

ȘCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea de Design de Mobilier și Inginerie a Lemnului

Mohammad Hassan MAZAHERIFAR

Cercetări privind utilizarea hârtiei și cartonului reciclat la fabricarea panourilor de interior

REZUMAT

Conducător științific

Prof. dr. ing. Camelia COȘEREANU

BRAȘOV, 2026

CUPRINS

INTRODUCERE: ARGUMENTARE, PREMISE	5
CAPITOLUL 1. Stadiul actual al valorificării hârtiei și cartonului reciclat în produse noi	7
1.1 Hârtia și cartonul: context istoric și industrial.....	7
1.2 Procese de reciclare durabile pentru hârtie și carton	7
1.3 Căi de valorificare dincolo de reciclarea convențională.....	7
1.4 Hârtie și carton reciclate pentru fabricarea panourilor de interior.....	8
1.5 Lianți, tratamente și tendința către substanțe chimice cu impact redus.....	9
1.6 Evaluarea de mediu a panourilor din hârtie și carton reciclat	10
1.7 Concluzii.....	10
CAPITOLUL 2. Scopul și obiectivele cercetării prezentate în teza de doctorat.....	11
CAPITOLUL 3. Metodologia de cercetare, echipamente și materiale	13
3.1 Pregătirea materiei prime.....	13
3.2 Fabricarea panourilor compozite	13
3.2.1 Panouri compozite de tip spumă prelucrate prin proces umed	14
3.2.2 Panouri de tip spumă prelucrate prin proces uscat.....	14
3.2.3 Panouri cu structură tip sandwich	15
3.2.4 Post-procesare și condiționarea panourilor	16
3.3 Metodologia de testare.....	16
3.3.1 Profilul densității verticale (VDP)	17
3.3.2 Evaluarea stabilității dimensionale după imersia în apă	17
3.3.3 Determinarea porozității	18
3.3.4 Investigarea performanței termice	18
3.3.5 Determinarea performanței acustice a materialului (α).....	19
3.3.6 Caracterizarea microstructurală	21
3.3.7 Spectroscopie în infraroșu cu transformată Fourier (FTIR)	22
3.3.8 Evaluarea performanțelor mecanice	22
3.4 Metodologie statistică.....	23
CAPITOLUL 4. Rezultatele cercetărilor privind performanța panourilor compozite poroase pentru miez.....	24
4.1 Panouri compozite poroase fabricate din carton, bicarbonat de sodiu și amidon de porumb	24
4.1.1 Profilul densității verticale (VDP)	25
4.1.2 Evaluarea stabilității dimensionale a panourilor după imersia în apă.....	25
4.1.3 Investigarea performanței termice	26
4.1.6 Evaluarea performanțelor mecanice	28
4.1.7 Concluzii	28
4.2 Compozite ușoare realizate din carton, bicarbonat de sodiu, praf de copt și oțet	29

4.2.1 Profilul densității verticale (VDP)	30
4.2.2 Evaluarea stabilității dimensionale după imersia în apă	30
4.2.3 Investigarea performanței termice	31
4.2.4 Determinarea performanței acustice	31
4.2.5 Caracterizarea microstructurală	32
4.2.6 Caracterizarea structurii moleculare pe baza FTIR	33
4.2.7 Evaluarea performanțelor mecanice	33
4.3 Compozite poroase fabricate din carton, bicarbonat de sodiu și drojdie.....	35
4.3.1 Profilul densității verticale (VDP)	35
4.3.2 Evaluarea stabilității dimensionale după imersia în apă	37
4.3.3 Investigarea performanțelor termice	38
4.3.4 Determinarea performanței acustice	38
4.3.5 Caracterizarea microstructurală	40
4.3.6 Evaluarea performanțelor mecanice	40
4.3.7 Concluzii	41
4.4. Compozite de tip spumă fabricate din deșeuri de hârtie și carton, bicarbonat de sodiu și drojdie.....	42
4.4.1 Profilul densității verticale (VDP)	42
4.4.2 Evaluarea stabilității dimensionale după imersia în apă	43
4.4.3 Investigarea performanței termice	43
4.4.4 Determinarea performanței acustice	44
4.4.5 Caracterizarea microstructurală	45
4.4.6 Caracterizarea structurii moleculare pe baza FTIR	46
4.4.7 Evaluarea performanțelor mecanice	47
4.4.8 Concluzii	48
4.5 Rezumatul capitolului.....	48
CAPITOLUL 5. Rezultate privind performanța panourilor compozite de tip sandwich fabricate din hârtie și carton reciclate	49
5.1 Investigarea performanțelor termice.....	49
5.2 Determinarea performanței acustice	50
5.3 Caracterizarea microstructurală	53
5.5 Compararea performanțelor între panourile compozite cu miez poros și panourile compozite cu structură tip sandwich dezvoltate în teza de doctorat.....	55
5.6 Concluzii.....	55
CAPITOLUL 6. Concluzii, contribuție originală, oportunități viitoare de cercetare, diseminarea cercetării	57
6.1 Concluzii generale	57
6.2 Contribuție originală.....	57

LISTA NOTAȚIILOR

Simbol	Termen complet
ρ	Densitate
ρ -Volumul	Densitate aparentă
ρ -Adevărată	Densitate reală
σ_c	Rezistența la compresiune
σ_{UTS}	Rezistența la tracțiune (rezistența maximă la tracțiune)
λ	Coeficientul de conductivitate termică
ΔT	Diferența de temperatură
α	Coeficient de absorbție fonică

LISTA ABREVIERILOR

Abreviere	Termen complet
B	Praf de copt
C	Carbon
Ca	Calciu
Cs	Amidon de porumb
D	Metoda uscată
d	Grosimea probei
E	Modulul de elasticitate (modulul lui Young)
EC	Modulul de compresie
EDX	Analiza cu raze X cu dispersie de energie
F	Fibră de palmier datelier
IB	Rezistența internă a legăturii
LCA	Evaluarea ciclului de viață
MDF	Placă fibrolemnoasă de densitate medie
MOE	Modulul de elasticitate
MOR	Modulul de rupere
N	Azot
Na	Sodiu
O	Oxigen
Pa	Hârtie
Pc	Carton imprimat
q	Flux termic măsurat
SEM	Microscopie electronică de baleiaj
S	Bicarbonat de sodiu
TC	Conductivitate termică
Tm	Temperatura medie a probei
TS	Umflarea în funcție de grosime
Uc	Carton neimprimat
V	Furnir de stejar
WA	Absorbție de apă
Y	Drojdie

INTRODUCERE: ARGUMENTARE, PREMISE

Conștientizarea globală tot mai mare cu privire la sustenabilitatea mediului a stimulat un interes semnificativ pentru dezvoltarea și utilizarea materialelor reciclate în toate industriile. Industria construcțiilor, cunoscută pentru amprenta sa ecologică substanțială, este supusă unei atenții deosebite în ceea ce privește utilizarea resurselor naturale și generarea de deșeuri. O cale promițătoare de reducere a acestui impact este încorporarea materialelor reciclate, precum hârtia și cartonul, în produsele pentru construcții. Această teză explorează utilizarea hârtiei și a cartonului post-consum pentru fabricarea panourilor de interior, cu scopul de a promova sustenabilitatea mediului și practicile de construcție ecologice.

În 2022, producția globală de hârtie și carton a depășit 400 de milioane de tone metrice, contribuind substanțial la producția industrială. Hârtia și cartonul reciclate fac parte din deșeurile municipale, însă potențialul lor ca materii prime pentru produse de construcții rămâne insuficient valorificat. Proprietățile hârtiei și cartonului, precum greutatea redusă și suprafața specifică mare, împreună cu caracteristicile favorabile de aderență, oferă perspective considerabile atunci când sunt proiectate corespunzător. Prin transformarea acestor materiale în panouri de interior, nu numai că se prelungește ciclul de viață al produselor din hârtie, ci se reduce și cererea de materii prime virgine, diminuând astfel impactul asupra mediului.

Această teză de doctorat investighează proprietățile materialelor, tehnicile de prelucrare și aplicațiile potențiale ale hârtiei și cartonului reciclate pentru panouri compozite de interior, cu o influență puternică asupra sustenabilității mediului și circularității materialelor. Printr-o combinație sistematică de cercetare experimentală și evaluare analitică, studiul își propune să dezvolte formulări și procese de fabricație optimizate care să echilibreze performanța între integritatea mecanică, izolația termică, absorbția acustică și stabilitatea dimensională, minimizând în același timp impactul asupra mediului și complexitatea producției. Un aspect inovator cheie al acestei cercetări este dezvoltarea de sisteme compozite fără lianți sau cu impact redus, care asigură coeziunea și funcționalitatea panourilor fără a utiliza rășini sintetice, lianți pe bază de formaldehidă sau aditivi chimici periculoși. În schimb, sunt exploatați agenți de spumare inofensivi pentru mediu și interacțiuni fizice în cadrul rețelei de fibre pe bază de celuloză pentru a genera materiale ușoare și multifuncționale. Prin adoptarea acestei abordări, teza demonstrează fezabilitatea tehnică și relevanța practică a compozitelor pe bază de hârtie și carton reciclat ca alternative cu adevărat ecologice pentru aplicații de construcție fără sarcini portante. În abordarea acestor obiective, cercetarea umple o lacună critică în literatura de specialitate, trecând dincolo de afirmațiile conceptuale privind sustenabilitatea, către o evaluare experimental validată a performanței panourilor de interior ecologice.

Pentru a asigura o dezvoltare coerentă a acestor obiective de cercetare și pentru a aborda sistematic provocările științifice și tehnologice identificate, teza este organizată într-o secvență structurată de capitole. Fiecare capitol se bazează pe cel precedent, progresând de la o analiză critică a cunoștințelor existente la investigația experimentală, evaluarea performanței și sinteza rezultatelor, oferind astfel un cadru cuprinzător pentru utilizarea deșeurilor de hârtie și carton în aplicații durabile de panouri compozite.

Capitolul 1, intitulat „Stadiul actual al valorificării hârtiei și cartonului reciclate în produse noi”, oferă o privire de ansamblu asupra evoluției istorice, relevanței industriale și tendințelor actuale de cercetare

în utilizarea hârtiei și cartonului reciclate. Se pune un accent deosebit pe procesele de reciclare durabile, căile emergente de valorificare dincolo de reciclarea convențională, tehnologiile de liant, tratamentele chimice cu impact redus și metodologiile de evaluare a impactului asupra mediului, stabilind astfel contextul științific și identificând lacunele critice de cercetare abordate în această lucrare.

Capitolul 2, intitulat „Scopul și obiectivele cercetării prezentate în teza de doctorat”, definește scopul general al cercetării doctorale și formulează obiectivele științifice specifice care ghidează programul experimental. Acest capitol delimitează ipotezele de cercetare, evidențiază aspectele inovatoare ale sistemelor de materiale propuse și clarifică contribuția tezei la promovarea tehnologiilor compozite ecologice, cu impact redus.

Capitolul 3, intitulat „Metodologia de cercetare, echipamente și materiale”, detaliază metodologia de cercetare, materialele și procedurile experimentale utilizate pe parcursul studiului. Acesta descrie pregătirea materiilor prime, căile de fabricație pentru panourile de tip spumă prelucrate prin proces umed, panourile prelucrate prin proces uscat și compozitele cu structură tip sandwich, precum și etapele de post-prelucrare și de condiționare. În plus, acest capitol prezintă metodologiile de testare, standardele și tehnicile analitice utilizate pentru evaluarea proprietăților fizice, termice, acustice, microstructurale, chimice și mecanice, asigurând reproductibilitatea și rigoarea științifică a rezultatelor experimentale.

Capitolul 4, intitulat „Rezultate privind performanța panourilor compozite cu miez”, prezintă o investigație experimentală extinsă asupra performanței panourilor compozite de tip spumă cu miez fabricate utilizând diferite sisteme de spumare pe bază de carton și hârtie reciclate, inclusiv formulări care încorporează bicarbonat de sodiu combinat cu amidon de porumb, praf de copt, oțet și drojdie. Fiecare subcapitol examinează sistematic profilul densității verticale, stabilitatea dimensională, conductivitatea termică, comportamentul de absorbție fonică, caracteristicile microstructurale, compoziția chimică și performanța mecanică, urmate de concluzii și discuții integrate care sintetizează tendințele observate și mecanismele subiacente.

Capitolul 5, intitulat „Rezultate privind performanța panourilor compozite de tip sandwich fabricate din hârtie și carton reciclate”, se concentrează pe dezvoltarea și evaluarea performanței panourilor compozite de tip sandwich derivate din miezuri de spumă selectate, acoperite cu diverse straturi de suprafață, inclusiv MDF, furnir și foi din fibre naturale. Acest capitol prezintă modul în care arhitectura tip sandwich influențează izolația termică, absorbția acustică, microstructura interfacială și comportamentul la încovoiere, oferind o evaluare cuprinzătoare a modului în care modificarea suprafeței și proiectarea stratificată îmbunătățesc performanța multifuncțională a panourilor pe bază de hârtie și carton reciclate.

În cele din urmă, **Capitolul 6**, intitulat „Concluzii, contribuție originală, oportunități viitoare de cercetare, diseminarea cercetării”, consolidează principalele concluzii științifice ale tezei și prezintă observații finale, subliniind originalitatea, sustenabilitatea și relevanța practică a materialelor compozite dezvoltate. Acest capitol documentează, de asemenea, diseminarea rezultatelor științifice prin publicații evaluate de colegi și conferințe internaționale și prezintă perspectivele viitoare de cercetare menite să optimizeze în continuare performanța materialelor, să extindă domeniile de aplicare și să consolideze scalabilitatea industrială a sistemelor compozite ecologice, fără lianți, bazate exclusiv pe resurse reciclate pe bază de celuloză.

CAPITOLUL 1. Stadiul actual al valorificării hârtiei și cartonului reciclat în produse noi

1.1 Hârtia și cartonul: context istoric și industrial

Producția modernă de hârtie și carton combină fibrele virgine provenite din păduri gestionate durabil cu fibrele secundare provenite din materiale reciclate. Fibrele virgine asigură rezistența mecanică și luminozitatea, în timp ce fibrele reciclate reduc costurile și impactul asupra mediului. Pentru a îmbunătăți logistica și disponibilitatea fibrelor, fabricile se amplasează din ce în ce mai mult în apropierea centrelor urbane, unde deșeurile de hârtie sunt abundente (Holik, 2006; Hietala *et al.*, 2018; Khan *et al.*, 2021).

Considerațiile privind sustenabilitatea modelează acum sectorul. Fabricarea hârtiei consumă multe resurse în ceea ce privește apa, energia și substanțele chimice, iar fabricile de celuloză și hârtie au fost asociate de-a lungul timpului cu provocări de mediu, inclusiv toxicitatea apelor uzate și emisiile de gaze cu efect de seră. În consecință, fabricile moderne utilizează tehnologii avansate de de-înnegrire, albire și recuperare a fibrelor, adoptând în același timp secvențe de albire cu consum redus de apă și fără clor (Gupta *et al.*, 2019). Aceste îmbunătățiri reflectă o orientare către eficiența resurselor, reducerea amprentei de carbon și respectarea principiilor economiei circulare.

Această traiectorie industrială și istorică subliniază atât importanța, cât și limitările hârtiei și cartonului ca materiale. Deși acestea rămân esențiale pentru ambalare și comunicare, dependența lor de resurse finite și amprenta asupra mediului evidențiază necesitatea unor noi căi de valorificare, cum ar fi transformarea lor în panouri de interior cu beneficii funcționale și de sustenabilitate suplimentare.

1.2 Procese de reciclare durabile pentru hârtie și carton

Reciclarea hârtiei și a cartonului reprezintă o piatră de temelie a economiei circulare, reducând eliminarea deșeurilor și dependența de fibrele virgine. Procesul implică colectarea, sortarea, transformarea în pastă, curățarea și, în unele cazuri, dezinchierarea pentru a îndepărta cernelurile, adezivii și materialele de umplutură. Fibrele recuperate sunt apoi transformate în hârtie, carton sau produse alternative (Bajpai, 2024).

Cu toate acestea, calitatea fibrelor se deteriorează la fiecare ciclu. Reciclarea scurtează fibrele, reduce flexibilitatea și diminuează capacitatea de legare, limitând, în general, reciclarea în circuit închis la 5–7 cicluri pentru fibrele de hârtie (Haigh *et al.*, 2022) și până la 25 de cicluri pentru fibrele de carton (Mazaherifar *et al.*, 2024; Mazaherifar *et al.*, 2025). În plus, contaminanții precum cerurile, rășinile de rezistență la umezeală și umpluturile minerale pot complica procesul de fabricare a celulozei și de decolorare, crescând astfel costurile de procesare și reducând randamentul (Monte *et al.*, 2009).

1.3 Căi de valorificare dincolo de reciclarea convențională

O cale promițătoare de valorificare implică încorporarea fibrelor de hârtie și carton reciclate în materiale compozite. În compozitele pe bază de ciment, fibrele de hârtie reciclate contribuie la reducerea fragilității și la îmbunătățirea rezistenței la fisurare datorită capacităților lor de absorbție a energiei și de legătură. Cu toate acestea, provocări precum dispersia fibrelor, compatibilitatea interfacială și

sensibilitatea la umiditate rămân factori critici care influențează performanța mecanică și durabilitatea (Frías *et al.*, 2015).

Ayrilmis *et al.* (2008) au arătat că panourile fabricate din cutii de băuturi post-consum, cu fațade din furnir, prezintă o rigiditate crescută și caracteristici ale suprafeței îmbunătățite, indicând potențialul fibrelor de carton în produsele laminate sau panouri pentru aplicații interioare.

În plus, prezența cartonului ondulat ca element structural în compozitele tip sandwich și stratificate a atras o atenție din ce în ce mai mare. Betts *et al.* (2020) și McCracken și Sadeghian (2018) au demonstrat că compozitele tip sandwich, cu miez de carton și fibre de în ca armături în fețele polimerice, ating rapoarte ridicate de rigiditate-greutate, potrivite pentru aplicații arhitecturale și de construcții ușoare.

În ansamblu, compozitele din hârtie reciclată și fibre de carton oferă o cale atractivă pentru valorificarea deșeurilor, furnizând surse regenerabile de armare și amprente ecologice reduse. Cu toate acestea, implementarea practică se confruntă încă cu limitări legate de variabilitatea fibrelor, consistența procesării și comportamentul compozitelor în condiții de umiditate sau alcalinitate. Cercetarea continuă privind chimia lianților, pretratarea fibrelor și optimizarea formulării compozitelor este, prin urmare, esențială pentru promovarea adoptării, la scară industrială, a acestor materiale durabile.

În plus, porozitatea intrinsecă și rezistența termică a fibrelor celulozice le fac potrivite pentru aplicații de izolare și acustice. Dincolo de rezistența termică, structura fibroasă a celulozei asigură o absorbție eficientă a sunetului prin disiparea energiei acustice, făcând-o potrivită pentru panouri de perete, plăci de tavan și straturi de bază pentru pardoseli în medii interioare.

Prezenta teză se concentrează pe o abordare particulară de valorificare: producția de panouri de interior care integrează fibre reciclate cu lianți cu impact redus. Astfel de panouri vizează să ofere integritate structurală, precum și funcționalitate termică și acustică, oferind o alternativă durabilă pentru aplicații în construcții și demonstrând potențialul fibrelor reciclate ca materiale de inginerie de mare valoare.

1.4 Hârtie și carton reciclate pentru fabricarea panourilor de interior

Procesul de spumare, realizat prin suflare fizică sau chimică, înseamnă fie introducerea de bule de gaz, fie eliminarea fazei lichide dintr-o suspensie apoasă de fibre. Prin urmare, se creează o porozitate care îmbunătățește rezistența la fluxul de aer și disipă eficient energia sonoră (Liuzzi *et al.* 2023). Liuzzi *et al.* (2023) au demonstrat că panourile produse din hârtie reciclată prezintă proprietăți de conductivitate termică și absorbție fonică reglabile în funcție de compoziția fibrelor și de porozitate, confirmând adecvarea spumelor pe bază de hârtie pentru aplicații acustice și termice de interior. Din perspectiva proiectării materialelor, sunt investigate mai multe căi pentru a îmbunătăți performanța funcțională. Secchi *et al.* (2016) au explorat compozitele din carton parțial reciclat ca absorbante de sunet, subliniind rolul macroporozității și al aliniamentului fibrelor.

Evaluările de mediu și ale ciclului de viață consolidează beneficiile de sustenabilitate ale acestor materiale. González-García *et al.* (2018) și Martínez *et al.* (2025) au arătat că panourile izolante pe bază de carton reciclat prezintă un consum energetic și emisii de gaze cu efect de seră mai reduse în

comparație cu vata minerală și polistirenul, chiar și atunci când se iau în calcul impactul producției de lianți și al transportului.

În concluzie, panourile din hârtie și carton reciclat oferă o cale viabilă din punct de vedere tehnic, favorabilă mediului și responsabilă din punct de vedere social pentru reciclarea deșeurilor celulozice în materiale de interior de înaltă performanță.

1.5 Lianți, tratamente și tendința către substanțe chimice cu impact redus

Performanța și durabilitatea pe termen lung a panourilor fabricate din fibre de hârtie și carton reciclate sunt determinate în mare măsură de alegerea lianților și a tratamentelor de suprafață. Așa cum se ilustrează în [Figura 1](#), acești factori influențează aderența dintre fibre, rezistența la umiditate și stabilitatea structurală.

