorită degradării polimerului sintetic sub acțiunea radiațiilor ultraviolete.

4.3.2.3. Proprietăți fizico-mecanice ale unui material biocompozit termoplastic cu matricea din polietilenă de înaltă densitate (HDPE) și umplutura din puzderii de cânepă sub formă de praf fin

Testele au fost efectuate atât pe epruvete confecționate profile extrudate din material cu următoare compoziție: 75% puzderii de cânepă sub formă de praf fin ;15% măcinatură de HDPE;4% agent de cuplare antidhrida maleică; 4% pigmenți; 2% aditivi de omogenizare-lubrefiere cât și pe profile extrudate obținute din materialul respectiv.

4.3.2.3.1. Încercări mecanice efectuate pe epruvete confecționate din profilul extrudat

S-au confecționat epruvete prin decuparea profilului extrudat (Fig.4.65) pe următoarele direcții:

1. direcția longitudinală (pe lungimea profilului) – corespunde direcției de extrudare
2. direcția transversală (pe lățimea profilului) – corespunde direcției perpendiculare pe direcția de extrudare
3. direcția transversală (pe grosimea profilului) – corespunde direcției perpendiculare pe direcția de extrudare

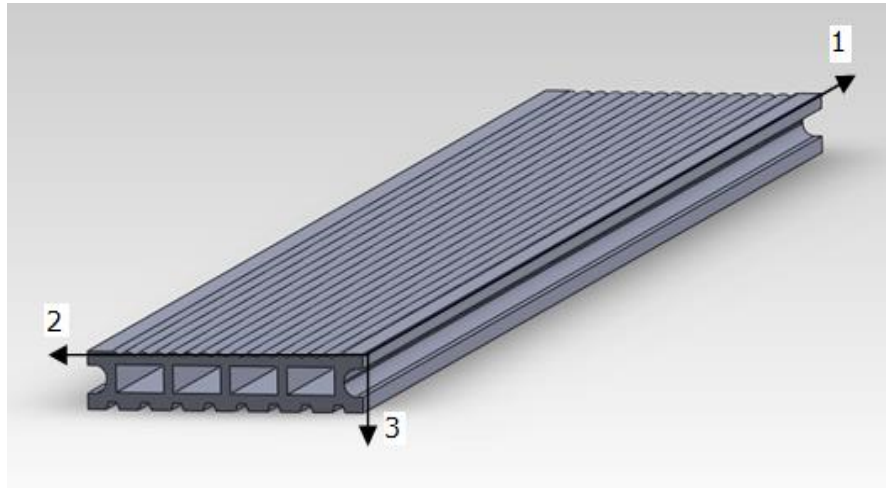


Fig.4.65 Profil extrudat din material

Încercarea la tracțiune

S-a efectuat pe un număr de cinci epruvete decupate pe direcția de extrudare (1). Valorile rezistențelor la tracțiune obținute sunt menționate în tabelul 4.14

Tabelul 4.14. Rezultatele încercărilor la tracțiune pentru materialul cu 75% puzderii de cânepă sub formă de praf fin ;15% măcinatură de HDPE;4% agent de cuplare antidhidra maleică; 4% pigmenti; 2% aditivi de omogenizare-lubrefiere

Material	Rezistența la tracțiune $\sigma_{t \max}$ [MPa]
1	12.73
2	19.71
3	19.97
4	23.31
5	30.87
Valori medii	21.31

Epruvetele folosite pentru încercarea la tracțiune pentru materialul cu 75% puzderii de cânepă sub formă de praf fin ;15% măcinatură de HDPE sunt prezentate în figura 4.66



Fig.4.66. Epruvete folosite pentru încercarea la tracțiune pentru materialul cu 75% puzderii de cânepă sub formă de praf fin ;15% măcinatură de HDPE;

Încercarea la încovoiere

Încercarea la încovoiere s-a efectuat pe 2 tipuri de epruvete: epruvete confecționate prin decuparea profilului extrudat pe direcția longitudinală (pe lungimea profilului) corespunzătoare direcției de extrudare și pe direcția transversală (pe lățimea profilului) corespunzătoare direcției perpendiculare pe direcția de extrudare. În Fig. 4.67 sunt prezentate epruvete din materialul cu 75% puzderii de cânepă sub formă de praf fin ;15% măcinatură de HDPE folosite la încercarea la încovoiere;



Fig.4.67 Epruvete folosite pentru încercarea la încovoiere pentru materialul cu 75% puzderii de cânepă sub formă de praf fin ;15% măcinatură de HDPE;

a) *încercarea la încovoiere pentru epruvete confecționate din material decupat pe direcția longitudinală 1 (pe lungimea profilului) corespunzătoare direcției de extrudare*

Rezultatele obținute pentru încercarea la încovoiere sunt prezentate în tabelul 4.15.

Tabelul 4.15. Rezultatele încercărilor la încovoiere pentru epruvete confecționate din material pe direcția longitudinală 1 pentru materialul cu 75% puzderii de cânepă sub formă de praf fin; 15% măcinatură de HDPE; 4% agent de cuplare antidhrida maleică; 4% pigmenți; 2% aditivi de omogenizare-lubrefiere

Nr epruvetă	Sageată maximă D_{max} [mm]	Forța max P_{max} [N]	Rezistența la încovoiere σ_{imax} [MPa]	Modulul de elasticitate la încovoiere E_f [MPa]
1	1.46	36.36	20.39	3000
2	1.39	29.21	18.18	2818
3	1.72	41.99	20.01	2644
4	1.45	34.32	17.52	2396
5	1.57	37.06	17.23	2323
6	1.42	29.19	17.46	2562
7	1.54	36.61	18.52	2448
8	1.63	34.32	18.22	2418
Medii	1.52	34.88	18.44	2567

Curbele caracteristice la încovoiere σ_i - ϵ_i pentru epruvetele din acest material este prezentată în figura 4.68

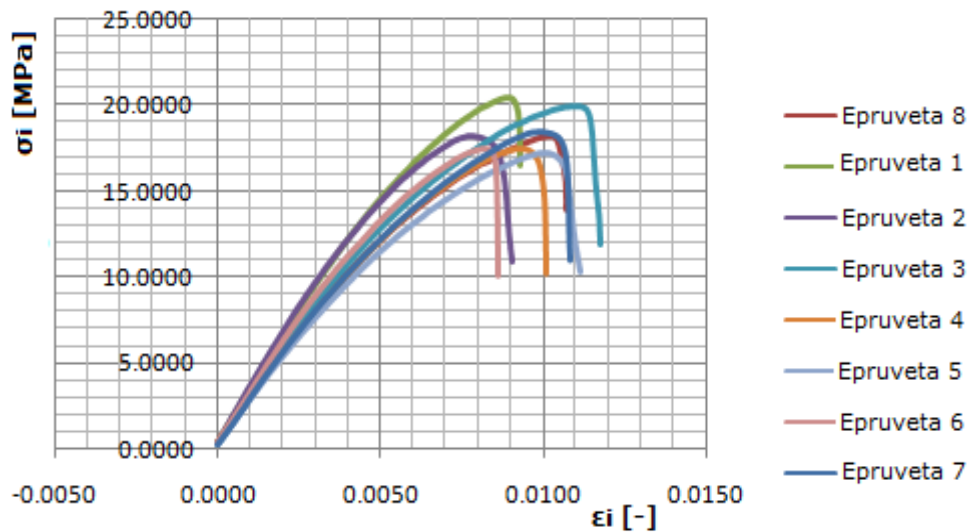


Fig.4.68. Curbele caracteristice la încovoiere σ_i - ϵ_i pentru epruvete din biocompozitul cu 75% puzderii de cânepă sub formă de praf fin; 15% măcinatură de HDPE; 4% agent de cuplare antidhrida maleică; 4% pigmenți; 2% aditivi de omogenizare-lubrefiere decupate pe direcția longitudinală 1

b) încercarea la încovoiere pentru epruvete confecționate din material decupat pe direcția transversală 2 (pe lățimea profilului)

S-au efectuat încercări la încovoiere pentru epruvete decupate pe direcția transversală 2 a profilului. Rezultatele încercărilor sunt trecute în tabelul 4.16. Curbele caracteristice la încovoiere σ_i - ϵ_i pentru epruvete confecționate din materialul decupat pe direcția transversală este prezentată în Fig.4.69

Tabelul 4.16. Rezultatele încercărilor la încovoiere pentru epruvete confecționate din material pe direcția transversală 2 a profilului pentru materialul cu 75% puzderii de cânepă sub formă de praf fin; 15% măcinatură de HDPE; 4% agent de cuplare antidhrida maleică; 4% pigmenti; 2% aditivi de omogenizare-lubrefiere

Nr epruvetă	Sageată maximă D_{max} [mm]	Forța max P_{max} [N]	Rezistența la încovoiere σ_{imax} [MPa]	Modulul de elasticitate la încovoiere E_f [MPa]
1	1.96	40.71	22.85	2903
2	1.10	29.36	14.5	2645
3	1.52	32.7	17.95	2642
4	1.97	37.31	23.34	2758
5	1.92	40.73	20.73	2388
6	1.43	38.83	19.25	2858
7	1.29	38.3	16.86	2449
8	1.94	51.57	22.34	2599
9	0.83	27.61	11.90	2229
Medii	1.55	37.45	18.85	2607

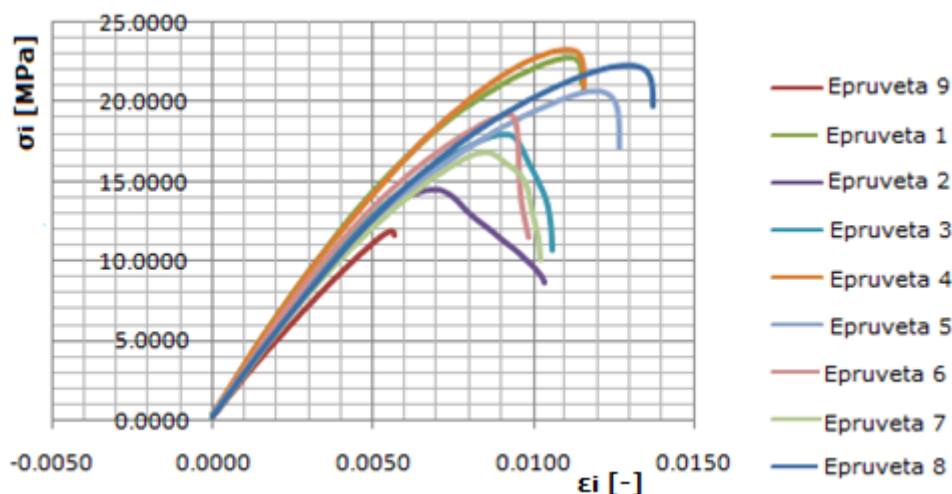


Fig.4.69. Curbele caracteristice σ_i - ϵ_i pentru epruvete din biocompozitul cu 75% puzderii de cânepă sub formă de praf fin; 15% măcinatură de PEHD; 4% agent de cuplare antidhrida maleică; 4% pigmenti; 2% aditivi de omogenizare-lubrefiere pe direcția transversală 2

Concluzii

Curbele caracteristice σ_i - ϵ_i sunt curbe fără discontinuități până în zona de rupere a materialului. Diferențele dintre valorile tensiunilor la încovoiere pentru epruvetele din material pe direcția longitudinală și cele pe direcția transversală sunt mici.

Încercarea la compresiune

Încercările la compresiune s-au efectuat conform ASTM 695-02/2002 pentru epruvete confecționate din material decupat pe trei direcții: pe direcția de extrudare (longitudinală 1), perpendicular pe direcția de extrudare (transversală 2 pe lățime) perpendicular pe direcția de extrudare (transversală 3 pe grosime).

a) *încercarea la compresiune pe pentru epruvete confecționate din material decupat pe direcția longitudinală 1 (direcția de extrudare)*

S-a efectuat pe 7 epruvete. Rezultatele încercărilor sunt trecute în tabelul 4.17, iar curbele caracteristice $\sigma_c - A_c$ sunt reprezentate în Fig.4.70

Tabelul 4.17. Rezultatele încercării la compresiune pentru epruvete confecționate din material decupat pe direcția longitudinală 1 pentru materialul cu 75% puzderii de cânepă sub form de praf fin; 15% măcinatură de HDPE; 4% agent de cuplare antidhrida maleică; 4% pigmenti; 2% aditivi de omogenizare-lubrefiere (75% PCPF+ 15% HDPE+ 4%AC +4%pigmenți+ 2% aditivi de omogenizare-lubrefiere)

Epruvetă-pe direcția de extrudare	Lățimea L [mm]	Lungimea h [mm]	Grosimea l [mm]	Forța maximă F_{max} [N]	Rezistența la compresiune σ_c [MPa]	Scurtarea Δl_c [mm]	Scurtarea specifică A_c [-]
1	9.95	14.87	4.11	1806.96	44.07	0.99	0.06
2	10.24	15.160	3.87	1187.82	29.93	0.73	0.06
3	10.15	14.97	3.62	1108.42	30.14	0.88	0.051
4	9.880	14.350	4.00	1319.27	33.37	0.84	0.059
5	10.000	14.970	3.95	1258.47	31.83	0.76	0.059
6	10.000	14.650	3.64	1260.00	34.52	0.93	0.048
7	10.320	15.000	3.89	1633.11	40.66	0.93	0.067
Medii	10.07	14.85	3.86	1367.72	34.93	0.86	0.058

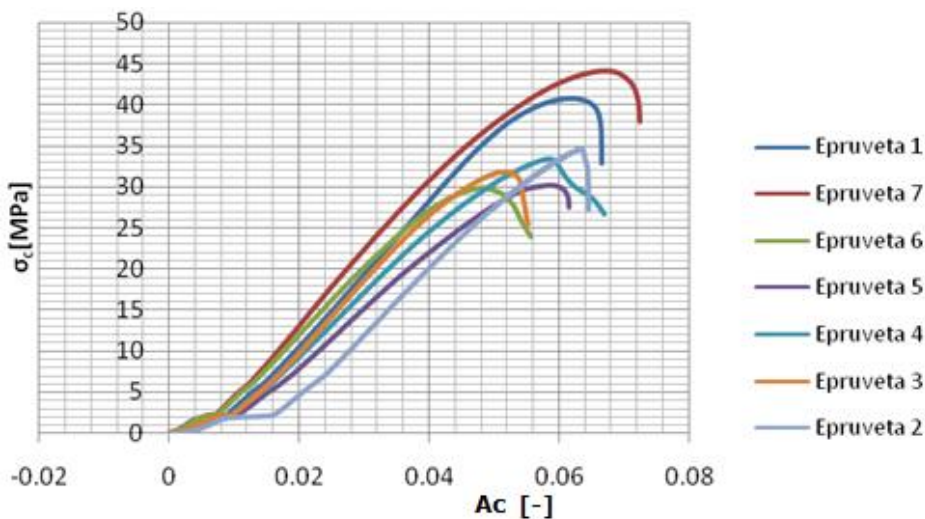


Fig. 4.70. Curbele caracteristice la compresiune $\sigma_c - A_c$ pentru epruvete confecționate din material decupat pe direcția longitudinală 1 (pe lungimea profilului)

b) *încercarea la compresiune pentru epruvete confecționate din material decupat pe direcția transversală 2 (pe lățimea profilului)*

S-a efectuat pe 7 epruvete. Rezultatele încercărilor sunt trecute în Tab. 4.18

Tabelul 4.18. Rezultatele încercării la compresiune pe pentru epruvete confecționate din material decupat pe direcția transversală 2 (pe lățimea profilului) pentru materialul cu 75% PCPF+ 15% HDPE+ 4%AC +4%pigmenți+ 2% aditivi de omogenizare-lubrefiere

Epruvetă (perpendicular pe direcția de extrudare-pe lățime)	Lățimea L [mm]	Lungimea h [mm]	Grosimea l [mm]	Forța maximă F_{max} [N]	Rezistența la compresiune σ_c [MPa]	Scurtarea Δl_c [mm]	Scurtarea specifică A_c [-]
1	9.98	14.95	4.06	1363.97	33.55	0.65	0.044
2	10.20	15.17	4.03	1698.61	41.27	0.80	0.053
3	10.02	15.16	4.07	2299.79	56.34	0.89	0.059
4	10.03	15.08	4.04	1868.51	45.96	0.75	0.050
5	10.02	15.15	4.11	1215.77	29.42	0.62	0.041
6	9.97	15.02	4.03	1841.53	45.67	0.71	0.048
7	9.98	15.03	3.96	1158.4	29.30	0.66	0.044
Medii	10.02	15.08	4.04	1635.22	40.21	0.72	0.048

Curbele caracteristice la compresiune $\sigma_c - A_c$ pentru epruvete confecționate din material decupat pe direcția transversală 2 sunt reprezentate în Fig.4.71.

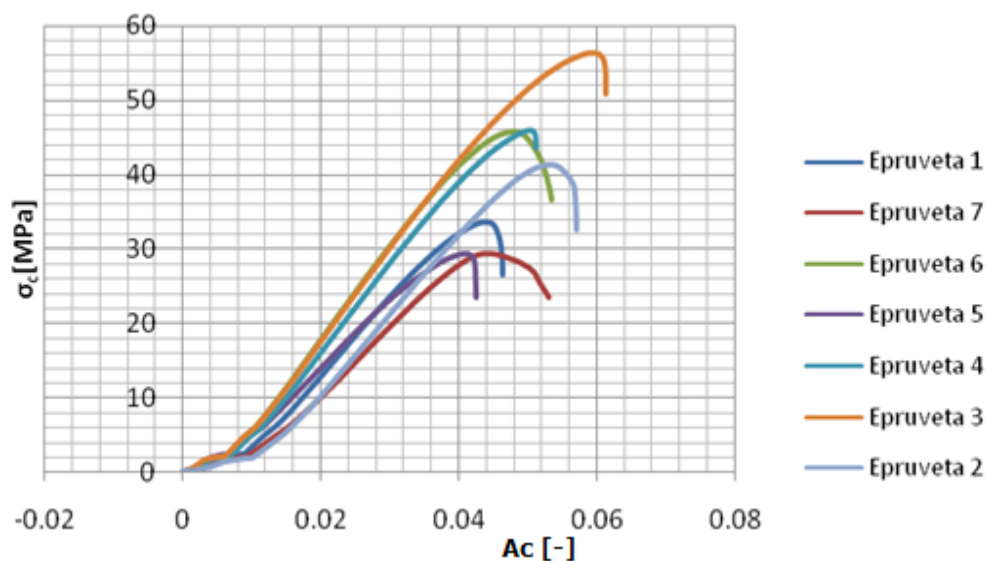


Fig. 4.71. Curbele caracteristice la compresiune $\sigma_c - A_c$ pentru epruvete confecționate din material decupat pe direcția transversală 2 (pe lățimea profilului)

b) încercarea la compresiune pentru epruvete confecționate din material decupat pe direcție transversală 3 (pe grosimea profilului)

S-au efectuat pe 3 epruvete. Rezultatele încercărilor sunt trecute în Tab.4.19

Tabelul 4.19. Rezultatele încercării la compresiune pentru epruvete confecționate din material decupat pe direcția transversală 3 (pe grosimea profilului) pentru materialul cu 75% PCPF+ 15% HDPE+ 4%AC +4%pigmenți+ 2% aditivi de omogenizare-lubrefiere

Epruvetă (perpe ndicular pe direcția de extrudare- pe grosime)	Lățimea L [mm]	Lungimea h [mm]	Grosimea l [mm]	Forța maximă F_{max} [N]	Rezistența la compresiune σ_c [MPa]	Scurtarea Δl_c [mm]	Scurtarea specifică A_c [-]
1	9.98	9.40	3.96	1004.917	25.42	0.76	0.081
2	10.110	9.330	4.010	1300.62	31.99	0.89	0.096
3	10.050	9.260	4.070	1360.03	33.18	0.89	0.096
4	9.970	8.670	3.970	1097.36	27.65	0.63	0.073
Medii	10.02	9.16	4.00	1190.73	29.56	0.79	0.086

Curbele caracteristice la compresiune $\sigma_c - A_c$ pentru materialul decupat pe direcția transversală 2 sunt reprezentate în Fig.4.72.

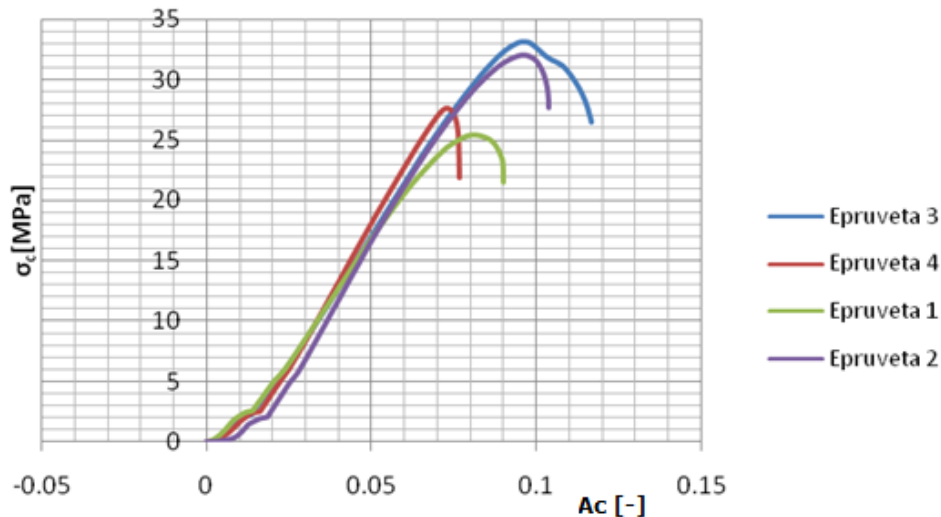


Fig.4.72. Curbele caracteristice la compresiune $\sigma_c - A_c$ pentru epruvete confecționate din material decupat pe direcție transversală 3 (pe grosimea profilului)

Din analiza curbelor caracteristice la compresiune $\sigma_c - A_c$ se constată că la începutul solicitării acestea prezintă un palier în care scurtările cresc fără o creștere semnificativă a tensiunilor. Acest fenomen se poate explica prin faptul că la materialele cu conținut ridicat de puzderii, acestea pot forma aglomerări de particule, care, la începutul solicitării materialului tind să se rearanjeze în matricea compozitului fără eforturi mari. În Fig. 4.73 este prezentat un grafic comparativ cu valorile rezistențelor la compresiune pentru cele trei tipuri de epruvete la compresiune confecționate din material decupat pe lungimea, lățimea și grosimea profilului pentru materialul cu 75% puzderii de cânepă sub formă de praf fin; 15% măcinătură de HDPE; 4% agent de cuplare antidhrida maleică; 4% pigmenți; 2% aditivi de omogenizare-lubrefiere

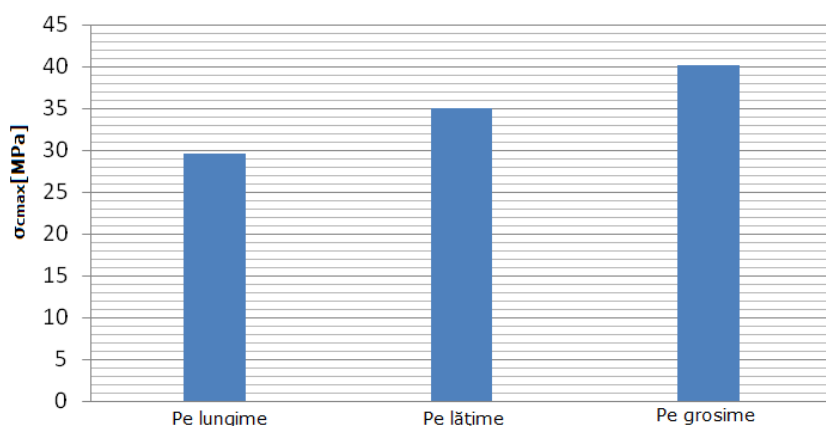


Fig.4.73. Valorile rezistențelor la compresiune pentru cele trei tipuri de epruvete confecționate din material decupat pe lungimea, lățimea și grosimea profilului pentru materialul cu 75% PCPF+ 15% HDPE+ 4%AC +4%pigmenți+ 2% aditivi de omogenizare-lubrefiere

Din diagrama din Fig.4.73 se constată că pentru materialul compozit cu 75% puzderii de cânepă sub formă de praf fin; 15% măcinatură de HDPE; 4% agent de cuplare antidhrida maleică; 4% pigmenti; 2% aditivi de omogenizare-lubrefiere valorile rezistențelor la compresiune pentru epruvetele confecționate pe trei direcții perpendiculare ale materialului sunt diferite, cu diferențe mici între acestea.

4.3.2.3.2. Încercări fizico-mecanice efectuate pe profilul extrudat

Analize fizice ale plăcilor

S-au efectuat următoarele analize fizice asupra plăcilor de profil extrudat (fig. 4.65): umflarea în grosime după imersia în apă; absorbția de apă; densitatea materialului compozit. Rezultatele încercărilor sunt trecute în tabelul 4.17.

Tabelul 4.17. Umflarea în grosime la imersia în apă la 20°C timp de 24 ore și absorbția de umiditate a epruvetelor confecționate din plăcile compozite pe bază de HDPE ranforsate cu 75% puzderii de cânepă sub formă de praf fin

Proba	Grosimea Inițială, t ₁ [mm]	Grosimea după imersie t ₂ [mm]	Umflarea în grosime G _i [%]	Masa inițială m ₁ [g]	Masa după imersie, m ₂ [g]	Absorbție de apă c [%]	Densit. ρ [kg/m ³]
P1.1	26.43	26.52	0.34	45.79	46.87	2.30	1160
P1.2	26.44	26.58	0.53	46.99	48.06	2.26	1100
P1.3	26.42	26.56	0.53	47.18	48.29	2.35	1120
P1.4	26.42	26.58	0.53	48.29	49.41	2.31	1090
P1.5	26.42	26.56	0.53	46.59	47.67	2.30	1150
Valori medii	26.43	26.56	0.49	46.97	48.06	2.30	1120

(P1.1-P1.5) = profile compozite din material cu 75% PCPF; 15% HDPE; 4% agent de cuplare antidhrida maleică; 4% pigmenti; 2% aditivi de omogenizare-lubrefiere

Din Tab.4.17 se observă profilele extrudate din material cu 75% PCPF; 15% HDPE; 4% agent de cuplare antidhrida maleică; 4% pigmenti; 2% aditivi de omogenizare-lubrefiere, prezintă valori ale umflării în grosime după imersia în apă <0.5% și valori ale absorbției de umiditate <2.5%.

Încercarea la încovoiere

S-au efectuat teste la încovoiere pe bucăți de profil extrudat decupate pe lățimea acestuia, fiecare având lățimea de 25mm. (Fig.4.74)

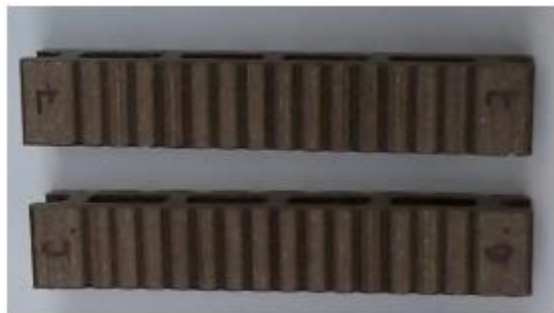


Fig. 4.74. Profil extrudat din material 75% PCPF; 15% HDPE; 4% agent de cuplare antidhrida maleică; 4% pigmenti; 2% aditivi de omogenizare-lubrefiere pentru încercarea la încovoiere

Încercările la încovoiere a profilelor s-au efectuat pe două fețe opuse (fața 1 și fața 2) ale profilului extrudat conform schemelor de încărcare din Fig.4.75 și Fig.4.76. În cadrul încercărilor s-au determinat săgețile la încovoiere D_{max} și forțele maxime la încovoiere F_{max} .

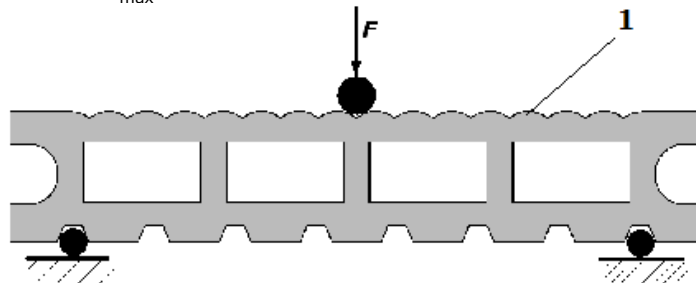


Fig.4.75 Schema de încărcare la solicitarea de încovoiere pe fața 1 a profilului extrudat

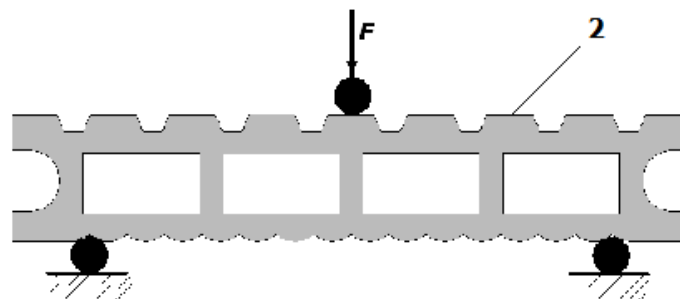


Fig.4.76 Schema de încărcare la solicitarea de încovoiere pe fața 2 a profilului extrudat

Rezultatele încercărilor la încovoiere pentru profilele solicitate la încovoiere sunt trecute în tabelele 4.18 și 4.19.