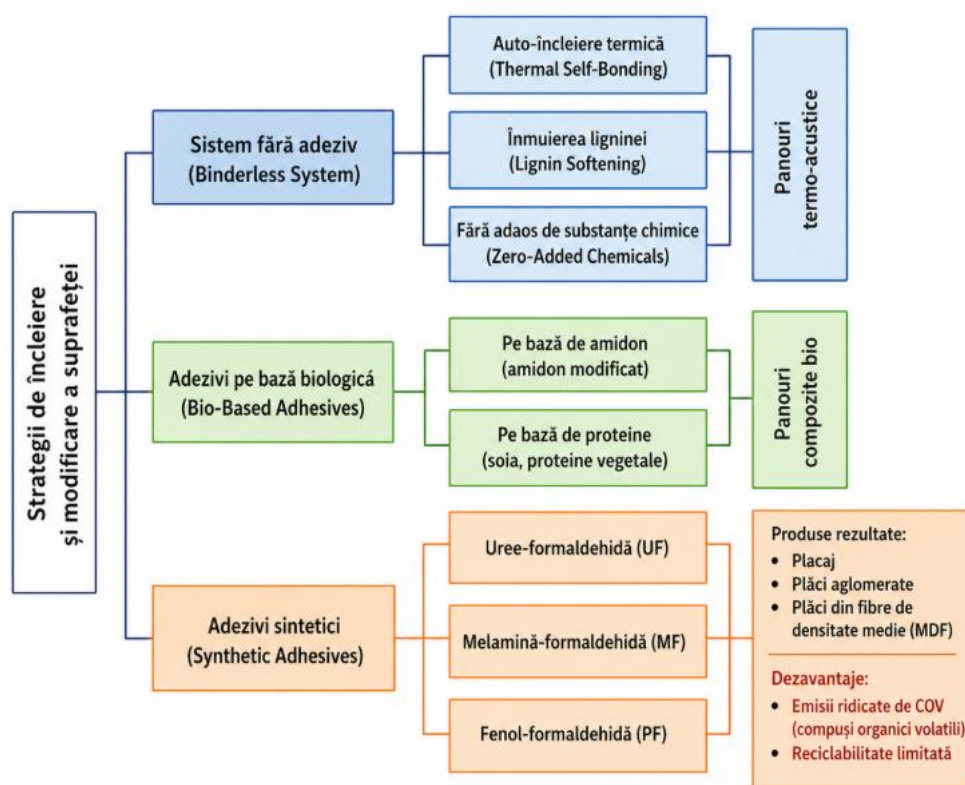


Figura 1. Clasificare schematică a sistemelor adezive și a strategiilor de modificare a suprafeței pentru panourile compozite pe bază de lemn și fibre naturale, inclusiv aplicațiile corespunzătoare, conform analizei literaturii de specialitate.

În ansamblu, trecerea continuă către compuși chimici cu impact redus și tratamente de suprafață durabile reprezintă o evoluție crucială în proiectarea panourilor pe bază de hârtie și carton reciclat. Integrarea adezivilor pe bază biologică, activarea ligninei și tehnicile de modificare inofensive nu numai că minimizează emisiile de formaldehidă și utilizarea resurselor fosile, dar îmbunătățesc și reciclabilitatea și biodegradabilitatea la sfârșitul ciclului de viață. Se preconizează că progresele viitoare vor pune accentul pe sisteme adezive multifuncționale capabile să asigure simultan aderență, hidrofobicitate și ignifugare, atribute cheie pentru obținerea atât a performanței, cât și a durabilității. Aceste progrese vor consolida poziția panourilor din fibre reciclate ca alternative credibile la materialele

sintetice de izolare și finisare, consolidându-le rolul în economia circulară și reducând amprenta de carbon a mediului construit (Mazaherifar *et al.*, 2025a).

1.6 Evaluarea de mediu a panourilor din hârtie și carton reciclat

Studiile privind evaluarea ciclului de viață (LCA) arată în mod constant că incorporarea fibrelor reciclate în panourile de construcție reduce energia încorporată și amprenta de carbon în comparație cu izolația pe bază de vată minerală sau polimeri (Buratti *et al.*, 2016). Beneficiile de mediu depind însă puternic de factori locali, precum distanțele de transport, sistemele de colectare și nivelurile de contaminare (Provost-Savard *et al.*, 2022).

Analizele comparative recente ale ciclului de viață confirmă faptul că înlocuirea celulozei virgine și a materiilor prime petrochimice cu fibre de hârtie și carton reciclate duce la reduceri semnificative ale cererii de energie primară (până la 60%) și ale potențialului de încălzire globală (30–50%), în funcție de sistemul de liant și de logistica transportului (Xie *et al.*, 2013; Virtanen și Nilsson, 2013). Aceste beneficii decurg în primul rând din evitarea producției de fibre virgine și din energia de proces mai redusă necesară pentru defibrarea mecanică în comparație cu fabricarea chimică a celulozei.

1.7 Concluzii

- Literatura de specialitate analizată în acest capitol demonstrează că hârtia și cartonul reciclate reprezintă materii prime secundare extrem de versatile, cu un potențial substanțial de valorificare în produse cu valoare adăugată, în special în sectoarele construcțiilor și amenajărilor interioare. Impulsionată de principiile economiei circulare, de obiectivele de atenuare a schimbărilor climatice și de presiunea crescândă de a reduce depozitarea deșeurilor în gropi de gunoi, cercetarea din ultimele două decenii s-a concentrat din ce în ce mai mult pe transformarea deșeurilor celulozice post-consum în materiale funcționale cu performanțe competitive și impact redus asupra mediului.
- Din perspectiva materialelor, fibrele de hârtie și carton reciclate oferă avantaje inerente, inclusiv densitate redusă, morfologie fibroasă, regenerabilitate și compatibilitate cu o gamă largă de lianți pe bază de biomasă și cu emisii reduse. Aceste caracteristici au permis încorporarea lor în diverse sisteme compozite, de la plăci aglomerate și plăci fibrolemnoase până la materiale izolante, acustice, cimentoase și pe bază de polimeri. Cu toate acestea, studiile analizate indică, de asemenea, că performanța compozitelor din fibre reciclate este extrem de sensibilă la pregătirea fibrelor, compoziția chimică a lianților, arhitectura panourilor și parametrii de procesare, subliniind complexitatea proiectării de sisteme optimizate din fluxuri de deșeuri eterogene.
- Prezenta cercetare doctorală introduce o abordare inovatoare în fabricarea panourilor din fibre reciclate prin dezvoltarea de sisteme compozite fără lianți și fără substanțe chimice, care exploatează potențialul fibrelor de celuloză de a se lega în condiții de prelucrare mecanică și termică controlată. Această strategie elimină necesitatea utilizării lianților sintetici sau a celor

cu impact chimic ridicat, rezultând composite ecologice cu amprentă de mediu minimă, reciclabilitate ridicată și biodegradabilitate îmbunătățită. Cercetarea se concentrează pe panouri de tip spumă și de tip sandwich cu densitate și morfologie a porilor adaptate pentru a obține performanțe multifuncționale, inclusiv izolație termică, amortizare acustică și stabilitate mecanică.

CAPITOLUL 2. Scopul și obiectivele cercetării prezentate în teza de doctorat

Obiectivul principal al acestei teze de doctorat este dezvoltarea și optimizarea panourilor composite de interior produse din hârtie și carton reciclate, cu accent pe materii prime durabile, impact redus asupra mediului și îndeplinirea cerințelor funcționale și mecanice pentru aplicații nestructurale, inclusiv panouri de izolare termică și acustică. Această cercetare contribuie la bioeconomia circulară prin transformarea deșeurilor celulozice post-consum în materiale de construcție de înaltă performanță care satisfac cerințele contemporane de eficiență energetică, confort acustic și durabilitate ecologică.

Pentru a atinge acest obiectiv general, programul de cercetare a fost structurat în următoarele obiective specifice, îndeplinite prin adoptarea strategiei prezentate în [Figura 2](#):

1. Valorificarea fibrelor de hârtie și carton postconsum ca materii prime lignocelulozice primare prin evaluarea adecvării lor intrinseci pentru producția de panouri ușoare de interior, cu o atenție deosebită acordată proprietăților lor morfologice și compatibilității lor cu procesele de spumare.
2. Proiectarea, dezvoltarea și optimizarea mai multor formule de panouri composite pe bază de fibre de celuloză reciclate combinate cu diverse sisteme de generare a gazului.
3. Evaluarea cuprinzătoare a proprietăților panourilor fabricate, inclusiv:
 - ▣ Analiza profilului de densitate verticală (VDP) pentru a evalua distribuția internă a masei.
 - ▣ Evaluarea stabilității dimensionale în cadrul testului de imersie în apă prin măsurarea umflării grosimii (TS) și a absorbției de apă (WA).
 - ▣ Evaluarea porozității pentru a determina fracțiunile de goluri interne.
 - ▣ Evaluarea performanțelor mecanice sub sarcină de flexiune și, respectiv, sub sarcină de tracțiune, inclusiv modulul de rupere (MOR), modulul de elasticitate (MOE) și, în final, rezistența internă a legăturii (IB).
4. Evaluarea performanțelor funcționale ale panourilor dezvoltate pentru aplicații de interior, în special prin determinarea:
 - ▣ Determinarea conductivității termice (TC) ca indicator al eficienței izolației clădirilor.
 - ▣ Determinarea coeficientului de absorbție fonică (α), împreună cu evaluarea performanței de absorbție fonică la frecvențe joase și înalte, pentru a evalua performanța acustică în ceea ce privește confortul interior și controlul zgomotului.
5. Efectuarea de investigații microscopice și structurale detaliate pentru a elucida interacțiunile dintre fibre, morfologia porilor și mecanismele de legătură, stabilind astfel conexiuni între parametrii de procesare, microstructură și performanța finală a panourilor:

- Caracterizarea microstructurală și analiza morfologică, incluzând atât stereomicroscopia, cât și microscopia electronică de baleiaj (SEM), pentru a examina structura internă și interacțiunile dintre fibre.
- Caracterizarea structurii moleculare, bazată pe spectroscopia în infraroșu cu transformată Fourier (FTIR), pentru identificarea funcționalităților chimice și a mecanismelor de legătură.

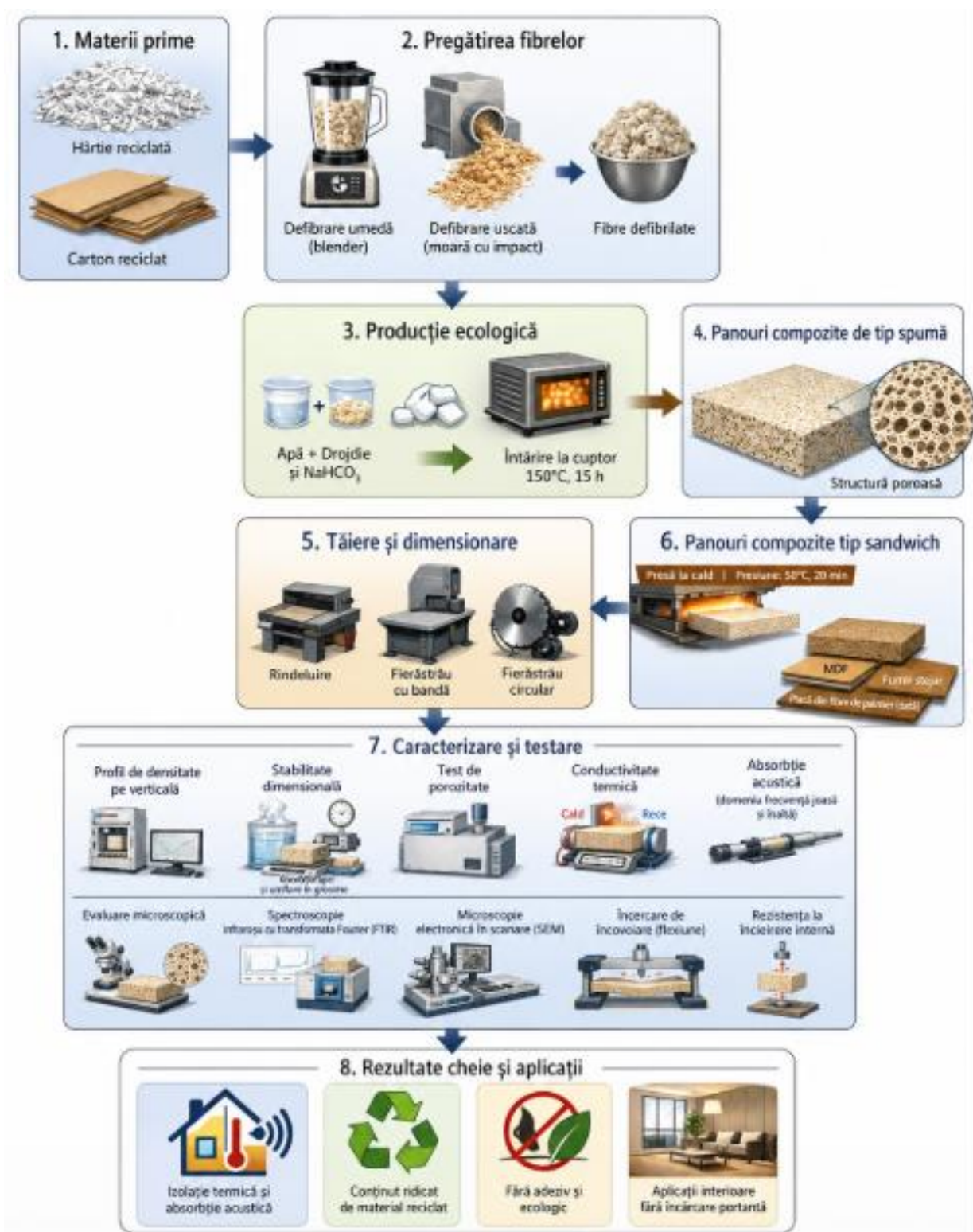


Figura2 . Reprezentare schematică a strategiei adoptate pentru atingerea obiectivelor tezei.

CAPITOLUL 3. Metodologia de cercetare, echipamente și materiale

3.1 Pregătirea materiei prime

Materiile prime pregătite pentru această cercetare au constat în principal din resurse lignocelulozice reciclate, și anume carton reciclat neimprimat și imprimat, hârtie de birou mărunțită și amestecuri ale acestora (Figura 3), completate de o gamă de agenți de spumare chimici și biologici selectați pentru a favoriza expansiunea controlată a panourilor în timpul procesării.



Figura 3. Materiale lignocelulozice reciclate, inclusiv deșeuri de hârtie și carton postconsum.

Pentru toate formulele prelucrate prin procesul umed, bucățile mici au fost scufundate în apă timp de 24 de ore pentru a înmuia rețeaua de fibre și a facilita dezintegrarea mecanică, apoi au fost defibrate cu ajutorul unui blender de laborator de mare viteză, funcționând la 9000 rpm timp de 1 minut, obținându-se o suspensie omogenă de fibre cu un raport fibră-apă optimizat în funcție de formula dorită a panoului compozit.

Al doilea grup de compozite a incorporat hârtie de birou reciclată fie ca singură sursă de fibre, fie în amestecuri controlate cu carton reciclat. Includerea hârtiei reciclate a fost motivată de două considerente centrale, inclusiv morfologia mai fină a fibrelor în comparație cu cartonul, care poate îmbunătăți încheierea acestora.

În plus față de materialele prelucrate prin procesul umed, o subgrupă de panouri compozite pe bază de carton a fost produsă utilizând o metodă de defibrare uscată, pentru a evalua influența defibrării fără apă asupra morfologiei fibrelor și a structurii finale a panoului. Această abordare a permis încorporarea agenților de expandare direct în amestecul uscat, oferind astfel un contrast în comportamentul de spumare față de formulările de suspensie umedă și susținând o comparație metodologică mai amplă pe parcursul studiului.

3.2 Fabricarea panourilor compozite

Fabricarea tuturor panourilor compozite, inclusiv a compozitelor din spumă derivate din carton reciclat, hârtie reciclată și amestecuri de hârtie și carton (Figura 4), precum și a panourilor cu structură tip sandwich cu miezuri pe bază de spumă, a urmat o metodologie standardizată și reproductibilă.

Acest cadru de procesare uniform a asigurat coerența între sistemele de materiale, permițând, în același timp, evaluarea sistematică a efectelor formulării și a compoziției fibrelor asupra proprietăților panourilor.



Figura4 . Compozite realizate din deșeuri de carton, hârtie reciclată și amestecuri de hârtie și carton.

3.2.1 Panouri compozite de tip spumă prelucrate prin proces umed

Pentru toate panourile compozite de tip spumă prelucrate prin procesul umed, suspensia de fibre pregătită în prealabil și amestecată cu agenți de spumare a fost turnată în tăvi căptușite cu matrițe, așa cum se arată în [Figura 5](#). Suspensia conținea proporția specificată de fibre, apă și agenți de spumare, care varia în funcție de mecanismul de spumare vizat. Suspensiile au fost întărite într-un cuptor cu convecție la 150 °C timp de 15 ore, facilitând evaporarea apei, activând agenții de spumare și consolidând matricea de fibre.



Figura5 . Amestecul de materii prime (procesul de turnare) al panourilor compozite de tip spumă obținute prin procesul umed.

3.2.2 Panouri de tip spumă prelucrate prin proces uscat

O subcategorie de compozite pe bază de carton a utilizat o metodă de defibrare uscată, în care fibrele de carton pre-sfâșiate au fost prelucrate mecanic într-o moară cu ciocane pentru a produce un material fibros uscat, cu curgere liberă, prezentat în [Figura 6](#). Ingredientele au fost adăugate la amestecul uscat și, după adăugarea apei, compoziția a fost turnată în tăvi căptușite cu matrițe de tip și supusă protocolului de întărire.



Figura6 . Amestecul de materii prime pentru panourile compozite de tip spumă obținute prin procesul uscat.

3.2.3 Panouri cu structură tip sandwich

În cazul panourilor cu structură tip sandwich, materialele de bază au constat în panouri fabricate anterior, obținute din deșeuri de hârtie 100%, deșeuri de carton 100% sau un amestec 50% hârtie–50% carton. Aceste miezuri prefabricate au fost tăiate la dimensiunile dorite și, ulterior, înțeleate cu unul dintre cele trei tipuri de straturi pentru fețe: placaj din fibră de densitate medie (MDF) de 3 mm, furnir de stejar de 1 mm sau foi din fibre extrase din nervura centrală a palmierului de curmale. Lista completă a compozițiilor materialelor, inclusiv tipul de compozit al miezului și straturile de fațadă pentru fiecare panou tip sandwich, este prezentată în [Tabelul 1](#), permițând o comparație clară între structuri.

Tabelul1 . Identificarea și caracteristicile panourilor sandwich.

Cod panou	Materia primă a panoului de bază	Straturi de fațadă
PM	100% hârtie	MDF
PV	100% hârtie	Furnir
PF	100% hârtie	Fibre de palmier datelier
PCM	50% hârtie/ 50% carton	MDF
PVC	50% hârtie/ 50% carton	Furnir
PCF	50% hârtie/ 50% carton	Fibre de palmier
CM	100% carton	MDF
CV	100% carton	Furnir
CF	100% carton	Fibre de palmier datelier

Înleierea s-a realizat folosind adezivul Jowacol 103.05 din acetat de polivinil (PVAc) D3 și o presă la cald Italpresse GL6 (Italpresse SPA, Bagnatica, Italia) la o presiune de 1 N/mm² la 50 °C timp de 20 de minute. Cantitățile de adeziv aplicate au fost optimizate pentru fiecare strat de fețe ([Figura 7](#)) pe baza unor încercări preliminare.

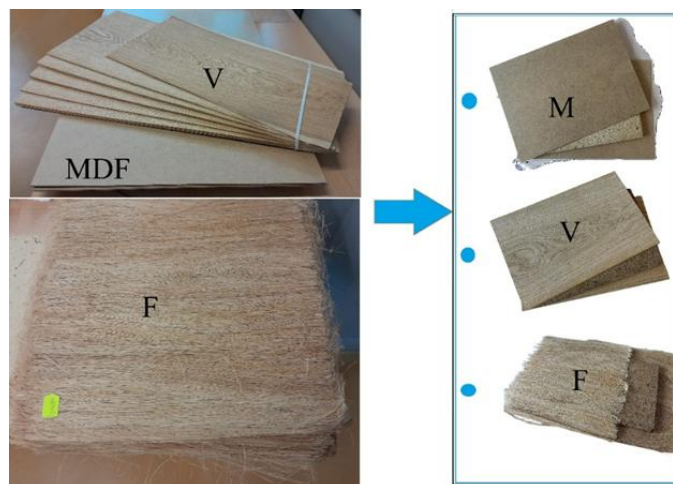


Figura 7 . Straturile exterioare și formarea panourilor sandwich (M pentru fețe din MDF, V pentru fețe din furnir și F pentru fețe din fibre de palmier datelier).

3.2.4 Post-procesare și condiționarea panourilor

Toate panourile compozite prezentate au fost debitate cu ajutorul unor mașini de rindeluit, ferăstraie cu bandă și ferăstraie circulare (Figura 8) pentru a îndepărta zonele supraexpandate și a obține o grosime uniformă de 10–30 mm. Panourile au fost condiționate într-un mediu normal (20 °C și 65% umiditate relativă) timp de 7 zile înainte de testarea caracteristicilor fizice, structurale și mecanice.



Figura 8 . Panoul compozit final, după tăierea la dimensiune, cu ajutorul unui ferăstrău circular.

3.3 Metodologia de testare

Protocolul de evaluare a inclus analiza profilului densității (VDP), evaluarea stabilității dimensionale în condiții de imersie în apă prin măsurarea umflării în grosime (TS) și a absorbției de apă (WA) (EN 317:1993), determinarea porozității și a coeficientului de conductivitate termică (TC) (ISO 8301 și DIN EN 12667), și determinarea coeficientului de absorbție fonică (α) în conformitate cu ISO 10534-2:2023, ISO 11654:1997 și ASTM E1050-12, completată de caracterizarea structurii moleculare bazată pe spectroscopia în infraroșu Fourier (FTIR) pentru a investiga structura chimică și potențialele interacțiuni dintre fibre și aditivi. Evaluarea microscopică a fost efectuată utilizând atât microscopia stereo, cât și microscopia electronică de baleiaj (SEM) pentru a analiza morfologia porilor, distribuția fibrelor și legăturile dintre fibre în cadrul matricei compozite. Performanța mecanică a fost evaluată prin teste de încovoiere, incluzând modulul de elasticitate (MOE) și modulul de rupere (MOR), conform EN 310:1993, precum și rezistența legăturii interne (IB), conform EN 319:1993, pentru a cuantifica

integritatea rețelei de fibre și a interfețelor adezive. Probele au fost mai întâi păstrate timp de 24 de ore la 20 ± 2 °C și $65 \pm 5\%$ umiditate relativă pentru a atinge echilibrul de umiditate și a asigura condiții de pornire uniforme pentru toate probele.

3.3.1 Profilul densității verticale (VDP)

Distribuția densității panourilor compozite propuse a fost evaluată utilizând profilarea pe grosime a densității pentru a înțelege variațiile structurii materialului în funcție de grosimea panoului. Acest parametru este esențial, deoarece afectează semnificativ performanța mecanică, stabilitatea dimensională și integritatea structurală în general. Măsurătorile au fost efectuate utilizând un profilator de densitate cu raze X IMAL DPX300 (IMAL S.p.A., San Damaso, Italia), un sistem nedistructiv de înaltă rezoluție conceput pentru materiale compozite lignocelulozice. Pentru fiecare tip de panou, au fost tăiate opt eşantioane de 50 mm × 50 mm din zone reprezentative pentru a surprinde variabilitatea potențială a distribuției densității. Profilul rezultat arată efectele materiei prime și ale agenților de spumare asupra distribuției densității atât a panourilor compozite de tip spumă, cât și a celor cu structură tip sandwich.

3.3.2 Evaluarea stabilității dimensionale după imersia în apă

Stabilitatea dimensională în condiții de expunere la apă a fost evaluată prin măsurarea umflării grosimii (TS) și a absorbției de apă (WA), indicatori-cheie ai rezistenței panourilor în condiții interioare cu potențiale fluctuații de umiditate.

Probele au fost imersate în apă distilată la 20 ± 1 °C timp de 24 de ore (Figura 9), iar măsurătorile au fost înregistrate înainte de imersie, după 2 ore și după 24 de ore de imersie în apă, captând atât cinetica inițială de absorbție a apei, cât și comportamentul de echilibru pe termen lung.



Figura9. Scufundarea probelor în apă pentru evaluarea stabilității dimensionale.

Valorile WA și TS au fost calculate cu ajutorul [ecuației \(1\)](#) și al [ecuației \(2\)](#), care oferă informații cantitative privind sensibilitatea la umiditate, aderența fibră-matrice și integritatea microstructurală.

$$WA (\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100, \quad (1)$$

unde m_1 este masa uscată inițială, iar m_2 este masa saturată după imersie.

$$TS (\%) = \frac{T_2 - T_1}{T_1} \cdot 100, \quad (2)$$

unde T_1 este grosimea inițială, iar T_2 este grosimea finală după imersie.

3.3.3 Determinarea porozității

Porozitatea a fost investigată pentru a cuantifica fracția de volum a golurilor, un parametru care influențează direct comportamentul mecanic, transportul termic și difuzia umidității. Măsurătorile de porozitate au fost efectuate utilizând picnometru de gaz AccuPyc III 1350, fabricat de Micromeritics Instrument Corp., Norcross, SUA, așa cum se arată în [Figura 10](#). Acest dispozitiv de înaltă precizie este proiectat special pentru a determina atât densitatea reală, cât și densitatea aparentă a materialelor solide.

AccuPyc III 1350 calculează densitatea reală (ρ_{true}) pe baza expansiunii heliului în camera de eșantionare, ignorând efectiv spațiile goale accesibile dintre particule, dar captând în același timp porozitatea internă etanșă. În paralel, se determină densitatea aparentă (ρ_{bulk}), care reprezintă densitatea globală a materialului, incluzând porii deschiși și închiși, precum și spațiile dintre particule. Porozitatea totală (P) a fost apoi calculată ca procent din volumul materialului folosind relația standard din [Ecuația \(3\)](#):

$$P (\%) = \frac{\rho_{bulk}}{\rho_{true}} \times 100 \quad (3)$$

3.3.4 Investigarea performanței termice

Comportamentul termic al panourilor compozite a fost evaluat prin determinarea coeficientului de conductivitate termică (λ), un indicator esențial al capacității lor de izolare termică, pentru utilizări eficiente din punct de vedere energetic. Măsurătorile au fost efectuate utilizând un aparat Heat Flow Meter HFM 436 Lambda, fabricat de Netzsch, Selb, Germania.

Au fost testate două eșantioane de panouri în conformitate cu specificațiile tehnice [ISO 8301](#) și [DIN EN 12667](#), asigurându-se rigurozitatea metodologică și comparabilitatea cu procedurile recunoscute la nivel internațional. Probele au fost tăiate la dimensiunea de 150 mm x 300 mm, permițând un contact optim cu plăcile aparatului. Fiecare probă a fost plasată între două plăci netede, placa superioară fiind menținută la 20 °C. Placa inferioară a fost răcită la -10 °C, stabilind un gradient de temperatură controlat pe întreaga suprafață a eșantionului. Parametrii experimentali detaliați sunt rezumați în [Tabelul 2](#).

Tabelul 2. Parametrii stabiliți pentru testare λ

Nr. test	T1 a plăcii inferioare	T2 a plăcii superioare	$\Delta T = T_2 - T_1$	$T_m = (T_1 + T_2) / 2$
1	-10	20	30	5
2	-5	20	25	7,5
3	0	20	20	10
4	5	20	15	12,5
5	10	20	10	15
6	15	20	5	17,5

HFM 436 Lambda determină fluxul de căldură prin probă folosind senzori încorporați, cu un λ calculat conform Legii lui Fourier (Ecuția 4):

$$\lambda = \frac{q \cdot d}{\Delta T}, (W/mK) \quad (4)$$

unde q reprezintă fluxul termic înregistrat, d corespunde grosimii eșantionului, iar ΔT indică gradientul de temperatură dintre plăci.

3.3.5 Determinarea performanței acustice a materialului (α)

Performanța acustică a compozitelor propuse a condus la determinarea unui coeficient de absorbție fonică (α) măsurat la frecvențe joase și înalte. Având în vedere că materialele poroase prezintă o absorbție dependentă de frecvență, s-au utilizat două configurații de tuburi de impedanță pentru a asigura o caracterizare precisă pe întregul spectru de interes. Toate măsurătorile au fost efectuate în condiții de incidență normală și în conformitate cu standardele internaționale relevante.

3.3.5.1 Evaluarea (α) în gama de frecvențe joase

Măsurătorile acustice de joasă frecvență au fost efectuate utilizând un tub de impedanță SCS80 FA, fabricat de Vibro-Acoustic S.R.L. din Campodarsego, Italia, echipat cu un sistem cu funcție de transfer cu microfon dublu. Aparatul a efectuat măsurători în intervalul de frecvență 50 Hz - 1390 Hz. A fost setată și menținută, pe toată durata măsurătorilor, o presiune acustică incidentă de 75 dB pentru a minimiza efectele acustice neliniare.



a.



b.



c.

Figura 10. Probele pregătite din panouri compozite poroase (a) și panouri sandwich (b: neperforate, c: perforate) pentru testarea frecvențelor joase.

Pentru fiecare tip de panou, a fost pregătit și testat un eșantion cu diametrul de 100 mm: panouri compozite de tip spumă (Figura 10a) și panouri tip sandwich (Figura 10b pentru cele neperforate și Figura 10c pentru cele perforate). Pentru a investiga efectul modificărilor geometrice, un set suplimentar de eșantioane cu unsprezece perforații dispuse uniform (cu diametrul de 3 mm fiecare) a fost testat în aceleași condiții (Figura 10c).

3.3.5.2 Evaluarea (α) în domeniul frecvențelor înalte

Măsurătorile acustice în domeniul frecvențelor înalte au fost efectuate pe un tub de impedanță Brüel & Kjær 4206, fabricat în Nærum, Danemarca, utilizând metoda funcției de transfer cu două microfoane (TFM).

Probele circulare cu un diametru de 29 mm (Figura 11) au fost montate în suportul destinat acestora. Intervalul de frecvență de măsurare de 100–6400 Hz a permis caracterizarea absorbției la frecvențe înalte, unde factori precum dimensiunea porilor, rezistivitatea la curgere și morfologia suprafeței influențează în mod critic disiparea acustică.

Un set suplimentar de probe cu șapte perforații dispuse uniform (cu diametrul de 3 mm fiecare) a fost testat în condiții identice, facilitând analiza rezonanțelor de tip Helmholtz.



a.



b.

Figura 11 . Probe din panouri compozite poroase (a, neperforate și perforate) și panouri tip sandwich (b, neperforate și perforate) pentru testarea absorbției acustice la frecvențe joase.

3.3.6 Caracterizarea microstructurală

Caracterizarea microstructurală a probelor a fost realizată atât cu ajutorul stereomicroscopiei optice, cât și al microscopiei electronice de baleiaj (SEM), pentru a examina în mod cuprinzător morfologia fibrelor, arhitectura porilor, distribuția aditivilor, legăturile interfaciale și structura matricei.

Prima investigație a fost efectuată la stereomicroscopul SMZ18-LOT2, fabricat de Nikon Corporation, Tokyo, Japonia. Este un sistem optic de înaltă precizie care oferă imagini de suprafață de înaltă rezoluție și o adâncime de câmp substanțială, fiind deosebit de potrivit pentru compozite lignocelulozice eterogene.

Imagistica a fost realizată la mărimi standardizate de 120× pentru morfologia miezului poros și de 22,5× pentru evaluarea secțiunii transversale a panourilor tip sandwich.

Pentru a investiga mai în detaliu caracteristicile microstructurale la mărimi mai mari, s-a utilizat un SEM-EDS de birou Phenom XL (Thermo Fisher Scientific, Eindhoven, Olanda), echipat cu un detector de electroni retrodifuzati (BSD) de înaltă sensibilitate. Analiza SEM a fost efectuată exclusiv pe panoul compozit tip sandwich din MDF cu miez mixt de hârtie-carton (PaPcSY 450-300). Această probă a fost selectată ca și configurație reprezentativă, deoarece integrează sistemul de miez hibrid, care a prezentat performanțe mecanice și acustice echilibrate, cu un strat de acoperire rigid pe bază de lemn care a îmbunătățit semnificativ proprietățile de încovoiere.

Pentru analiza SEM au fost decupate eșantioane de aproximativ 10 × 10 × 10 mm din zone reprezentative ale panoului PaPcM. Suprafața observată corespundea unei secțiuni transversale care includea atât placajul MDF, cât și miezul, înclăiate între ele (Figura 12), permițând evaluarea detaliată a zonei de tranziție interfacială.

Investigațiile SEM au fost efectuate la 10 kV sub vid redus (60 Pa) în modul de imagistică punctuală. Micrografiile au fost obținute la mărimi cuprinse între 500× și 4200×. În plus, a fost efectuată o analiză prin spectroscopie cu raze X cu dispersie de energie (EDX) pe SEM-EDX, selectând mai multe locații pe imaginile microscopice și utilizând identificarea și cuantificarea automată a elementelor.

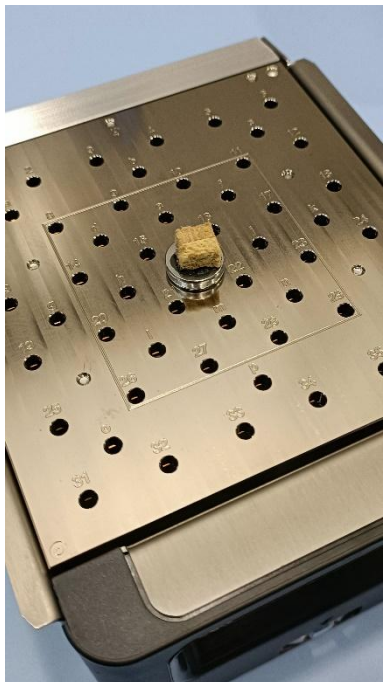


Figura 12 . Eșantioane preparate din panouri compozite de tip sandwich pentru analiza SEM.

3.3.7 Spectroscopie în infraroșu cu transformată Fourier (FTIR)

Compoziția chimică a materiilor prime și a compozitelor rezultate a fost analizată prin spectroscopie în infraroșu Fourier (FTIR). Această analiză a permis identificarea grupărilor funcționale, evaluarea interacțiunilor chimice și detectarea modificărilor induse de procesarea termică sau de reacțiile de expandare.

Toate spectrele au fost obținute cu un spectrometru (Alpha-Bruker FTIR), fabricat de Bruker Optics din Ettlingen, Germania. Acest aparat este echipat cu un modul de reflexie totală atenuată (ATR), care permite analiza directă a probelor și păstrează caracteristicile chimice intrinseci atât ale materiilor prime, cât și ale celor prelucrate. Pentru testare, s-a utilizat o rezoluție spectrală de 4 cm^{-1} și s-au efectuat măsurători în regiunea infraroșu mediu ($4000\text{--}600\text{ cm}^{-1}$) cu 24 de scanări per probă, acumulate pentru a obține un raport semnal-zgomot ridicat și reproductibilitate.

Pentru analiză au fost utilizate probe cu dimensiunile de $0,5\text{ mm} \times 0,5\text{ mm}$. Pentru postprocesare s-a utilizat software-ul OPUS 7.2, dezvoltat de Bruker, un producător din Ettlingen, Germania, care include corectarea liniei de bază pentru a elimina erorile, netezirea spectrală pentru a reduce zgomotul și calcularea mediei pentru a genera spectre reprezentative pentru fiecare categorie de materiale. Spectrele medii au fost ulterior normalizate utilizând o procedură Min–Max, asigurând comparații semnificative între diferite materiale și compozite prin evidențierea diferențelor chimice reale, mai degrabă decât a variațiilor de intensitate.

3.3.8 Evaluarea performanțelor mecanice

Evaluarea performanțelor mecanice a fost efectuată utilizând metode standardizate pentru testele de încovoiere și de coeziune internă (IB), oferind indicatori-cheie privind integritatea probelor, capacitatea maximă de încărcare și calitatea interacțiunilor fibră-fibră și fibră-matrice.

Comportamentul la încovoiere al probelor, exprimat ca modul de rupere (MOR) și modul de elasticitate (MOE), a fost testat folosind o mașină de testare universală de la ZwickRoell GmbH, Ulm, Germania. Aceasta suportă o sarcină de 10 kN, oferind măsurători de înaltă precizie adecvate pentru materiale compozite cu densitate redusă. Pentru fiecare categorie de compozit, au fost pregătite opt epruvete cu dimensiunile de 250 mm x 50 mm x 12,5 mm, în conformitate cu [EN 326-1](#), asigurând o eșantionare consistentă și reprezentativă pentru toate sistemele de materiale.

Rezistența la coeziune internă (IB), un indicator-cheie al coeziunii în cadrul rețelei de fibre din miez, a fost testată în conformitate cu [EN 319:1993](#). Testul a fost efectuat pe aceeași mașină de testare universală, echipată cu dispozitive de fixare specializate pentru tensiune, care aplică forțe de tracțiune uniforme, perpendiculare.

Pentru fiecare tip de compozit, au fost extrase opt epruvete pătrate (50 mm × 50 mm) din regiuni reprezentative ale panoului, pentru a minimiza influența variațiilor locale de densitate.

3.4 Metodologie statistică

A fost aplicată o metodologie statistică pentru a evalua semnificația factorilor care influențează comportamentul compozitelor examinate în acest studiu. Abordarea a fost concepută pentru a asigura reproductibilitatea, rigoarea metodologică și interpretarea precisă a datelor experimentale.

Analiza inițială a implicat calcularea în Microsoft Excel, a mediei și a deviației standard, și utilizarea unui interval de încredere de 95% și a unui prag de semnificație de 0,05 ($p < 0,05$). Această abordare a permis o evaluare clară a tendințelor centrale și a gradului de variație al tuturor caracteristicilor fizice, mecanice și termice evaluate.

Pentru a evalua dacă diferențele observate între grupurile de compozite erau semnificative din punct de vedere statistic, s-a utilizat software-ul statistic Minitab (versiunea 19.2020.1). Pentru a compara cele două grupuri, s-a utilizat un *test t*, pentru a evalua diferențele în valorile medii ale parametrilor cheie, respectiv indicatorii de performanță mecanică (MOE, MOR și IB) și indicatorii fizici (densitate, afinitate pentru apă, performanță acustică și termică).

Atunci când au fost comparate trei sau mai multe tipuri de compozite sau când configurații multiple de eșantioane au necesitat evaluarea simultană, s-a efectuat o *analiză ANOVA* unidirecțională. Atunci când *ANOVA* a indicat diferențe semnificative din punct de vedere statistic ($p < 0,05$), s-au efectuat analize post hoc — precum testul *HSD Tukey* — pentru a determina care perechi specifice de grupuri au generat variațiile observate, menținând în același timp controlul asupra ratelor de eroare de tip I.

CAPITOLUL 4. Rezultatele cercetărilor privind performanța panourilor compozite poroase pentru miez

4.1 Panouri compozite poroase fabricate din carton, bicarbonat de sodiu și amidon de porumb

Această secțiune prezintă rezultatele experimentale pentru panourile compozite ușoare produse exclusiv din deșeuri de carton, utilizând bicarbonat de sodiu și amidon de porumb ca agenți principali de spumare și de legare, așa cum se arată în [Figura 13](#). Aceste panouri reprezintă prima formulă din categoria mai largă a compozitelor pe bază de celuloză dezvoltate în cadrul acestei cercetări. Au fost fabricate două variante de panouri compozite cu această formulă: una conținând 3,5 % amidon de porumb (UcSCs 100-100) și cealaltă conținând 7 % amidon de porumb (UcSCs 100-200), cu bicarbonat de sodiu menținut la 3,5 % din greutate în ambele cazuri. Această variație controlată a conținutului de amidon permite evaluarea influenței acestuia asupra eficienței de expandare, a stabilizării porilor și a performanței finale a panoului.



Figura 13. Panou compozit fabricat din carton reciclat, cu agenți de expandare: bicarbonat de sodiu și amidon de porumb.

[Tabelul 3](#) rezumă principalii parametri fizici, structurali și mecanici obținuți pentru compozitele fabricate din carton reciclat cu bicarbonat de sodiu și amidon de porumb.

Tabelul 3. Rezultatele testelor fizice și mecanice ale compozitelor UcSCs 100-100 și UcSCs 100-200.

Tipul panoului	Densitate (kg/m ³)	Absorbția apei (%)		Umflare la grosime (%)		Porozitate (%)	Conductivitate termică (W/mK)	Rezistență la încovoiere (N/mm ²)		Rezistență la lipire internă (N/mm ²)
		2 ore	24h	2 ore	24h			MOE	MOR	
UcSCs 100-100	237,4	336	377	12,04	16,4	80	0,048	235,7	1,66	0,30
UcSC 100-200	284,3	277	322	10,94	19,6	76	0,049	535,2	3,1	0,43

Notă: Uc: carton neimprimat; S: bicarbonat de sodiu; Cs: amidon de porumb

4.1.1 Profilul densității verticale (VDP)

Profilele de densitate verticală (VDP) ale celor două panouri compozite de tip spumă pe bază de carton, fabricate cu 3,5 % amidon de porumb (panoul UcSCs 100-100) și 7 % amidon de porumb (panoul UcSCs 100-200), sunt prezentate în figurile 14a și 14b. Distribuțiile densității reflectă organizarea structurală internă care se dezvoltă în timpul tratării termice și al expansiunii.