Tabelul 4.18. Rezultatele încercării la încovoiere pe direcția 1 pentru profile extrudate din material 75% PCPF; 15% HDPE; 4% agent de cuplare antidhrida maleică; 4% pigmenți; 2% aditivi de omogenizare-lubrefiere

Epruvetă direcția 1	Săgeata la încovoiere D_{max}[mm]	Forța maximă la încovoiere F_{max}[N]
6	0.85	399.61
7	1.02	373.53
8	0.93	335.08
9	0.82	370.50
10	0.89	402.06
Medii	0.90	376.16

Tabelul 4.19. Rezultatele încercării la încovoiere pe direcția 2 pentru profile extrudate din material 75% PCPF; 15% HDPE; 4% agent de cuplare antidhrida maleică; 4% pigmenți; 2% aditivi de omogenizare-lubrefiere

Epruveta direcția 2	D_{max}[mm]	F_{max}[N]
1	1.30	513.20
2	1.33	529.53
3	1.38	522.00
4	1.31	519.87
5	1.22	483.51
Medii	1.31	513.62

Din analiza rezultatelor prezentate în tabelele 4.18 și 4.19 rezultă că atât valorile forțelor maxime cât și ale săgeților maxime la încovoiere sunt diferite pe cele două direcții de solicitare ale profilului extrudat datorită faptului că forma profilului este diferită pe cele două fețe.

Concluzii

Din rezultatele experimentale cu privire la proprietățile fizico-chimice ale materialelor analizate bază rafinate că puzderiile din cânepă se pot utiliza la realizarea compozitelor care intră în componența scândurilor pentru pardoseli exterioare. Profilele compozite, care conțin componenta lemnoasă înglobată în componenta polimerică se utilizează pentru placarea teraselor exterioare, plajelor, piscinelor, pontoanelor ca și mobilier stradal (bănci, mese, jardiniere, coșuri de gunoi.)

4.4. Comparații între rezultatele teoretice și cele experimentale obținute pentru proprietățile la tracțiune ale materialelor biocompozite pe bază de rășini termoplastice ranforsate cu deșuri sub formă de fibre scurte de in și cânepă și puzderii de cânepă

Proprietățile la tracțiune ale materialelor biocompozite pe bază de polipropilenă și polietilenă de înaltă densitate ranforsate cu fibre scurte de in cânepă respectiv cu puzderii de cânepă au fost determinate atât pe cale teoretică cu ajutorul modelelor micromecanice de calcul cât și pe cale experimentală prin încercări la tracțiune. Încercările experimentale au rolul de a evidenția care dintre modelele micromecanice utilizate în calcul (Kelly Tyson, Halpin Tsai, Cox Krenkel) dau rezultate mai apropiate de cele experimentale. Diferențele dintre rezultatele teoretice obținute pe baza modelelor micromecanice și cele experimentale se pot explica prin faptul că aceste modele se bazează pe caracteristici mecanice ale matricei și fibrei care sunt date în domenii foarte largi de valori precum și prin faptul că distribuția fibrelor în interiorul matricei nu este de o formă geometrică fixă așa cum presupun modelele micromecanice. De asemenea, deșeurile de fibre liberiene utilizate ca elemente de ranforsare în materiale biocompozite au forme neregulate și geometrie diferită.

În tabelul 4.20 sunt trecute proprietățile la tracțiune ale materialelor analizate. În figurile 4.77,....,4.106 sunt reprezentate graficele comparative între valorile teoretice ale proprietăților la tracțiune determinate cu formulele lui Kelly Tyson respective Cox Krenkel și cele experimentale. În figurile 4.107,....,4.108 sunt reprezentate graficele comparative între valorile teoretice ale proprietăților la tracțiune determinate cu formulele lui Halpin Tsai și cele experimentale.

Tabelul 4.20. Proprietăți la tracțiune ale unor biocompozite pe bază de rășini termoplastice ranforsate cu deșuri de fibre liberiene

Proba (Material)	Fracțiune de volum fibră V_f [-]	Rezistența la tracțiune σ_{tmax} [MPa]	Modulul de elasticitate longitudinal E [MPa]
1FP (57%PP+3%AC+ 40%FSIC)	0.4	32.3	1896
2FP (77%PP+3%AC+ 20%FSIC)	0.2	31.9	1706.1
2PP (77%PP+3%AC+20% PMC)	0.2	27.9	1414
1PP (57%PP+3%AC+40% PMC)	0.4	26.2	1723.5
P2 (40% PPJ700+60% PCPF)	0.6	23.23	1990
P3 (57% PP J 700+ 3% AC+ 40% PCPF)	0.4	32.59	1137
P4 (77%PP J 700+ 3%AC + 20% PCPF)	0.2	28.8	800
75% PCPF + 15% HDPE + 4%AC + 4% pigmenți; 2% aditivi de omogenizare-lubrefiere	0.75	21.31	

4.4 – Comparații între rezultatele teoretice și experimentale 121

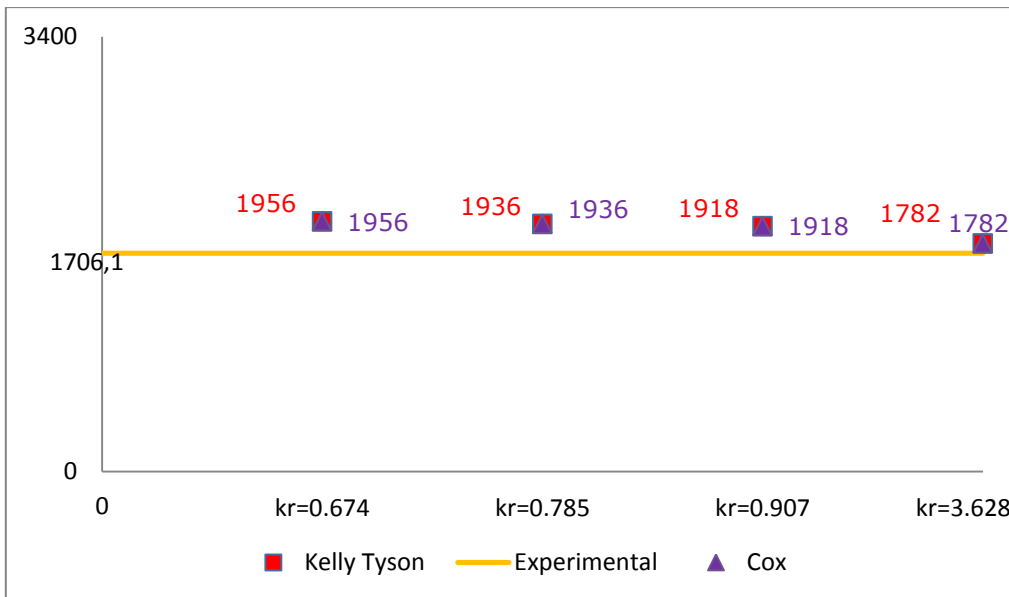


Fig.4.77. Valori teoretice și experimentale ale modului de elasticitate longitudinal pentru materialul compozit de la proba 2FP (77%PP+3%AC+20%FSIC) pentru $E_f=3 \cdot 10^4$ MPa

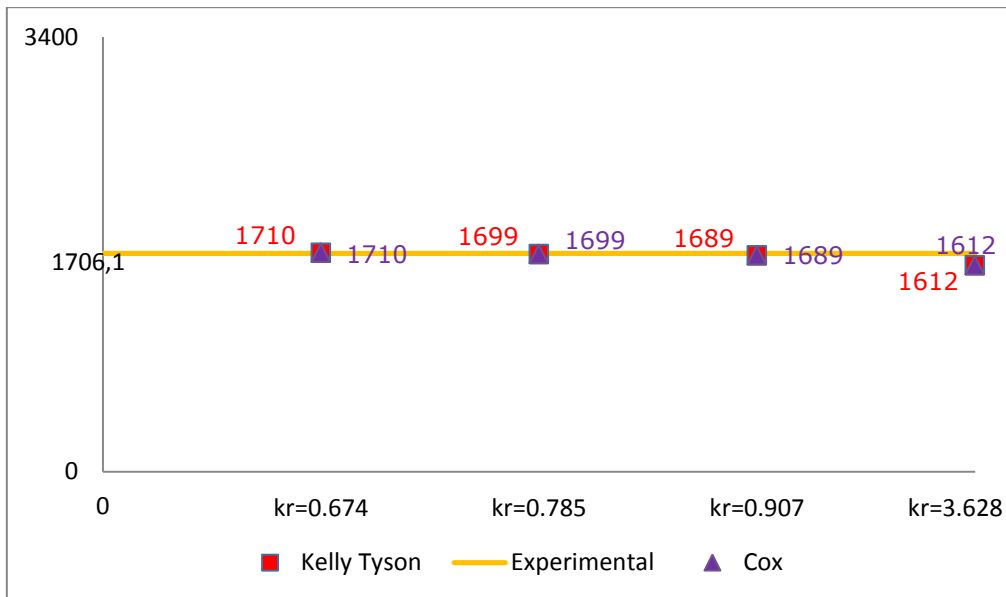


Fig.4.78. Valori teoretice și experimentale ale modului de elasticitate longitudinal pentru materialul compozit de la proba 2FP (77%PP+3%AC+20%FSIC) pentru $E_f=2 \cdot 10^4$ MPa

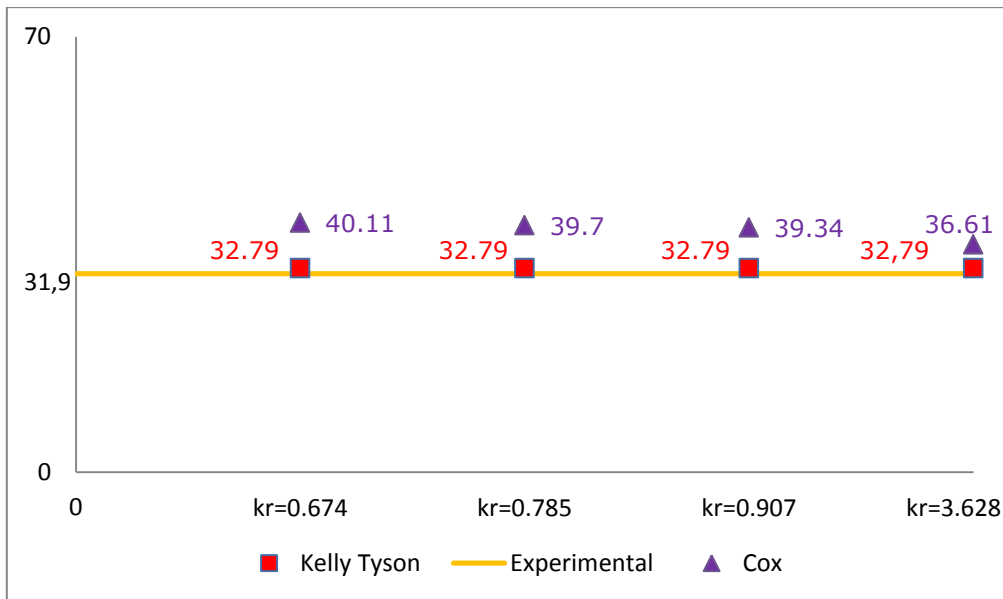


Fig.4.79. Valori teoretice și experimentale ale rezistenței la tracțiune pentru materialul compozit de la proba 2FP (77%PP+3%AC+20%FSIC) pentru $E_f=3 \cdot 10^4$ MPa

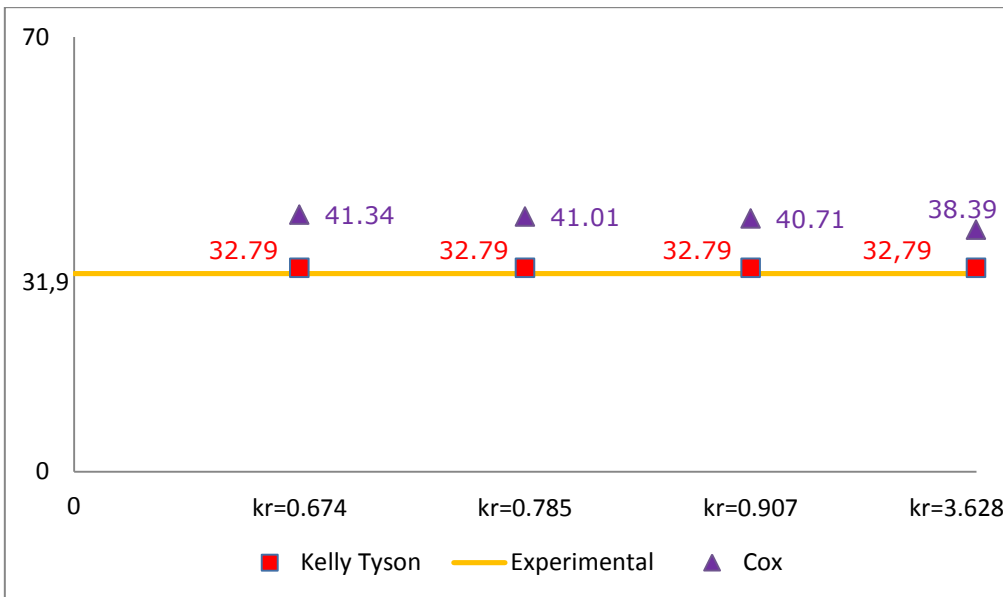


Fig.4.80. Valori teoretice și experimentale ale rezistenței la tracțiune pentru materialul compozit de la proba 2FP (77%PP+3%AC+20%FSIC) pentru $E_f=2 \cdot 10^4$ MPa

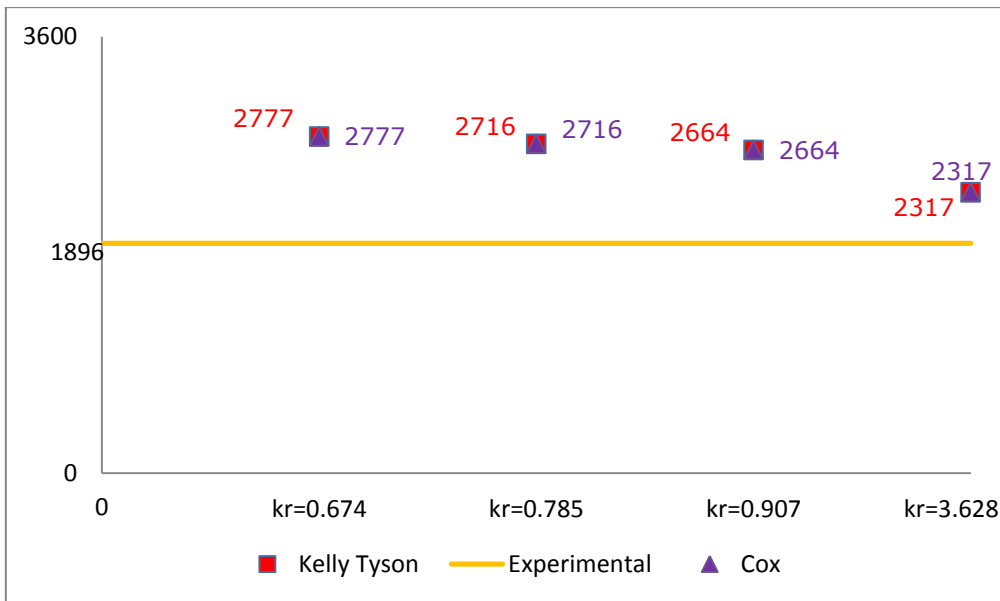


Fig.4.81. Valori teoretice și experimentale ale modulului de elasticitate longitudinal pentru materialul compozit de la proba 1FP (57%PP+3%AC+40%FSIC) pentru $E_f=3 \cdot 10^4$ MPa

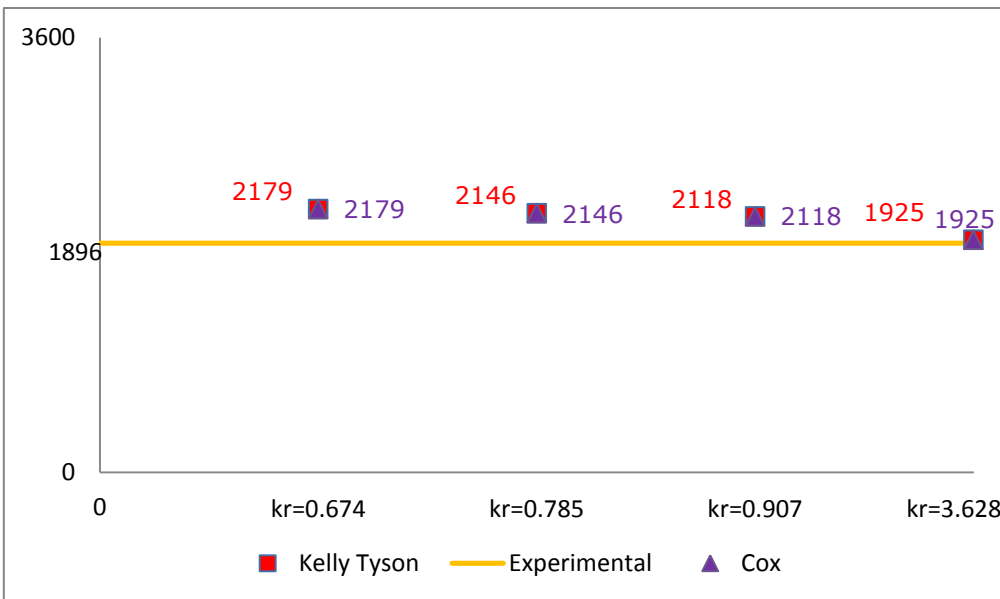


Fig.4.82. Valori teoretice și experimentale ale modulului de elasticitate longitudinal pentru materialul compozit de la proba 1FP (57%PP+3%AC+40%FSIC) pentru $E_f=2 \cdot 10^4$ MPa

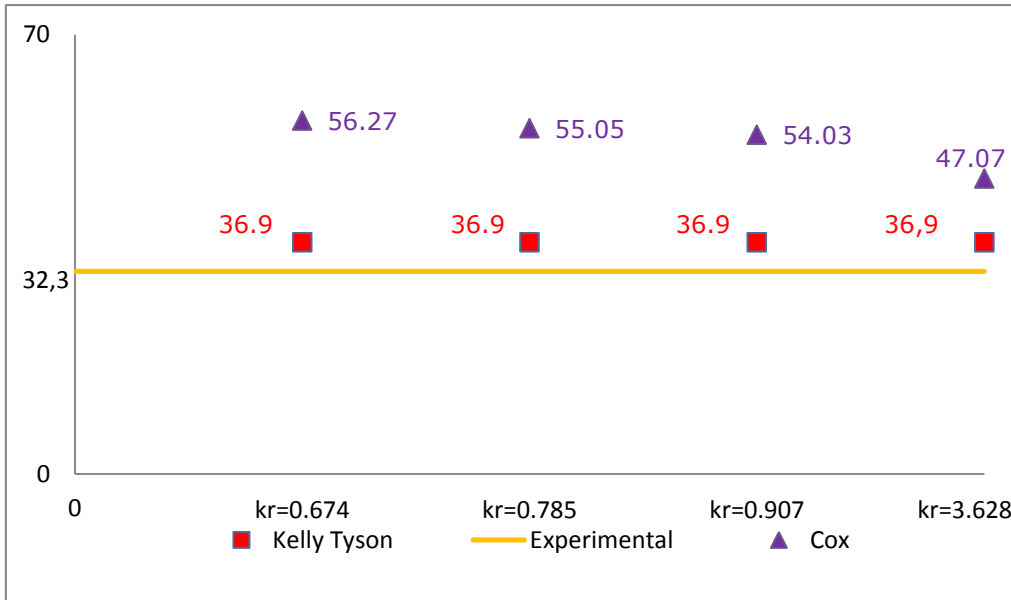


Fig.4.83. Valori teoretice și experimentale ale rezistenței la tracțiune pentru materialul compozit de la proba 1FP (57%PP+3%AC+40%FSIC) pentru $E_f=3 \cdot 10^4$ MPa

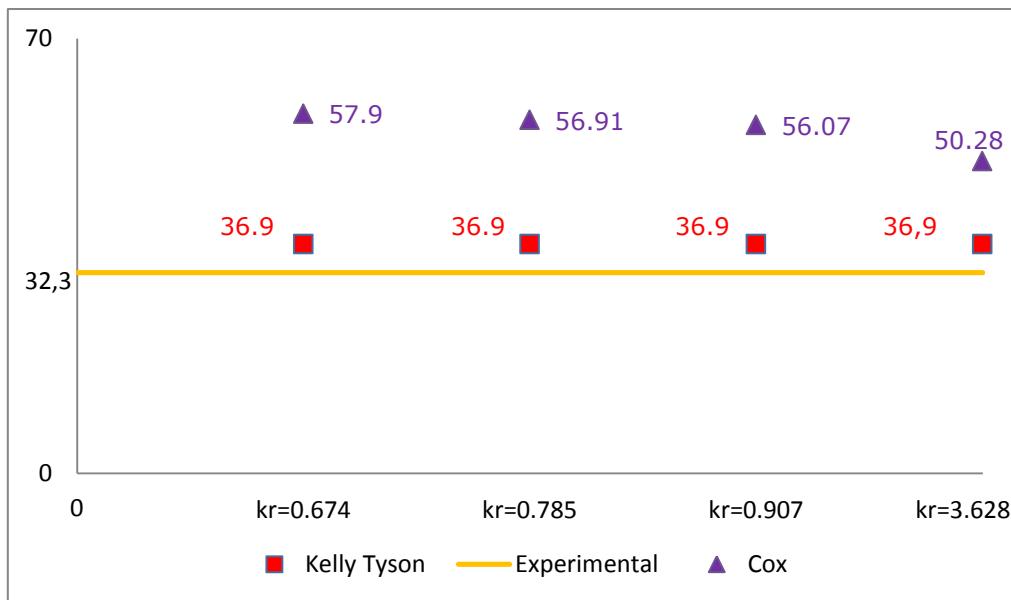


Fig.4.84. Valori teoretice și experimentale ale rezistenței la tracțiune pentru materialul compozit de la proba 1FP (57%PP+3%AC+40%FSIC) pentru $E_f=2 \cdot 10^4$ MPa

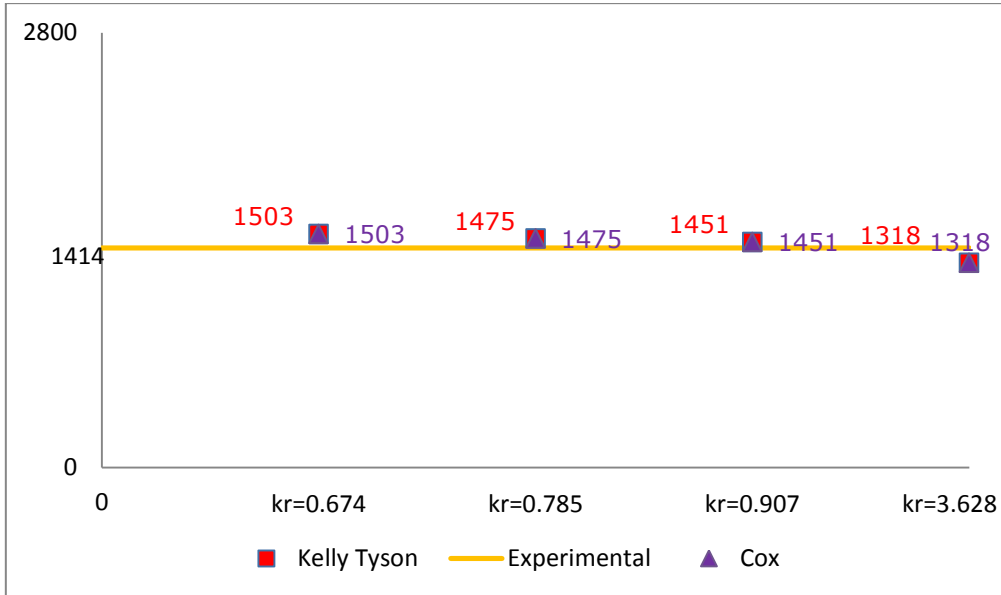


Fig.4.85. Valori teoretice și experimentale ale modulului de elasticitate longitudinal pentru materialul compozit de la proba 2PP (77%PP+3%AC+20%PMC) pentru $E_f=3 \cdot 10^4$ MPa

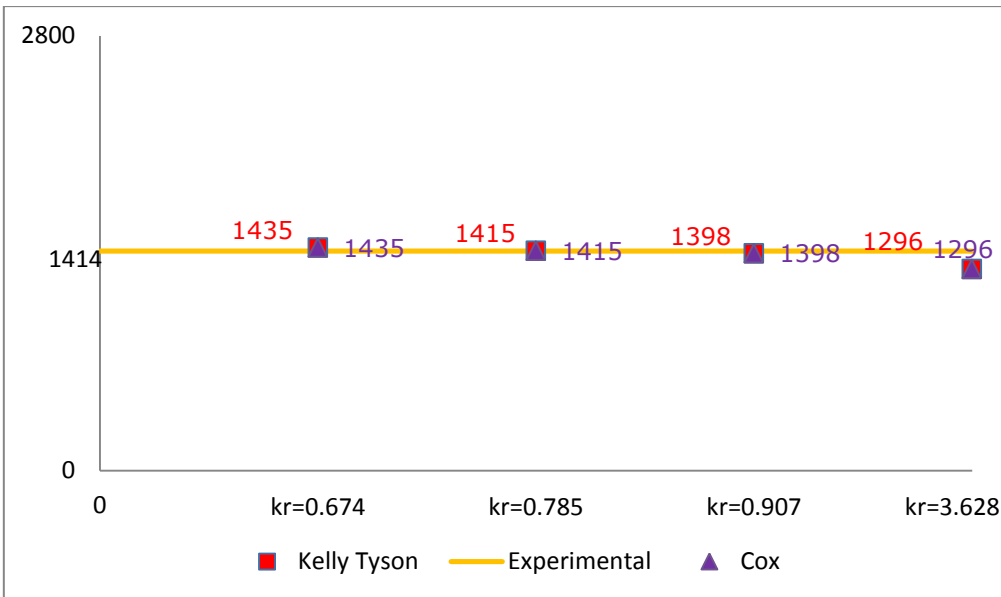


Fig.4.86. Valori teoretice și experimentale ale modulului de elasticitate longitudinal pentru materialul compozit de la proba 2PP (77%PP+3%AC+20%PMC) pentru $E_f=2 \cdot 10^4$ MPa

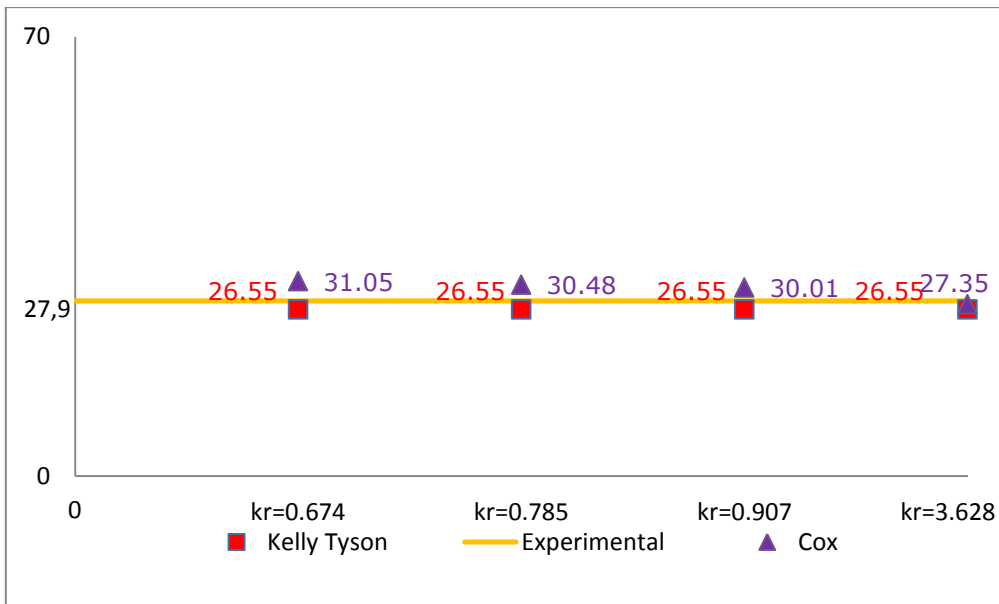


Fig.4.87. Valori teoretice și experimentale ale rezistenței la tracțiune pentru materialul compozit de la proba 2PP (77%PP+3%AC+20%PMC) pentru $E_f=3 \cdot 10^4$ MPa

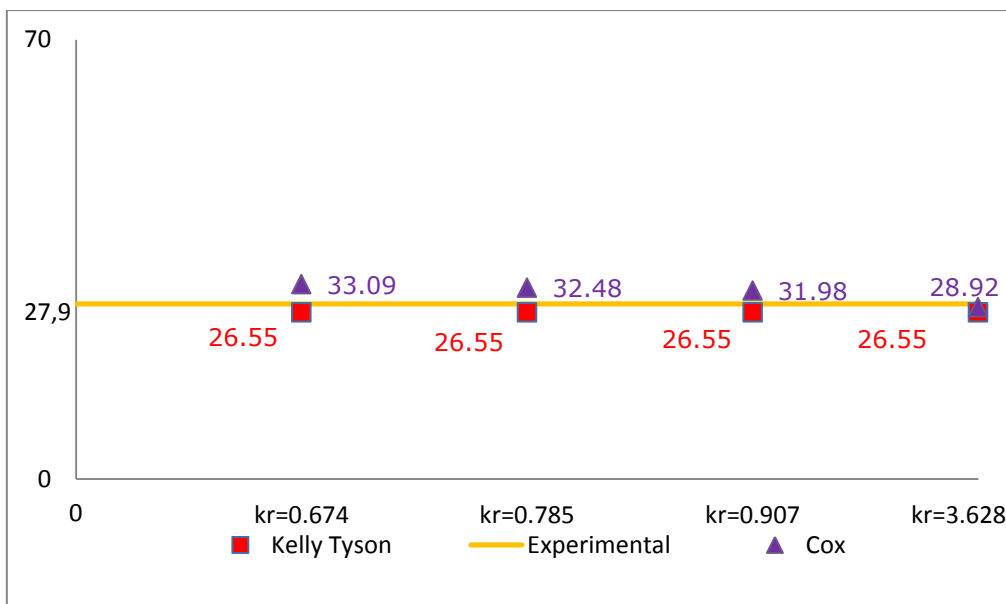


Fig.4.88. Valori teoretice și experimentale ale rezistenței la tracțiune pentru materialul compozit de la proba 2PP (77%PP+3%AC+20%PMC) pentru $E_f=2 \cdot 10^4$ MPa

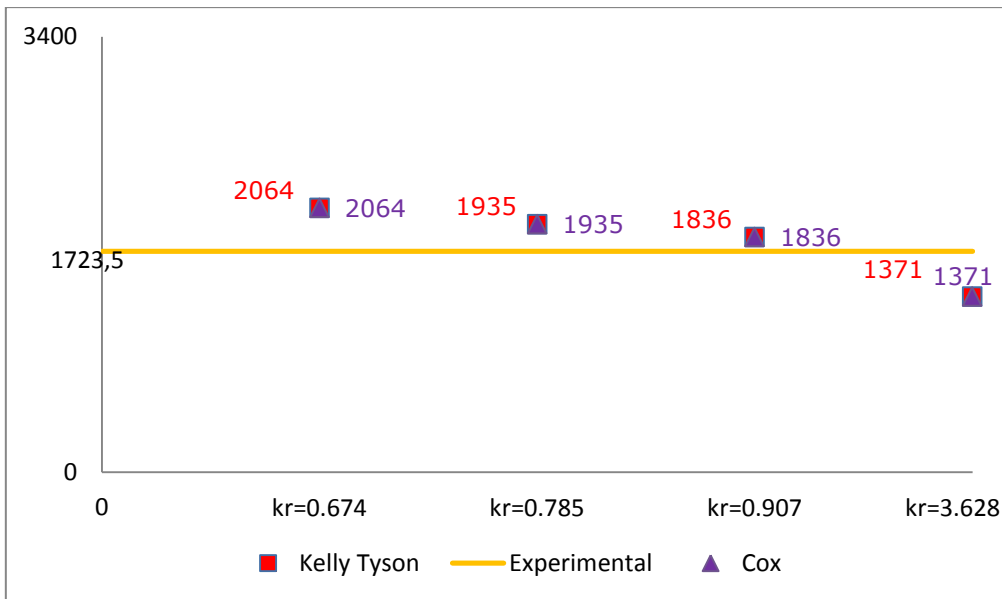


Fig.4.89. Valori teoretice și experimentale ale modulului de elasticitate longitudinal pentru materialul compozit de la proba 1PP (57%PP+3%AC+40%PMC) pentru $E_r=3 \cdot 10^4$ MPa

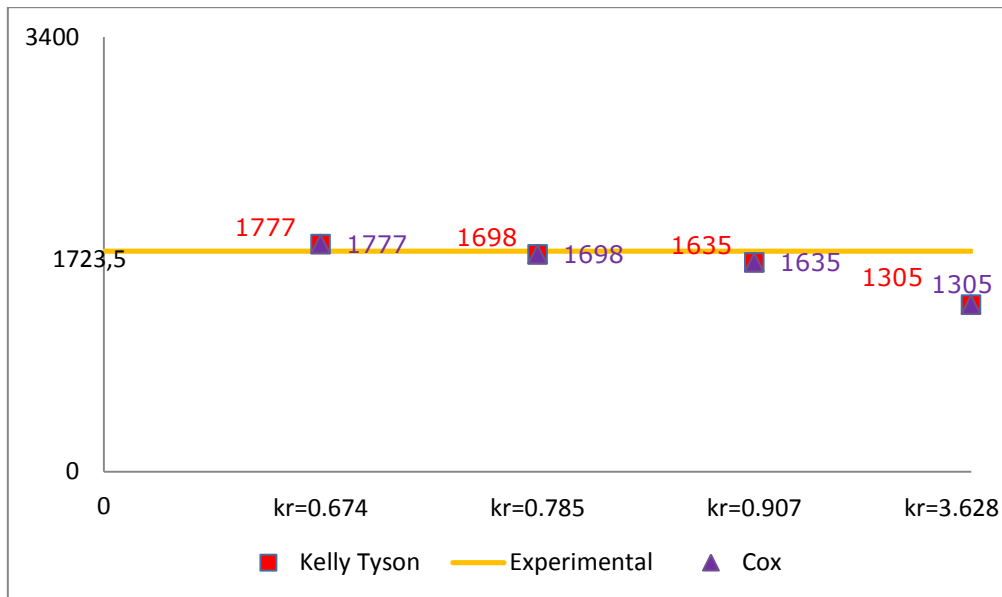


Fig.4.90. Valori teoretice și experimentale ale modulului de elasticitate longitudinal pentru materialul compozit de la proba 1PP (57%PP+3%AC+40%PMC) pentru $E_r=2 \cdot 10^4$ MPa

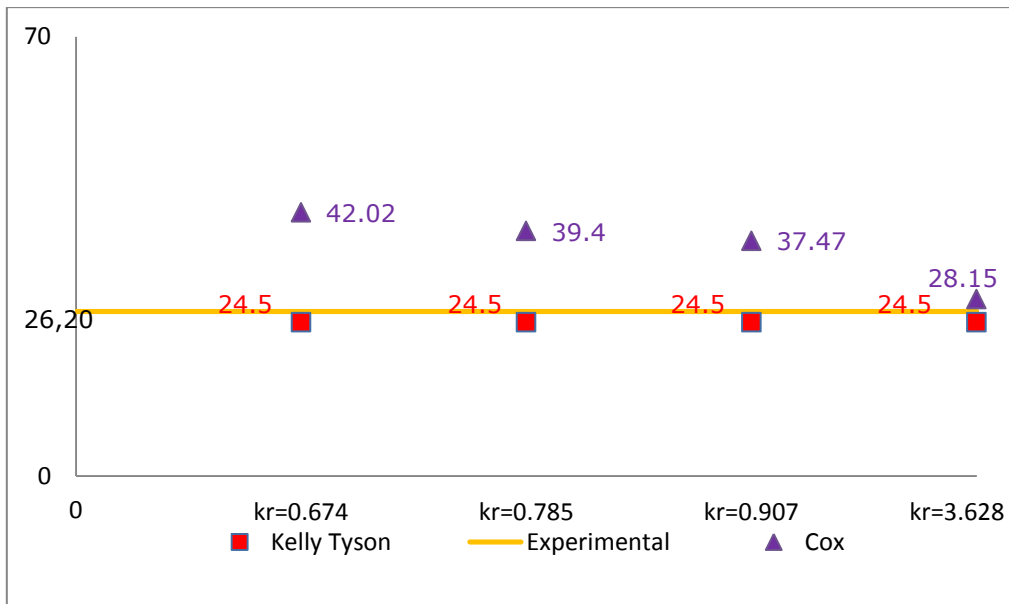


Fig.4.91. Valori teoretice și experimentale ale rezistenței la tracțiune pentru materialul compozit de la proba 1PP (57%PP+3%AC+40%PMC) pentru $E_f=3 \cdot 10^4$ MPa

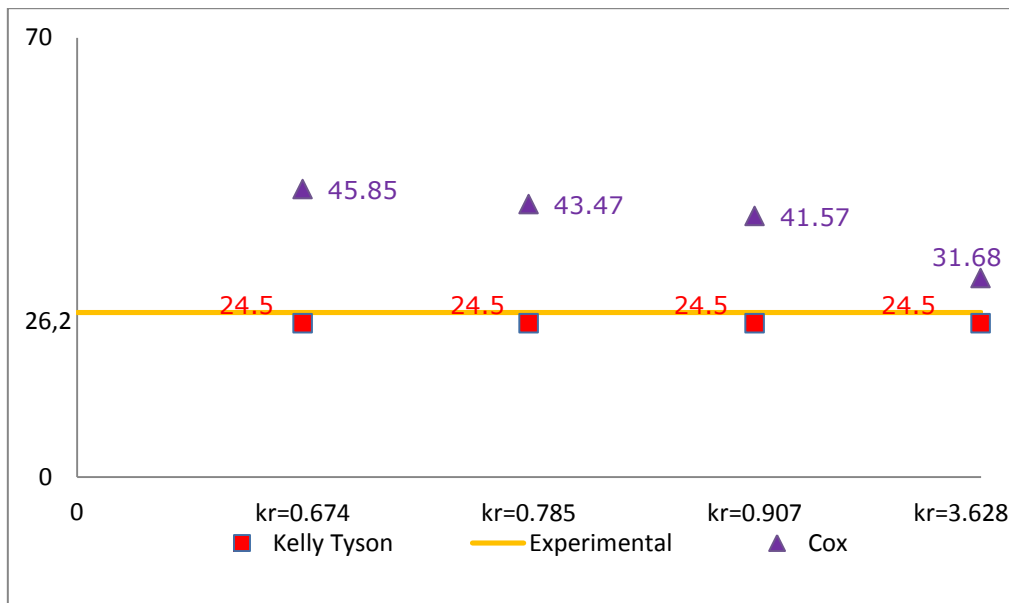


Fig.4.92. Valori teoretice și experimentale ale rezistenței la tracțiune pentru materialul compozit de la proba 1PP (57%PP+3%AC+40%PMC) pentru $E_f=2 \cdot 10^4$ MPa

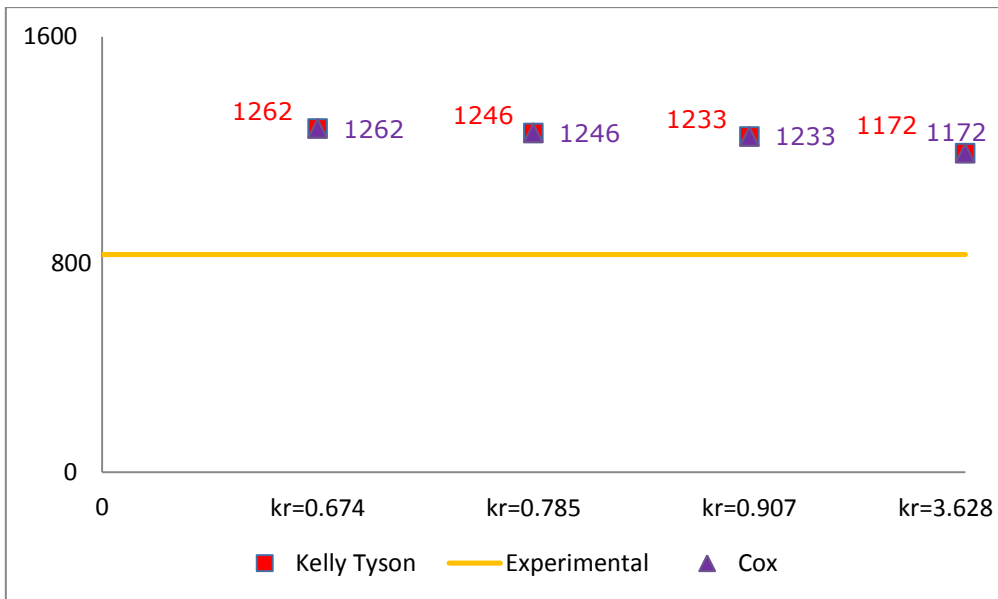


Fig.4.93. Valori teoretice și experimentale ale modulului de elasticitate longitudinal pentru materialul compozit de la proba P4 (77%PP+3%AC+20%PCPF) pentru $E_f = 3 \cdot 10^4 \text{ MPa}$

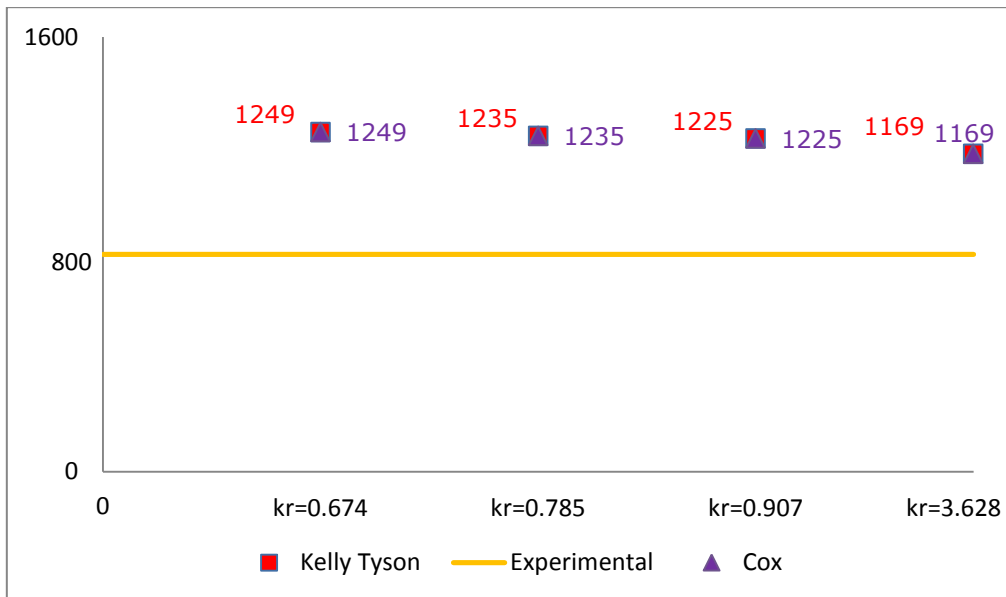


Fig.4.94. Valori teoretice și experimentale ale modulului de elasticitate longitudinal pentru materialul compozit de la proba P4 (77%PP+3%AC+20%PCPF) pentru $E_f = 2 \cdot 10^4 \text{ MPa}$

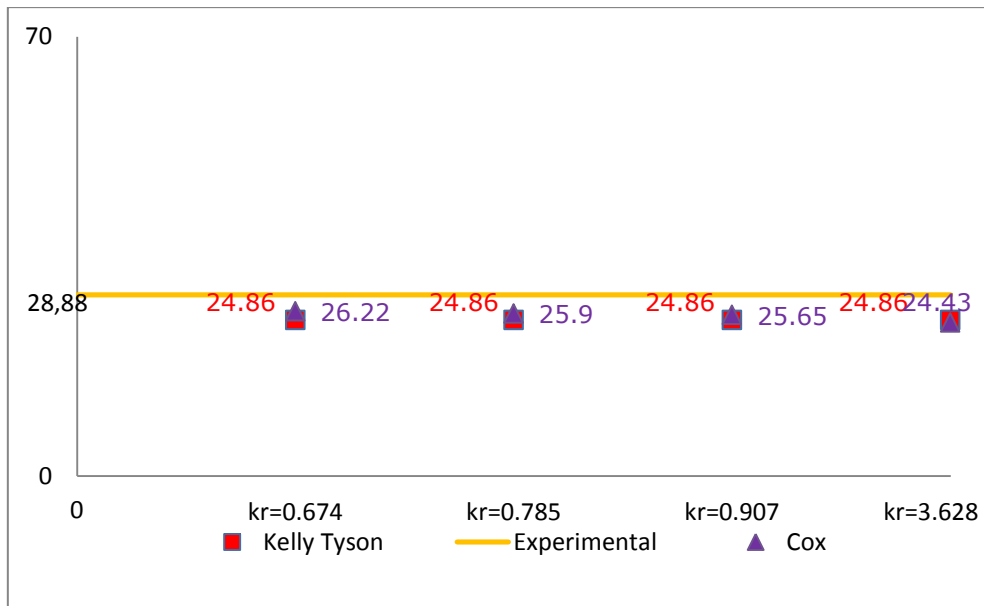


Fig.4.95. Valori teoretice și experimentale ale rezistenței la tracțiune pentru materialul compozit de la proba P4 (77%PP+3%AC+20%PCPF) pentru $E_f=3 \cdot 10^4$ MPa

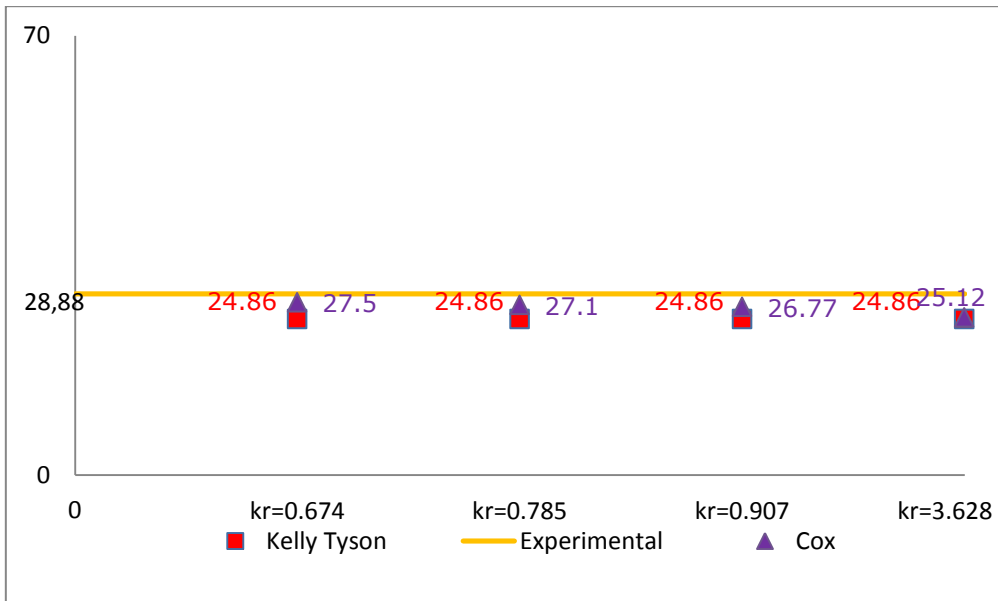


Fig.4.96. Valori teoretice și experimentale ale rezistenței la tracțiune pentru materialul compozit de la proba P4 (77%PP+3%AC+20%PCPF) pentru $E_f=2 \cdot 10^4$ MPa

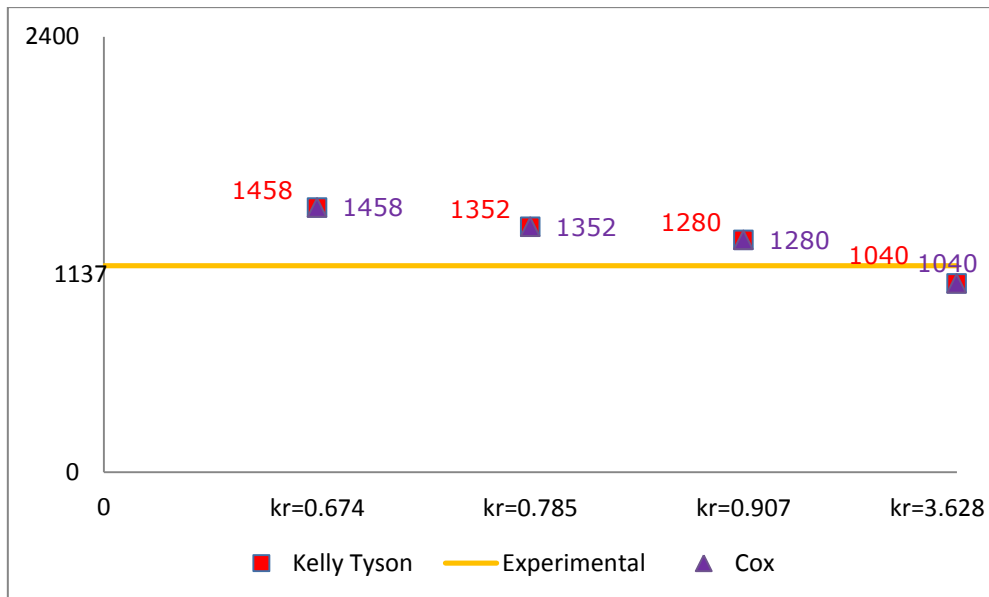


Fig.4.97. Valori teoretice și experimentale ale modulului de elasticitate longitudinal pentru materialul compozit de la proba P3 (57%PP+3%AC+40%PCPF) pentru $E_f=3 \cdot 10^4$ MPa

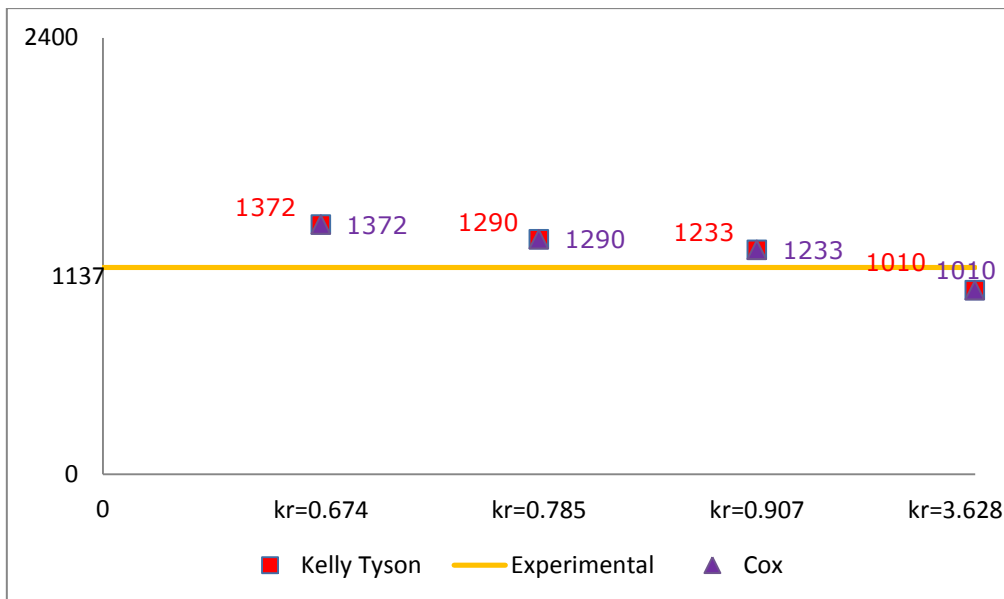


Fig.4.98. Valori teoretice și experimentale ale modulului de elasticitate longitudinal pentru materialul compozit de la proba P3 (57%PP+3%AC+40%PCPF) pentru $E_f=2 \cdot 10^4$ MPa

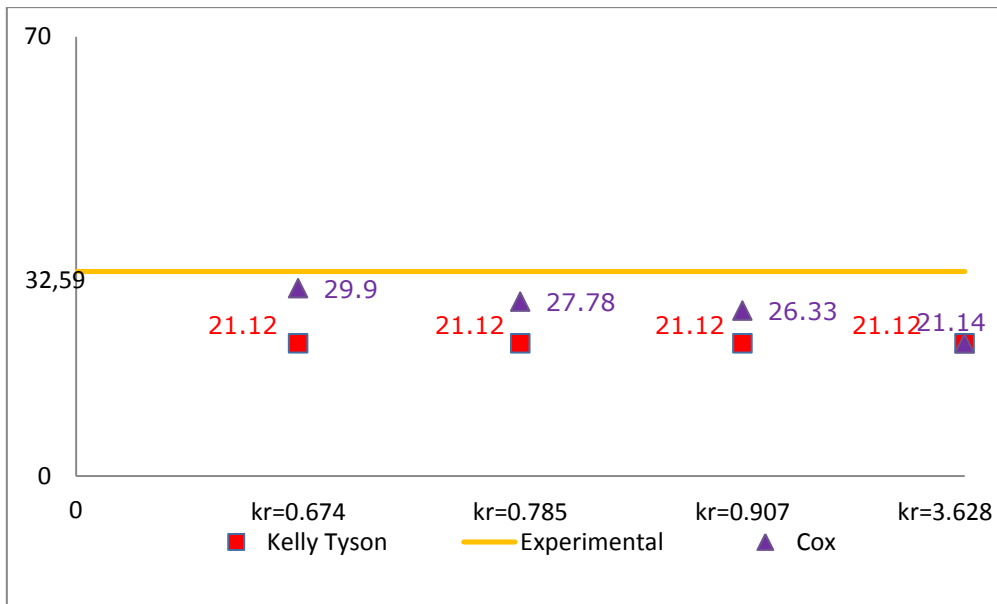


Fig.4.99. Valori teoretice și experimentale ale rezistenței la tracțiune pentru materialul compozit de la proba P3 (57%PP+3%AC+40%PCPF) pentru $E_f=3 \cdot 10^4$ MPa

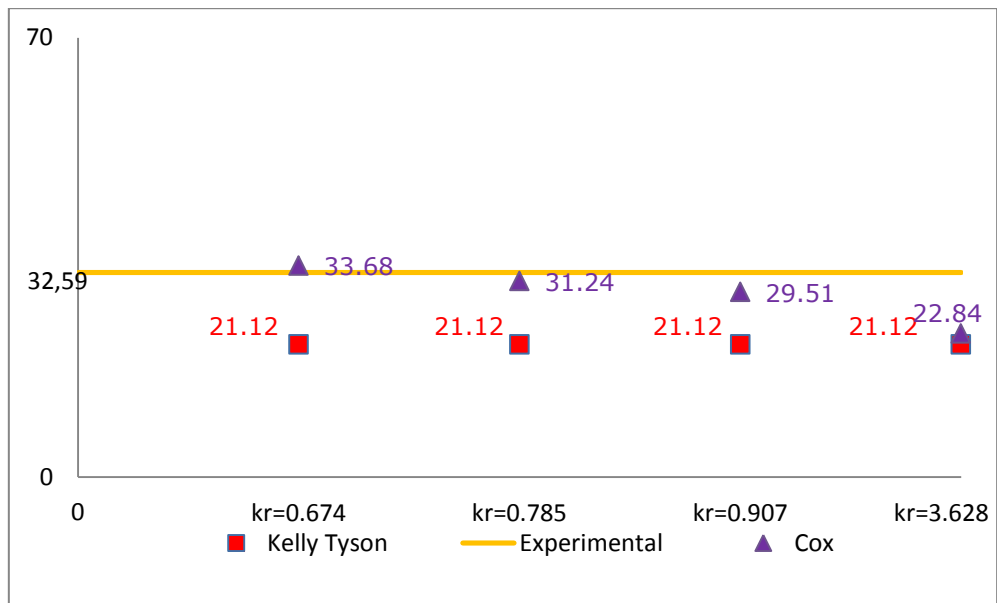


Fig.4.100. Valori teoretice și experimentale ale rezistenței la tracțiune pentru materialul compozit de la proba P3 (57%PP+3%AC+40%PCPF) pentru $E_f=2 \cdot 10^4$ MPa

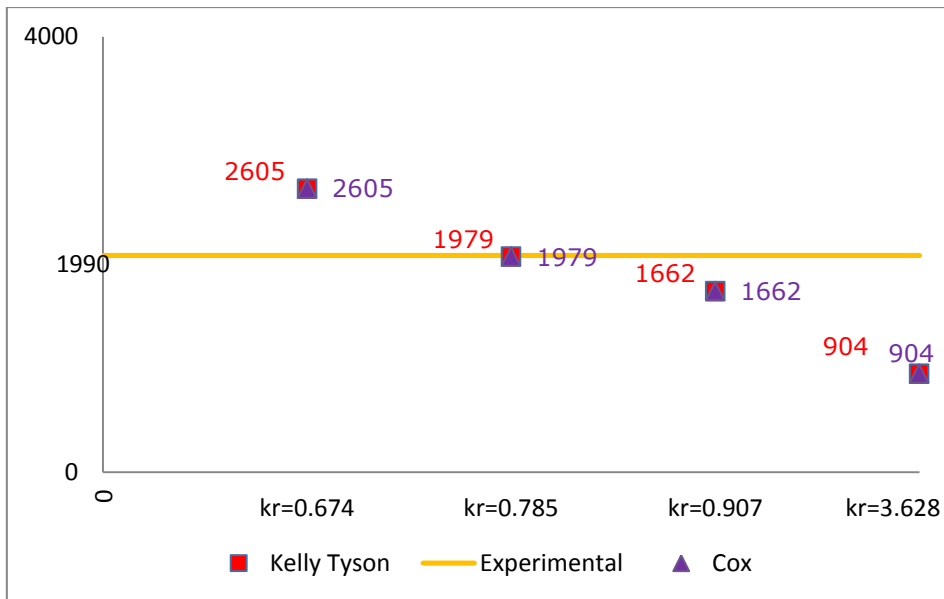


Fig.4.101. Valori teoretice și experimentale ale modului de elasticitate longitudinal pentru materialul compozit de la proba P2 (40%PP +60%PCPF) pentru $E_f=3 \cdot 10^4 \text{ MPa}$