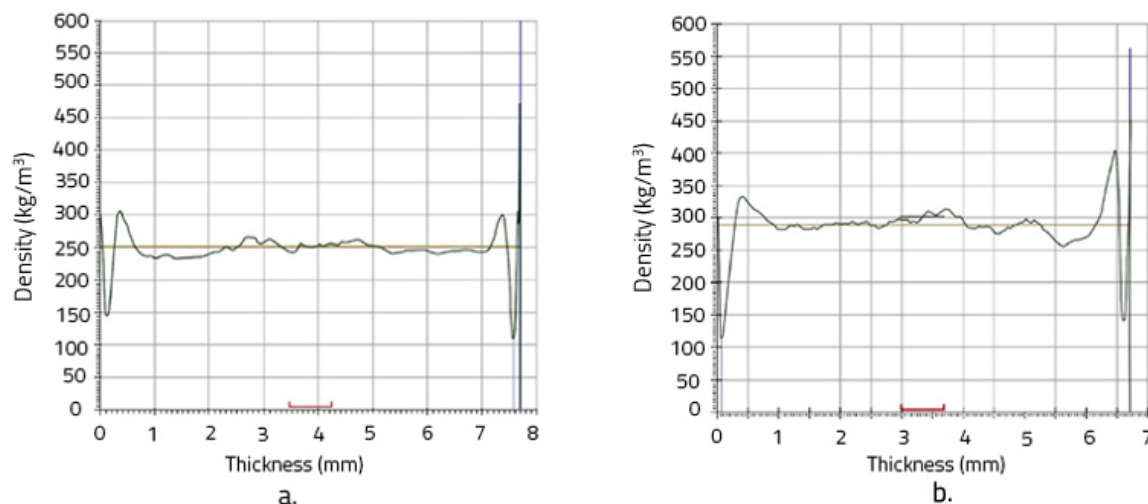


Figura 14. VDP-urile eșantionului de tip UcSCs 100-100 (a) și ale eșantionului de tip UcSCs 100-200 (b).

Analiza statistică a confirmat că diferența dintre valorile VDP ale celor două variante este semnificativă. Cantitatea mai mare de amidon din panoul UcSCs 100-200 a favorizat probabil formarea unor pereți porosi mai groși și mai coeziivi, care restricționează expansiunea volumetrică și, astfel, cresc densitatea aparentă finală.

4.1.2 Evaluarea stabilității dimensionale a panourilor după imersia în apă

Panourile compozite fabricate cu 3,5 % amidon de porumb (UcSCs 100-100) au prezentat valori medii ale TS de 12,04 % după 2 ore și de 16,4 % după 24 de ore de imersie în apă (Figura 15). În schimb, probele care conțineau 7 % amidon de porumb (UcSCs 100-200) au prezentat o TS ușor redusă, de 10,94 %, după 2 ore, dar mai mare cu 19,6 % după 24 de ore de imersie în apă.

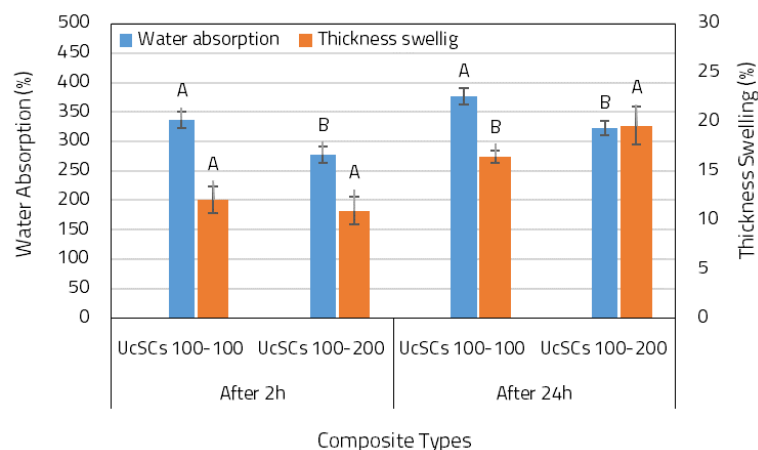


Figura 15. WA și TS ale probelor UcSCs 100-100 și UcSCs 100-200 după imersie în apă timp de 2 ore și 24 de ore.

4.1.3 Investigarea performanței termice

Analiza statistică efectuată la un nivel de încredere de 95% (Figura 16) a confirmat că diferența numerică ușoară dintre cele două valori nu este semnificativă din punct de vedere statistic. Aceste constatări indică faptul că variațiile conținutului de amidon în intervalul investigat nu afectează substanțial comportamentul de transfer termic al panourilor compozite pe bază de carton.

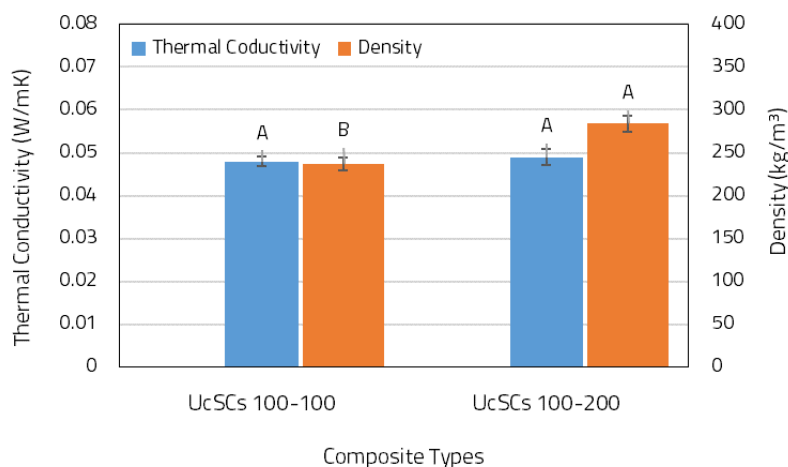


Figura 16. Coeficientul de conductivitate termică în funcție de densitatea probelor UcSCs 100-100 și UcSCs 100-200.

4.1.4 Caracterizarea microstructurală

Structura poroasă a panourilor compozite experimentale a fost examinată prin microscopie stereo, relevând limite bine definite ale porilor și dispunerea fibrelor, așa cum se arată în Figura 17.



Figura 17. Măsurători la o mărire de 30x ale compozitelor UcSCs 100-100 și UcSCs 100-200: a. 3,5 % amidon de porumb; b. 7 % amidon de porumb; c. mărire de 180x; d. Aderența fibrelor (zona pătrată) și prezența amidonului de porumb (zona încercuită) la o mărire de 300x.

Observațiile microscopice definesc morfologia porilor, aderența fibră-matrice și uniformitatea generală a microstructurii. Interacțiunea dintre dimensiunea porilor, dispersia fibrelor și distribuția liantului ajută la elucidarea comportamentului termic, mecanic și legat de umiditate al compozitelor.

4.1.5 Caracterizarea structurii moleculare pe baza FTIR

Spectrele FTIR ale principalilor constituenți utilizați în producerea panourilor compozite poroase — și anume, deșeurii de carton ondulat recuperate ca fază fibroasă și amidon de porumb ca agent de legătură — sunt prezentate una lângă alta în [Figura 18](#) pentru comparație.

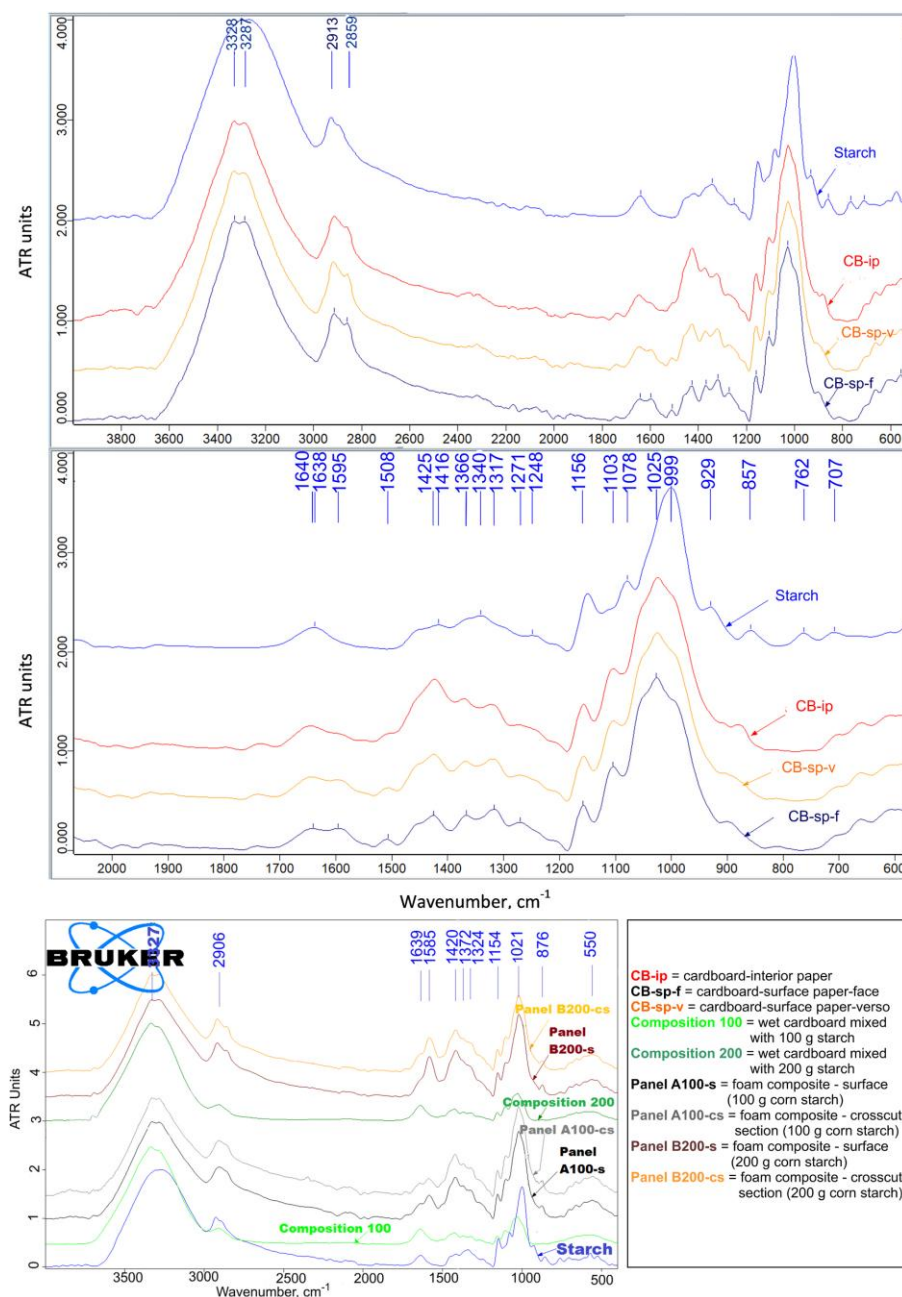


Figura 18. Spectre FTIR comparative ale materialelor constitutive ale panourilor, compoziții umede cu conținut variabil de amidon (100 g și 200 g) și compozitele întărite (UcSCs 100-100 și UcSCs 100-200).

Analiza FTIR confirmă faptul că tratarea termică nu numai că elimină umiditatea reziduală, ci și îmbunătățește interacțiunile dintre fibre și amidon, contribuind la îmbunătățirea integrității structurale, a rezistenței mecanice și a rezistenței la umiditate în compozitele finale.

4.1.6 Evaluarea performanțelor mecanice

Rezultatele arată că mărirea conținutului de amidon îmbunătățește semnificativ performanța la încovoiere a panourilor (Figura 19).

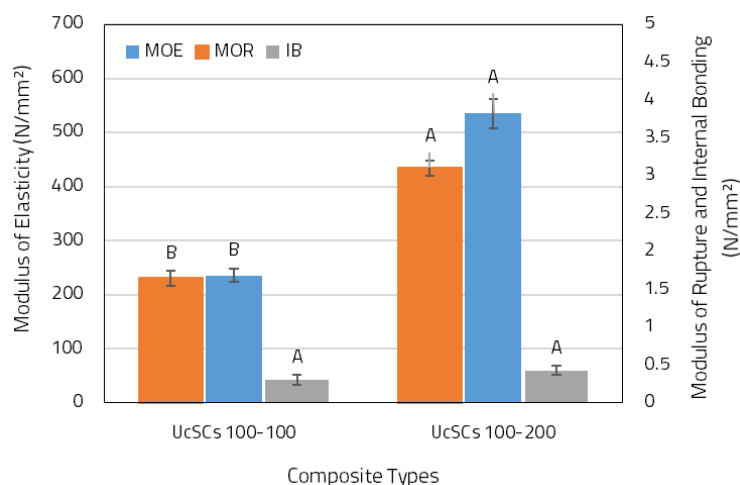


Figura 19. Valorile MOR, MOE și IB ale probelor UcSCs 100-100 și UcSCs 100-200.

Având în vedere că obiectivul principal al acestor compozite este izolația termică și acustică, mai degrabă decât performanța structurală de înaltă rezistență, cunoașterea performanțelor lor mecanice oferă o referință valoroasă pentru potențiale aplicații secundare. De exemplu, dacă aceste panouri sunt acoperite cu furnir subțire, plăci sau straturi de fațadă similare, ele ar putea fi integrate în componente de mobilier ușoare, panouri de compartimentare interioară sau miezuri de uși, unde rezistența moderată la încovoiere și la înclieare, împreună cu greutatea redusă și performanța de izolare, ar fi avantajoasă. Înțelegerea interacțiunii dintre densitate, conținutul de liant și proprietățile mecanice facilitează astfel optimizarea proiectării panourilor atât pentru aplicații de izolare, cât și pentru aplicații structurale secundare, extinzând potențial durata de viață și versatilitatea funcțională a produselor rezultate.

4.1.7 Concluzii

- Panourile compozite ușoare pot fi fabricate cu succes din carton ondulat reciclat, utilizând amidon de porumb ca liant biologic și bicarbonat de sodiu ca agent de spumare, cu întărire termică la 105 °C timp de 15 ore, producând compozite poroase, stabile din punct de vedere structural.
- În ciuda diferențelor de densitate, conductivitatea termică a rămas aproape identică (0,048–0,049 W/mK), confirmând faptul că performanța de izolare este controlată în primul rând de structura celulară globală și de porozitate (80% pentru panourile cu conținut redus de amidon, 76% pentru cele cu conținut ridicat de amidon).

- Performanța mecanică crește odată cu conținutul de amidon, datorită interacțiunilor mai puternice dintre fibre și liant și pereților porilor mai groși și mai continui; cu toate acestea, proprietățile mecanice modeste rămân acceptabile pentru aplicații de izolare termică.
- Integritatea structurală și coeziunea sunt suficiente pentru utilizări ușoare, iar performanța mecanică poate fi îmbunătățită pentru aplicații precum panouri de mobilier, pereți despărțitori sau miezuri de uși prin laminare cu plăci fibrolemnoase subțiri de densitate medie sau ridicată, fără a crește semnificativ greutatea.
- Stabilitatea dimensională este limitată de WA și TS datorită naturii hidrofile a fibrelor de amidon și celuloză; un conținut mai ridicat de amidon îmbunătățește ușor rezistența pe termen scurt, dar expunerea prelungită crește umflarea.
- Analiza FTIR indică faptul că tratamentul hidrotermic favorizează reorganizarea structurală a amidonului, crescând cristalinitatea, reducând solubilitatea și îmbunătățind interacțiunile dintre amiloză și amilopectină, contribuind la o legătură mai puternică între fibre, la compactitate și la omogenitatea compozitelor.
- Expandarea indusă de bicarbonatul de sodiu, gelatinizarea amidonului și dispersia fibrelor, generează o morfologie poroasă uniformă, care susține performanța de izolare termică.

4.2 Compozite ușoare realizate din carton, bicarbonat de sodiu, praf de copt și oțet

Această serie introduce un parametru comparativ esențial, și anume tipul de carton: reciclat imprimat (PcSB 450-300) și neimprimat (UcSB 450-300). Această distincție are o importanță științifică, deoarece cernelurile de tipar, acoperirile și tratamentele de suprafață, prezente în mod obișnuit pe materialele de ambalare comerciale, pot influența morfologia fibrelor, chimia suprafeței, dezvoltarea porozității și performanța generală a compozitului. Aceste compozite au fost fabricate prin metoda umedă (Figura 20).



Figura 20. Compozite ușoare realizate din carton reciclat, bicarbonat de sodiu, praf de copt și oțet ca agenți de spumare.

4.2.1 Profilul densității verticale (VDP)

O evaluare statistică, la un nivel de încredere de 95%, a confirmat consistența valorilor densității pentru fiecare tip de panou. Curbele VDP ilustrate în Figura 21 prezintă o tendință general liniară pe grosime.

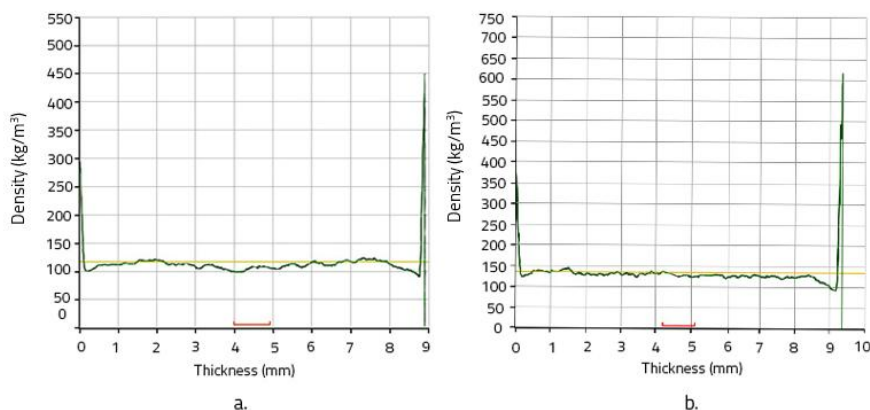


Figura 21. Profilul VDP al probei de tip UcsB 450-300 (a) și al probei de tip PcSB 450-300 (b).

Analiza VDP oferă informații esențiale cu privire la modul în care selecția materiei prime, respectiv carton neimprimat și imprimat, influențează direct distribuția densității, formarea microstructurală și, în cele din urmă, proprietățile funcționale ale compozitelor rezultate.

4.2.2 Evaluarea stabilității dimensionale după imersia în apă

Creșterea WA în PcSB 450-300 (Figura 22) sugerează că procesul de imprimare, care implică adesea pigmenți, polimeri și aditivi de suprafață, poate altera interacțiunile apă-fibră, favorizând astfel o absorbție inițială mai mare a umidității. Deși aceste tratamente îmbunătățesc uneori rezistența la umiditate în aplicațiile de ambalare, rolul lor în cadrul unei matrice compozite expandate pare mai complex. Cernelurile și acoperirile pot perturba comportamentul natural de umflare al fibrelor și pot interfera cu distribuția uniformă a liantului, crescând astfel porozitatea efectivă și facilitând pătrunderea apei în rețeaua de fibre.

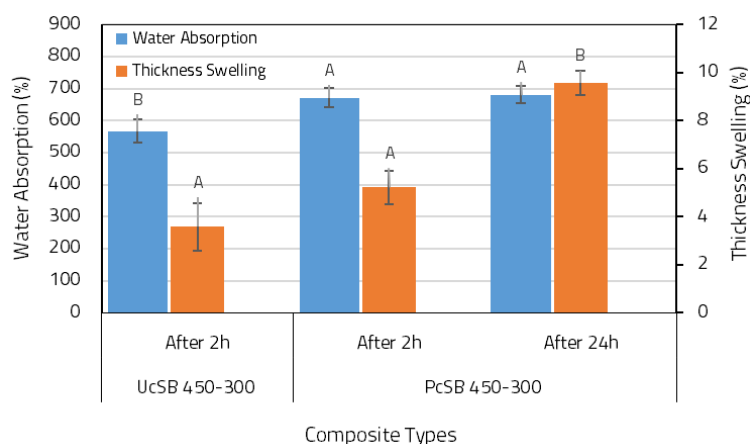


Figura 22. WA și TS ale probelor UcsB 450-300 și PcSB 450-300 după 2 și 24 de ore de imersie în apă.

În general, comportamentul de stabilitate dimensională al UcSB 450-300 și PcSB 450-300 indică faptul că imprimarea oferă o materie primă mai favorabilă absorbției de apă și unei umflări pe termen scurt mai reduse în panourile compozite. Panourile din carton imprimat, deși sunt mai ușoare din punct de vedere structural, sunt mai predispuse la modificări dimensionale induse de umiditate, în special în cazul unor perioade de expunere prelungite. Aceste informații sunt esențiale pentru a determina adecvarea acestor materiale pentru aplicații care necesită rezistență la umiditate.

4.2.3 Investigarea performanței termice

Deși diferența dintre cele două valori este mică din punct de vedere numeric (Figura 23), o analiză statistică la un nivel de încredere de 95% a confirmat că aceasta este semnificativă din punct de vedere statistic. Acest rezultat indică faptul că chiar și diferențele mici de densitate și de caracteristici microstructurale pot influența conductivitatea termică.

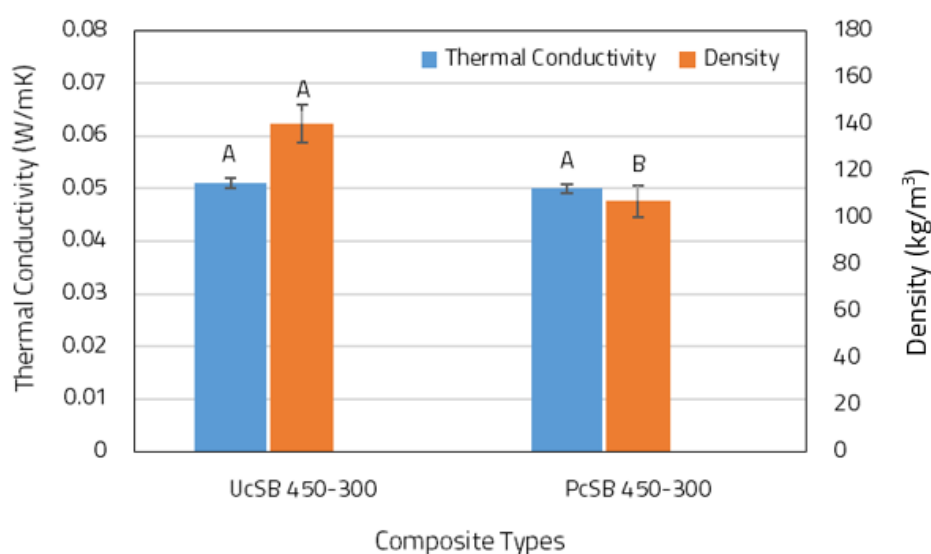


Figura 23. Coeficientul de conductivitate termică în funcție de densitatea probelor UcSB 450-300 și PcSB 450-300.

În concluzie, rezultatele privind conductivitatea termică confirmă faptul că atât compozitele din carton neimprimat, cât și cele imprimate prezintă performanțe de izolare comparabile și stabile, determinate în principal de densitatea redusă și de porozitatea internă ridicată. Deși semnificativă din punct de vedere statistic, diferența dintre cele două materiale este practic minimă, ceea ce le recomandă în sistemele de izolare termică.

4.2.4 Determinarea performanței acustice

Coeficienții de absorbție fonică obținuți pentru ambele tipuri de panouri au demonstrat similitudine, indicând o eficacitate comparabilă în disiparea energiei acustice, așa cum se ilustrează în Figura 24.

În ciuda diferențelor de densitate, ambele panouri au demonstrat capacitatea de a absorbi sunetul în gama de frecvențe medii, datorită porozității ridicate și microstructurii fibroase. Aceste rezultate au subliniat rolul important al golurilor interne de aer și al conectivității porilor. Strategiile de optimizare,

cum ar fi modificarea grosimii panoului sau introducerea unor perforații proiectate , ar putea extinde capacitățile de absorbție la frecvențe joase și înalte în studiile viitoare.

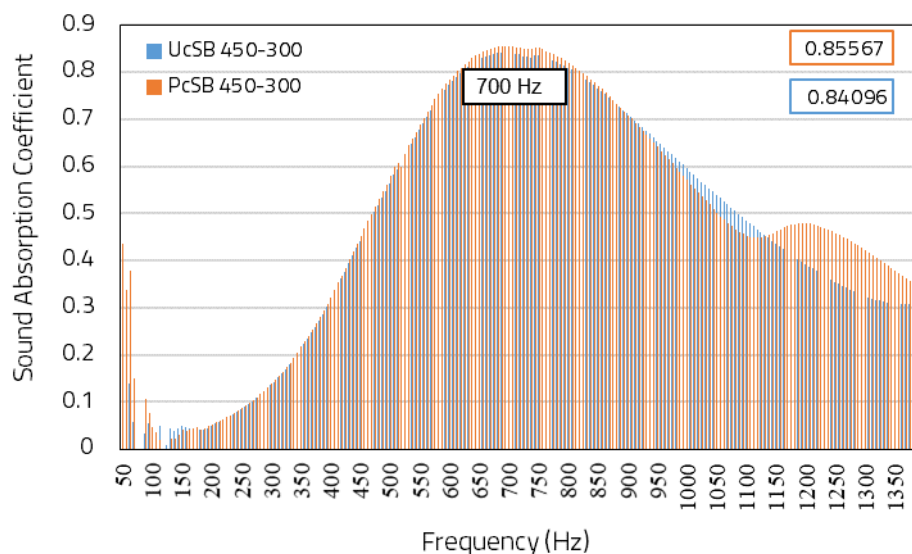


Figura24 . Absorbția sunetului de joasă frecvență a probelor UcSB 450-300 și PcSB 450-300.

4.2.5 Caracterizarea microstructurală

Examinarea microscopică a UcSB 450-300 a relevat faptul că probele prezintă o morfologie extrem de poroasă, caracterizată prin numeroase goluri și fibre de celuloză întrețesute aleatoriu (Figura 25a și b).

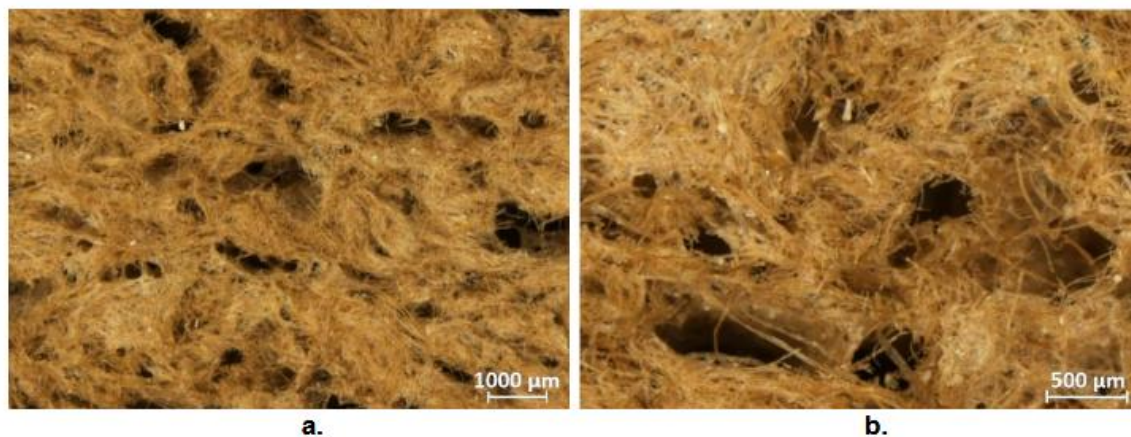


Figura25 . Investigarea microscopică a probelor UcSB 450-300: a. 22,5x; b. 60x

După cum se vede în Figura 25, orientarea neregulată a fibrelor și abundența spațiilor goale indică faptul că porozitatea este o caracteristică structurală predominantă a materialului. Aceste goluri sunt generate în principal prin acțiunea combinată a bicarbonatului de sodiu și a prafului de copt, ambele funcționând ca agenți de degajare a gazului în timpul fabricării compozitului. Reacția dintre bicarbonatul de sodiu și oțet eliberează CO_2 , inițiind expansiunea matricei și formarea rețelei de pori, vizibilă în întreaga microstructură. Analiza microscopică confirmă faptul că structura compozitului este dominată de pori interconectați și fibre de celuloză, rezultate din generarea controlată a gazului și a aditivilor

4.2.6 Caracterizarea structurii moleculare pe baza FTIR

Spectrele FTIR ale ingredientelor amestecate, utilizate la producerea celor două compozite, atât în stare uscată la aer, cât și după tratament termic, sunt prezentate în [Figura 26](#).

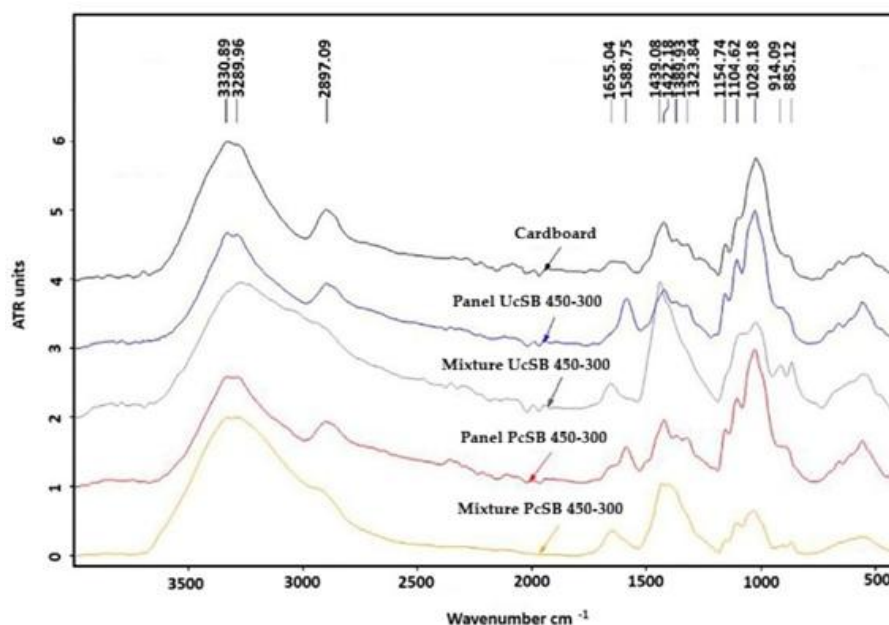


Figura 26. Spectrele FTIR ale ingredientelor amestecate utilizate pentru prepararea compozitelor, sub formă de probe uscate la aer (amestecul UcSB 450-300, amestecul PcSB 450-300) și ale compozitelor finite (UcSB 450-300, PcSB 450-300) obținute în urma tratamentului termic.

În urma procesării termice prelungite, atât agenții de spumare, cât și apa sunt în mare parte îndepărtate, rezultând spectre finale care seamănă mai mult cu cele ale materialului din fibră de carton.

O comparație calitativă a spectrelor FTIR ale probelor UcSB 450-300 și PcSB 450-300 relevă doar diferențe minore între ele. Aceste variații indică faptul că ambele tipuri de panouri sunt similare din punct de vedere chimic, cu diferențe limitate în distribuția grupărilor funcționale — în concordanță cu comportamentul lor fizic și mecanic, în general comparabil.

4.2.7 Evaluarea performanțelor mecanice

Performanța mecanică a celor două tipuri de panouri compozite, UcSB 450-300 și PcSB 450-300, a fost evaluată în mod cuprinzător prin teste de încovoiere și măsurarea IB ([Figura 27](#)).

În ciuda diferențelor numerice, analiza statistică, la un nivel de încredere de 95%, nu a evidențiat nicio diferență semnificativă între proprietățile mecanice ale celor două tipuri de materiale. Acest lucru sugerează că variațiile observate între UcSB 450-300 și PcSB 450-300 în ceea ce privește MOE, MOR și IB pot fi atribuite variabilității naturale a materialelor din carton reciclat și procesului de fabricație. Cu toate acestea, modelul constant al valorilor medii mai ridicate pentru UcSB 450-300 indică o tendință măsurabilă în favoarea compozitului din carton neimprimat.

Valorile MOR au urmat aceeași tendință: UcSB 450-300 a atins 0,153 N/mm², depășind PcSB 450-300, care a înregistrat 0,111 N/mm². MOR reflectă capacitatea maximă de încărcare înainte de rupere, indicând faptul că panoul pe bază de carton neimprimat poate suporta solicitări de încovoiere mai mari.

Acest avantaj de performanță sugerează că UcSB 450-300 poate fi mai potrivit pentru aplicații structurale în care sarcinile de încovoiere sunt critice sau fiabilitatea mecanică este o cerință esențială.

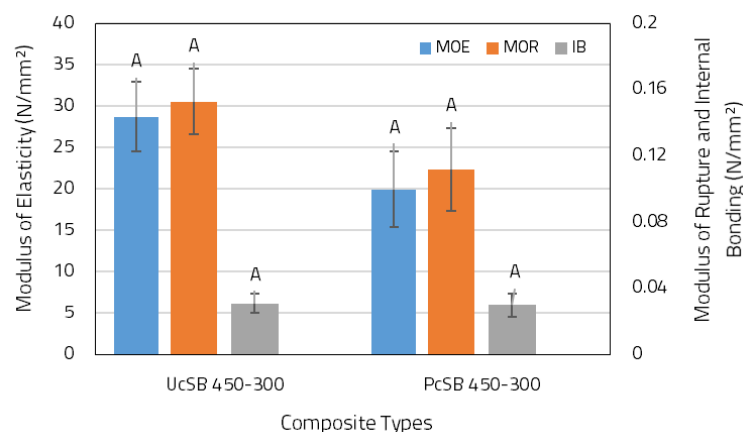


Figura 27. Rezultatele testelor de încovoiere și valorile IB ale probelor UcSB 450-300 și PcSB 450-300.

Rezultatele demonstrează că, în timp ce PcSB 450-300 are performanțe adecvate pentru toți parametrii testați, UcSB 450-300 este superior din punct de vedere mecanic, prezentând o rigiditate mai mare, o rezistență la încovoiere mai ridicată și o coeziune internă ușor îmbunătățită. Performanța redusă a PcSB 450-300 se datorează probabil modificărilor legate de imprimare care alterează structura fibrelor sau introduc microdefecte, crescând potențial porozitatea și slăbind rețeaua de fibre.

4.2.8 Concluzii

- ▣ Ambele panouri au prezentat un gradient de densitate aproape liniar, indicând condiții de fabricație stabile.
- ▣ Stabilitatea dimensională și comportamentul legat de apă au reflectat diferențele de densitate.
- ▣ Porozitatea, formată prin eliberarea controlată a gazului din bicarbonatul de sodiu și praful de copt, a fost esențială pentru densitatea redusă, absorbția fonică și performanța termică.
- ▣ Conductivitatea termică a fost scăzută pentru ambele materiale, indicând faptul că imprimarea nu afectează semnificativ transferul de căldură.
- ▣ Absorbția fonică a fost similară pentru ambele panouri, cu performanțe puternice la frecvențe medii (coeficienți >0,84) datorită structurilor poroase care disipă energia sonoră, făcându-le potrivite pentru acustica interioară; absorbția la frecvențe joase a fost limitată de grosimea panoului.
- ▣ Analiza FTIR a confirmat păstrarea structurilor chimice ale celulozei, hemicelulozei și ligninei, cu diferențe minore la nivelul vârfurilor hidroilice și aromatice.
- ▣ Diferențele privind performanța mecanică au fost consecvente în toate testele, aliniindu-se densității și observațiilor microscopice, deși nu au fost semnificative din punct de vedere statistic la un nivel de încredere de 95%.

4.3 Compozite poroase fabricate din carton, bicarbonat de sodiu și drojdie

Aceste panouri constituie a treia formulă din categoria mai largă a panourilor compozite poroase pe bază de celuloză dezvoltate în cadrul acestui studiu. În total, au fost investigate șapte tipuri de panouri compozite. Șase panouri au fost fabricate folosind metoda de prelucrare umedă (Figura 28a), în timp ce un panou suplimentar a fost produs folosind metoda de prelucrare uscată (Figura 28b). Un total de șase panouri au fost fabricate folosind metoda umedă, diferind în ceea ce privește tipul de carton (neimprimat sau imprimat) și proporțiile relative ale bicarbonatului de sodiu și ale drojdiei.



a.



b.

Figura 28 . Panouri compozite fabricate din carton reciclat, utilizând bicarbonat de sodiu și drojdie ca agenți de spumare, prin metode de procesare umedă și uscată.

4.3.1 Profilul densității verticale (VDP)

VDP-urile compozitelor de tip spumă fabricate din carton, folosind bicarbonatul de sodiu și drojdia, sunt prezentate în Figura 29, acoperind toate cele șapte variante de panouri produse atât prin metode de procesare umede, cât și uscate. Analiza VDP oferă un profil de densitate care arată distribuția acestuia pe grosimea panoului, reflectând efectele combinate ale metodei de procesare, ale tipului de carton și proporțiilor agentului de spumare asupra compactării fibrelor, evoluției gazelor și uniformității structurale interne. Rezultatele VDP demonstrează că metoda de prelucrare este factorul dominant care determină distribuția densității în aceste compozite, urmată de tipul cartonului și de proporția agentului de spumare. Panoul prelucrat prin procesul uscat a atins o densitate superioară și o stabilitate

a profilului, în timp ce panourile prelucrate prin procesul umed au prezentat densități mai mici și porozități mai mari, cu regiuni centrale rezonabil omogene.

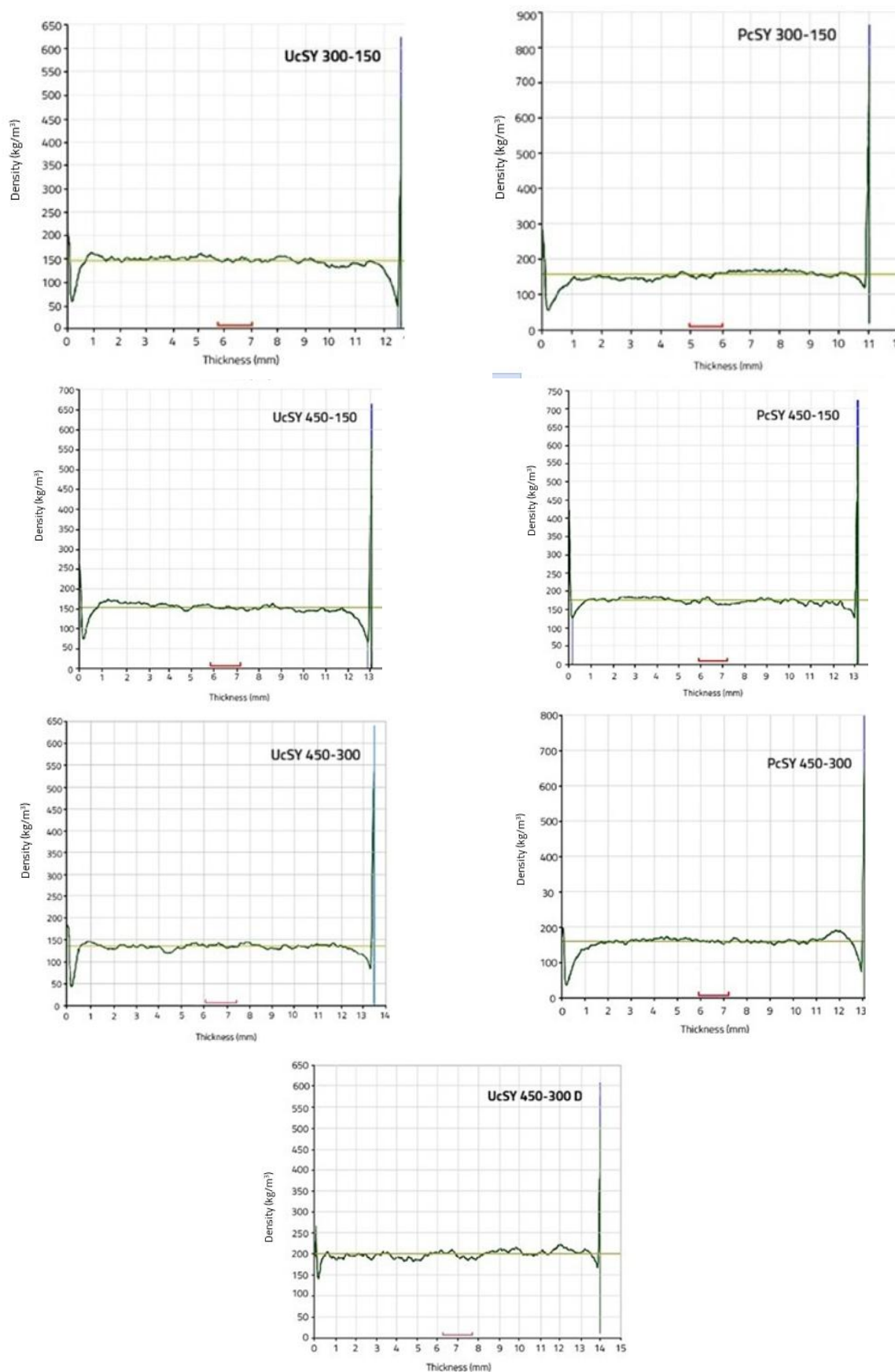


Figura29. VDP al panourilor compozite pe bază de carton prelucrate prin procesul umed și uscat.

4.3.2 Evaluarea stabilității dimensionale după imersia în apă

Evaluarea s-a realizat prin măsurarea absorbției de apă (WA) și a umflării în grosime (TS) după 2 și 24 de ore de imersie în apă. Rezultatele, prezentate în [Figura 30](#) pentru WA și în [Figura 31](#) pentru TS, evidențiază diferențe pronunțate între panourile fabricate prin procesul umed și panoul fabricat prin metoda uscată, subliniind influența puternică a condițiilor de procesare, a porozității și a structurii interne asupra comportamentului la umiditate.

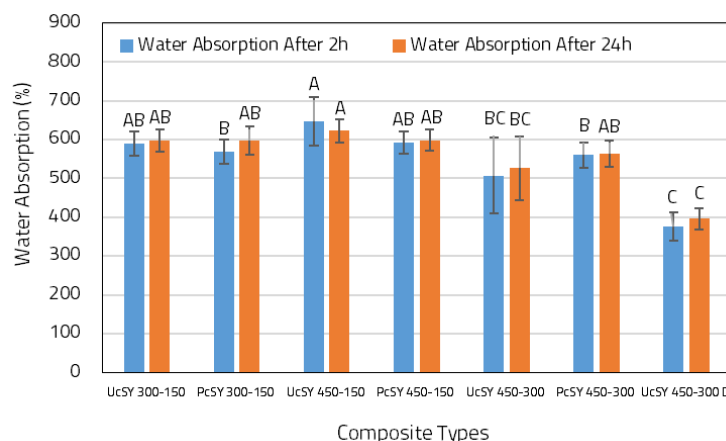


Figura30 . Absorbția de apă a probelor obținute prin metode de prelucrare umedă și uscată după imersie în apă timp de 2 ore și, respectiv, 24 de ore.