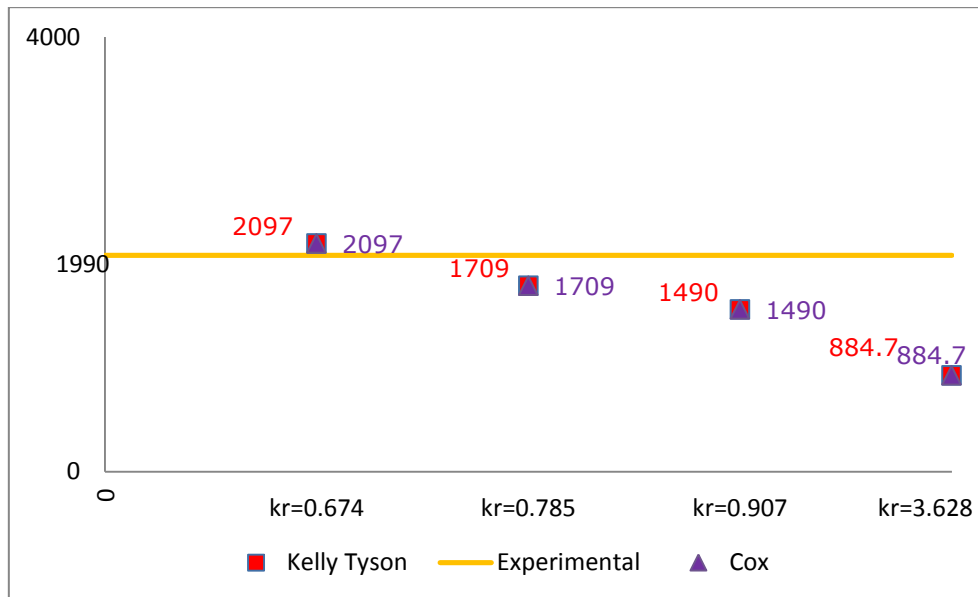


Fig.4.102. Valori teoretice și experimentale ale modului de elasticitate longitudinal pentru materialul compozit de la proba P2 (40%PP+60%PCPF) pentru $E_f=2 \cdot 10^4 \text{ MPa}$

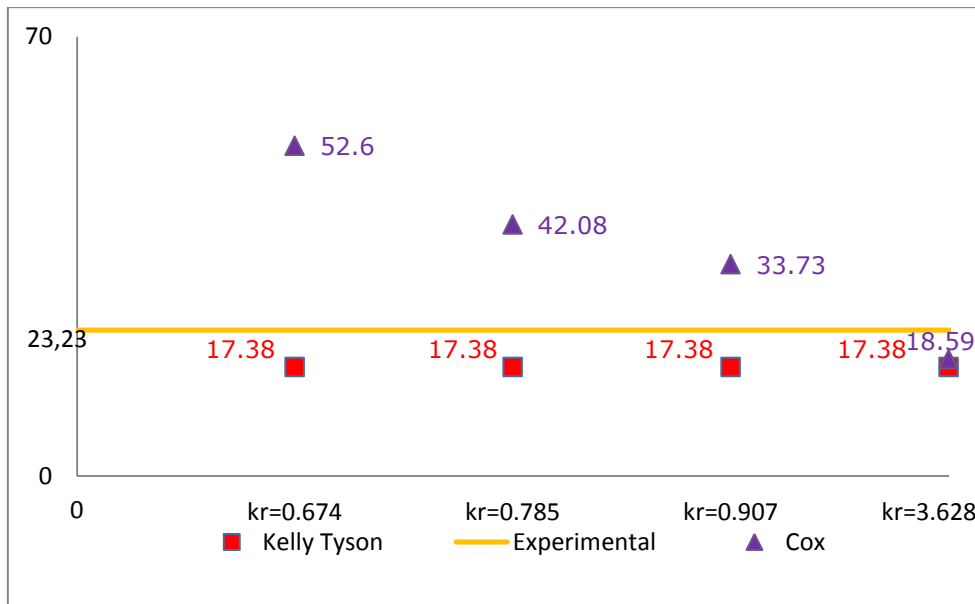


Fig.4.103. Valori teoretice și experimentale ale rezistenței la tracțiune pentru materialul compozit de la proba P2 (40%PP+60%PCPF) pentru $E_f=3 \cdot 10^4$ MPa

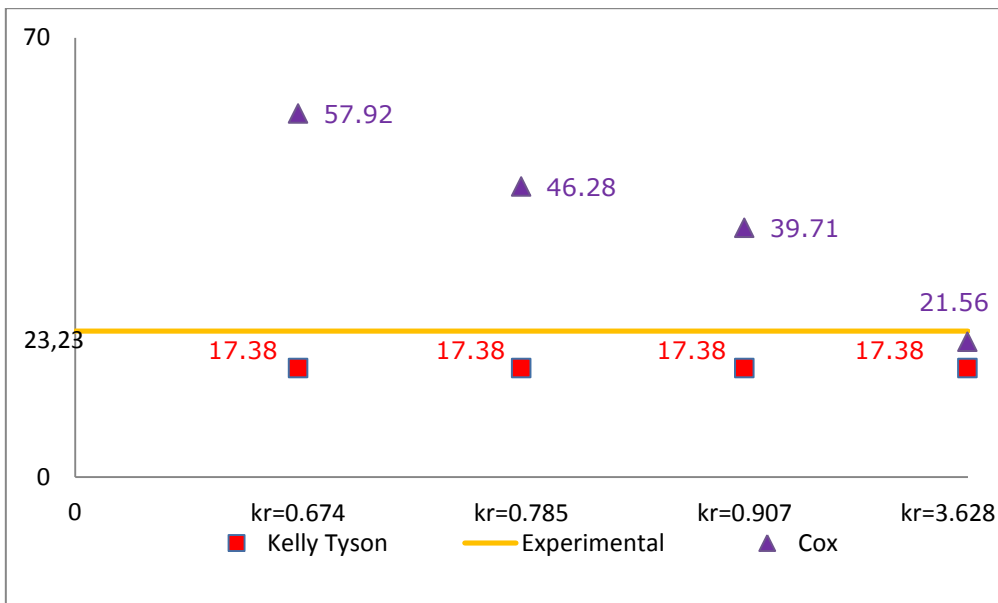


Fig.4.104. Valori teoretice și experimentale ale rezistenței la tracțiune pentru materialul compozit de la proba P2 (40%PP +60%PCPF) pentru $E_f=2 \cdot 10^4$ MPa

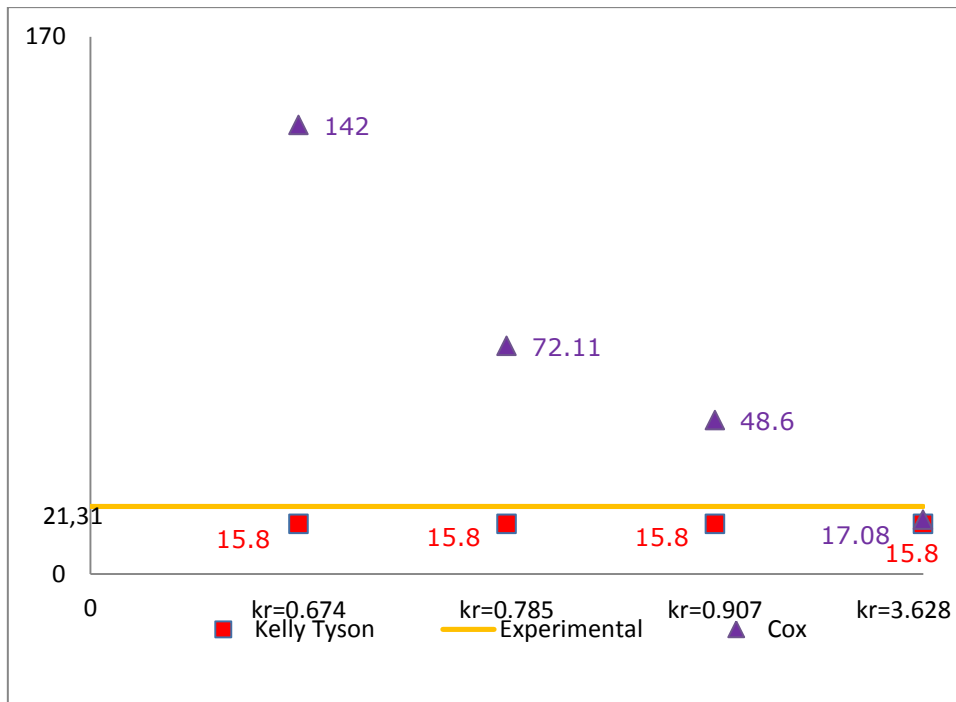


Fig.4.105. Valori teoretice și experimentale ale rezistenței la tracțiune pentru materialul compozit cu 15%PEHD+10%AC+75%PCPF pentru $E_f=3 \cdot 10^4$ MPa

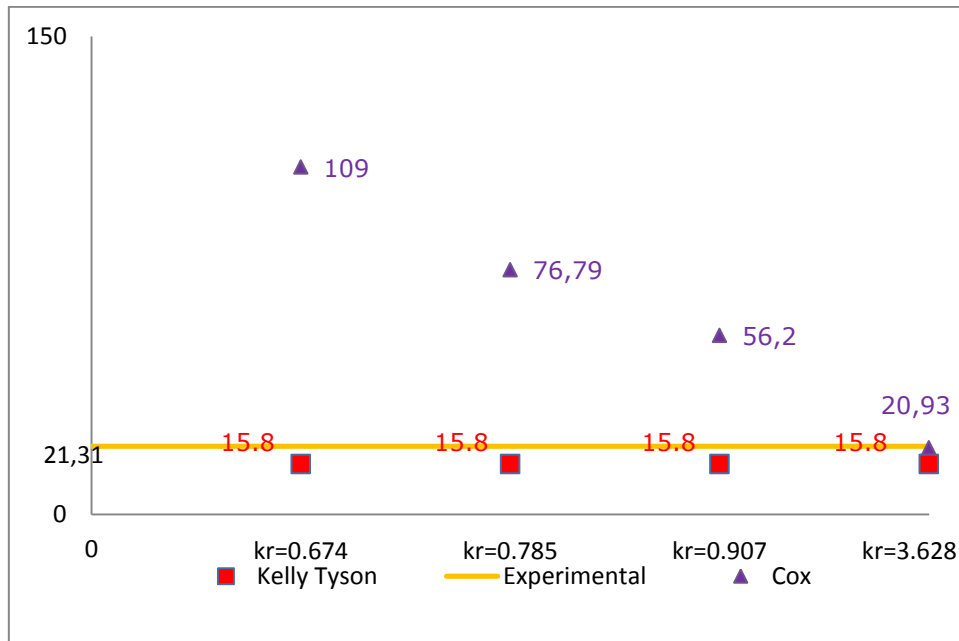


Fig.4.106. Valori teoretice și experimentale ale rezistenței la tracțiune pentru materialul compozit cu 15%PEHD+10%AC+75%PCPF pentru $E_f=2 \cdot 10^4$ MPa

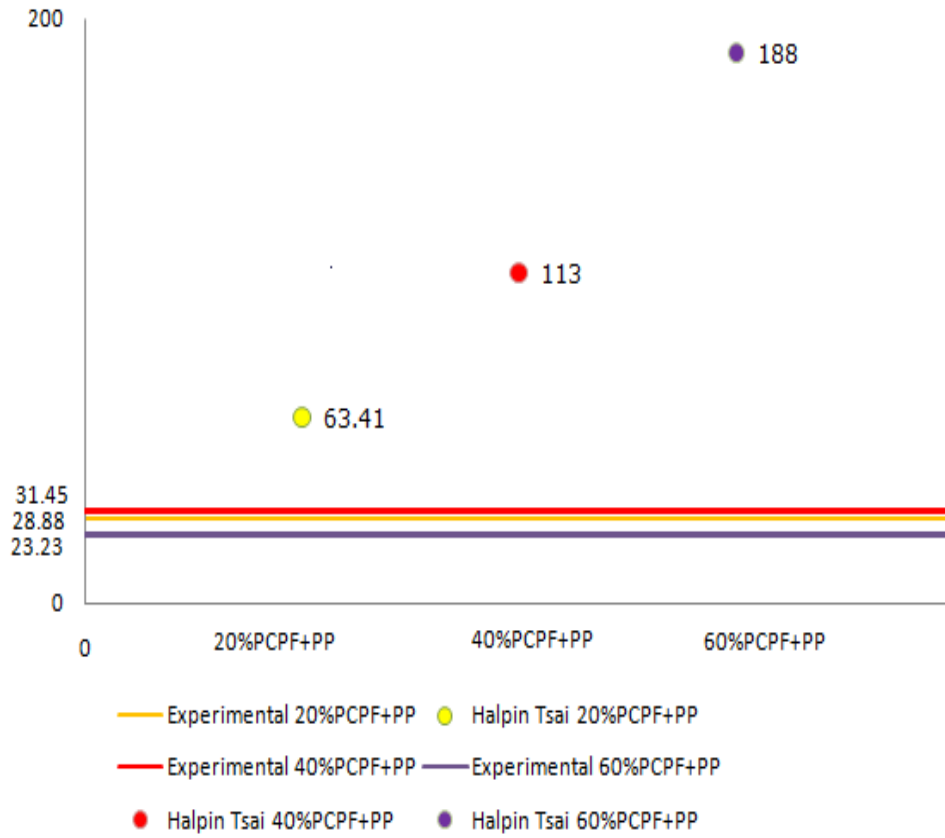


Fig.4.107 Comparație între valorile teoretice (conform modelului Halpin Tsai) și experimentale ale rezistențelor la tracțiune pentru materialele pe bază de PP ranforsate cu 20%,40%,60%PCPF $E_f=2 \cdot 10^4 \text{MPa}$

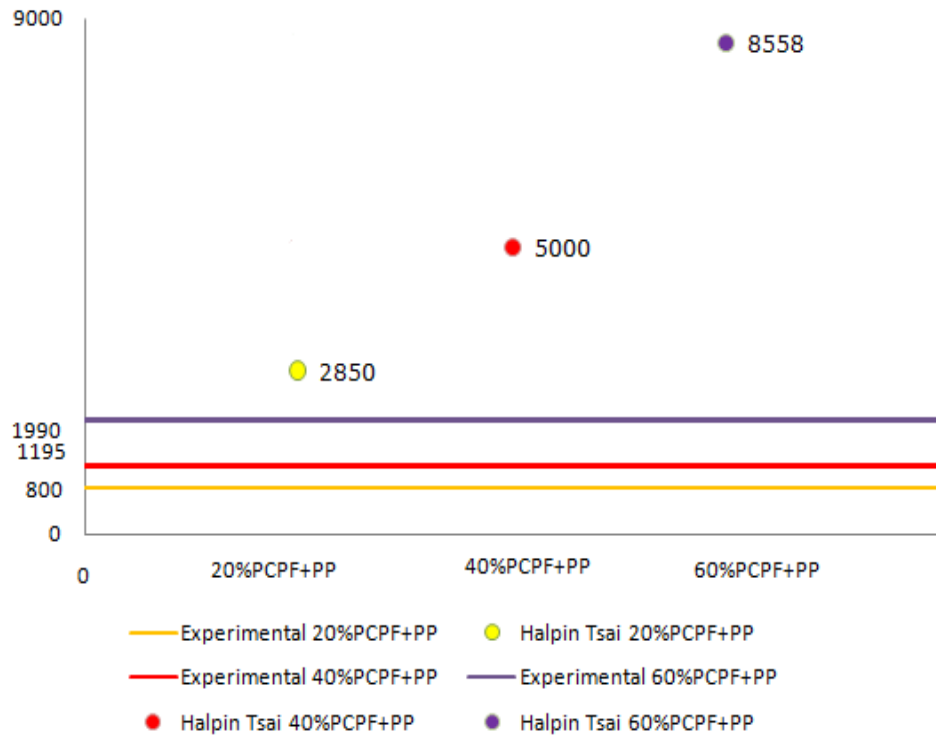


Fig. 4.108 Comparație între valorile teoretice (conform modelului Halpin Tsai) și experimentale ale modulelor de elasticitate longitudinale pentru materialele pe bază de PP ranforsate cu 20%,40%,60%PCPF pentru $E_r=2 \cdot 10^4$ MPa

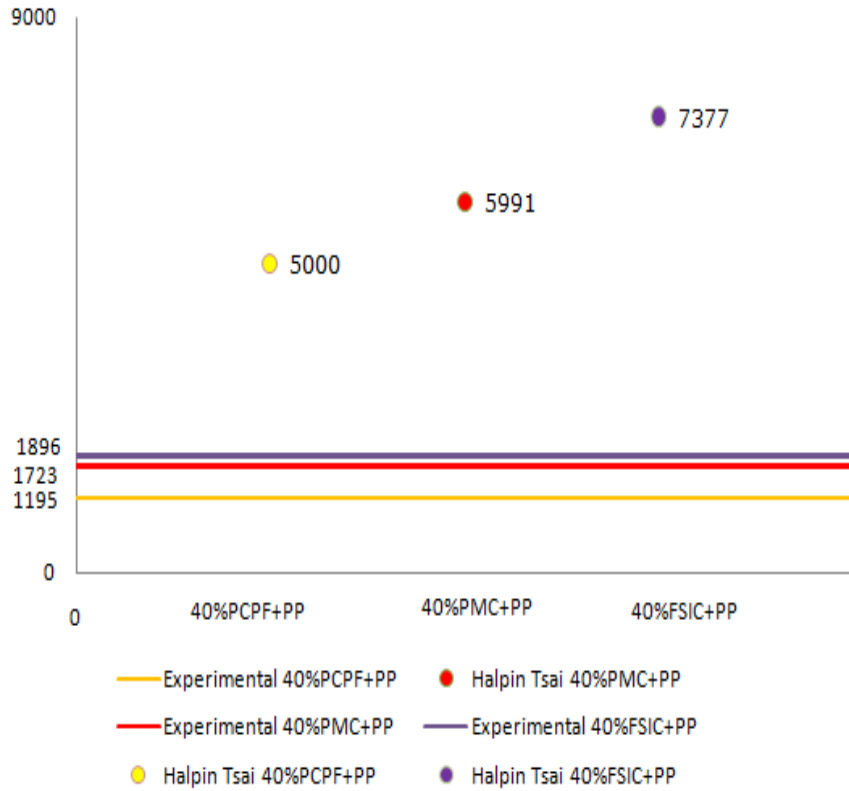


Fig.4.109 Comparație între valorile teoretice (conform modelului Halpin Tsai) și experimentale ale modulelor de elasticitate longitudinale pentru materialele pe bază de PP ranforsate cu 40%PCPF,PMC respectiv FSIC pentru $E_f=2 \cdot 10^4$ MPa

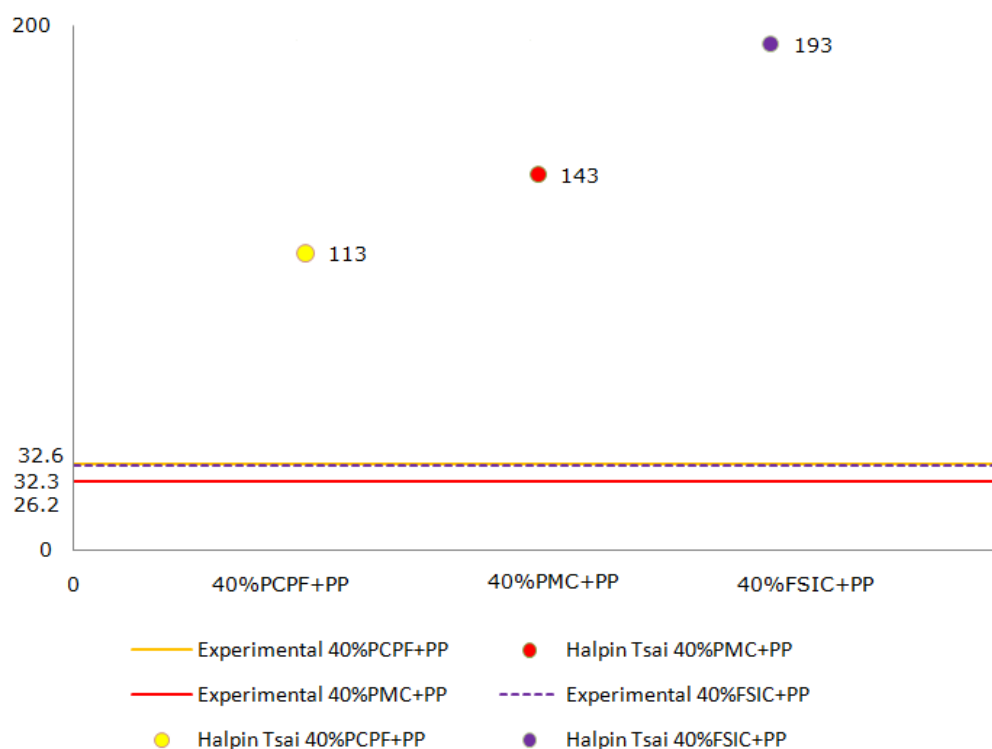


Fig.4.110 Comparație între valorile teoretice (conform modelului Halpin Tsai) și experimentale ale rezistențelor la tracțiune pentru materialele pe bază de PP ranforsate cu 40%PCPF,PMC respectiv FSIC pentru $E_f=3 \cdot 10^4$ MPa

Concluzii

1) pentru biocompozitele de la probele 2FP și 1FP

-Din Fig.4.77 și 4.78 (proba 2FP) și Fig.4.81 și 4.82 (proba 1FP) se constată că modulul de elasticitate longitudinal are valori teoretice mai apropiate de cele experimentale pentru modulul de elasticitate al fibrei $E_f=20000$ MPa. Modelul Kelly Tyson aproximează mai bine rezultatele experimentale decât modelul Cox Krenkel. Coeficienții de distribuție a fibrei în matrice K_f nu dau diferențe semnificative între valorile teoretice ale rezistențelor la tracțiune (Fig.4.79, 4.80, 4.83 și 4.84).

2) pentru biocompozitele de la probele 2PP și 1PP

-Din Fig.4.85 și 4.86 (proba 2PP) și Fig.4.89 și 4.90 (proba 1PP) se constată că modulul de elasticitate longitudinal are valori teoretice mai apropiate de cele experimentale pentru modulul de elasticitate al fibrei $E_f=20000$ MPa. Modelul Kelly Tyson aproximează mai bine rezultatele experimentale decât modelul Cox Krenkel. Coeficienții de distribuție a fibrei în matrice K_f nu dau diferențe semnificative între valorile teoretice ale rezistențelor la tracțiune (Fig.4.87, 4.88, 4.91 și 4.93).

3) pentru biocompozitele de la proba P4

-Din Fig.4.93 și 4.94 se constată că modulul de elasticitate longitudinal are valori teoretice diferite de cele experimentale pentru ambele valori ale modulului de elasticitate al fibrei $E_f=20000$ MPa și $E_f=30000$ MPa. Modelul Kelly Tyson aproximează mai bine rezultatele experimentale decât modelul Cox Krenkel.

Coeficienții de distribuție a fibrei în matrice K_r nu dau diferențe semnificative între valorile teoretice ale rezistențelor la tracțiune (Fig.4.95 și 4.96).

4) pentru biocompozitul de la proba P3

-Din Fig.4.97 și 4.98 se constată că modulul de elasticitate longitudinal are valori teoretice mai apropiate de cele experimentale pentru valoarea modulului de elasticitate al fibrei $E_f=20000\text{MPa}$. Pentru $K_r=0.907$ (aranjament hexagonal) se obțin valori mai apropiate de cele experimentale. Modelul Cox Krenkel aproximează mai bine rezultatele experimentale decât modelul Kelly Tyson atât pentru modulul de elasticitate cât și pentru rezistența la tracțiune. Pentru $K_r=0.674$ (aranjament pătratic centrat) se obțin valori teoretice ale rezistențelor la tracțiune mai apropiate de experiment (Fig.4.99 și 4.100).

5) pentru biocompozitul de la proba P2

-Din Fig.4.101 și 4.102 se constată că modulul de elasticitate longitudinal are valori teoretice mai apropiate de cele experimentale pentru valoarea modulului de elasticitate al fibrei $E_f=20000\text{MPa}$. Pentru $K_r=0.674$ (aranjament pătratic centrat) se obțin valori mai apropiate de cele experimentale. Modelul Cox Krenkel aproximează mai bine rezultatele experimentale decât modelul Kelly Tyson atât pentru modulul de elasticitate cât și pentru rezistența la tracțiune. Pentru $K_r=0.674$ se obțin valori teoretice ale rezistențelor la tracțiune mai apropiate de experiment (Fig.4.103 și 4.104)

6) pentru biocompozitul 15%PEHD+10%AC+75%PCPF

-Din Fig.4.105 și 4.106 se constată că rezistența la tracțiune a biocompozitului are valori teoretice mai apropiate de cele experimentale pentru valoarea modulului de elasticitate al fibrei $E_f=20000\text{MPa}$. Modelul Kelly Tyson aproximează mai bine rezultatele experimentale decât modelul Cox Krenkel. Coeficienții de distribuție a fibrei în matrice K_r nu dau diferențe semnificative între valorile teoretice ale rezistențelor la tracțiune.

Pentru validarea modelului lui Halpin Tsai s-a utilizat modelul micronecanic al lui Halpin Tsai modificat. Rezultatele arată că la acest model diferențele dintre rezultatele teoretice și cele experimentale sun foarte mari (Fig.4.107 și 4.108)

În figurile 4.109 și 4.110 este prezentată o analiză comparativă între rezultatele teoretice și experimentale cu privire la proprietățile la tracțiune ale materialelor biocompozite pe bază de polipropilenă ranforsate cu 40%FSIC, PMC, PCPF. Se constată că pentru aceeași fracțiune de volum a elementelor de ranforsare (40%), compozitul ranforsat cu fibre scurte are atât rigiditatea cât și rezistența la tracțiune mai mari decât biocompozitul ranforsat puzderii măcinate de cânepă.

5. STUDIUL DEGRADĂRII MECANICE A MATERIALELOR BIOCOMPOZITE

5.1. Generalități

Modelarea matematică a degradării mecanice a biocompozitelor este necesară pentru a reduce pe cât posibil costurile încercărilor experimentale care ar urma să fie efectuate pe piesele realizate din aceste materiale.

Degradarea structurilor din materiale compozite este o combinație dintre fisurarea matricei, ruperea fibrei la întindere sau compresiune și delaminarea. Fisurarea matricei și ruperea fibrei la întindere sau compresiune sunt degradări intralaminare iar delaminarea este degradare interlaminară. Aceste degradări conduc la reducerea semnificativă a proprietăților mecanice ale materialelor.

Studiul mecanismului degradării are următoarele obiective:

- determinarea condițiilor pentru inițierea primului eveniment de degradare;
- anticiparea evoluției unei degradări progresive;
- caracterizarea și cuantificarea degradării;
- analizarea efectului degradării prin exprimarea rigidității materialului ca funcție de degradare;
- definirea degradării critice pentru evaluarea performanțelor materialului din punct de vedere al integrității structurale și durabilității;
- furnizarea de informații pentru o analiză structurală globală precum și pentru proiectare.

5.2. Concepte generale ale degradărilor în lamine unidireționale

Degradarea este caracterizată prin modificarea rigidității materialului. Aceasta joacă un rol important în analiza materialelor compozite ranforsate cu fibre. Multe astfel de materiale prezintă un comportament fragil elastic, adică degradarea în aceste materiale este inițiată fără o deformare semnificativă. Prin urmare, când se modelează comportamentul acestor materiale, plasticitatea poate fi neglijată.

Abaqus oferă un model de analiză a degradării pentru materiale fragil elastice cu un comportament anizotrop, model care permite prezicerea debutului degradării și modelarea evoluției acesteia. Modelul este destinat în primul rând a fi utilizat pentru materiale compozite armate cu fibre, deoarece acestea prezintă de obicei un astfel de comportament. Pentru aplicarea acestui model de degradare este necesară specificarea următoarelor date:

- răspunsul materialului nedegradat;
- un criteriu de inițiere a degradării;
- un răspuns al evoluției.

Răspunsul materialului nedegradat se presupune a fi liniar elastic iar modelul de degradare este destinat să prezică comportamentul unui material compozit ranforsat cu fibre pentru care degradarea poate fi inițiată fără o deformare mare.

Criteriul de inițiere a degradării folosit pentru a prezice apariția și legea de evoluție a acesteia este criteriul Hashin care se bazează pe modificarea proprietăților mecanice ale materialului.

Răspunsul evoluției degradării include alegerea elementului din materialul analizat care urmează să fie eliminat din studiu ca urmare a îndeplinirii a cel puțin unuia dintre criteriile de degradare.

Modelarea degradării și ruperii cu ajutorul programului Abaqus permite o combinație de mai multe mecanisme de rupere care acționează simultan pe același material. Ruperea materialului se referă la pierderea completă a capacității portante, care rezultă din degradarea progresivă a rigidității materialului. Procesul de degradare a rigidității materialului este modelat cu ajutorul mecanicii de degradare. Pentru a înțelege capacitățile de modelare a ruperii în Abaqus, se ia în considerare răspunsul unei epruvete de material în timpul unui test de tracțiune simplu. În răspunsul tensiune-deformație, precum cel ilustrat în figura 5.1, sunt precizate faze distincte care sunt utilizate în studiul fenomenului degradării. Răspunsul materialului este inițial liniar elastic, a-b, urmat de zona plastică prezentând deformații mari, b-c. Dincolo de punctul c există o reducere semnificativă a capacității portante până la rupere, c-d. Litera c identifică starea materialului la debutul degradării, care este echivalată cu criteriul de inițiere a degradării. Dincolo de acest punct c, răspunsul tensiune-deformație c-d este guvernat de evoluția degradării rigidității în regiunea de localizare a deformației. În contextul mecanicii degradării, curba c-d' poate fi privită ca răspunsul nedegradat al curbei pe care materialul ar fi urmat să o aibă în absența degradării.

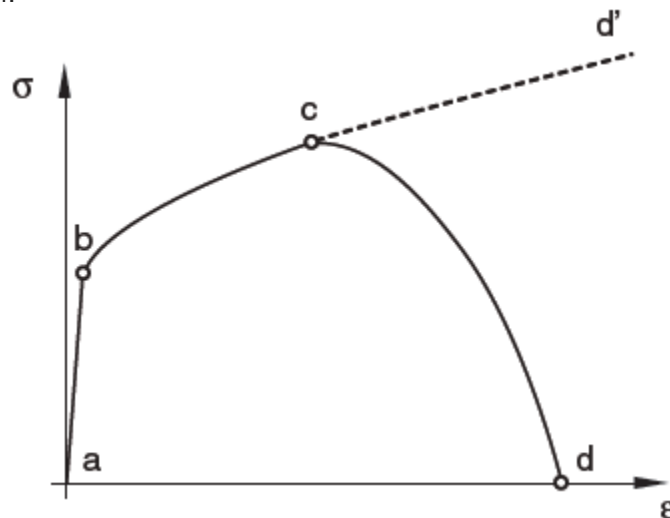


Fig.5.1. Răspunsul tipic uniaxial tensiune-deformație a unei epruvete

Astfel, în Abaqus specificarea mecanismului de rupere constă din patru etape distincte:

1. definirea unui răspuns al materialului efectiv (nedegradat): curba a-b-c-d' în figura 6.1,
2. un criteriu de inițiere a degradării: punctul c în figura 6.1;
3. o lege de evoluție a degradării: curba c-d în figura 6.1;
4. alegerea unui criteriu de eliminare din calcul a unui element odată ce rigiditatea materialului este complet degradată: punctul d în figura 5.1

În cazul materialelor compozite ranforsate cu fibre, epruveta supusă modelării este de forma unei lamine cu fibrele dispuse unidirecțional după lungimea laminei (Fig.6.2)

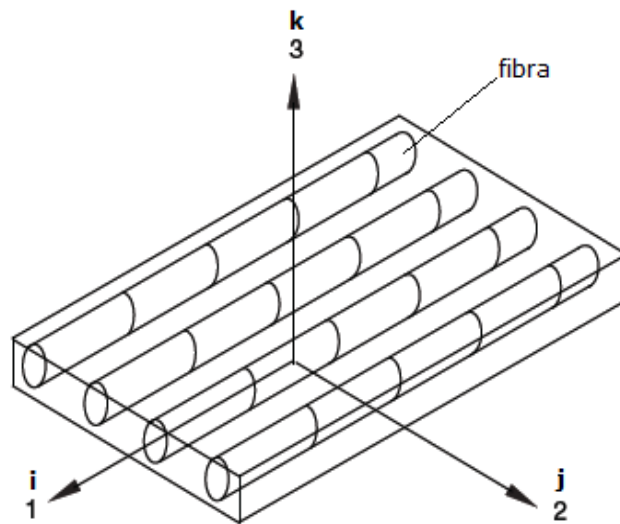


Fig.5.2. Lamina unidirecțională

Lamina este în planul 1-2 și direcția locală 1 corespunde direcției fibrei

5.3. Definirea răspunsului materialului nedegradat

Pentru definirea răspunsului materialului nedegradat se folosește una din metodele pentru definirea unui material elastic liniar ortotrop:

- Definirea elasticității ortotrope specificând proprietățile mecanice ale materialului;
- Definirea elasticității ortotrope în planul tensiunilor;
- Definirea elasticității ortotrope specificând termenii în matricea de rigiditate elastică.

Cea mai convenabilă metodă de definire a răspunsului materialului nedegradat este metoda de definire a elasticității ortotrope în planul tensiunilor.

Un model liniar elastic se caracterizează prin următoarele:

- este valabil pentru deformații elastice mici (mai mici de 5%)
- poate fi izotrop, ortotrop sau complet anizotrop
- poate avea proprietăți care depind de temperatură și alte variabile;

Definirea comportamentului liniar elastic al unui material

Tensiunea totală este definită prin deformația elastică totală ca:

$$\sigma = D^{el} \cdot \varepsilon^{el} , \quad (5.1)$$

unde:

σ reprezintă tensiunea totală (reală) din material;

D^{el} reprezintă tensorul elasticitate de ordinul patru;

ε reprezintă deformația totală a materialului.

În funcție de numărul de plane de simetrie, pentru proprietățile elastice, un material poate fi clasificat fie izotrop (cu un număr infinit de plane de simetrie care trec prin fiecare punct) sau anizotrop (la care nu există plane de simetrie). Unele materiale au un număr limitat de plane de simetrie care trec prin fiecare punct, de exemplu, materialele ortotrope care au două plane de simetrie ortogonale pentru proprietățile elastice.

Stabilitatea unui material liniar elastic

Materialele liniar elastice trebuie să îndeplinească condițiile de stabilitate. Stabilitatea necesită ca tensorul D^{el} să fie definit pozitiv, ceea ce duce la anumite restricții privind valorile constantelor elastice.

5.3.1 Definirea elasticității ortotropice specificând proprietățile mecanice ale materialului

Elasticitatea liniară într-un material ortotropic este cel mai ușor de definit specificând proprietățile mecanice ale materialului: modulele de elasticitate E_1, E_2, E_3 , coeficienții lui Poisson $\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$, modulele de forfecare G_{12}, G_{13}, G_{23} asociate cu direcțiile principale ale materialului. Aceste module definesc matricea de conformitate elastică conform cu

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix}, \quad (5.2)$$

Mărimile ν_{ij} reprezintă interpretarea fizică a coeficientului lui Poisson care caracterizează deformația transversală în direcția j , când materialul este sollicitat în direcția i . În general $\nu_{ij} = \nu_{ji}$, ele fiind exprimate prin:

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j}, \quad (5.3)$$

Stabilitatea materialului

Pentru stabilitatea materialului este necesar ca:

$$\begin{aligned}
 E_1, E_2, E_3, G_{12}, G_{13}, G_{23} &> 0, \\
 |v_{12}| &< (E_1/E_2)^{1/2}, \\
 |v_{13}| &< (E_1/E_3)^{1/2}, \\
 |v_{23}| &< (E_2/E_3)^{1/2}, \\
 1 - v_{12}v_{21} - v_{23}v_{32} - v_{31}v_{13} - 2v_{21}v_{32}v_{13} &> 0
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Atunci când partea din stânga a inegalității se apropie de 0, materialul are un comportament incompresibil. Folosind relațiile $v_{ij}/E_i = v_{ji}/E_j$, a doua, a treia și a patra restricție de mai sus pot fi deasemenea exprimate prin

$$\begin{aligned}
 |v_{21}| &< (E_2/E_1)^{1/2}, \\
 |v_{31}| &< (E_3/E_1)^{1/2}, \\
 |v_{32}| &< (E_3/E_2)^{1/2},
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

5.3.2. Definirea elasticității ortotrope în planul de tensiunilor

În condițiile de tensiuni plane, cum ar fi elementul de tip înveliș, pentru definirea unui material ortotrop sunt necesare numai valorile lui $E_1, E_2, v_{12}, G_{12}, G_{13}$ și G_{23} . În toate elementele cu tensiuni plane, în Abaqus, suprafața elementului studiat este în planul tensiunilor astfel că din condițiile de tensiuni plane $\varepsilon_{33}=0$. Modulele de forfecare G_{13} și G_{23} sunt incluse deoarece ele pot fi necesare în modelarea deformațiilor la forfecare transversale ale învelișului. Coeficientul lui Poisson ν_{21} este dat implicit ca:

$$\nu_{21} = \frac{E_2}{E_1} \cdot \nu_{12}, \tag{5.6}$$

În acest caz, relațiile tensiune-deformație pentru componentele din plan ale tensiunilor sunt următoarele:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \tag{5.7}$$

Stabilitatea materialului pentru planul tensiunilor necesită:

$$\begin{aligned} E_1, E_2, G_{12}, G_{23}, G_{13} > 0 \\ |v_{12}| < (E_1/E_2)^{1/2}, \end{aligned} \quad (5.8)$$

5.3.3 Definirea elasticității ortotrope specificând termenii matricei de rigiditate elasticitate

Elasticitatea liniară într-un material ortotrop poate fi de asemenea definită menționând cei nouă parametrii de rigiditate elastică independenți. În acest caz relațiile tensiuni- deformații au forma:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ & D_{2222} & D_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ & & D_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ & & & D_{1212} & 0 & 0 \\ & \text{sym} & & & D_{1313} & 0 \\ & & & & & D_{2323} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{pmatrix} = [D^{el}] \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{pmatrix} \quad (5.9)$$

Pentru un material ortotrop proprietățile mecanice ale acestuia definesc matricea D după cum urmează:

$$\begin{aligned} D_{1111} &= E_1(1 - v_{23}v_{32})Y, \\ D_{2222} &= E_2(1 - v_{13}v_{31})Y, \\ D_{3333} &= E_3(1 - v_{12}v_{21})Y, \\ D_{1133} &= E_1(v_{31} - v_{21}v_{32})Y = E_3(v_{13} + v_{12}v_{23})Y, \\ D_{2233} &= E_2(v_{32} - v_{12}v_{31})Y = E_3(v_{23} + v_{21}v_{13})Y, \\ D_{1212} &= G_{12}, \\ D_{1313} &= G_{13}, \\ D_{2323} &= G_{23}. \end{aligned} \quad (5.10)$$

unde

$$Y = \frac{1}{1 - v_{12}v_{21} - v_{23}v_{32} - v_{31}v_{13} - 2v_{21}v_{32}v_{13}} \quad (5.11)$$

Când parametrii rigidității materialului (D_{ijkl}), sunt dați direct, Abaqus impune pe $\sigma_{33} = 0$ pentru cazul tensiunilor plane pentru a reduce matricea rigidității

materialului după cum este necesar. În Abaqus/Standard se poate defini comportamentul elastic ortotrop spațial variabil pentru elemente omogene, solide și continue folosind o ecuație constitutivă. Ecuația constitutivă trebuie să includă valorile pentru modulele de elasticitate. (Abaqus 6.11 Analysis Users Manual Volume 1,[2011]).

Stabilitatea

Restricțiile pentru constantele elastice datorate stabilității materialului sunt:

$$\begin{aligned} D_{1111}, D_{2222}, D_{3333}, D_{1212}, D_{1313}, D_{2323} &> 0, \\ |D_{1122}| &< (D_{1111}D_{2222})^{1/2}, \\ |D_{1133}| &< (D_{1111}D_{3333})^{1/2}, \\ |D_{2233}| &< (D_{2222}D_{3333})^{1/2}, \\ \det(D^{el}) &> 0. \end{aligned} \tag{5.12}$$

ultima relație conduce la:

$$\begin{aligned} D_{1111}D_{2222}D_{3333} + 2D_{1122}D_{1133}D_{2233} - D_{2222}D_{1133}^2 - D_{1111}D_{2233}^2 - \\ - D_{3333}D_{1122}^2 > 0 \end{aligned} \tag{5.13}$$

Aceste restricții definite în termeni de parametri de rigiditate elastică sunt echivalenți cu restricțiile în termeni de proprietăți mecanice. Materialul este incompresibil când partea stângă a inegalității se apropie de 0.

5.4 Inițierea degradării pentru materiale compozite ranforsate cu fibre

Inițierea degradării se referă la declanșarea acesteia într-un punct al materialului (punctul c în figura 5.1). În Abaqus inițierea degradării se bazează pe teoria lui Hashin (Hashin Z. [1973], Hashin Z. [1980] Maimí P. [2007]).

Deoarece în realitate materialele compozite ranforsate cu fibre sunt eterogene și anizotrope criteriul de inițiere a degradării a lui Hashin ia în considerare anizotropia materialului pentru lamine unidirecționale. Există două moduri de bază ale abordării: abordarea micromecanică și abordarea macromecanică a ruperii. În abordarea micromecanică, sunt analizate posibilele moduri de rupere ale compozitului pe baza dezvoltării ruperii locale detaliate, cum ar fi ruperea sau flambarea fibrei, dezlipirea fibrei de matrice și fisurarea matricei. Din cauză că aceste investigații prezintă dificultăți mari în abordare, ele au fost limitate la solicitări simple ale materialului cum ar fi tracțiunea, compresiunea sau forfecarea pură. În ceea ce privește abordarea macromecanică se presupune că ruperea poate fi descrisă printr-un criteriu macroscopic, mai ales în ceea ce privește tensiunile medii la care este supus compozitul. Criteriul conține parametri necunoscuți care trebuie să fie determinați din termeni de tensiuni de rupere obținuți prin încercări experimentale simple (Hashin Z. [1973], Hashin Z. [1980]). Teoria lui Hashin utilizată în modelarea cu Abaqus se bazează pe modul de abordare macromecanică a ruperii. Conform teoriei lui Hashin au fost identificate două moduri de rupere ale materialului: modul de rupere a fibrei și modul de rupere a matricei. Pe baza acestor

moduri de rupere s-au dezvoltat 4 mecanisme diferite de inițiere a degradării în compozit:

- ruperea fibrei la tracțiune;
- flambajul fibrei la compresiune
- fisurarea matricei la tracțiunea transversală și forfecare;
- spargerea matricei la compresiune transversală și forfecare.

Răspunsul materialului este dat de:

$$\sigma = C_d \varepsilon \quad (5.14)$$

unde ε este deformația și C_d este matricea de elasticitate care reflectă apariția degradărilor și are forma:

$$C_d = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} (1-d_f)E_1 & (1-d_f) \cdot (1-d_m) \cdot v_{21} \cdot E_1 & 0 \\ (1-d_f) \cdot (1-d_m) \cdot v_{12} \cdot E_2 & (1-d_m) \cdot E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1-d_s)GD \end{bmatrix},$$

(5.15)

unde

$$D = 1 - (1-d_f)(1-d_m)v_{12}v_{21}, d_f \quad (5.16)$$

reflectă stadiul momentan al degradării fibrei, d_m reflectă stadiul momentan al degradării matricei, d_s reflectă stadiul momentan al degradării la forfecare, E_1 este modulul de elasticitate pe direcția fibrei, E_2 este modulul de elasticitate în direcție perpendiculară pe fibre, G este modulul de forfecare iar v_{12} și v_{21} sunt coeficienții lui Poisson.

Criteriile de inițiere ale degradării se exprimă prin funcții de inițiere a degradării fibrelor respectiv matricei la tracțiune sau compresiune, Department of Defense, Vol3[2002]. Aceste funcții au următoarele expresii:

Tracțiunea fibrei ($\hat{\sigma}_{11} \geq 0$)

$$F_f^t = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^T} \right)^2 + a \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2, \quad (5.17)$$

Compresiunea fibrei ($\hat{\sigma}_{11} < 0$)

$$F_f^c = \left(\frac{\hat{\sigma}_{11}}{X^C} \right)^2. \quad (5.18)$$

Tracțiunea matricei ($\hat{\sigma}_{22} \geq 0$)

$$F_m^t = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^T} \right)^2 + \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2, \quad (5.19)$$

Compresiunea matricei ($\hat{\sigma}_{22} < 0$)

$$F_m^C = \left(\frac{\hat{\sigma}_{22}}{2S^T} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T} \right)^2 - 1 \right] \frac{\hat{\sigma}_{22}}{Y^C} + \left(\frac{\hat{\tau}_{12}}{S^L} \right)^2, \quad (5.21)$$

În ecuațiile de mai sus semnificația mărimilor este următoarea:

- X^T -rezistența la tracțiune pe direcție longitudinală
- X^C -rezistența la compresiune pe direcție longitudinală
- Y^T -rezistența la tracțiune pe direcție transversală
- Y^C -rezistența la compresiune pe direcție transversală
- S^L -rezistența la forfecare pe direcție longitudinală
- S^T -rezistența la forfecare pe direcție transversală

a -coeficientul care determină contribuția tensiunii de forfecare la criteriul de initiere a tracțiunii fibrei și

$\hat{\sigma}_{11}, \hat{\sigma}_{22}, \hat{\tau}_{12}$ sunt componente ale tensorului tensiunilor $\hat{\sigma}$, care se folosesc pentru a evalua criteriul de initiere a ruperii si care este calculat ca fiind:

$$\hat{\sigma} = M\sigma, \quad (5.22)$$

Unde σ este tensiunea reală și M este operatorul de degradare

$$M = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-d_f)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1-d_m)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_s)} \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

d_f, d_m, d_s sunt variabilele interne de degradare care caracterizează degradarea fibrei d_f , a matricei d_m și degradarea la forfecare d_s , variabile care derivă din variabilele de degradare $d_f^t, d_f^c, d_m^t, d_m^c$ ce corespund celor 4 moduri de degradare prezentate anterior, după cum urmează:

$$d_f = \begin{cases} d_f^t & \text{dacă } \hat{\sigma}_{11} \geq 0, \\ d_f^c & \text{dacă } \hat{\sigma}_{11} < 0, \\ d_m^c & \text{dacă } \hat{\sigma}_{22} < 0, \end{cases} \quad (5.25)$$

$$d_s = 1 - (1 - d_f^t)(1 - d_f^c)(1 - d_m^t)(1 - d_m^c). \quad (5.26)$$

Înainte oricărei inițieri și evoluții a degradării, operatorul M este egal cu matricea unitate astfel încât $\hat{\sigma} = \sigma$. Odată ce inițierea și evoluția degradării s-a îndeplinit pentru cel puțin un mod de degradare din cele 4, iar operatorul de degradare M începe să influențeze celelalte criterii de inițiere a degradării.

Tensiunea efectivă $\hat{\sigma}$ reprezintă tensiunea care acționează asupra zonei degradate care rezistă efectiv forțelor interne. Criteriul de inițiere a degradării prezentat mai sus poate fi modificat pentru a obține modelul propus de Hashin și Rotem în anul 1973 alegând $\sigma = 0$ și $S^T = Y^C/2$ sau modelul propus de Hashin în 1980 alegând $\sigma = 0$ (Hashin Z.[1973], Hashin Z.[1980]).

În modelul de degradare progresivă propus de Hashin, punctul la care se inițiază degradarea este determinat de momentul în care fiecare din criteriile de degradare este atins. Fiecare criteriu de degradare compară diferite tensiuni calculate cu proprietățile de rezistență ale materialului respectiv.

O variabilă de ieșire este asociată cu fiecare criteriu de inițiere a degradării (întinderea fibrei, compresiunea fibrei, întinderea matricei, compresiunea matricei) pentru a se verifica dacă criteriul a fost îndeplinit. O valoare de 1 sau mai mare arată că s-a îndeplinit criteriul de degradare.

Criteriile de inițiere a degradării într-un punct din materialul ranforsat cu fibre sunt:

HSNFTCRT- Valoarea maximă a criteriului de inițiere a degradării pentru tracțiunea fibrei

HSNFCCRT- Valoarea maximă a criteriului de inițiere a degradării pentru compresiunea fibrei

HSNMTCRT- Valoarea maximă a criteriului de inițiere a degradării pentru tracțiunea matricei

HSNMCCRT- Valoarea maximă a criteriului de inițiere a degradării pentru compresiunea matricei

Pentru variabilele de mai sus (HSNFTCRT,HSNFCCRT,HSNMTCRT,HSNMCCRT), o valoare care este mai mică de 1 indică faptul că criteriul nu a fost îndeplinit, în timp ce o valoare de 1 sau mai mare indică faptul că criteriul a fost îndeplinit.

5.5 Studiul degradărilor cu programul Abaqus la piesa de tip epruvetă încercată experimental la încovoiere

Studiul s-a realizat cu ajutorul programului Abaqus pentru structuri de aceeași formă cu cele încercate experimental pentru materialul pe bază de HDPE ranforsat cu 75% puzderii de cânepă praf fin, material prezentat în capitolul 4. Simularea s-a realizat cu elemente finite în stare plană de tensiune CPS8 având 1952 de elemente conectate în 6133 noduri.

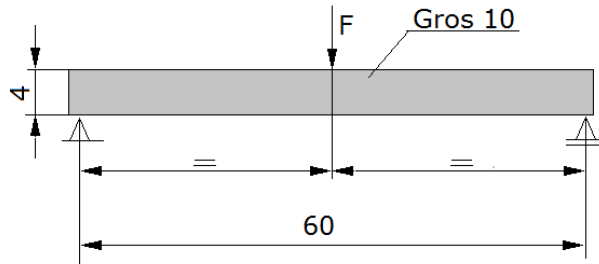


Fig.5.3.Schema modului de solicitare

5.5.1 Definiția caracteristicilor materialului încercat

Caracteristicile materialului care au fost introduse în program sunt cele obținute experimental sau calculate teoretic.

Proprietăți mecanice ale matricei (HDPE)

$\sigma_m = 31$ MPa –rezistența la tracțiune a matricei

$G_m = 467$ MPa modulul de forfecare al matricei

$\tau_m = 17.9$ MPa – rezistența la forfecare a matricei

Proprietăți mecanice ale compozitului

$\sigma_{tl} = 21.31$ MPa –rezistența la tracțiune în direcție longitudinală a compozitului - experimental

$\sigma_{tr} = 31$ MPa –rezistența la tracțiune în direcție transversală a compozitului

$E_L = 126.16$ MPa –modulul de elasticitate longitudinală

$\sigma_{IT} = 18.85$ MPa –rezistența la încovoiere pe direcție transversală - experimental

$\sigma_{iL} = 18,44$ MPa- rezistența la încovoiere pe direcție longitudinală - experimental

$E_{iL} = 2567$ MPa - modulul de elasticitate la încovoiere pe direcție longitudinală - experimental

$E_{IT} = 2607$ MPa- modulul de elasticitate la încovoiere pe direcție transversal- experimental

$\sigma_{cl} = 40.21$ MPa rezistența la compresiune pe direcție longitudinală-experimental

$\sigma_{ct} = 34.93$ MPa rezistența la compresiune pe direcție transversală-experimental

$\tau_l = 17.9$ MPa=rezistența la forfecare pe direcție longitudinală

$\tau_t = 17.4$ MPa rezistența la forfecare pe direcție transversală= $\sigma_{ct}/2$

$\nu = 0.35$

În simulare elasticitatea ortotropă a fost definită în planul tensiunilor.

5.5.2 Definiția stării de încărcare a materialului încercat de tip epruvetă

Încărcarea modelului a fost făcută considerând o jumătate de epruvetă la care a fost impusă, la un capăt, o deplasare pe verticală (în partea stângă) de maxim 2 mm (similară cu săgeata la încărcarea de încovoiere), deplasările pe orizontală și rotațiile fiind blocate. Părțile opuse a epruvetei i s-a impus fixarea pe direcție verticală, celelalte mișcări fiind permise. (Fig.5.4)



Fig.5.4 Definierea încărcărilor în Abaqus pentru epruvetă

5.5.3. Rezultate obținute prin simulare pentru materialul încercat de tip epruvetă

În figura 5.5 este prezentată centralizarea rezultatelor privind evoluția criteriilor de degradare obținute prin simulare. Este evident că îndeplinirea primului criteriu de degradare se realizează la o săgeată a epruvetei de 1,2mm careia îi corespunde o forță de aproximativ 33 N respectiv o tensiune de aproximativ 19 MPa. În figurile 5.6.a-d sunt vizualizate detalii din simulare privind tensiunile din material și criteriile de degradare.

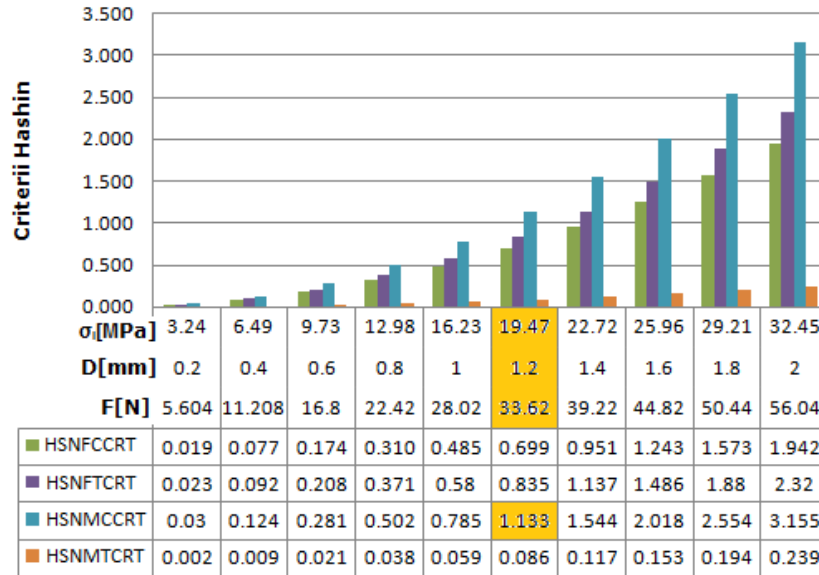
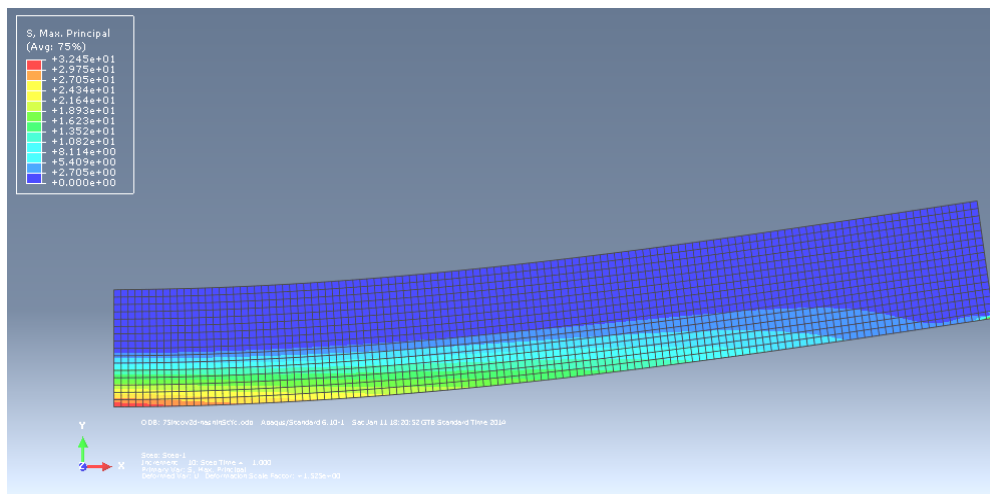
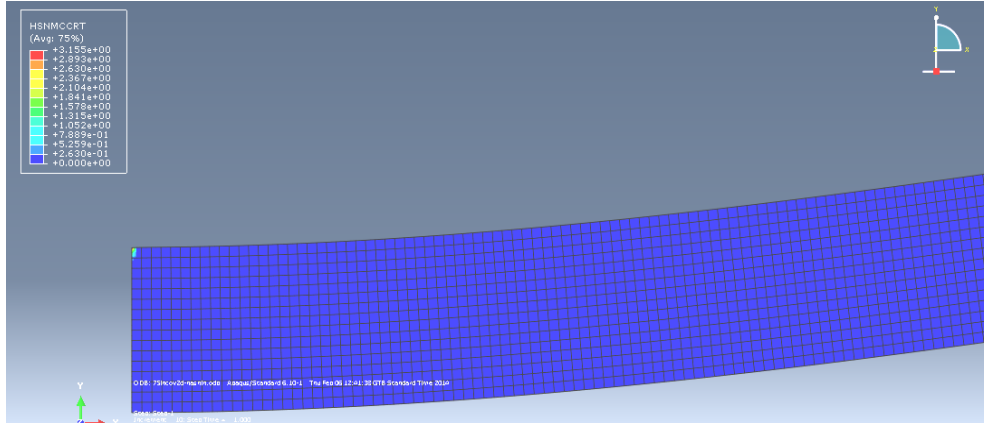


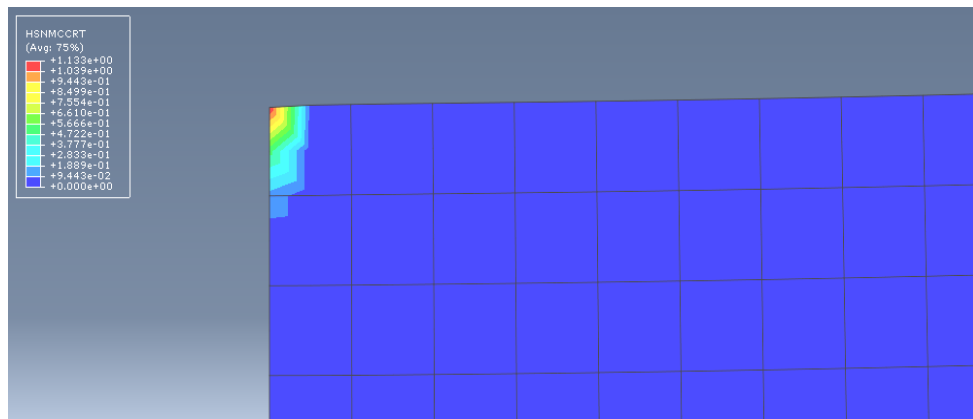
Fig.5.5 Evoluția degradării pentru materialul HDPE + 75%puzderii de cânepă



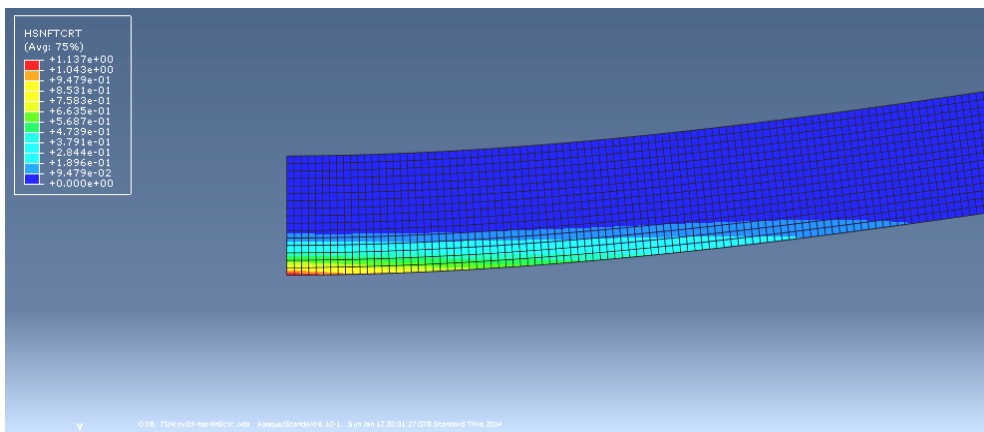
a. Tensiunea din material pentru deplasarea maximă



b. Criteriul HSNMCCRT corespunzător deplasării la care apare degradarea



c. Detaliu la criteriul HSNMCCRT corespunzător deplasării la care apare degradarea



d. Criteriul HSNFTCRT la care apare degradarea

Fig. 5.6.(a-d) Reprezentarea grafică a tensiunilor din epruvetă și apariției degradărilor

Din analiza rezultatelor se observă că apariția primelor degradări se produce prin îndeplinirea criteriului de solicitare la compresiune a matricei (Fig5.5). Aceasta nu conduce la ruperea epruvetei ci la o tasare a acesteia în partea superioară. Dacă se urmărește în continuare evoluția criteriilor de degradare se observă că la următorul pas corespunzător unei deplasări de 1,4 mm este îndeplinit și criteriul de degradare HSNFTCRT care ține cont de tensiunea în fibră astfel încât putem considera că prin cumularea efectului celor două criterii, degradarea devine catastrofală.