TS a urmat o tendință similară cu cea a absorbției de apă. Probele prelucrate prin metoda umedă au prezentat valori TS mai mari ([Figura 31](#)). Spre deosebire de absorbția de apă, diferențele de umflare a grosimii între cele două tipuri de probe au fost semnificative din punct de vedere statistic ($p < 0,05$), imediat după 24 de ore de imersie în apă, așa cum indică grupările distincte din [Figura 31](#).

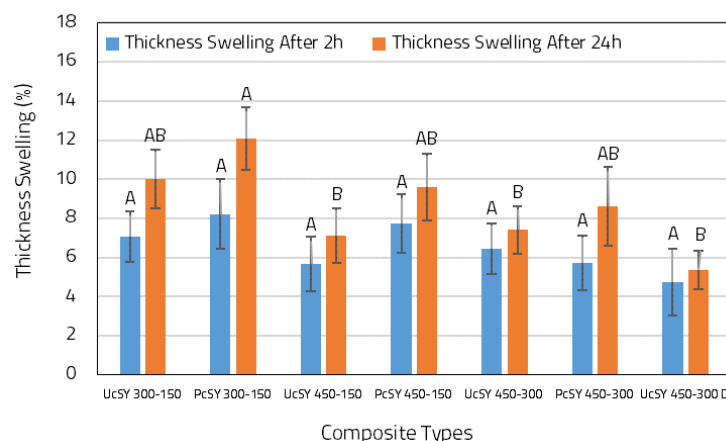


Figura31 . Umflarea grosimii probelor obținute prin metode de prelucrare umedă și uscată după imersie în apă timp de 2 ore și, respectiv, 24 de ore.

În concluzie, rezultatele privind stabilitatea dimensională demonstrează că metoda de prelucrare uscată îmbunătățește semnificativ rezistența la umflarea, în ciuda naturii inerent hidrofile a matricei pe bază de carton. Deși panourile compozite prelucrate prin metoda umedă oferă avantaje în ceea ce privește porozitatea ridicată și densitatea scăzută, care sunt caracteristici dorite pentru performanța termică și acustică, absorbția ridicată de apă și umflarea în grosime limitează adecvarea lor pentru aplicații care necesită stabilitate dimensională în condiții de umiditate.

4.3.3 Investigarea performanțelor termice

Potențialul de izolare al compozitelor realizate cu carton, bicarbonat de sodiu și drojdie ca aditivi a fost măsurat utilizând coeficientul de conductivitate termică (λ). Valorile înregistrate pentru toate variantele de compozite sunt prezentate în [Figura 32](#). În ansamblu, panourile au prezentat o conductivitate termică scăzută, caracteristică materialelor lignocelulozice cu porozitate ridicată, confirmând adecvarea lor pentru aplicații care necesită izolație termică.

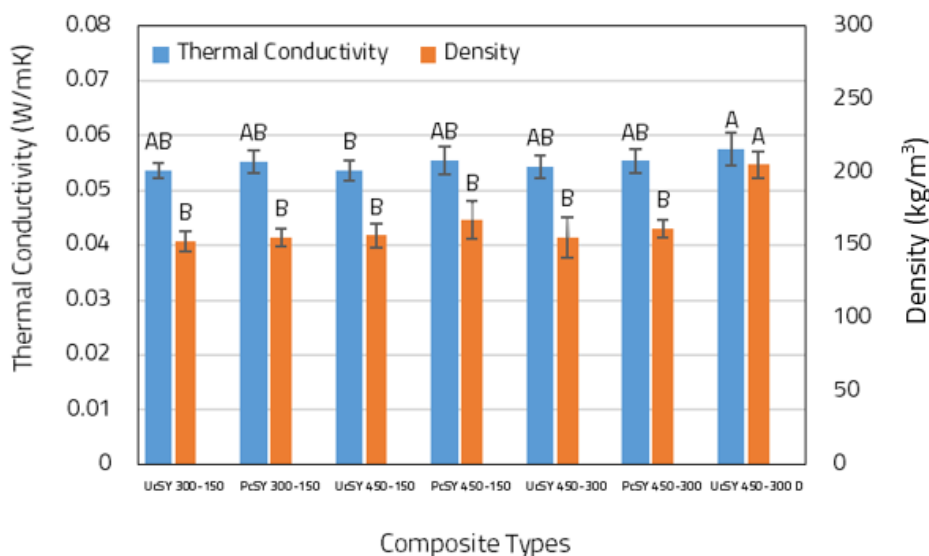


Figura32 . Coeficientul de conductivitate termică (λ) în funcție de densitate.

4.3.4 Determinarea performanței acustice

Comportamentul de absorbție acustică al compozitelor analizate în gama de frecvențe joase este prezentat în [Figura 33](#), acoperind intervalul de frecvențe de la 50 Hz la 1390 Hz, ceea ce reprezintă o provocare deosebită pentru materialele poroase, deoarece undele acustice de joasă frecvență au lungimi de undă mai mari și necesită combinații adecvate de grosime a panoului, densitate, pentru a obține o atenuare sau o absorbție eficientă.

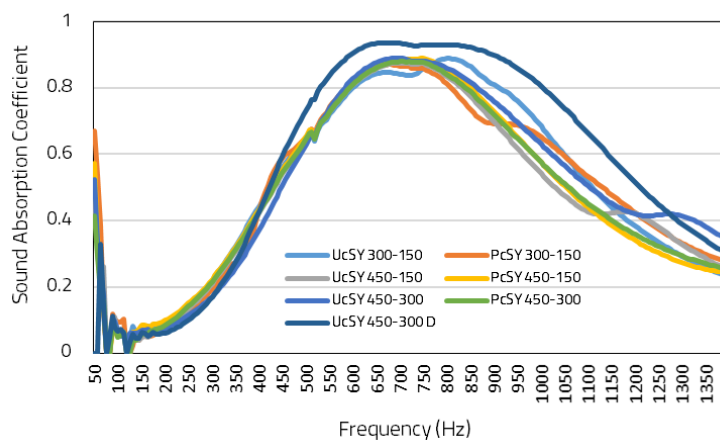


Figura33 . Coeficientul de absorbție acustică la frecvențe joase al probelor testate.

Rezultatele privind absorbția fonică la frecvențe joase demonstrează că toate panourile compozite prezintă o atenuare fonică eficientă la frecvențe medii, ceea ce este deosebit de relevant pentru aplicații

acustice interioare, cum ar fi controlul vorbirii și reducerea zgomotului în spațiile ocupate. Panoul prelucrat prin procesul uscat a prezentat un avantaj distinct în domeniul frecvențelor joase, în timp ce panourile prelucrate prin procesul umed au avut, de asemenea, performanțe bune, oferind un echilibru între performanța acustică și densitatea redusă. Aceste constatări confirmă faptul că atât metoda de prelucrare, cât și rețetele joacă un rol important în adaptarea răspunsului acustic la frecvențe joase al compozitelor pe bază de carton, în conformitate cu principiile stabilite la proiectarea materialelor acustice.

Figura 34a–c ilustrează performanța de absorbție a sunetului de înaltă frecvență a compozitelor din carton reciclat și bicarbonat de sodiu și drojdie, acoperind frecvențe de la 100 la 6400 Hz.

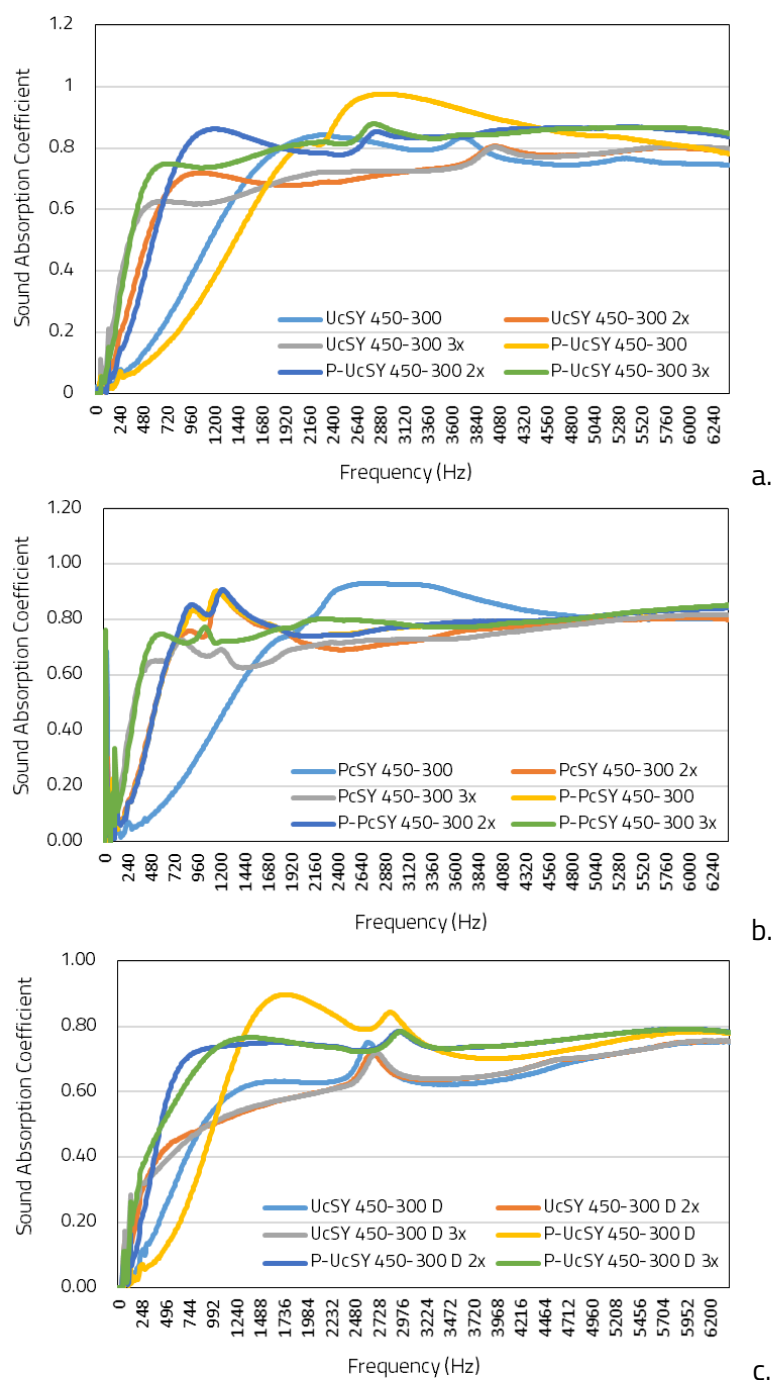


Figura 34. Absorbția fonică la frecvențe înalte a probelor UcSY 450-300 (a), PcSY 450-300 (b) și UcSY 450-300 D (c).

Rezultatele privind absorbția sunetului de înaltă frecvență demonstrează clar că perforarea este parametrul cel mai influent pentru îmbunătățirea performanței acustice, în timp ce creșterea grosimii este benefică doar până la un nivel optim, dincolo de care poate apărea saturația sau o ușoară degradare a performanței. Panourile prelucrate prin procesul umed beneficiază mai uniform de variația grosimii datorită structurii lor deschise și fibrilate, în timp ce panourile prelucrate prin procesul uscat depind mai mult de modificarea suprafeței pentru a atinge niveluri de absorbție comparabile. Performanța constant superioară a cartonului neimprimat subliniază și mai mult importanța purității fibrelor și a conectivității porilor.

4.3.5 Caracterizarea microstructurală

În [Figurile 35a](#) și, respectiv, [35b](#) sunt prezentate micrografii reprezentative ale panourilor compozite prelucrate prin procedeul umed și, respectiv, prin procedeul uscat.

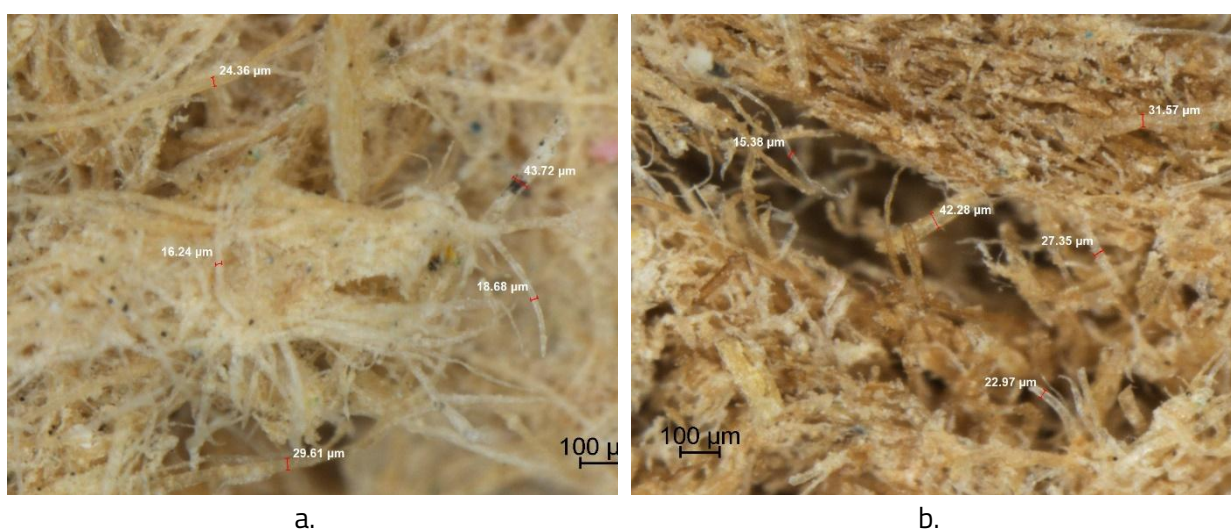


Figura 35. Investigarea microscopică a probelor prelucrate prin procesul umed (a) și prin procesul uscat (b).

Observațiile stereomicroscopice demonstrează că metoda de prelucrare este un factor dominant. Prelucrarea umedă favorizează o fibrilare extinsă și o arhitectură deschisă, poroasă, favorabilă aplicațiilor termice și acustice, în timp ce prelucrarea uscată produce o structură mai densă, mai compactă, cu o stabilitate dimensională îmbunătățită. Aceste informații privind microstructura oferă un context esențial pentru interpretarea tendințelor de performanță fizică, mecanică și funcțională discutate în secțiunile precedente și următoare ale acestui subcapitol.

4.3.6 Evaluarea performanțelor mecanice

Testele de încovoiere și măsurătorile de coeziune internă au fost efectuate pe compozitele analizate pentru a investiga performanța lor mecanică. Modulul de rupere (MOR) și modulul de elasticitate (MOE) au fost măsurate sub încovoiere în trei puncte, în timp ce IB a fost măsurată perpendicular pe planul probei, pentru a caracteriza coeziunea internă sub sarcina de tracțiune. Rezultatele înregistrate pentru toate variantele de compozite sunt rezumate în [Figura 36](#) (MOE și MOR) și [Figura 37](#) (IB), permițând o comparație directă a efectelor metodei de prelucrare, ale tipului de carton și ale procentului de agent

de spumare. Diferențele observate între panourile compozite au fost semnificative la un nivel de încredere de 95% ($p < 0,05$).

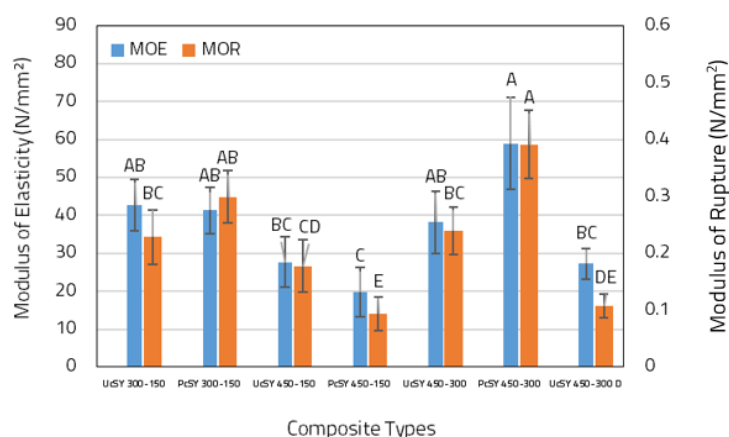


Figura36. Valorile proprietăților de flexiune ale probelor obținute prin procesele umed și uscat.

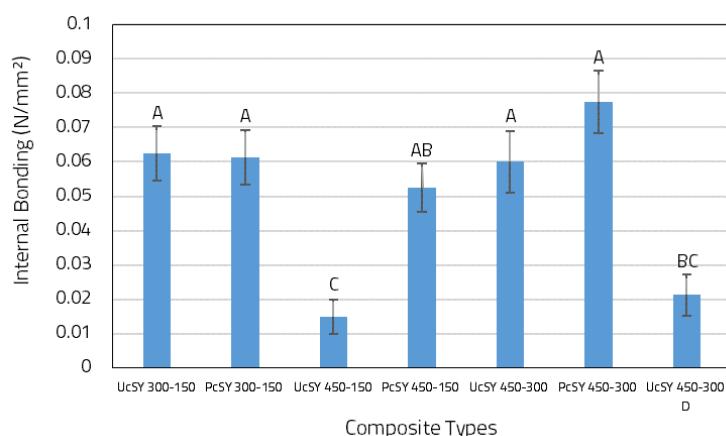


Figura37. Valorile rezistenței la aderență internă ale probelor obținute prin procesele umed și uscat.

Rezultatele proprietăților mecanice demonstrează că procesarea umedă este cea mai eficientă metodă de producere a acestor compozite cu rigiditate, rezistență și coeziune internă îmbunătățite, în ciuda densității lor mai mici.

4.3.7 Concluzii

- ▣ Panourile compozite poroase, produse din carton reciclat cu bicarbonat de sodiu și drojdie, oferă performanțe multifuncționale extrem de adaptabile.
- ▣ Metoda de procesare (umedă vs. uscată) domină comportamentul funcțional: procesarea umedă favorizează umflarea extensivă a fibrelor, fibrilarea și expansiunea uniformă a gazului, rezultând în densități mai mici și VDP mai uniforme, în timp ce procesarea uscată produce densități mai mari și mai stabile datorită împachetării compacte a fibrelor și expansiunii limitate a porilor.
- ▣ Prelucrarea umedă favorizează panourile ușoare și poroase, cu proprietăți mecanice, termice și acustice superioare, în timp ce prelucrarea uscată îmbunătățește stabilitatea dimensională, în detrimentul performanței funcționale; studiul confirmă faptul că panourile pe bază de drojdie sunt mai durabile, promițătoare pentru aplicații nestructurale în construcții, izolație și acustică.

4.4. Compozite de tip spumă fabricate din deșeuri de hârtie și carton, bicarbonat de sodiu și drojdie

Au fost investigate două rețete distincte de compozite: PaSY 450-300 (Figura 38a) și PaPcSY 450-300 (Figura 38b), în care hârtia de birou mărunțită a fost utilizată fie ca singur constituent fibros, fie în combinație cu carton imprimat.



Figura38. Compozite realizate din hârtie mărunțită (a) și deșeuri mixte de carton și hârtie (b) folosind bicarbonat de sodiu și drojdie ca agenți de spumare.

4.4.1 Profilul densității verticale (VDP)

VDP-urile compozitelor de tip spumă realizate din hârtie de birou mărunțită și din combinația acestora cu carton imprimat sunt prezentate în Figura 39.

Analiza VDP demonstrează că atât panourile compozite PaSY 450-300, cât și cele PaPcSY 450-300 au obținut distribuții de densitate și omogenitate internă comparabile, în ciuda diferențelor de fibre. Deși s-au observat diferențe asociate cu morfologia fibrelor și comportamentul umidității, lipsa semnificației statistice indică faptul că sistemul de aditivi și condițiile de procesare au exercitat o influență mai puternică asupra dezvoltării densității decât înlocuirea hârtiei cu carton imprimat. Aceste constatări oferă o bază structurală importantă pentru interpretarea rezultatelor ulterioare privind porozitatea, stabilitatea dimensională, conductivitatea termică, performanța acustică și proprietățile mecanice, prezentate în acest subcapitol.

Ambele tipuri de panouri compozite au prezentat profile de densitate uniforme și continue pe toată grosimea panoului, fără scăderi bruște ale densității sau stratificare pronunțată.

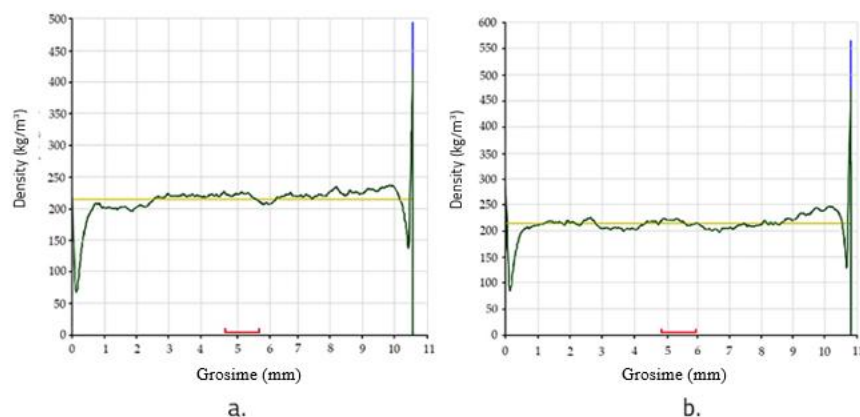


Figura 39. VDP al probei PaSY 450-300 (a) și al probei PaPcSY 450-300 (b).