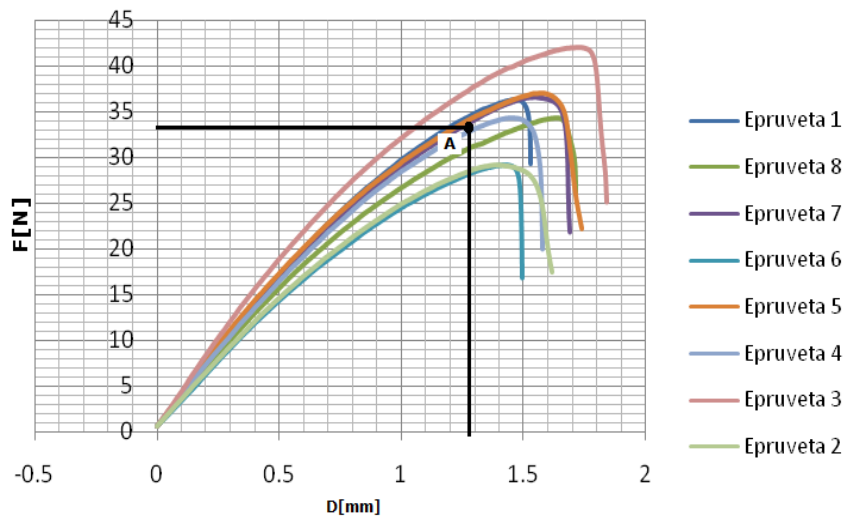


Fig.5.7. Punerea în evidență a momentului apariției degradărilor pe baza curbelor experimentale

Pentru compararea rezultatelor obținute prin simulare cu cele experimentale, pe diagrama experimentală forță deplasare la încovoiere (Fig.5.7) am considerat un punct A în care scăderea pantei acestor curbe devine evidentă, punct în care apar degradări majore în epruvete. Se observă că acest punct corespunde unei valori a forței de aproximativ 34,2N, respectiv unei săgeți la încovoiere de aproximativ 1.28mm. Simularea numerică indică drept valori ale forței și săgeții de 33.62N și 1.2mm astfel încât se poate considera că diferențele pot fi considerate acceptabile. Valorile determinate experimental pentru forța de rupere la încovoiere, și săgeata la încovoiere (Cap.4) sunt $F_{max} = 34.88N$ și $D_{max} = 1.52$ mm. Din rezultatele prezentate rezultă că degradarea epruvetei apare înaintea ruperii acesteia, motiv pentru care la solicitările reale ale materialului nu trebuie să se ajungă până la valorile critice.

5.5.4 Influența unor caracteristici ale materialelor asupra fenomenului de degradare pentru materialului încercat de tip epruvetă

Influența tensiunilor de tracțiune ale materialului asupra degradării

Influența tensiunilor de tracțiune σ_{tL} și σ_{tT} asupra criteriilor de degradare sunt prezentate în figurile 5.8a-d. Analiza a fost efectuată considerând materialul cu

proprietățile inițiale singurele caracteristici care au fost modificate fiind perechile σ_{tL} și σ_{tT} .

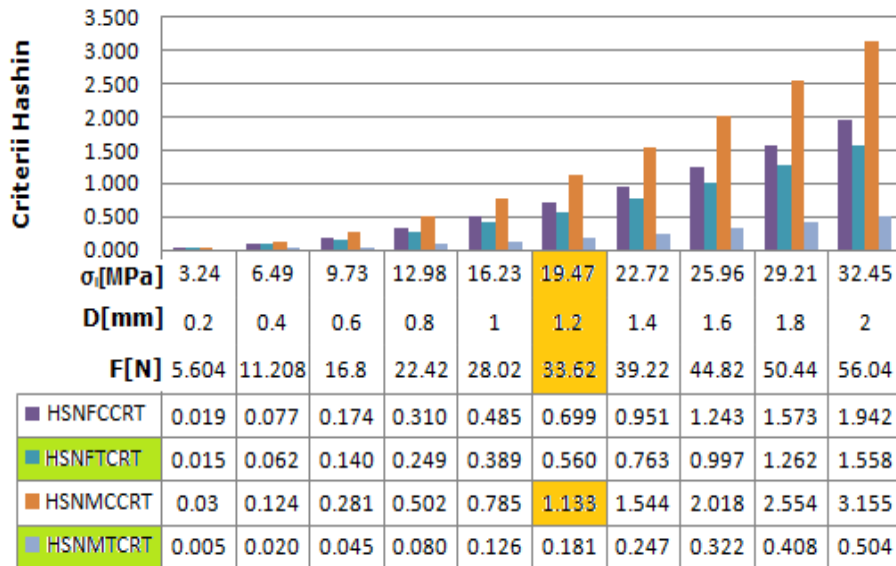


Fig.5.8.a Variația criteriilor de degradare pentru materialul analizat cu $\sigma_{tL}=26$ MPa, $\sigma_{tT}=14$ MPa

Observație: La creșterea σ_{tL} de la 21.31MPa la 26 MPa și scăderea σ_{tT} de la 31MPa la 14MPa criteriul prioritar de degradare rămâne neschimbat, pericolul apariției degradării după criteriul HSNFTCRT scade iar după criteriul HSNMTCRT crește.

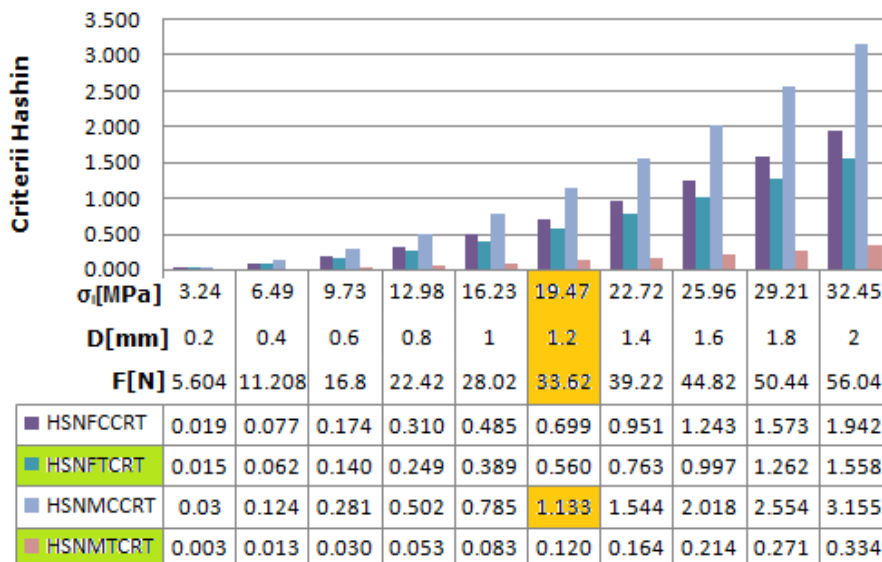


Fig.5.8.b Variația criteriilor de degradare pentru materialul analizat cu $\sigma_{tL}=26$ MPa, $\sigma_{tT}=20$ MPa

Observație: La creșterea σ_{tL} de la 21.31MPa la 26MPa și scăderea σ_{tT} de la 31MPa la 20MPa criteriul prioritar de degradare rămâne neschimbat, pericolul apariției degradării după criteriul HSNFTCRTC scade iar după criteriul HSNMTCRTC crește.

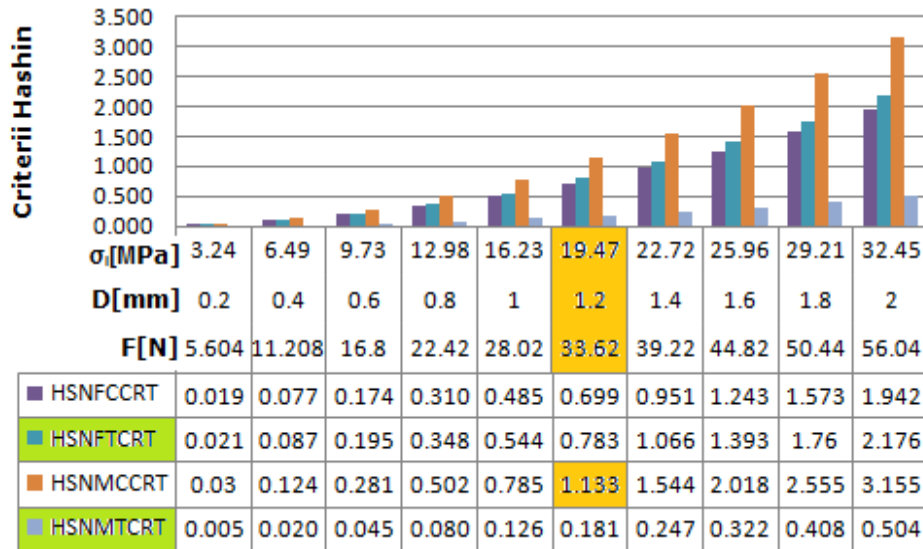


Fig.5.8.c Variația criteriilor de degradare pentru materialul analizat cu σ_{tL} =22 MPa, σ_{tT} =14 MPa

Observație: La creșterea σ_{tL} de la 21.31MPa la 22 MPa și scăderea σ_{tT} de la 31MPa la 14MPa criteriul prioritar de degradare rămâne neschimbat, pericolul apariției degradării după criteriul HSNFTCRTC scade iar după criteriul HSNMTCRTC crește.

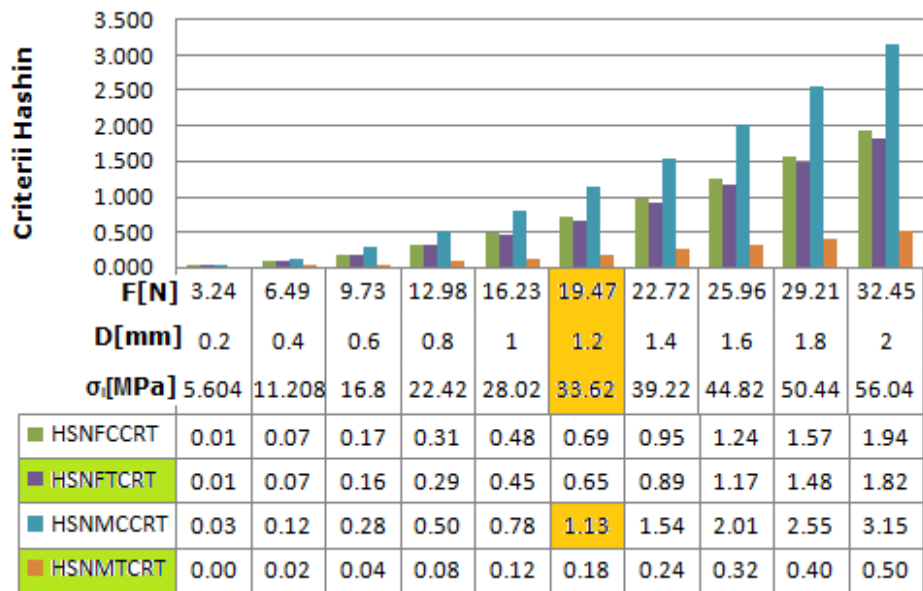


Fig.5.8.d Variația criteriilor de degradare pentru materialul analizat cu $\sigma_{tL} = 24\text{MPa}$, $\sigma_{tT} = 14\text{MPa}$

Observație: La creșterea σ_{tL} de la 21.31MPa la 24MPa și scăderea σ_{tT} de la 31MPa la 14MPa criteriul prioritar de degradare rămâne neschimbat pericolul apariției degradării după criteriul HSNFTCRT scade iar după criteriul HSNMTCRT crește.

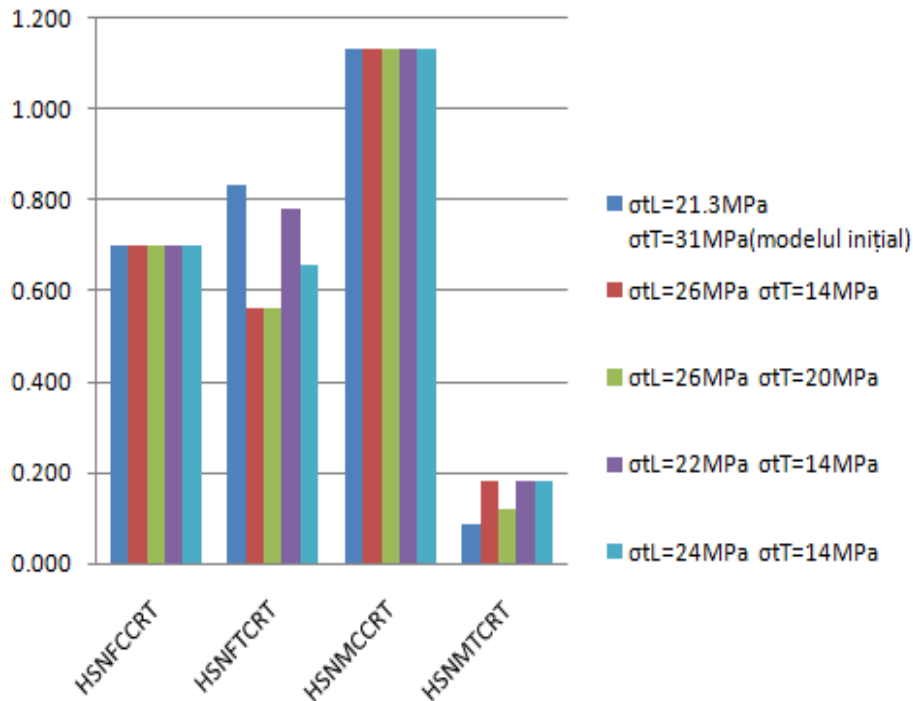


Fig.5.9 Variația criteriilor de degradare Hashin în funcție de tensiunile de tracțiune ale materialului

Criteriile HSNFCCRT și HSNMCCRT rămân neschimbate deoarece sunt influențate de tensiunile de compresiune ale materialului, criteriul HSNFTCRT scade odată cu creșterea lui σ_L și menținerea constantă a lui σ_T deoarece criteriul este influențat de tensiunile la tracțiune ale materialului pe direcție longitudinală. Cu creșterea lui σ_T scade HSNMTCRT, criteriu influențat de tensiunile de tracțiune pe direcție transversală din material. Valorile mici ale criteriilor evidențiază un pericol redus de apariție a degradării.

Influența tensiunilor de compresiune ale materialului asupra degradării

Influența tensiunilor de compresiune σ_{cL} și σ_{cT} asupra criteriilor de degradare sunt prezentate în figurile 5.10.a-c. Analiza a fost efectuată considerând materialul cu proprietățile inițiale singurele caracteristici care au fost modificate fiind perechile σ_{cL} și σ_{cT} .

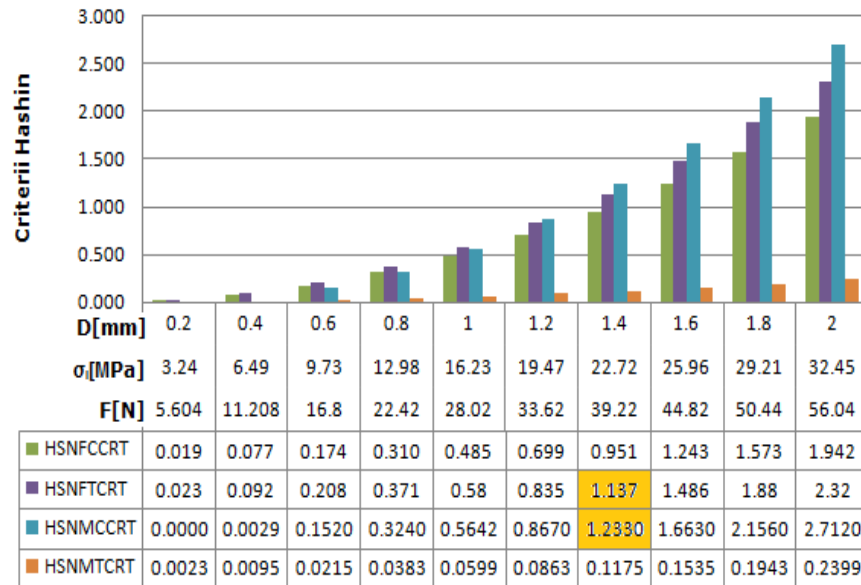


Fig.5.10.a Variația criteriilor de degradare pentru materialul analizat cu $\sigma_{cl} = 40.21$ MPa, $\sigma_{ct} = 40.21$ MPa

Pentru aceeași valoare a $\sigma_{cl} = 40.21$ MPa, la creșterea σ_{ct} de la 34.93MPa la 40.21MPa criteriul prioritar de degradare HSNMCCRT scade ceea ce înseamnă că pericolul apariției degradării după criteriul corespunzător tensiunilor de compresiune pe direcție longitudinală a materialului scade. Restul criteriilor de degradare rămân neschimbate.

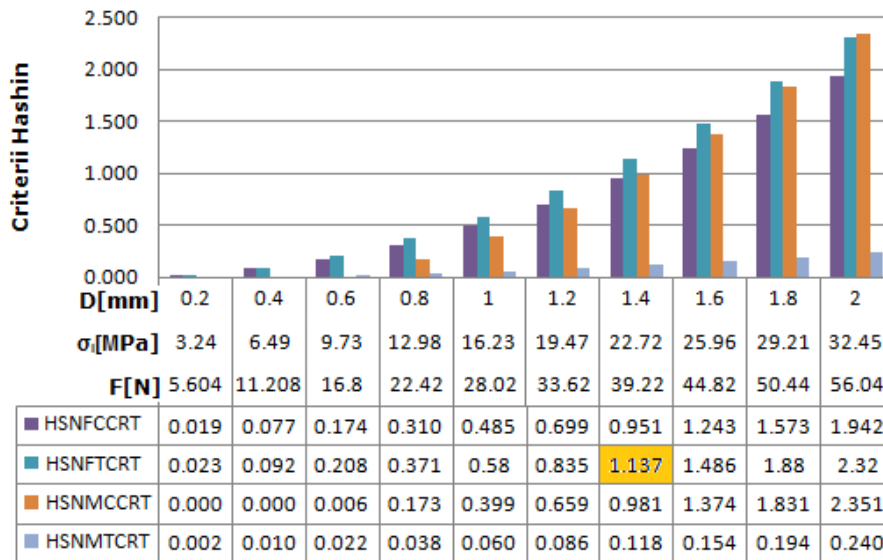


Fig.5.10.b Variația criteriilor de degradare pentru materialul analizat cu $\sigma_{cl} = 40.21$ MPa, $\sigma_{ct} = 45$ MPa.

Pentru aceeași valoare a $\sigma_{cl}=40.21$ MPa, la creșterea σ_{ct} de la 34.93MPa la 45MPa criteriul degradare HSNMCCRT scade ceea ce înseamnă că pericolul apariției degradării după criteriul corespunzător tensiunilor de compresiune pe direcție longitudinală a materialului scade. Devine criteriu prioritar de degradare HSNFTCRT criteriul corespunzător tensiunilor de tracțiune pe direcție transversală.

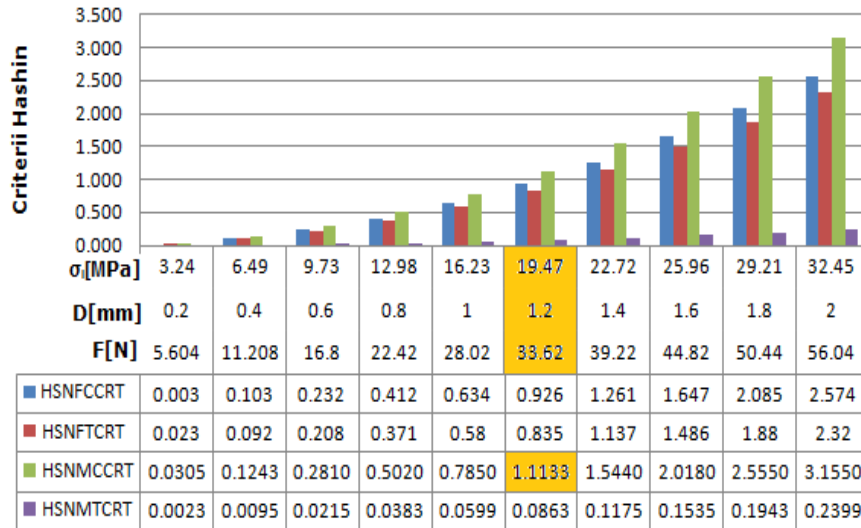


Fig.5.10.c Variația criteriilor de degradare pentru materialul analizat cu $\sigma_{cl} =34.93$ MPa, $\sigma_{ct}=34.93$ MPa

Pentru aceeași valoare a $\sigma_{ct} =34.93$ MPa, la scăderea σ_{cl} de la 40.21 MPa la 34.93MPa criteriul prioritar de degradare HSNMCCRT rămâne neschimbat. Criteriul HSNFCCRT crește ceea ce înseamnă că pericolul apariției degradării după criteriul corespunzător tensiunilor de compresiune pe direcție longitudinală a materialului crește. Variația criteriilor de degradare Hashin în funcție de tensiunile la compresiune este dată în figura 5.11.

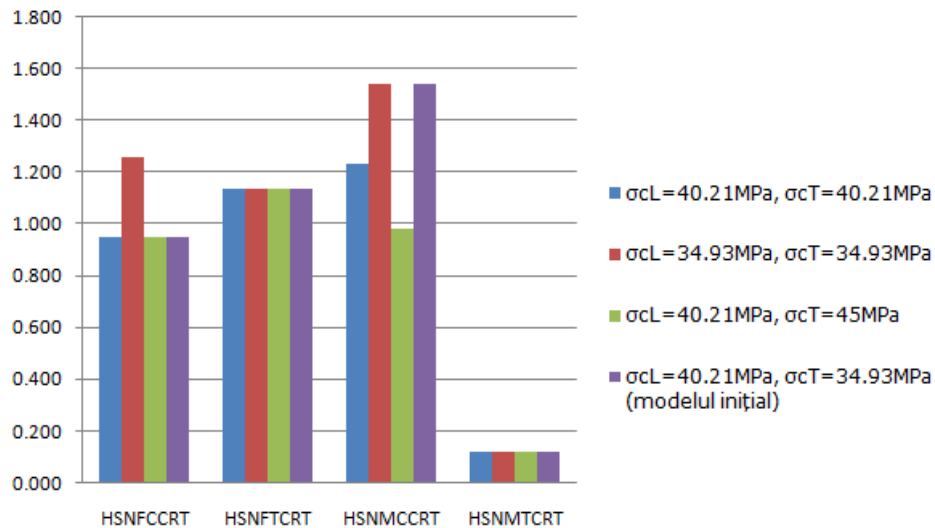


Fig.5.11. Variația criteriilor de degradare Hashin în funcție de tensiunile de compresiune ale materialului

Criteriile HSNFTCRT și HSNMTCRT rămân neschimbate cu creșterea sau descreșterea tensiunilor la compresiune, ele fiind influențate numai de tensiunile de tracțiune ale materialului. Criteriul HSNMCCRT scade odată cu creșterea lui σ_{CT} și menținerea constantă a lui σ_{TL} deoarece criteriul este influențat de tensiunile materialului pe direcție transversală. Cu creșterea lui σ_{CL} pentru aceeași σ_{CT} criteriul HSNFCCRT crește, criteriu influențat de tensiunile de compresiune pe direcție longitudinală din material. Valorile mici ale criteriilor arată pericol redus de apariție a degradării.

5.6. Studiul degradărilor cu programul Abaqus la piesele de tip fagure încercate experimental la încovoiere

Pentru piesa de tip fagure s-a realizat atât experimental cât și prin modelare o solicitare la încovoiere în două sensuri raportate la forma asimetrică a piesei față de o axă orizontală. Simularea s-a realizat cu elemente finite în stare plană de tensiune CPS4R având 10056 de elemente legate în 10652 de noduri .

Din analiza rezultatelor obținute pentru solicitarea la încovoiere criteriul prioritar de degradare este HSNFTCRT.

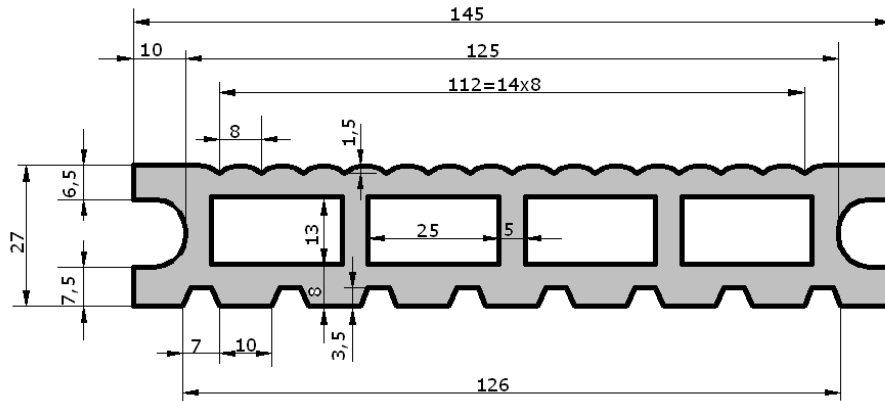


Fig.5.12. Profilul piesei de tip fagure

5.6.1 Definierea caracteristicilor materialului încercat

Materialul din care este executată piesa este materialul compozit pe bază HDPE ranforsat cu 75% puzderii de cânepă praf fin (cu aceleași caracteristici prezentate în capitolul 5.5.1).

5.6.2 Definierea stării de încărcare a materialului de tip fagure încercat la încovoiere

Varianta 1

Piesa a fost fixată în cele două zone inferioare și s-a impus o deplasare pe verticală în zona centrală superioară a piesei de 1.5mm conform figurii 5.12.