4.4.2 Evaluarea stabilității dimensionale după imersia în apă

Absorbția de apă (WA) și umflarea în grosime (TS) au fost măsurate după 2 și 24 de ore de imersie în apă a probelor, iar rezultatele sunt prezentate în Figura 40. Acești parametri arată interacțiunile dintre morfologia fibrelor, porozitate și sensibilitatea la umiditate în aceste compozite pe bază de celuloză cu porozitate ridicată.

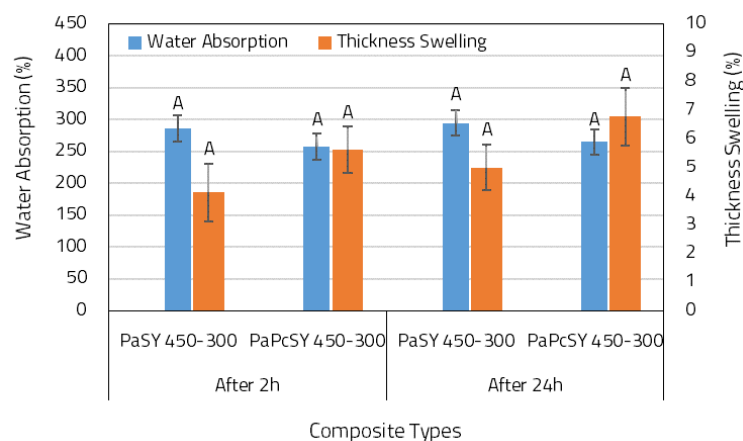


Figura 40. WA și TS ale probelor PaSY 450-300 și PaPcSY 450-300 după 2 ore și 24 de ore de imersie în apă.

Rezultatele privind stabilitatea dimensională indică faptul că atât panourile PaSY 450-300, cât și cele PaPcSY 450-300 prezintă o rezistență comparabilă la deformarea indusă de umiditate, în ciuda diferențelor de compoziție a fibrelor. Lipsa diferențelor semnificative din punct de vedere statistic atât în ceea ce privește WA, cât și TS confirmă faptul că hibridizarea hârtiei cu carton imprimat oferă o configurație structurală echilibrată, menținând stabilitatea dimensională și permițând, în același timp, o utilizare mai largă a materiilor prime.

4.4.3 Investigarea performanței termice

Coeficientul de conductivitate termică (λ) al compozitelor de tip spumă realizate din hârtie de birou mărunțită și din combinația mixtă de hârtie și carton imprimat este prezentat în Figura 41. Rezultatele arată că această proprietate este semnificativ diferită ($p < 0,05$) între cele două sisteme de panouri

investigate, evidențiind influența mărimii și numărului de pori, precum și a compoziției fibrelor asupra transferului termic.

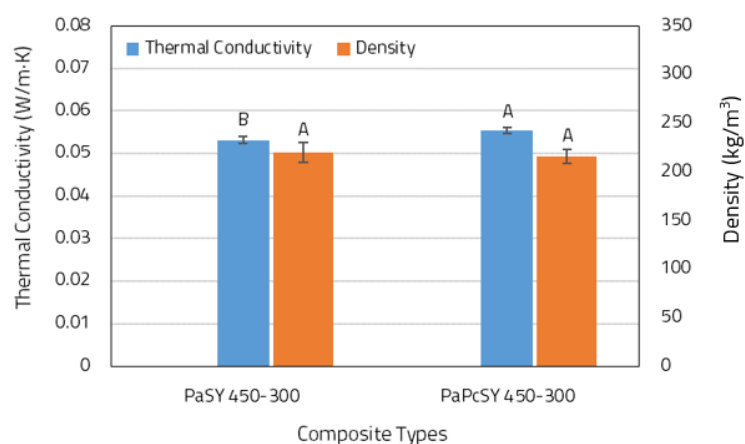


Figura 41. Coeficientul de conductivitate termică în funcție de densitatea probelor PaSY 450-300 și PaPcSY 450-300.

Ambele panouri prezintă valori adecvate pentru aplicații de izolare termică ușoară, subliniind potențialul compozitelor pe bază de hârtie reciclată ca materiale izolante durabile.

4.4.4 Determinarea performanței acustice

Coeficienții de absorbție fonică (α) în intervalul de frecvențe joase (50 Hz-1390 Hz) ai compozitelor PaSY 450-300 și PaPcSY 450-300 sunt prezentați în Figura 42.

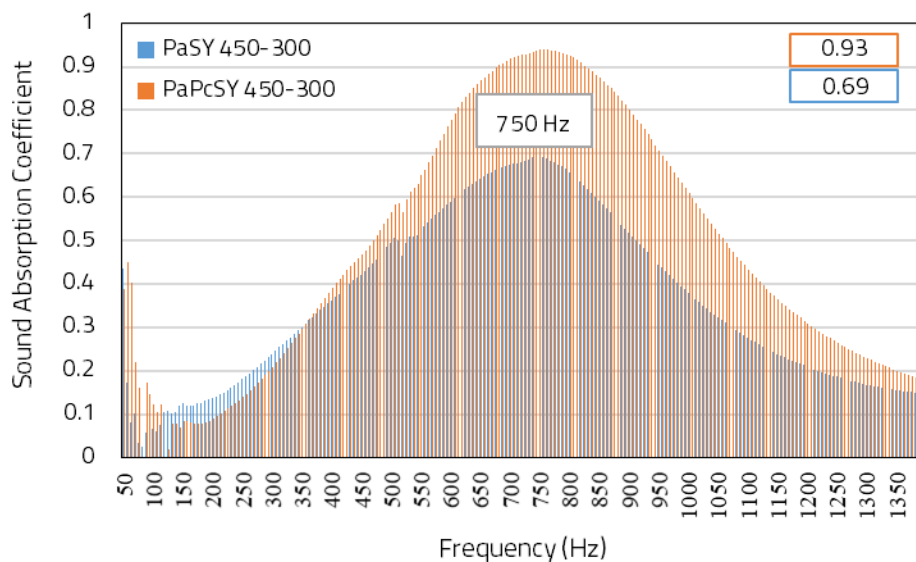
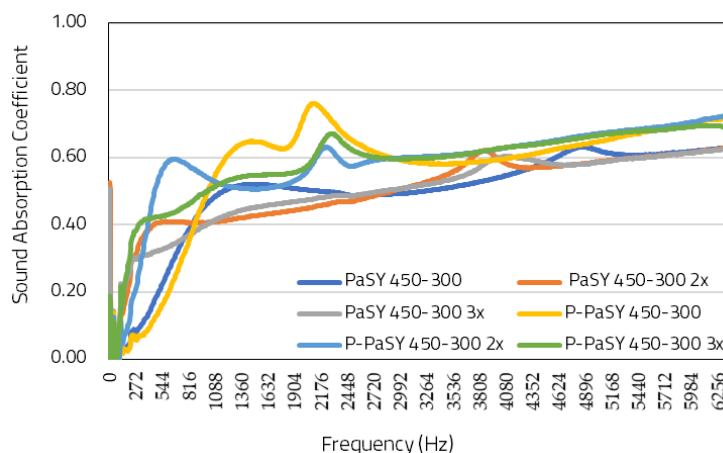


Figura 42. Absorbția fonică la frecvențe joase a probelor PaSY 450-300 și PaPcSY 450-300.

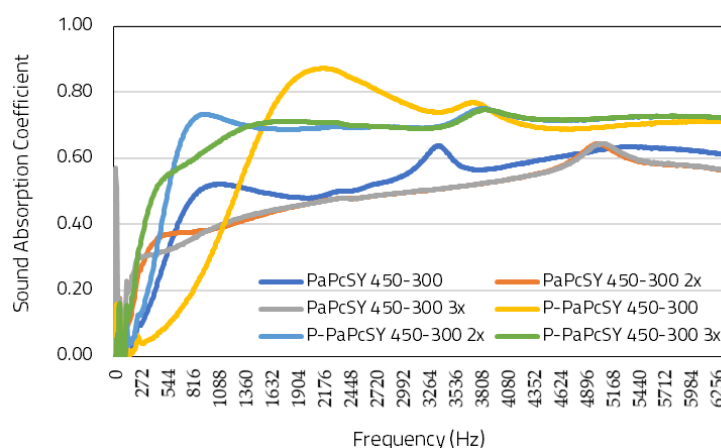
Rezultatele privind absorbția fonică în gama de frecvențe joase demonstrează că panoul hibrid din hârtie și carton PaPcSY 450-300 oferă un avantaj clar față de PaSY 450-300, compus exclusiv din hârtie, în ceea ce privește atenuarea undelor acustice cu lungime de undă mare. Această performanță îmbunătățită evidențiază rolul benefic al combinării fibrelor de hârtie cu cartonul imprimat pentru acustica la frecvențe joase. Un astfel de comportament este deosebit de relevant pentru aplicații în

construcții și amenajări interioare, unde este necesară atenuarea eficientă a zgomotului de joasă frecvență.

Coeficientul de absorbție fonică (α) al panourilor compozite a fost evaluat și la frecvențe înalte (100–6400 Hz). Rezultatele înregistrate sunt prezentate în [Figura 43a](#) și [Figura 43b](#).



a.



b.

Figura 43. Coeficientul de absorbție fonică al probelor PaSY 450-300 (a) și PaPcSY 450-300 (b) înregistrat la frecvențe înalte

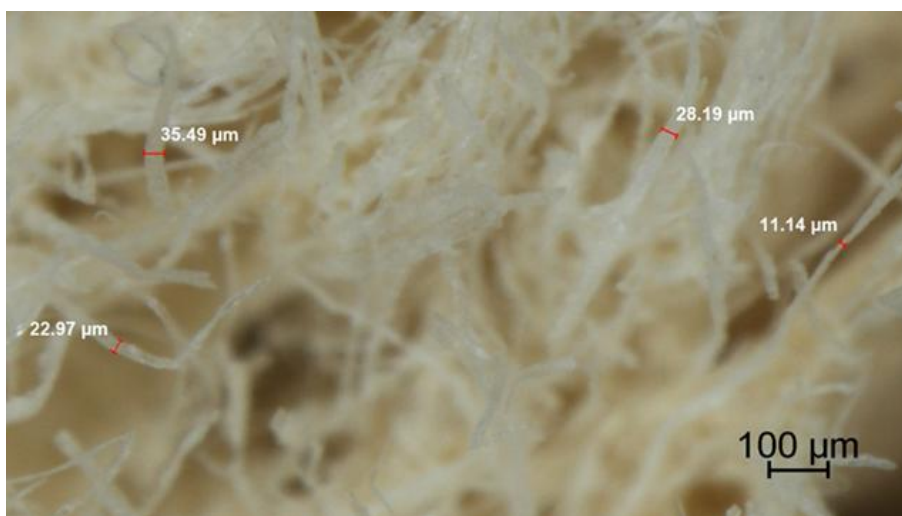
Rezultatele privind absorbția fonică la frecvențe înalte demonstrează că panourile PaSY 450-300 sunt eficiente în principal la frecvențe foarte înalte, cu beneficii limitate din creșterea grosimii și o dependență puternică de perforații pentru o performanță îmbunătățită la frecvențe medii. În contrast, panourile PaPcSY 450-300 prezintă un răspuns acustic mai echilibrat, de bandă largă, în special atunci când se aplică perforații, datorită efectelor combinate ale unei structuri de pori multiscalare și ale rezonanței aerului.

4.4.5 Caracterizarea microstructurală

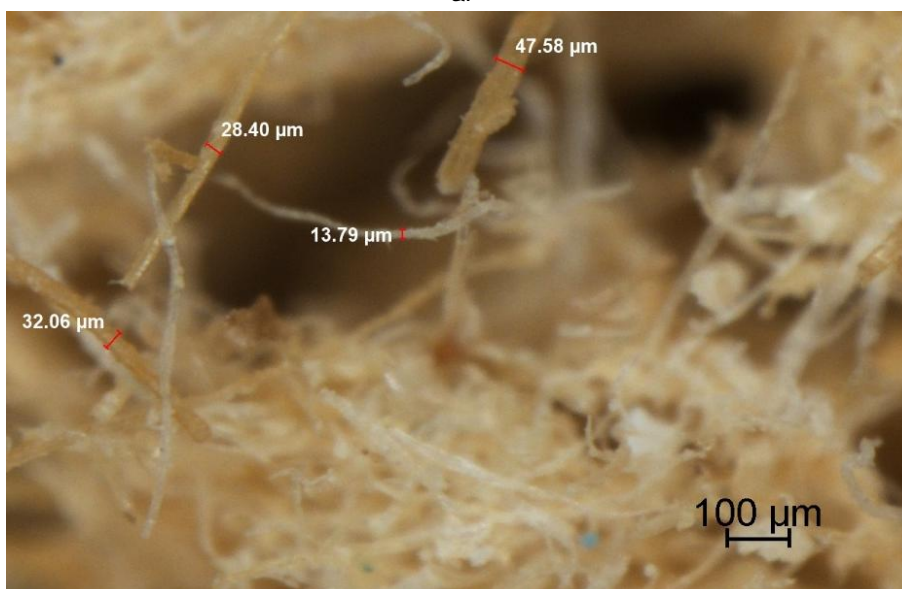
Analiza microscopică la o mărire de 120× a evidențiat legăturile dintre structura și proprietățile compozitelor PaSY 450-300 și PaPcSY 450-300, așa cum se ilustrează în [Figura 44a](#) și, respectiv, în [Figura 44b](#).

Evaluarea microscopică confirmă faptul că panoul PaSY 450-300 se caracterizează printr-o rețea densă de fibre fine, care favorizează rigiditatea mecanică și absorbția redusă a apei, dar limitează disiparea acustică, în timp ce panoul PaPcSY 450-300 beneficiază de o morfologie hibridă a fibrelor,

care promovează porozitatea interconectată și o absorbție fonică îmbunătățită, menținând în același timp proprietăți mecanice și fizice acceptabile.



a.



b.

Figura 44 . Morfologia probelor PaSY 450-300 (a) și PaPcSY 450-300 (b).

4.4.6 Caracterizarea structurii moleculare pe baza FTIR

Figura 45 compară spectrele FTIR ale amestecurilor de ingrediente uscate la aer, preparate pentru PaSY 450-300 și PaPcSY 450-300, cu cele ale panourilor compozite finale, obținute după întărire la 150 °C timp de 15 ore. În urma tratamentului termic, apar modificări spectrale notabile atât în PaSY 450-300, cât și în PaPcSY 450-300.

Rezultatele FTIR indică faptul că PaSY 450-300 și PaPcSY 450-300 au caracteristici chimice în mare parte similare, dominate de structuri pe bază de celuloză, cu contribuții spectrale suplimentare în PaPcSY 450-300, provenite din fibrele de carton imprimate și din aditivii anorganici. Este important de menționat că nu s-au observat dovezi ale formării de noi legături covalente în urma tratamentului termic, ceea ce sugerează că formarea compozitelor este guvernată în principal de procese fizice, în

special de descompunerea termică a bicarbonatului de sodiu și de eliberarea de gaz facilitată de activitatea drojdiei, mai degrabă decât de reacții chimice de reticulare. Aceste observații confirmă faptul că tratamentul aplicat păstrează caracteristicile chimice inerente ale materialelor fibroase reciclate, inducând în același timp modificări structurale care stau la baza proprietăților lor fizice, mecanice și acustice.

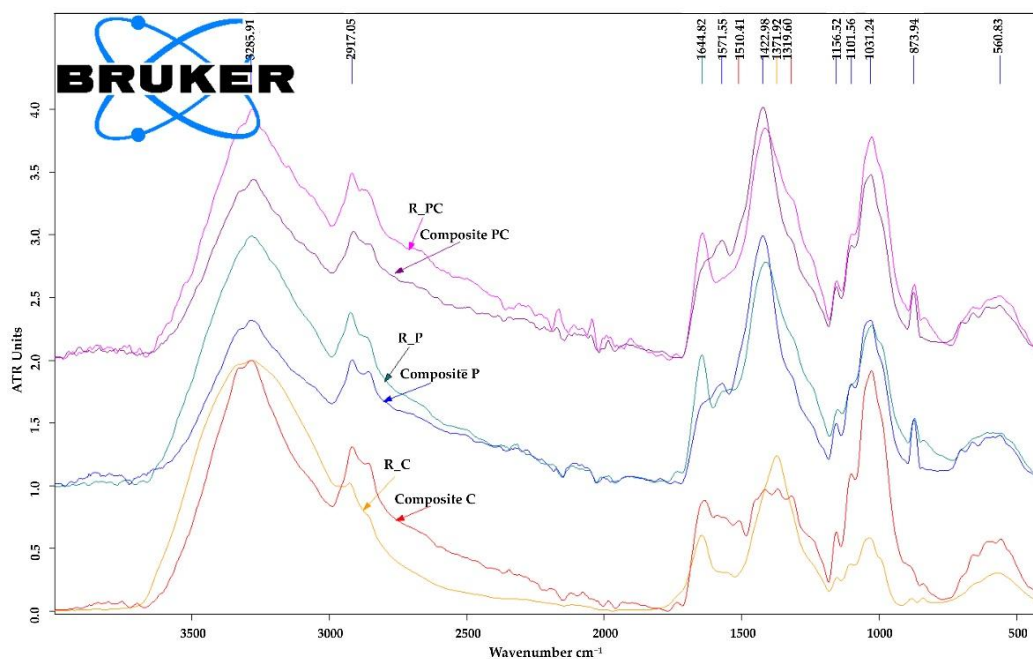


Figura45 . Spectrele FTIR ale celor două compozite, ca ingrediente preparate pentru R_P (PaSY 450-300) și R_PC (PaPcSY 450-300) înainte de tratamentul termic, și ale compozitelor spumate finale (PaSY 450-300 și PaPcSY 450-300).

4.4.7 Evaluarea performanțelor mecanice

Performanțele mecanice ale compozitelor PaSY 450-300 și PaPcSY 450-300 au fost evaluate prin testele de încovoiere în trei puncte și de coeziune internă (IB).

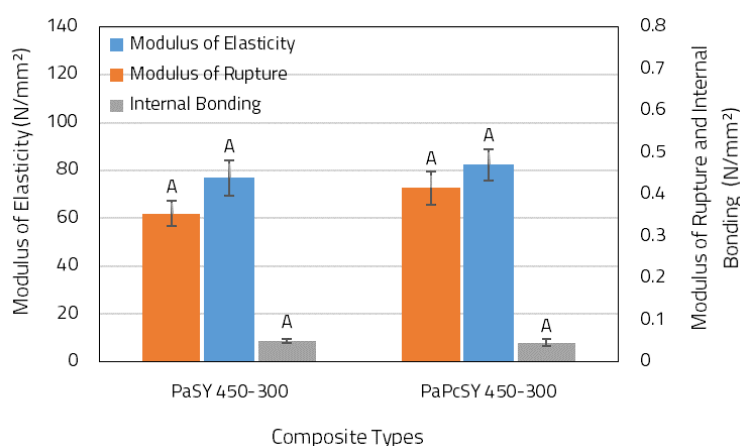


Figura46 . Performanța mecanică a probelor PaSY 450-300 și PaPcSY 450-300.

Nu s-au obținut diferențe semnificative ($p > 0,05$) pentru proprietățile mecanice ale compozitelor PaSY 450-300 și PaPcSY 450-300.

Rezultatele sugerează că optimizarea mecanică a compozitelor ar trebui să se concentreze pe controlul porozității, al dispersiei fibrelor și al omogenității rețelei, mai degrabă decât pe modificarea exclusivă a compoziției fibrelor.

4.4.8 Concluzii

- Panourile compozite realizate din hârtie (PaSY 450-300) și din hârtie și carton imprimat (PaPcSY 450-300), pot fi produse cu succes folosind bicarbonat de sodiu și drojdie ca agenți de expandare ecologici.
- Ambele sisteme demonstrează o puternică absorbție acustică în gamele de frecvențe joase și înalte; performanța la frecvențe joase este determinată de grosimea panoului și de rezistivitatea fluxului de aer, în timp ce absorbția la frecvențe înalte este controlată de morfologia porilor, fibrilare, modificări de suprafață, configurații multistrat și perforare, panourile hibride obținând o absorbție mai amplă și mai stabilă.

4.5 Rezumatul capitolului

Rezultatele confirmă faptul că expandarea controlată, compoziția optimizată a fibrelor, reprezintă o abordare promițătoare pentru dezvoltarea de materiale de bază durabile, ușoare, termoizolante și eficiente din punct de vedere acustic, potrivite pentru aplicații în construcții (Figura 47).