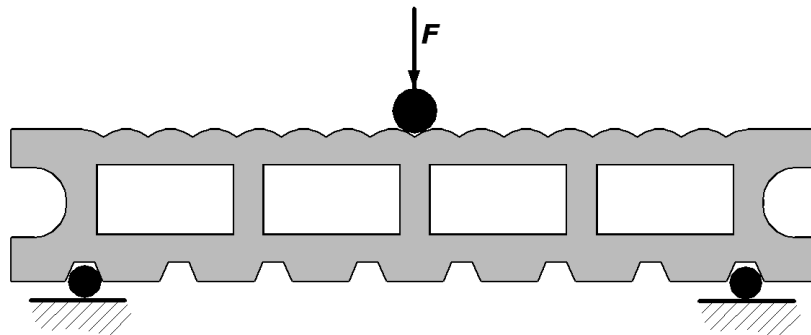


Fig.5.12. Schema încărcării pentru varianta 1

În figurile 5.13, 5.14, 5.15 sunt reprezentate definierea încărcărilor, vizualizarea deplasărilor respectiv vizualizarea rupei

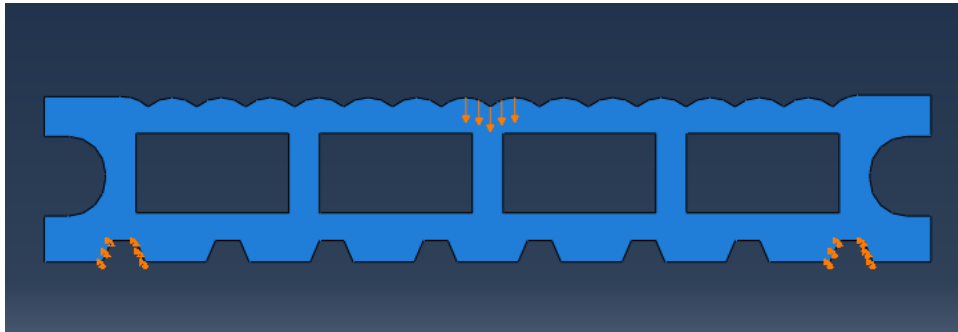


Fig.5.13 Definirea încărcărilor pentru varianta 1 în Abaqus

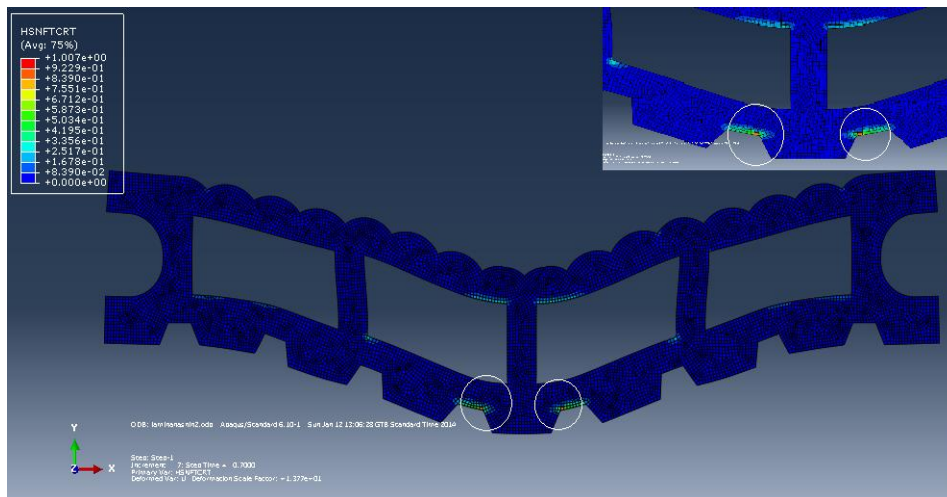


Fig.5.14 Vizualizarea degradărilor oferite de Abaqus



Fig.5.15 Vizualizarea ruperii la încercarea experimentală

În figura 5.16 este reprezentată variația criteriilor de degradare Hashin la încovoiere

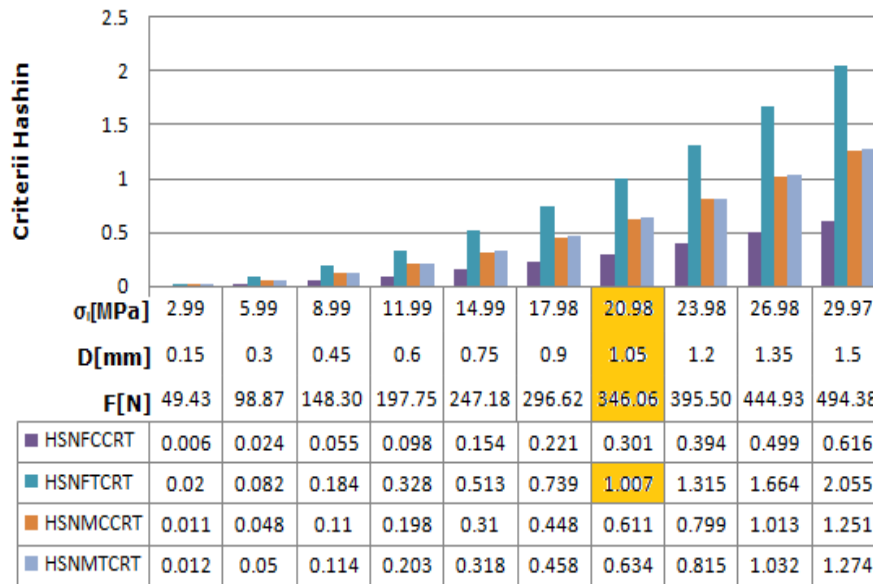


Fig.5.16 Variația criteriilor de degradare Hashin la încovoiere pentru piesa de tip figure pe varianta 1

După efectuarea simulării se observă o deformare a piesei și apariția degradării la o deplasare de 1.05mm care a generat o tensiune σ_i de 20.98 MPa corespunzătoare unei forțe de 346.06N (Fig.5.16). Zona în care apar degradările se observă în figura 5.14 (ansamblu și în detaliu). Valorile determinate experimental pentru ruperea la încovoiere, pentru forță și deplasare(Cap.4) sunt $F_{max} = 376.16N$ și $D_{max} = 0.90mm$.

Simularea a pus în evidență faptul că degradările au apărut la o forță mai mică decât forța de rupere. Criteriul prioritar în determinarea apariției degradării este criteriul de inițiere a degradării pentru tracțiunea fibrei (HSNFTCRT). Este evident că atât simularea cât și încercarea experimentală au pus în evidență ruperea în zona unui concentrator de tensiune.(Fig.5.14 și 5.15).

Varianta 2

Piesa a fost fixată în cele două zone inferioare și s-a impus o deplasare pe verticală în zona centrală superioară a piesei de 1.5mm conform figurii 5.17.

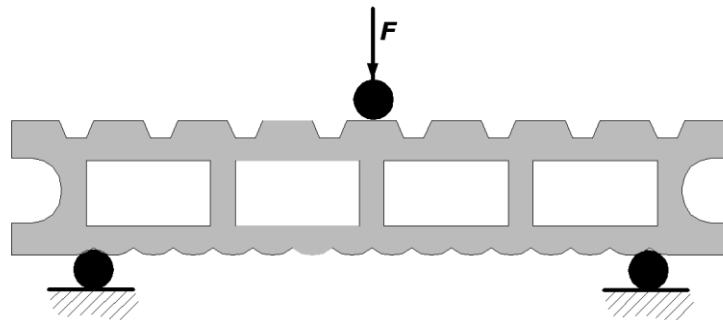


Fig.5.17 Schema încărcării pentru varianta 2

În figurile 5.18, 5.19 și 5.20 sunt reprezentate definirea încărcărilor, vizualizarea degradărilor și vizualizarea rupei pentru varianta 2.

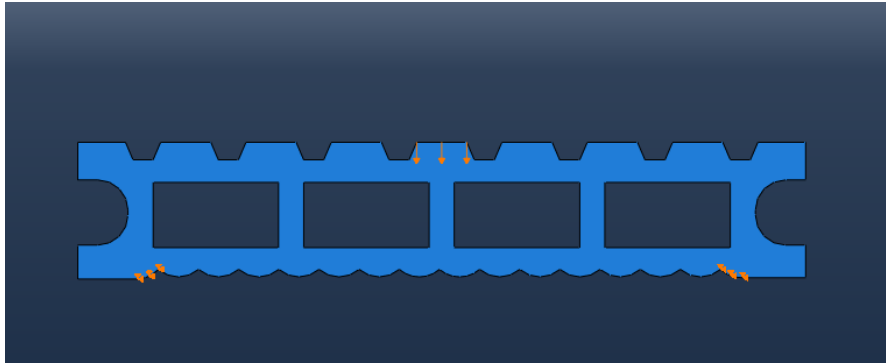


Fig.5.18 Definirea încărcărilor pentru varianta 2 în Abaqus

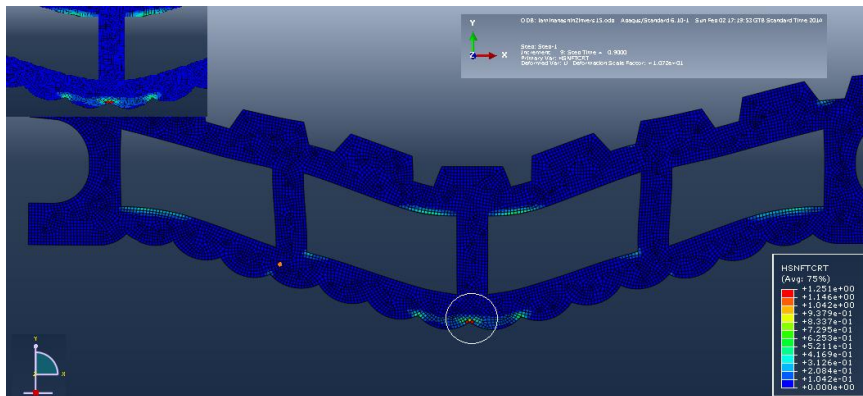


Fig.5.19 Vizualizarea degradărilor oferite de Abaqus



Fig.5.20 Vizualizarea rupei la încercarea experimentală

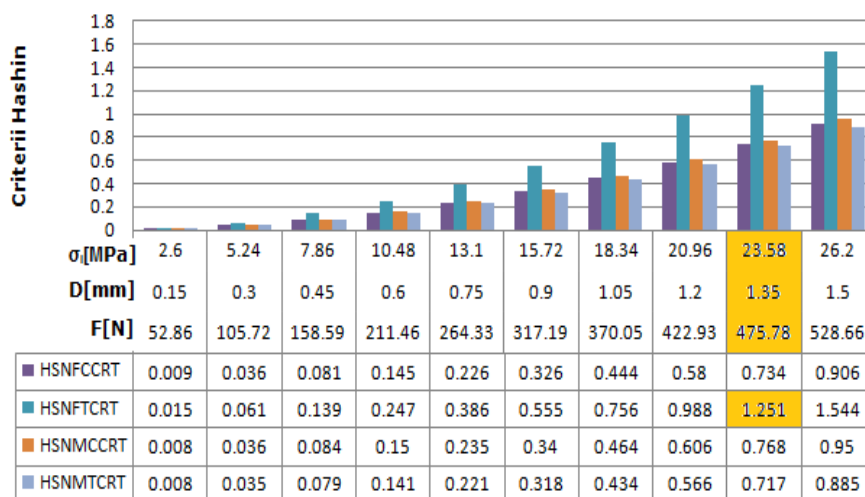


Fig.5.21. Variația criteriilor de degradare Hashin la încovoiere pentru piesa de tip fagure pe varianta 2

După efectuarea simulării se observă o deformare a piesei și apariția degradării la o deplasare de 1.35mm care a generat o tensiune σ_i de 23.58 MPa corespunzătoare unei forțe de 475.78 N (Fig.5.21). Zona în care apar degradările se observă în figura 5.19 (ansamblu și în detaliu). Valorile determinate experimental pentru ruperea la încovoiere, pentru forță și deplasare (Cap.4) sunt $F_{max} = 513N$ și $D_{max} = 1.31mm$.

Simularea a pus în evidență faptul că degradările au apărut la o forță mai mică decât forța de rupere. Criteriul prioritar în determinarea apariției degradării este criteriul de inițiere a degradării pentru tracțiunea fibrei (HSNFTCRT). Este evident că atât simularea cât și încercarea experimentală au pus în evidență ruperea în zona unui concentrator de tensiune. (Fig.5.19 și 5.20).

Concluzii

Din analiza degradării efectuată pe epruvetă se constată următoarele:

-apariția primelor degradări în epruvetă la solicitarea acesteia la încovoiere se produc datorită compresiunii materialului din care este confecționată, în zona superioară a acesteia. Aceste degradări nu duc la ruperea epruvetei ci la o tasare a ei.

-cu creșterea sau descreșterea tensiunilor la compresiune, criteriile HSNFTCRT și HSNMTCRT rămân neschimbate, ele fiind influențate numai de tensiunile de tracțiune ale materialului. Valorile mici ale criteriilor de degradare arată un pericol redus de apariție a acesteia.

Din analiza degradării efectuată pe piesa de tip fagure se constată următoarele:

-simularea a pus în evidență faptul că degradările au apărut la o forță mai mică decât forța de rupere la încovoiere. Criteriul prioritar de degradare este HSNFTCRT. El a pus în evidență faptul că ruperea s-a produs în zona unui concentrator de tensiune.

- în cazul variantei 1 degradările au apărut la valori mai mici ale forțelor la încovoiere comparativ cu varianta 2, ceea ce arată că geometria concentratorilor de tensiune influențează caracteristicile de degradare ale materialului.

6. CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI CONCLUZII FINALE, DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

6.1. Contribuții personale

Materialele analizate în cadrul acestui studiu sunt materiale biocompozite noi ranforsate cu deșeuri de plante liberiene (în și cânepă) obținute în urma procesului tehnologic de separare a fibrelor liberiene de tulpini.

- În această teză a fost abordată o problemă relativ nouă din punct de vedere al materialelor compozite, aceea a materialelor biocompozite ranforsate cu deșeuri din plante liberiene sub formă de fibre scurte și puzderii.

- A fost analizată oportunitatea utilizării acestor materiale precum și avantajele și dezavantajele lor. Studiile teoretice și experimentale efectuate până în prezent precum și realizările din acest domeniu justifică extinderea preocupărilor în ceea ce privește materialele biocompozite ranforsate cu fibre și puzderii liberiene, în vederea realizării unor materiale biocompozite noi cu proprietăți mecanice corespunzătoare

- În acest sens, în lucrare a fost făcută o prezentare a materialelor biocompozite în general, a tipurilor de fibre și matrici utilizate cu precizarea proprietăților fizico-mecanice ale acestora precum și a plantelor liberiene din care se extrag aceste fibre.

- Deasemenea au fost prezentate pe scurt tehnologiile de fabricare a materialelor biocompozite și proprietățile fizico-mecanice ale acestora.

- Pentru estimarea teoretică a proprietăților mecanice la tracțiune ale materialelor biocompozite analizate în cadrul tezei au fost prezentate câteva modele micromecanice de calcul. Calculele s-au efectuat ținând cont de geometria, fracțiunea de volum și proprietățile mecanice ale elementelor de ranforsare, de modul de dispunere a acestora în compozit, precum și de proprietățile mecanice ale matricelor materialelor biocompozite realizate în vederea efectuării încercărilor experimentale

- În vederea extinderii modelelor de distribuție a elementelor de ranforsare în matricea compozitului, s-a propus un nou model de distribuție, modelul pătratic centrat, pentru care s-a determinat valoarea coeficientului K_r de distribuție a elementelor de ranforsare în compozit.

- A fost efectuat un studiu comparativ între rezultatele teoretice obținute în calculul rezistenței la tracțiune și a modulului de elasticitate longitudinal

- Încercările experimentale s-au efectuat pe o varietate de materiale biocompozite noi pe bază de rășini termorigide și rășini termoplastice ranforsate cu fibre scurte de în și cânepă sau puzderii de cânepă pentru diferite fracțiuni de volum ale elementelor de ranforsare. Încercările fizico-mecanice (tracțiune, compresiune, încovoiere, impact, duritate, absorbția de apă, gradul de umflare în grosime după imersia în apă și îmbătrânirea) au fost efectuate în conformitate cu standardele în vigoare cu ajutorul mașinilor și aparaturii de încercare care au fost deasemenea prezentate pe scurt în lucrare.

- S-a făcut o descriere din punct de vedere micro și microscopic a acestor materiale biocompozite noi și s-au prezentat tehnologiile de obținere a acestora.
- Pe baza rezultatelor experimentale obținute, aceste materiale biocompozite noi s-au analizat din punct de vedere al proprietăților fizice și mecanice
 - S-a făcut o analiză comparativă între proprietățile diferitelor materiale biocompozite care au fost testate.
 - S-a analizat efectul agenților de compatibilizare asupra proprietăților mecanice ale materialelor biocompozite
 - S-a studiat efectul fracțiunii de volum, a naturii și dimensiunilor elementelor de ranforsare asupra proprietăților mecanice ale biocompozitelor studiate
 - Rezultatele experimentale au fost sistematizate prin tabele și grafice
 - Aceste rezultate au fost utilizate pentru validarea modelelor micromecanice de predicție a proprietăților mecanice ale biocompozitelor.
 - Pe baza proprietăților fizico-mecanice ale biocompozitelor, obținute experimental au fost identificate domenii de utilizare a acestora în practică.
 - A fost făcut un studiu prin simulare numerică cu ajutorul programului Abaqus, privind comportamentul la solicitarea de încovoiere pentru o epruvetă și o piesă cu structură celulară de tip fagure realizate din materialul biocompozit pe bază de polietilenă de densitate mare ranforsat cu 75% puzderii de cânepă sub formă de praf fin. În cadrul studiului s-au efectuat analize ale fenomenului de degradare a pieselor respective.

6.2. Concluzii finale

Din punct de vedere al proprietăților mecanice ale materialelor biocompozite analizate s-a arătat că proprietățile mecanice ale acestora sunt influențate de proprietățile mecanice ale elementelor de ranforsare și ale matricilor, geometria elementelor de ranforsare (lungime, diametru), fracțiunea de volum a acestora, interfața fibre-matrice, tehnologia de fabricare, de structura materialelor.

Aspectul microscopic al biocompozitelor analizate arată că biocompozitele ranforsate cu fibre și puzderii liberiene au o structură compactă. Forma și dimensiunile elementelor de ranforsare atât pentru fibrele scurte din in și cânepă cât și pentru puzderiile de cânepă diferă mult în cadrul aceluiași compozit. Din acest motiv, există diferențe uneori semnificative între rezultatele teoretice de estimare a proprietăților mecanice la tracțiune și cele obținute experimental.

Se constată că valorile obținute folosind modelele micromecanice Kelly Tyson și Cox Krenkel de estimare a rezistenței la tracțiune și a modulului de elasticitate longitudinal sunt mai apropiate între ele și diferă mult de cele obținute cu modelul Halpin Tsai. Diferențele apar din faptul că modelele Kelly Tyson și Cox Krenkel țin cont de mai multe elemente care determină proprietățile intrinseci ale compozitului.

Biocompozitele pe bază de rășini furanice ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă care sunt biocompozite 100% naturale au densitatea, duritatea și rezistența la impact mai mici decât biocompozitele pe bază de rășini ureo-formaldehidice pentru același tip de element de ranforsare și aceeași fracțiune de volum a acestuia.

Biocompozitele pe bază de rășini melamino-formaldehidice au fost supuse la teste mecanice la impact și încovoiere. Valoările mici obținute pentru rezistențele la

impact și forma curbelor caracteristice la încovoiere arată că materialele sunt materiale fragile. Pentru aceste materiale s-a determinat de asemenea absorbția de apă și gradul de umflare în grosime după imersia în apă. Rezultatele arată că pentru biocompozitele ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă atât gradul de umflare în grosime cât și capacitatea de absorbție a apei respectiv gradul de umflare în grosime după imersia în apă sunt mai reduse decât în cazul celor ranforsate cu puzderii de cânepă.

Biocompozitele pe bază de polipropilenă ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă sau cu puzderii de cânepă (măcinate sau sub formă de praf grosier sau fin) au fost testate la impact, tracțiune, încovoiere și duritate. Pentru aceste biocompozite s-au făcut analize comparative între valorile teoretice și cele experimentale ale rezistenței la tracțiune și modulului de elasticitate longitudinal. Aceste analize au arătat că la majoritatea materialelor biocompozite analizate, exceptând materialul biocompozit cu 60% puzderii de cânepă sub formă de praf fin, modelul Kelly Tyson aproximează cel mai bine rezultatele experimentale. Toate modelele de distribuție a fibrei în compozit dau valori teoretice apropiate de cele experimentale pentru rezistența la tracțiune. Modelul pătratic centrat aproximează pentru acest material bine rezultatele teoretice pentru modulul de elasticitate longitudinal. Calculele teoretice efectuate după modelul Halpin Tsai dau rezultate diferite de cele experimentale. Diferențele apar din faptul că modelele Kelly Tyson și Cox Krenkel țin cont de mai multe elemente care determină proprietățile intrinseci ale compozitului.

Din analiza comparativă între rezultatele teoretice și cele experimentale pentru biocompozitele pe bază de polipropilenă cu aceeași fracțiune de volum și elemente de ranforsare diferite se constată că rezistența la tracțiune cea mai mare se obține în cazul biocompozitului ranforsat cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin. De asemenea, modulul de elasticitate longitudinal este mai mic în cazul acestui biocompozit decât în cazul celor ranforsate cu fibre scurte sau puzderii măcinate. Din aceasta se poate trage concluzia că prin reducerea dimensiunilor elementelor de ranforsare la ordinul micronilor, proprietățile la tracțiune ale materialelor biocompozite se măresc.

Biocompozitele pe bază de polietilenă de joasă densitate ranforsate cu puzderii de cânepă sub formă de praf fin au fost testate la tracțiune și impact. Rezultatele experimentale obținute arată că pentru aceeași fracțiune de volum de puzderii biocompozitele cu agent de compatibilizare au proprietăți mecanice la tracțiune și impact mai mici decât în cazul biocompozitelor pe bază de polipropilenă.

Materialul biocompozit pe bază de polietilenă de înaltă densitate ranforsat cu 75% puzderii de cânepă sub formă de praf fin a fost încercat experimental atât pe epruvete decupate dintr-un profil extrudat tip fagure din acest material cât și pe profil. Pentru epruvete au fost efectuate încercări la tracțiune, încovoiere și compresiune iar pentru profilul extrudat s-au efectuat încercări la încovoiere. Încercările la încovoiere au fost simulate cu ajutorul programului Abaqus și au fost comparate rezultatele obținute prin simulare cu cele teoretice.

Curbele caracteristice la tracțiune și încovoiere ale materialelor biocompozite pe bază de matrici polimerice ranforsate cu fibre scurte și puzderii de plante liberiene arată că acestea prezintă porțiuni cvasiliniare iar ruperea acestora se produce în general brusc.

Rezistența la impact a biocompozitelor este scăzută ceea ce arată că acestea sunt materiale fragile, fapt evidențiat și prin aspectul în ruptură al acestora.

Biocompozitele ranforsate cu fibre scurte de in și cânepă au proprietăți fizico-mecanice mai bune decât cele ranforsate cu puzderii de cânepă, Pernevan

M.S, și alții, [2012]. Se observă că proprietățile mecanice la tracțiune și încovoiere pentru biocompozitele ranforsate cu puzderii de cânepă cu granulație fină sunt mai bune decât în cazul biocompozitelor cu granulație grosieră, Pernevan M.S, și alții, [2011]. Acest lucru se explică prin faptul că în cazul biocompozitelor cu granulație fină există o omogenizare mai bună a elementului de ranforsare în masa matricei, ceea ce determină o aderență mai bună a matricei la elementul de ranforsare.

Odată cu creșterea fracțiunii de volum a elementului de ranforsare rezistența la impact a biocompozitelor scade. La aceeași fracțiune de volum a fibrei, biocompozitele ranforsate cu puzderii sub formă de praf grosier au rezistența la impact mai scăzută decât cele ranforsate cu praf fin, deci sunt mai fragile.

Odată cu creșterea fracțiunii de volum a elementului de ranforsare, atât rezistența la tracțiune cât și rezistența la încovoiere a biocompozitelor cresc până la o anumită valoare optimă a conținutului de element de ranforsare din biocompozit. Depășirea acestei valori optime a fracțiunii de volum a elementului de ranforsare în biocompozit face ca aderența dintre acesta și matrice să fie mai slabă, ceea ce conduce la scăderea acestor proprietăți mecanice.

Odată cu creșterea fracțiunii de volum a elementului de ranforsare, atât modulul de elasticitate longitudinal cât și modulul de elasticitate la încovoiere cresc.

Pentru aceeași fracțiune de volum și același element de ranforsare, biocompozitele pe bază de rășini termorigide au rezistența la impact mai scăzută decât cele pe bază de polipropilenă.

De asemenea biocompozitele 100% naturale pe bază de rășini furanice au rezistența la impact mai scăzută decât cele pe bază de rășini ureo-formaldehidice.

Pentru aceeași fracțiune de volum și același element de ranforsare, biocompozitele pe bază de polipropilenă au rezistența la impact mai scăzută decât cele pe bază de polietilenă de joasă densitate.

Pentru aceeași fracțiune de volum și același element de ranforsare, biocompozitele pe bază de polipropilenă au rezistența la tracțiune și modulul de elasticitate longitudinal mai mari decât cele pe bază de polietilenă de joasă densitate.

Biocompozitele care au în compoziția lor agent de compatibilizare au proprietăți fizico-mecanice celor fără agent de compatibilizare (maleabilizare). În cadrul biocompozitelor termorigide, biocompozitele pe bază de biorășini (100%) naturale au rezistența la impact mai scăzută de cât cele pe bază de rășini ureo-formaldehidice.

Absorbția de umiditate în biocompozit conduce la scăderea proprietăților fizico-mecanice ale acestuia.

Atât densitatea cât și durezza biocompozitelor realizate sunt scăzute.

Analiza studiului de degradare pentru piese confecționate din biocompozit pe bază de HDPE ranforsat cu 75% puzderii de cânepă sub formă de praf fin pus în evidență se constată următoarele:

-aparitia primelor degradări în epruvetă la solicitarea acesteia la încovoiere se produc datorită compresiunii materialului din care este confecționată, în zona superioară a acesteia. Aceste degradări nu duc la ruperea epruvetei ci la o tasare a ei.

-cu creșterea sau descreșterea tensiunilor la compresiune, criteriile de degradare la tracțiune rămân neschimbate, ele fiind influențate numai de tensiunile de tracțiune ale materialului. Valorile mici ale criteriilor de degradare arată un pericol redus de apariție a acesteia.

-degradările au apărut la o forță mai mică decât forța de rupere la încovoiere.

-ruperea s-a produs în zona unui concentrator de tensiune.
-geometria concentratorilor de tensiune influențează caracteristicile de degradare ale pieselor.

Studiul apariției degradărilor în piese cu diverse considerații, solicitate mecanic cu ajutorul programului Abaqus oferă informații referitoare la zonele în care apar primele degradări, cauzele care produc degradările (prin indicarea criteriilor de degradare, gradul în care proprietățile mecanice ale materialelor din care sunt realizate piesele influențează degradarea). Aceste informații pot fi utilizate la optimizarea formei pieselor și la îmbunătățirea acelor caracteristici mecanice care să minimizeze pericolul apariției degradărilor.

Pe baza rezultatelor obținute în cadrul acestui studiu au fost identificate câteva domenii de aplicabilitate ale acestora: în industria mobilei pentru obținerea de scânduri, plăci, placaje, în electrotehnică ca înlocuitor al bachelitei, în construcții (pentru confecționarea de profile, lambriuri) în construcția de automobile (la reperi pentru interioare auto), etc.

6.3. Direcții viitoare de cercetare

- Pe parcursul elaborării acestei lucrări autorul a găsit necesară pentru viitor posibilitatea îmbunătățirii modelelor micromecanice de estimare a proprietăților mecanice a materialelor compozite ranforsate cu fibre și puzderii liberiene prin introducerea unor noi factori de corecție a proprietăților mecanice ale materialelor biocompozite în relațiile de calcul ale acestora, care să țină cont de neuniformitatea geometriei elementelor de ranforsare

- elaborarea de studii ale apariției degradării în toate materialele compozite analizate în cadrul acestei teme de cercetare;

- elaborarea unor studii de optimizare a proprietăților mecanice a materialelor compozite analizate din punct de vedere al fracțiunii de volum și a geometriei elementelor de ranforsare;

- elaborarea unor studii de optimizare a proprietăților mecanice ale pieselor din materialele compozite analizate, prin realizarea de combinații de solicitări și configurații de piese;

- realizarea unor biocompozite ranforsate cu micro și nanoparticule de fibre sau puzderii liberiene cu proprietăți mecanice ridicate;

- identificarea unor domenii noi de utilizare a materialelor compozite ranforsate cu fibre și puzderii liberiene în practică;

- elaborarea unor metodologii și respectiv standardizări pentru încercările mecanice ale materialelor biocompozite;

- elaborarea unei baze de date pentru rețete de materiale biocompozite cu precizarea proprietăților mecanice ale acestora;

- extinderea studiilor de degradare pentru toate materialele analizate în cadrul acestei teze.

BIBLIOGRAFIE

1. Abaqus 6.11 Analysis Users Manual Volume III (2011) *Damage initiation for fiber-reinforced composites*, Providence R.I., Dassault Systems, Center of Simulation Excellence, pag.677
2. Anandjiwala, RD and Blouw, S. 2004. Composites from bast fibres - prospects and potential in the changing market environment. *FAO Global Workshop: Bast Fibrous Plants for Healthy Life*, Banja Luka, Bosnia-Herzegovina, 24-28 October, 1-22
3. Andersons J., Sparnins E., Porike E., Joffe R. 2008 Strength distribution of elementary flax fibres due to mechanical defects, *11th International Inorganic-Bonded Fiber Composites Conference (IIBCC) Madrid, Nov. 4-7, Proceedings*, ISBN 9788469168295, 247-253,
4. Arbelaz, B. Fernández, J.A. Ramos, A. Retegi, R. Llano-Ponte, I. Mondragon 2005, Mechanical properties of short flax fibre bundle/polypropylene composites: Influence of matrix/fibre modification, fibre content, water uptake and recycling, *Composites Science and Technology* 65, 1582–1592
5. Avérous L., Le Digabel F 2006 Properties of biocomposites based on lignocellulosic fillers, *Carbohydrate Polymers Volume 66, Issue 4, 23 November*, 480-493
6. Ayse A., Mohini S. 2008 Biocomposites from wheat straw nanofibers: Morphology, thermal and mechanical properties *Composites Science and Technology* 68, 557–565
7. Bank L.C., Gentry T.R., Thomson B.P., Russell J.S. (2003) A model specification for FRP composites for civil engineering structures, *Construction and building materials*, 17 (6), 405-437
8. Barkoula N.M., Garkhaila S.K, Peijs T. (2010) Biodegradable composites based on flax/polyhydroxybutyrate and its copolymer with hydroxyvalerate, *Industrial Crops and Products* 31 34–42
9. BIOCOMP Project (2008) *New Classes of Engineering Composite Materials from Renewable Resources*, NMP2-CT-2005-515769, Project coordinator organisation name: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. Summary Report Publishable, pag.26
10. Bjurenstedt A. and Lärneklint F. (2004) *3D Biocomposites for Automotive Interior Parts*, Master of Science Programme, Luleå University of Technology, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Polymer Engineering, Luleå Tekniska Universitet, Sweden, ISSN: 1402-1617, pag. 28
11. Bledzki A.K., Sperber V.E and Faruk O. (2002) *Natural and Wood Fibre Reinforcement in Polymers, Report 152*, University of Kassel, Rapra Review Reports Expert overviews covering the science and technology of rubber and plastics, Volume 13, Number 8, ISSN: 0889-3144, pag. 158
12. Blümelhuber G., (2002) *Einfluß von Fettsäuren und Pflanzenölen auf die Eigenschaften eines Faser-Epoxydharz-Verbundwerkstoffs*, genehmigten Dissertation, Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs, pag. 126

13. Bos Harriette L. (2004) *The potential of flax fibres as reinforcement for composite materials*, Eindhoven, Technische Universiteit Eindhoven, Proefschrift. – ISBN 90-386-3005-0, NUR 913 pag.37
14. Burgstaller C., Stadlbauer W. (2007) Influence of polymer grade and compatibilizer concentration on the interfacial shear strength in sisal fibre polypropylene composites, *Proceedings of the 28th Risø International Symposium on Materials Science: Interface Design of Polymer Matrix Composites – Mechanics, Chemistry, Modelling and Manufacturing* Editors: B. F. Sørensen, L. P. Mikkelsen, H. Lilholt, S. Goutianos, F. S. Abdul-Mahdi Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 149-155
15. Cabral H., Cisneros M., Kenny J. M., Vazquez A., Bernal C. R. (2005) Structure–Properties Relationship of Short Jute Fiber-reinforced Polypropylene Composites, *Journal of Composite Materials* 39(1), ISSN: 1359-8368, 51-65
16. Cañigueral N., Vilaseca F., Méndez J.A., López J.P., Barberà L., Puig J., Pèlach M.A., and Mutjé P. (2009) Behavior of biocomposite materials from flax strands and starch-based biopolymer, *Chemical Engineering Science* 64 (11) 2651–2658
17. Carus M., Karst S., Kauffman A., Hobson J., Bertucelli S., (2013), The European Hemp Industry: Cultivation, processing and applications for fibres, shivs and seeds, *EIHA 2013*, www.eiha.org
18. Charles L. Tucker III, Charles L., Liang E. (1999) Stiffness Predictions for Unidirectional Short Fiber Composites: Review and Evaluation, *Composite science and technology*, No. 59, 655-671
19. Chi Hoong C., Chin Hua C., Sarani Z., Ishak A., Dufresne A. (2013) Production and Characterisation of Cellulose and Nano-Crystalline Cellulose from Kenaf Core Wood, *BioResources*, 8(1), 785-794
20. Christian S.J., Billington S. (2009) Mechanical Characterization And Structural Assessment of Biocomposites for Construction *Report No.168. March, The John A Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University*, pag.219
21. Decolon C. (2002) *Analysis of Composite Structures*, ISBN: 978-1-903996-62-1, Elsevier Ltd., pag. 351
22. Deo Chitta Ranjan (2010) *Preparation and characterization of polymer matrix composite using natural fiber lantana-camara*, a thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering Submitted to National Institute of Technology, Rourkela (Deemed University), Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology Rourkela -769 008 (India) pag. 280
23. Department of Defense (2002) *Composite Materials Handbook, Volume 1. Polymer Matrix Composites, Guidelines for Characterization of Structural Materials*, MIL-HDBK-17-1F, Volume 1 of 5, pag. 586
24. Department of Defense (2002) *Composite Materials Handbook, Volume 2. Polymer Matrix Composites, Material properties* MIL-HDBK-17-1F, Volume 1 of 5, pages 529
25. Department of Defense (2002) *Composite Materials Handbook, Volume 3. Polymer Matrix Composites, Materials usages, Design and Analysis*, MIL-HDBK-17-1F, Volume 1 of 5, pag. 683

26. Dhakal H.N., Zhang Z.Y., Richardson M.O.W. (2007) Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 67, 1674–1683
27. Dhakal H.N., Zhang Z.Y., Richardson M.O.W. (2006): Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites, *Composite Part A*, Vol. 35, 1267–1276
28. DiBenedetto A. T. (1985) Evaluation of fiber surface treatments in composite materials, *Pure & Appl Chemistry*, Vol. 57, No. 11, 1659–1665
29. Dittenber D.B., Ganga Rao H.V.S. (2012) Critical Review of Recent Publications on Use of Natural Composites in Infrastructure, Review Article, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 43, Issue 8, August, 1419-1429
30. Doan M.Sc., Thi Thu Loan (2006) *Investigation on Jute fibres and Their composites based on polypropylene and epoxy matrices*, Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur (Dr.-Ing.) angenommene Dissertation, pag. 138
31. Donnell A. O., Dweib M.A, Wool R. (2004) P. Natural fiber composites with plant oil-based resin, *Composites Science and Technology* 64, 1135–1145,
32. Drzal L.T., Mohanty A. K., Misra M. (2003) *Structural BioComposites From Natural Fibers and Bio Polymers*, 61st ANTEC, Nashville, TN copy right Michigan State University,
33. El-Tayeb N.S.M. (2008) A study on the potential of sugarcane fibers/polyester composite for tribological applications, *Wear*, Vol. 265, Issue 1-2, 223-235,
34. Espert A, Vilaplana F, Karlsson S. (2004) Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 35, Issue 11, 1267-1276
35. Fereidoon A., Saeedi E., and Ahmadimoghadam B. (2008) Comparison Between Different Finite Element Methods for Foreseeing the Elastic Properties of Carbon nanotube Reinforced Epoxy Resin Composite, *Proceedings of the World Congress on Engineering*, Vol II WCE 2008, July 2 - 4, 2008, London, U.K, ISBN:978-988-17012-3-7, 1381-1385
36. Fowler P.A., Hughes J.M., Elias R.M. (2010) Review Biocomposites (2006) technology, environmental, credentials and market forces, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86, ISSN: 1097-0010, 1781-1789
37. Gahle C., Carus M. (2008) *Biowerkstoffe Naturfaser und WPC Spritzguss in Deutschland und Europa*, Anwendungen und Märkte, Nova Institut GMBH Hürt, pag.56
38. Garkhail S.K., Heijenrath R.W.H., and Peijs T. (2000) Mechanical Properties of Natura-Fibre-Mat-Reinforced Thermoplastics based on Flax Fibres and Polypropylene, *Applied Composite Materials* Vol 7, 351-372
39. Garkhail S.K : *Composites based on natural fibres and thermoplastic matrices*, a thesis presented to department of materials Queen Mary College University of London for the degree of Doctor of Philosophy, October 2001, pag. 326
40. Halpin .J. C., Kardos J. L (1976): The Halpin-Tsai Equations: A Review, *Polymer Engineering and Science*, May, vol. 16, no. 5, 344-351

41. Hashin Z., Rotem A. (1973) *A Fatigue Failure Criterion for fiber reinforced materials*, Technion-Israel Institute of Technology, MED Report No 39, Scientific Report No3 EOAR USAF Contract F 44620-71-C-0100, distributed by NTIS, USA Department of Commerce, pag. 45
42. Hashin Z. (1980) Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 47, No.1, 448-464
43. Harris B., *Fatigue in composites-* (2003) *Science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics-* Woodhead Publishing, Cambridge England, ISBN 185573608X, pag. 764
44. Herrera-Franco P.J., Valadez-González A. (2005) A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites, *Composites: Part B* Vol. 36, ISSN: 1359-8368, 597-608
45. Holbery, J., Houston, D. (2006) Natural-Fiber-Reinforced Polymer Composites in Automotive Applications, *Journal of the Minerals, Metals, and Materials Society*, 58 (11), 80-86.
46. Holser A.R. Rigsby L; Patricia A. A; James A. K. (2008) Preparation of Flax Shive and Processing Waste for Biocomposites, *International Conference on Flax and Other Bast Plants*, ISBN #978-0-9809664-0-4, 92-96
47. Iannace S., Nocilla G., Nicolais L. (1999) Biocomposites based on sea algae fibers and biodegradable thermoplastic matrices, *Journal of Applied Polymer Science*, Volume 73, Issue 4, ISSN: 1097-4628, 583-592
48. Isopescu D., Stănilă O., Astanei J., Corduban C. (2012) Analiza experimentală a proprietăților mecanice ale lemnului la încovoiere, întindere și compresiune, *Revista Română de materiale*, 42 (2), 204-219.
49. Jang-Kio Kim and Yiu-Wing Mai (1998) *Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites*, Elsevier Science Ltd, First edition ISBN 0-08-042695-6, Printed in The Netherlands, pag.422
50. John Mj., Thomas S. (2008) Biofibres and Biocomposites, *Carbohydrate Polymers*, Vol.71, Elsevier Ltd, ISSN 0144-8817, 343-364
51. John MJ, Anandjiwala RD. (2008) Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites. *Polymer Composites*, ISSN 0272-8397, 187-207
52. Joshi S.V., Drzal L.T., Mohanty A.K., Arora S. (2004) Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?, *Composites: Part A*, Vol.35, ISSN 1359-835X, 371-376
53. Isopescu D, Stănilă O., Astanei J., Corduban C. (2012) Analiza experimentală a proprietăților mecanice ale lemnului la încovoiere, întindere și compresiune, *Revista Română de materiale 2012*, 42(2), 204-219
54. Kalaprasad G. Joseph K., Thomas S., Pavithran C. (1997) Theoretical Modelling of tensile properties of short sisal fibre/reinforced low-density polyethylene composites, *Journal of Material Science*, Volume 32, ISSN 0022-2461, 4261-4267
55. Khan M.N., Roy J. K., Akter N., Zaman H. U., Islam T., Khan R. A., (2012) Production and Properties of Short Jute and Short E-Glass Fiber Reinforced Polypropylene-Based Composites, *Journal of Composite Materials* Vol.2, doi:10.4236/ojcm.2012.22006, 40-47,
56. Karnani R., Krishnan M. and Narayan R. (1997) Biofiber-Reinforced Polypropylene Composites, *Polymer Engineering and Science*, Vol.37, Nr.2., ISSN: 1548-2634, 476-483
57. Keller A. (2001) Biodegradable Hanffaser-Verbundwerkstoffe, Einflüsse der Faserzelle auf strukturelle, mechanische und degradationskinetische

- verbundeigenschaften, Dissertation zur Erlangung des Titels Doctor der Technischen Wissenschaften der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 1.2 (pag.7)
58. Kers J., Peetsalu P., Saarna M., Viikna A., Krumme A. And Menind A. (2010) Preliminary Investigation into Tensile Characteristics of long Flax Fibre reinforced Composite Materials, *Agronomy Research 2010*, Volume 8, Special Issue I, Biosystems Engineering, 13-24
 59. Kidalova L., Terpakova E., Prigang S., Stevulova N: Possibilities of using hemp shives in lightweight composites, *Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Science and Technology, (CEST2011)*, Rhodes, Greece, Volume 1 of 4, ISBN: 978-1-62748-192-2, 547-552
 60. Kozlovski R., Mieleniak B., Helwig M., and Przpiera A. (1999) Flame resistant lignocellulosic -mineral composite particleboards, *Polymer Degradation and Stability*, Vol.64, 523-598
 61. Ku H., Wang H., Pattarachaiyakoop N., and Trada M. (2011) A review on the tensile properties of natural fibre reinforced polymer composites, *Composites Part B: Engineering*, Volume 42, Issue 4, ISSN: 1359-8368, 856-873.
 62. Lampke T. (2001) *Beitrag zur Charakterisierung naturfaserverstärkter Verbundwerkstoffe mit hochpolymerer Matrix*, Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doctor – Ingenieur, von der Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Technischen Universität Chemnitz, 11 Mai 2001
 63. Le Duigou A., Davies P., Baley C. (2010) Interfacial bonding of flax fibre/Poly (l- lactide) bio-composites, *Composites science and technology*, February, Volume 70, Issue 2, Pages 231-239
 64. Lusti H.R. (2003) *Property Predictions for Short Fiber and Platelet Filled Materials by Finite Element Calculations*, A dissertation submitted to the Swiss Federal Institute of Technology Zurich for the degree of Doctor of Sciences, DISS. ETH NO. 15078, pag. 116
 65. Madsen Bo, Lilholt L. (2007) Biofibres and biocomposites, Structure, Properties and Applications, Materials Research Department, Risø National Laboratory, Technical University of Denmark, *Biomaterials Workshop*, 25 sep.2011, pag.20
 66. Madsen Bo: *Properties of Plant Fibre Yarn Polymer Composites- An Experimental Study*, Report BYG-DTU R-082 2004, TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK, ISSN 1601-2917, ISBN 87-7877-145-5, pag. 218
 67. Maimí P., Camanho P.P., Mayugo J.A., Dávila C.G. (2007) A continuum damage model for composite laminates: Part I – Constitutive model, *Mechanics of Materials*, Vol. 39, 897–908
 68. Maya J.J., Sabu T. (2008) Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 71, 343–364
 69. Mankovski Jerzy and Kolodziej Jacek (2008) Increasing Heat of Combustion of Briquettes Made of Hemp Shives, *2008 International Conference on Flax and other Bast Plants*, ISBN #978-0-9909664-0-4, 344-352
 70. McMahon P.E., Zing L., (1982) *Effects of Fiber/Matrix interaction on the properties of Graphite/Epoxy Composites*, NASA Contractor Report 3607, Contract NAS 1-15479, September 1982

71. Miao Menghe, Finn Niall (2008), Conversion of Natural Fibres into Structural Composites, *Journal of Textile Engineering* Vol.54, No. 6, pp.165-177
72. Mueller, D.H., Krobjilowski, A. (2003) New Discovery in the Properties of Composites Reinforced with Natural Fibers, *Journal of Industrial Textiles*, 33(2): pp.111-129
73. Mutjé P., Gironès J, Lòpez A., Llo M.F. (2006) Hemp Strands: PP Composites by Injection Molding: Effect of Low Cost Physico-chemical Treatments, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* February 2006 vol. 25 no. 3, , ISSN 0731-6844, 313-327
74. Myungsoo Kim (2009) *Modeling, Manufacturing and Characterization of Nanocomposites and Multiscale Composites*, Electronic These.\, Treatise and Dissertations. A Dissertation submitted to the for the Department of Industrial and Manufacturing Engineering in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Florida State University College of Engineering, Florida
75. Narendra Redy, Yigi Yang. (2005) Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications, *Trends in Biotechnology* Vol.23 No.1, 22-27
76. Nilson T. (2006) *Micromechanical Modelling Of Natural Fibres For Composite Materials*, Licentiate Dissertation Department of Construction Sciences Structural Mechanics ISRN LUTVDG/TVSM--06/3067--SE (1-127) ISSN 0281-6679
77. O'Gara John F, Novak Glen E, Wyzgoski M G. (2010) Predicting the tensile strength of short glass fiber reinforced injection molded plastic, *Proceedings of the 10th Annual SPE Automotive Composites Conference Exposition ACCE*, Paper by Virtual Prototyping & Testing of Composites, Volume 40, Issue 2, ISBN: 978-1-61839-024-0, Pag. 2
78. P.W.J. van den Heuvel (1995) *Failure Phenomena in Carbon/Epoxy Microcomposite Model Sytems*, Report WFW-95.027, Computational Mechanics, Eindhoven University of Technology, ISBN 90-5282-445-2, pag.79
79. Pan N. (1994) Analytical Characterization of the Anisotropy and local Heterogeneity of Short Fiber Composites: Fiber Fraction as Variable, *Journal of Composite Materials*, Vol.28, No16 1500 DOI: 10.1177/002199839402801601, 1500-1531
80. Patcharaphun S., Menning G. (2006) Prediction of Tensile Strength for Sandwich Injection Molded Short-Glass-Fiber Reinforced Thermoplastics, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, Vol.17 No.2, 9-16
81. Peng X. Q., Cao J., Numerical Determination of Mechanical Elastic Constants of Textile Composites, *15th Annual Technical Conference of the American Society for Composites*, College Station, Texas, Sept. 25-27, 2000, pag. 11
82. **Pernevan M.S.**, Marşavina L., Radu D., Popa M., Sîrghie C., (2013) Considerations about the impact behavior of biocomposites based on polypropylene and furan resins reinforced with hemp shives, *Journal of Natural Fibers*, ISSN 1544-0478, Taylor Francis, Philadelphia USA, Vol10, 197-206, June 2013, *ISI Journal*
83. Popa M.I., **Pernevan S.**, Sîrghie C., Spiridon I., Chambre D., Copolovici D. M., Popa N. (2013) Mechanical Properties and Weathering Behavior of Polypropylene- Hemp Shives Composites, *Journal Of Chemistry*, ISSN:

- 2090-9063 (Print),ISSN: 2090-9071 (Online),Vol 2013, Hindawi Publishing Corporation, New York USA, Article ID 320329, 8 pages, *ISI Journal*
84. **Pernevan M.S.**, Marşavina L. (2012) The influence of the theoretical fibers arrangement model on the mechanical properties of the vegetal fiber reinforced composites, *15th European Conference of Composite Materials, June 24-28, 2012, Venice, Italy*, ISBN: 978-88-88785-33-2; Paper nr. 1995, 1-8
85. **Pernevan M.S.**, Sîrghie C., Pernevan I., Popescu M., Marşavina L. (2012) Comparative Analysis of the Bending Properties of Biocomposites Reinforced with Hemp Shives in Form of Dust and Melamino-Formaldehyde Matrix , *Conference Proceedings, 4th International Conference Nanocon ,Brno, Cehia*, ISBN 978-80-87294-35-2 , Volume IV, October,2012, 669-674, *ISI Proceedings*;
86. **Pernevan M.S.**, Marşavina L., Pernevan I., Sîrghie C., Popescu M., (2013) Experimental Research Regarding The Tensile Properties Of Some Polypropylene Based Biocomposites Reinforced With Hemp Shives *The 10th International Conference "Structural Integrity Of Welded Structures ISCS, Timișoara, Romania*, ISBN-13:978-3-03785-848-6, Vol.814, 230-234, *ISI Proceedings*;
87. **Pernevan M.S.**, Marşavina L., Sârghie C., Pernevan I. (2011) Bast Fibers Used as Reinforcement Elements in Biocomposites", *Scientific Bulletin Of Politehnica Timișoara*, ISSN 1224 – 6077 Editura Politehnica Timișoara, Romania vol. 56 (70) iss. 2, dec 2011 61-64, *cu indexare B⁺*;
88. **Pernevan M.S.**, Marşavina L., Popescu M., Pernevan I. (2012) Comparative Analysis Regarding The Mechanical Properties Of Polymer Matrix Based Biocomposites Reinforced With Hemp Scraps, *Proceedings of the Scientific GeoConference (SGEM 2012), Albena, Bulgaria*, ISSN 1314-2704,Volume IV, June, 2012, pp. 667-674, *cu indexare BDI (Scopus, EBSCO)*
89. **Pernevan M.S.** (2012) Mechanical Testing Of Polypropylene Based Composites Materials Reinforced With Bast Fibers, *Workshop-ul nr.2 INTERDISCIPLINARITATEA ȘI MANAGEMENTUL CERCETĂRII, Universitatea „Politehnica” din Oradea, 7-8 iunie 2012*;
90. **Pernevan M.S.** Considerations Regarding Natural Fibres Reinforced Biocomposites (2011) *Workshop-ul nr.1 INTERDISCIPLINARITATEA ȘI MANAGEMENTUL CERCETĂRII, Universitatea „Politehnica” din Timișoara 24-25 noiembrie 2011*;
91. **Pernevan M.S.**, Sârghie C., Dreucean M. F., Popescu M., Pernevan I., (2011) Considerații privind utilizări ale biocompozitelor pe bază de fibre liberiene, *Agro Buletin Agir* , ISSN 2066-6179 ,Editat de societatea de Inginerii Agricole Timișoara, Timiș, Romania, Vol. sept-nov an III nr.3(10), 131-137, B⁺, *Copernicus Master List*
92. **Pernevan M.S.**, Dreucean M., Popescu M. Possibilities of using bast fibers in polymer composites, *Agro Buletin Agir*, ISSN 2066-6179, Editat de societatea de Inginerii Agricole Timișoara Timis Romania Vol iun-aug an III, nr.2(9), 2011 pag. 164-170, B⁺ *Copernicus Master List*
93. **Pernevan M.S.**, Marşavina L., Pernevan I., Popescu M, Sîrghie C. A theoretical and experimental study regarding some mechanical properties of a melamino-formaldehyde based biocomposite reinforced with hemp shives, *Proceedings of the 13th International Scientific Geoconference (SGEM 2013), Albena, Bulgaria*, ISSN 1314-2704, Volume V, June, 2013, pp. 295-300, *cu indexare BDI (Scopus, EBSCO)*

94. Pervaiz M., Sain M.M. (2003) Carbon storage potential in natural fiber composites, *Resources conservation & Recycling* 39, 325-340
95. Popescu M., *Îmbinarea materialelor avansate*, Editura Politehnica Timișoara 2010, ISBN 978-606-554-243-3
96. Popescu M., Roșu A.R., **Pernevan M.S.**, (2012) Utilization problems of biocomposite materials", 12th International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference Albena SGEM 2012, ISSN 1314-2704, Volume IV, June, 2012, 805-812, *cu indexare BDI (Scopus, EBSCO)*
97. Pracella M., Chionna D., Anguillesi J., Kulinski Z., Piorkowska E. (2006) Functionalization, compatibilization and properties of polypropylene composites with Hemp fibres, *Composite Science and Technology* 66, 2218-2230
98. Rana A. (2008) *Development and characterization of compression molded flax fiber-reinforced biocomposites*, A Thesis Submitted to the College of Graduate Studies and Research in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in the Department of Agricultural and Bioresource Engineering University of Saskatchewan Saskatoon, Saskatchewan, July 2008
99. Rana A. K., Mandal A. and Bandyopadhyay S. (2003) Short Jute fibre reinforced polypropylene composites : effect of compatibiliser, impact modifier and fibre loading, *Composites Science and Technology*, Vol. 63, issue 6, 801 – 806
100. Ranjan D. (2010), *Preparation and characterization of polymer matrix composite using natural fiber latana-camara* , a Thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology, Rourkela (Deemed University)-769008, India, 280 pages
101. Ratna D. (2009), *Handbook of Thermoset Resins*, Smithers Company, U.K, ISBN: 978-1-84735-410, pag. 424
102. Reußmann T. (2003) *Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von Langfasergranulat mit Naturfaserverstärkung*, Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Technischen Universität Chemnitz, Rudolstadt
103. Rho D., Yang J., Lorrain M.J., Lau P.C.K., Ton-That M.C., Kole K., Hu W., Denault J. (2008), Processing of Flax Fibers for Biocomposites Using a Thermostable Pectate Lyase, *International Conference on Flax and Other Bast Plants*, ISBN #978-0-9809664-0-4, 201-210
104. Riedel U., Nickel J. (2003), *Biocomposites State of the Art and Further Perspectives*, Institute of Structural Mechanics, DLR Braunschweig, www.forestprod.org/wpc03riedel.pdf, pag.29
105. Rijkskwijk K., Brouwer W.D., Beukers A., (2001) Application of Natural Fibre Composites in the Development of Rural Societies, *FAO corporate document repository*, ID 161781, pag. 47
106. Saha S. (2011) *A study on effect of fiber parameters on mechanical behaviour of natural fiber based polymer composites*, BTEch Thesis, National Institute of Technology, Rourkela 769008
107. Sedlacik G. (2003) *Beitrag zum Einsatz von unidirektional naturfaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen als Werkstoff für*

- großflächige Strukturbauteile*, genehmigte Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.), Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz
108. Sen T., Jagannatha Reddy H. N., (2011) Various Industrial Applications of Hemp, Kenaf, Flax and Ramie Natural Fibers, *International Journal of Innovation, Management and Technology*, Vol.2, No.3, June, 192-198
 109. Shibata M., Ozawa K., Teramoto N.,, Yosomiya R., Takeishi H. (2003) Biocomposites Made from Short Abaca Fiber and Biodegradable Polyesters, *Macromolecular Materials and Engineering*, Volume 288, Issue 1, ISSN: 1439-2054, 35-43
 110. Shinji Ochi, Mechanical properties of kenaf fibers and kenaf/PLA composites, *Mechanics of Materials* 40 (2008) 446-452
 111. Singha A S, Vijay Kumar Thakur (2008) Mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites, *Bull. Mater. Science*, Vol. 31, No. 5, October, 791-799
 112. Sparniniš E., (2006) *Mechanical properties of flax fibers and their composites*, Licentiate thesis, University of Technology, Department of applied Physics and Mechanical Engineering Division of Polymer Engineering, ISSN:1402-1757, ISRN:LTU-LIC-06/60-SE. LTU-LIC 0660,
 113. Taj S., Munawar A., Khan S. (2007) Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites, review, *Proc. Pakistan Acad. Sci.* 44(2), 129-144.
 114. Thygesen A., (2006) *Properties of hemp fibre polymer composites –An 179 fulfillment of fibre properties using novel defibrillation methods and fibre characterization*, thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Ph.D. degree at The Royal Agricultural and Veterinary University of Denmark, Risø National Laboratory, ISBN 87-550-3440-3
 115. Tungjitpornkull, S. and Sombatsompop, N, (2009) Processing Technique and fibre orientation angle affecting the mechanical properties of E-glass reinforced wood/PVC composites, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, 3079-3088
 116. Tucker III Charles L., Iii Charles L., Liang Erwin (1999) Stiffness Predictions for Unidirectional Short-Fiber Composites: Review and Evaluation, *Composite science and technology*, No. 59, 655-671.
 117. Virk A.S., (2010) *Numerical models for natural fibre composites with stochastic properties*, a thesis submitted to the University of Plymouth in partial fulfillment for the degree of Doctor of Philosophy, School of Marine Science and Engineering, Faculty of Science and Technology
 118. Zak G., Haberer M., Park C.B. and Benhabib B. 2000 Mechanical properties of short fibre layered composites: Prediction and experiment, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 6, Nr. 2, 107-118
 119. Zampaloni M., F. Pourboghrat, S.A. Yankovich, B.N. Rodgers, J. Moore, L.T. Drzal, A.K. Mohanty, and M. Misra (2007) Kenaf natural fiber reinforced polypropylene composites: A discussion on manufacturing problems and solutions, *Composites: Part A*, vol. 38, ISSN 1359-835x, 1569-1580
 120. You-Ping Wu, Qing-Xiu Jia, Ding-Sheng Yu, Li-Qun Zhang, (2004) Modeling Young's modulus of rubber-clay nanocomposites using composite theories, *Polymer Testing* Vol.23, ISSN: 0142-9418, 903-909
 121. Yunkai Lu (2002) *Mechanical properties of Random Discontinuous Fiber Composites Manufactured from Wetlay Process*, thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial

122. fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Engineering Mechanics, August 6, Blacksburg, Virginia
123. Vasiliev V., Morozov E. [2001] *Mechanics and Analysis of Composite Materials*, ISBN-0-08-042702-2, Elsevier book Mechanics and Analysis
124. Van den Heuvel P.W.J (1995) Failure phenomena in carbon/epoxy microcomposite model systems - Report WFW-95.027 Eindhoven: Instituut Vervolgopleidingen, Eindhoven University of Technology, Computational mechanics. –With Ref. ISBN 90-5282-445-2. Pag. 79
125. Walter T. (2006), *Methoden zur qualitative und quantitative Analyse der Mikrostruktur von Naturfaserwerkstoffen*, Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades des Departments Biologie der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften der Universität Hamburg, Hamburg, October 2006, pag. 232
126. Wilson M. (2003) *Finite Element Analysis of Glass Fiber Reinforced Thermoplastics Composites for Structural Automotive Components*, Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy, University of Nottingham, School of Mechanics, Materials, Manufacturing Engineering and Management, pag.248
127. Wretfors C., Svennerstedt B., (2006) *Bio fibre technology used for military applications - an overview*. Rapport 142, Report, Alnarp, Sveriges lantbruksuniversitet Institutionen för jordbrukets biosystem och teknologi (JBT), Swedish University of Agricultural Sciences Department of Agricultural Biosystems and Technology, Alnarp, Sweden., pag. 40.
128. www.wikipedia.ro
129. Elisa Zini E., Mariastella Scandola M., (2011) Green composites: An overview, *Polymer Composites*, Vol. 32, Issue 12, 1905-1915
130. Xue Li (2008) Development of flax fiber reinforced Polyethylene biocomposites by injection molding, A thesis submitted of the College of Graduate Studies and Research in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor Philosophy in the Department of Agricultural and Bioresource Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada
131. ASTM D 256-02, Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics
132. ASTM D 570-98, Standard Test Methods for Water absorption of Plastics
133. ASTM D 638-03, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics
134. ASTM D 695 -02, Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics
135. ASTM D 785 Standard Test Method for Rockwell Hardness of Plastics and Electrical Insulating Materials
136. ASTM D 790 Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials
137. SR-EN ISO 179-2 Determinarea proprietăților la șoc Charpy- Partea 2: Încercarea instrumentală la șoc
138. SR-EN ISO 527-4 Determinarea proprietăților de tracțiune. Partea 4- Condiții de încercare pentru compozite din materiale plastic armate cu fibre izotrope și ortotrope
139. ISO 188 (2007) – Rubber, vulcanized or thermoplastic-Accelerated ageing and heat resistance test
*** - Rapoarte de cercetare perioada 2010-2013 Contract Programul Operațional Sectorial Creșterea Competitivității Economice, Axa prioritară 2 – Competitivitate prin CDI,

Operațiunea 2.1.2: "Proiecte CD de înalt nivel științific la care vor participa specialiști din străinătate": Plantele liberiene-resurse regenerabile strategice pentru economia Europeană - BASTEURES.