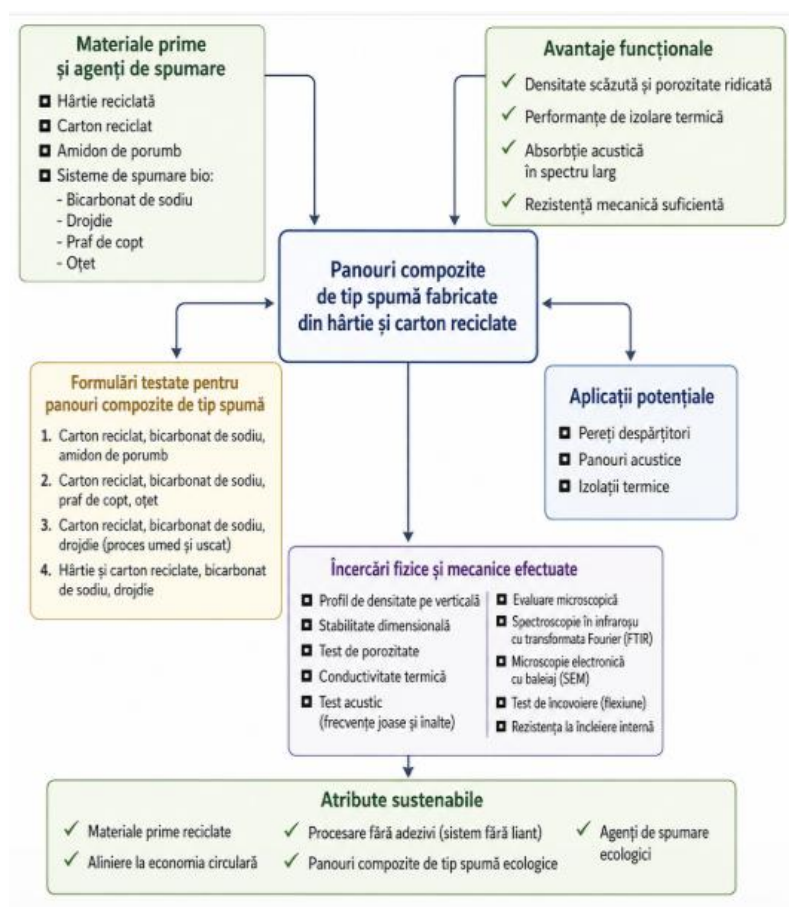


Figura 47. Rezumatul capitolului 4.

CAPITOLUL 5. Rezultate privind performanța panourilor compozite de tip sandwich fabricate din hârtie și carton reciclate

Au fost selectate trei variante compozite reprezentative pentru optimizare ulterioară: PcSY 450-300, PaSY 450-300 și PaPcSY 450-300. Aceste panouri au fost alese pentru compozițiile lor contrastante de fibre și combinațiile echilibrate de densitate, izolație termică, performanță acustică și integritate mecanică. Pentru a le îmbunătăți rezistența, durabilitatea suprafeței și versatilitatea funcțională, miezurile selectate au fost transformate în panouri de tip sandwich prin aplicarea diferitelor materiale de acoperire, așa cum se arată în [Figura 48](#).



Figura 48. Panouri tip sandwich fabricate din miezuri compozite din spumă selectate, cu diferite straturi de acoperire.

5.1 Investigarea performanțelor termice

Coeficienții de conductivitate termică (λ) și valorile corespunzătoare ale densității panourilor compozite de tip sandwich sunt prezentate în [Figura 49](#). S-a constatat o relație semnificativă din punct de vedere statistic ($p < 0,05$) între densitatea panourilor și conductivitatea termică, ceea ce indică faptul că o densitate mai mare a fost, în general, asociată cu valori mai mari ale λ . Această tendință a fost susținută și de analiza statistică, care a clasificat panourile în grupe distincte de performanță pe baza densității și a comportamentului termic.

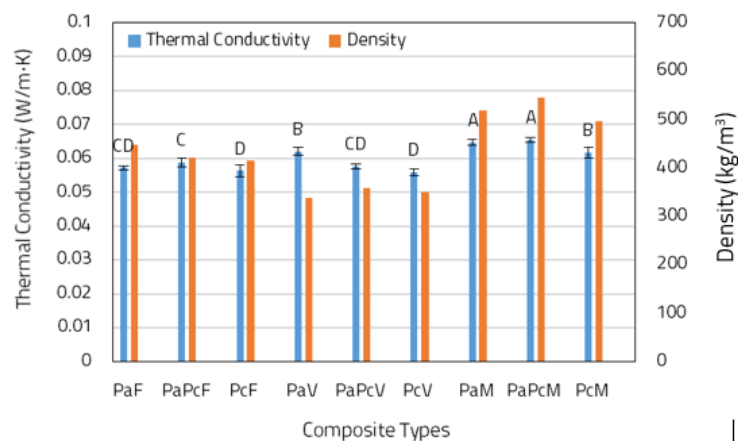
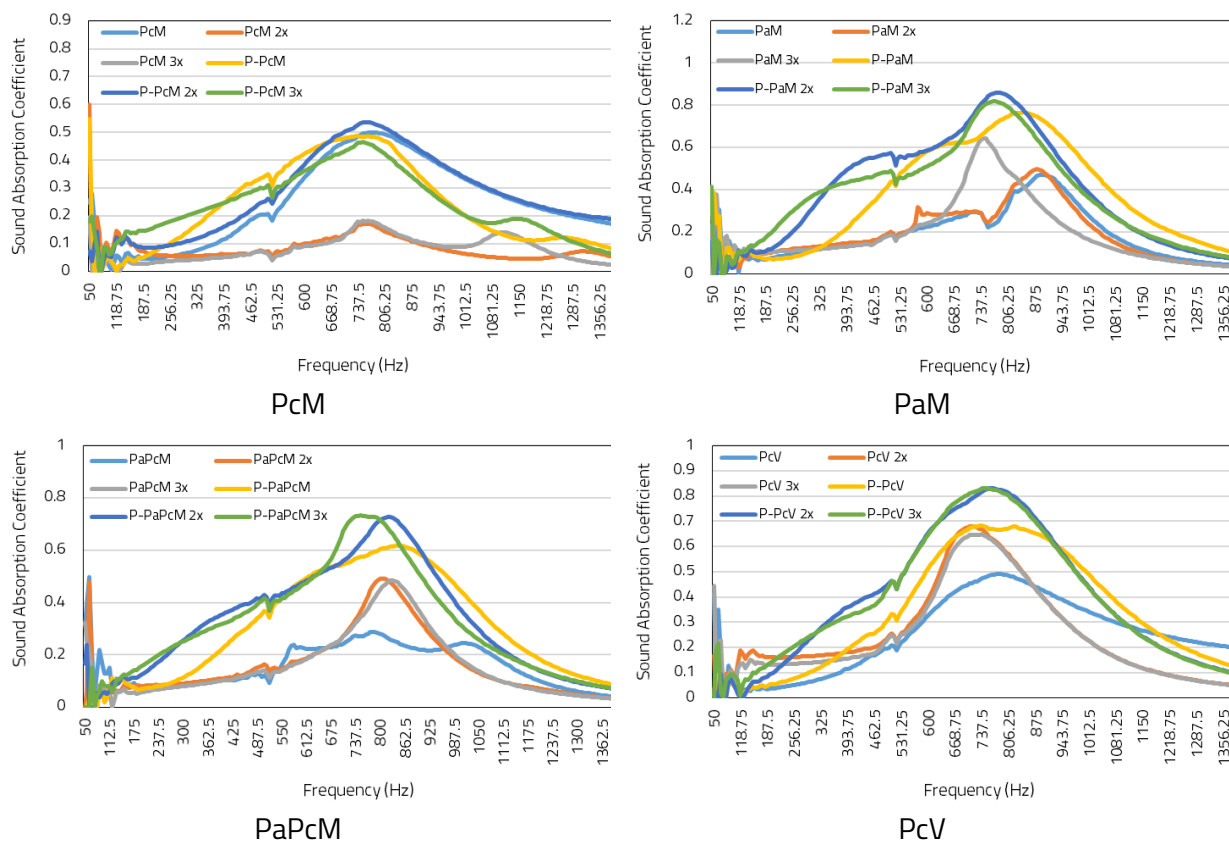


Figura49. Coeficientul de conductivitate termică în funcție de densitatea compozitelor de tip sandwich.

Panourile compozite de tip sandwich dezvoltate au prezentat coeficienți de conductivitate termică în intervalul 0,055-0,065 W/m-K, ceea ce le plasează într-un interval competitiv pentru aplicații de izolare termică în sisteme de construcții durabile.

5.2 Determinarea performanței acustice

Comportamentul de absorbție acustică la frecvențe joase al panourilor compozite de tip sandwich este ilustrat în Figura 50, care acoperă intervalul de frecvență de la 50 la 1390 Hz.



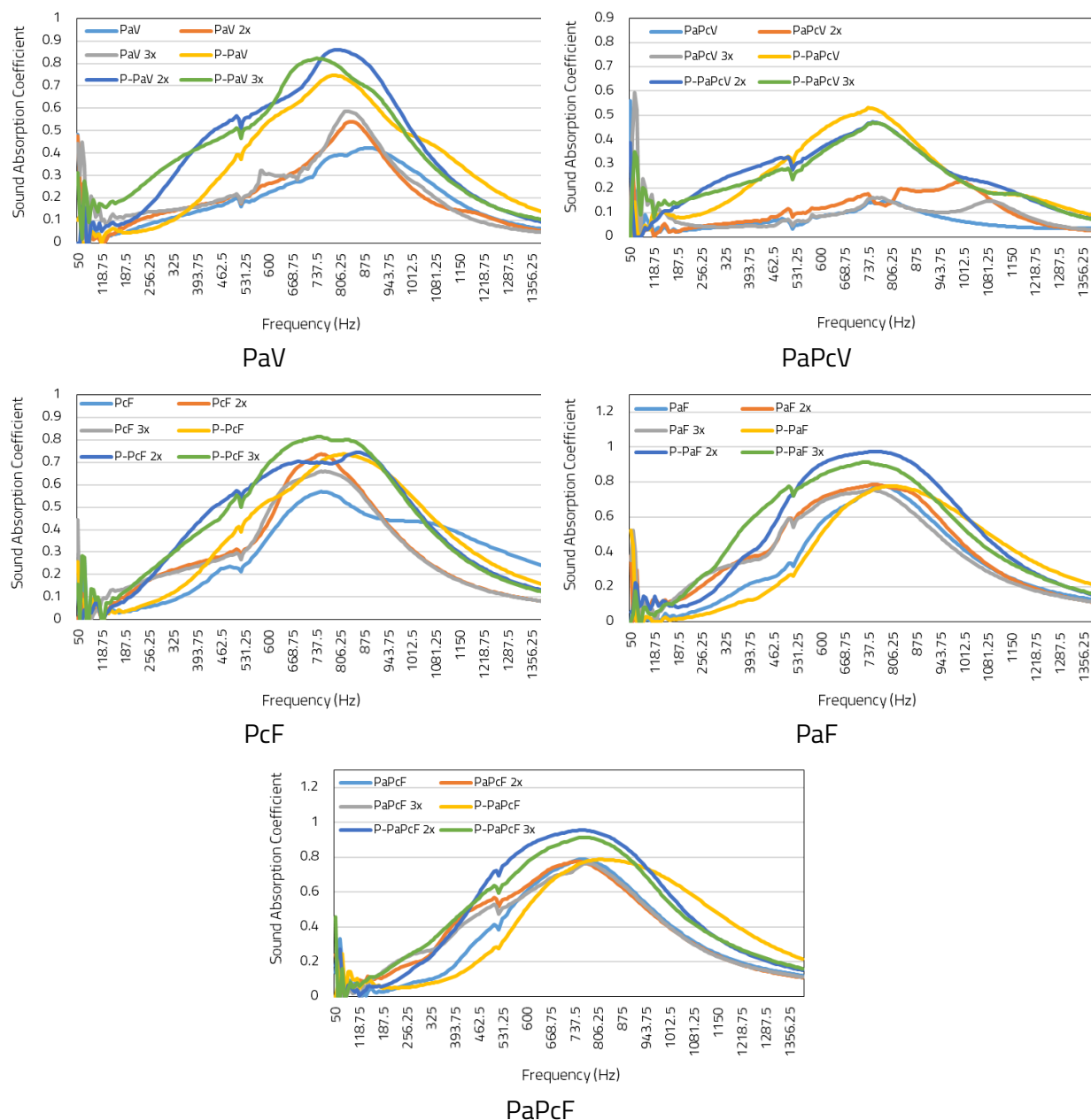
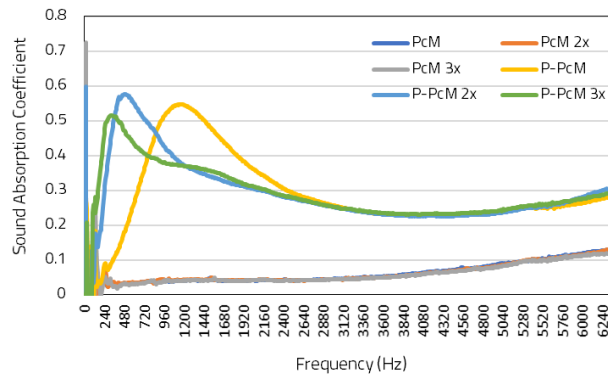


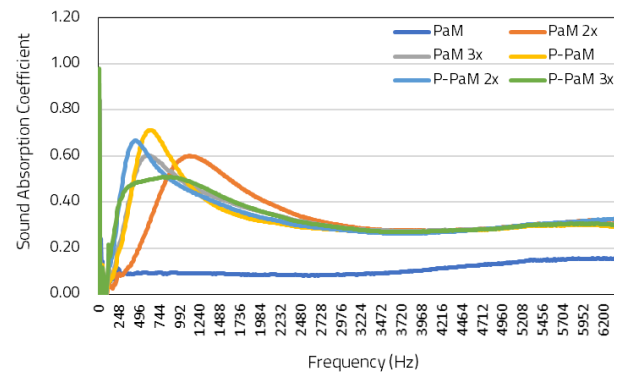
Figura50. Coeficientul de absorbție acustică al probelor de tip sandwich în gama de frecvențe joase.

Rezultatele privind absorbția fonică la frecvențe joase demonstrează că performanța acustică a acestor compozite-sandwich poate fi adaptată în mod eficient printr-o combinație de compoziție a miezului, selecția materialului de acoperire, variația grosimii și perforarea suprafeței. Absorbția îmbunătățită observată pentru configurațiile mai groase și perforate, în special cele care încorporează miezuri hibride din hârtie-carton și straturi de acoperire fibroase, evidențiază potențialul ridicat al acestor compozite pentru atenuarea zgomotului de joasă frecvență în aplicații acustice pentru clădiri și interioare.

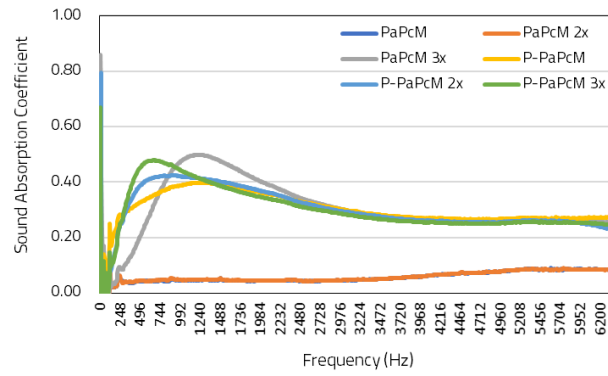
Comportamentul de absorbție fonică în gama de frecvențe înalte a fost evaluat în intervalul 100–6400 Hz, iar rezultatele sunt prezentate în Figura 51. Rezultatele demonstrează că performanța acustică este influențată de caracteristicile suprafeței. Combinația dintre perforație, o compoziție hibridă a miezului și straturile de acoperire fibroase s-a dovedit a fi deosebit de eficientă în obținerea unei absorbții fonice îmbunătățite. Aceste constatări demonstrează potențialul panourilor tip sandwich pentru controlul zgomotului în sistemele acustice durabile pentru clădiri și interioare, unde există o cerere tot mai mare de materiale ușoare, ecologice, cu proprietăți acustice reglabile.



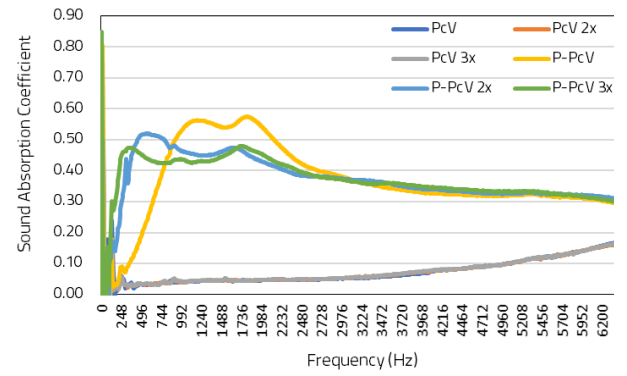
PcM



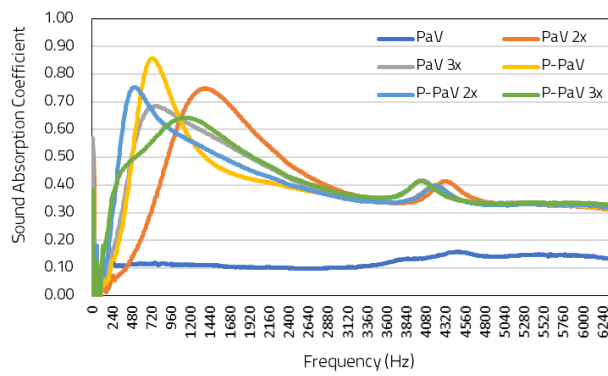
PaM



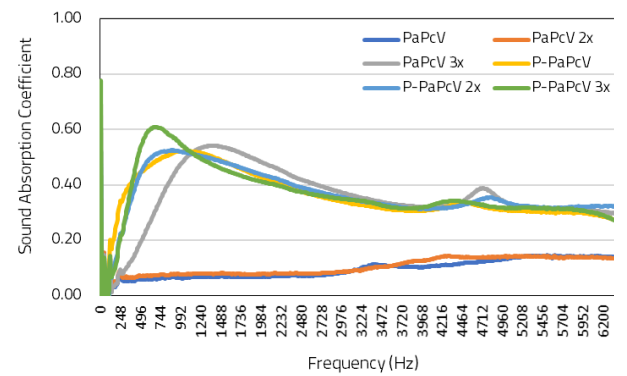
PaPcM



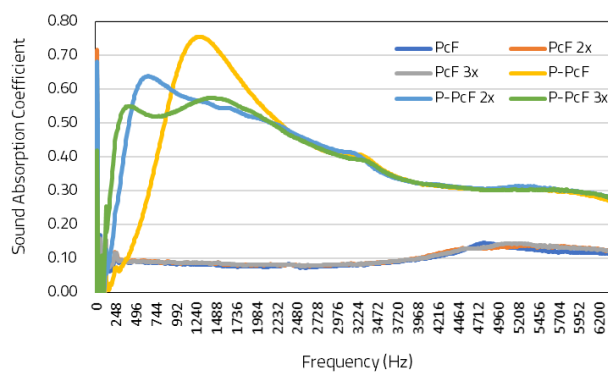
PcV



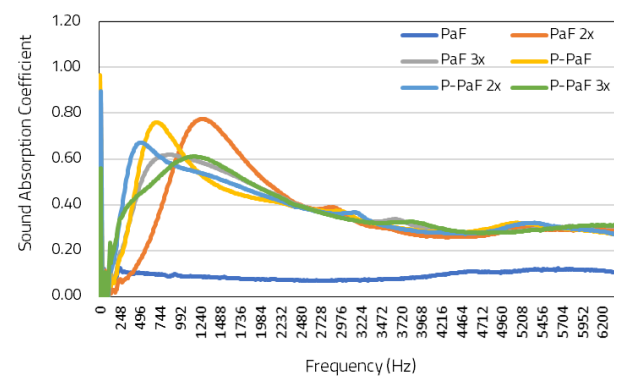
PaV



PaPcV



PcF



PaF

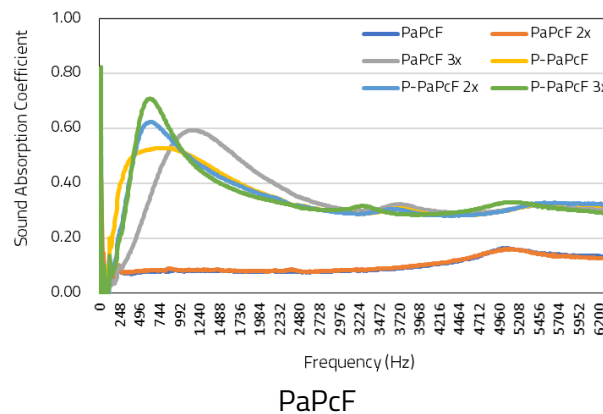


Figura 51. Absorbția fonică a probelor de tip sandwich în domeniul frecvențelor înalte.

5.3 Caracterizarea microstructurală

Panourile tip sandwich pe bază de hârtie (PaF, PaM și PaV) au prezentat, în mod constant, cea mai compactă morfologie a miezului dintre configurațiile investigate. Miezurile din hârtie (Figura 52) au prezentat o porozitate redusă și o rețea de fibre mai uniformă, ceea ce a dus la straturi de încleiere mai uniforme. În cazul panourilor PaM, straturile de MDF au format interfețe adezive relativ uniforme, sugerând condiții de încleiere stabile datorită suprafeței netede și omogene a MDF-ului. Straturile de furnir din panourile PaV au produs, de asemenea, linii adezive înguste și continue.

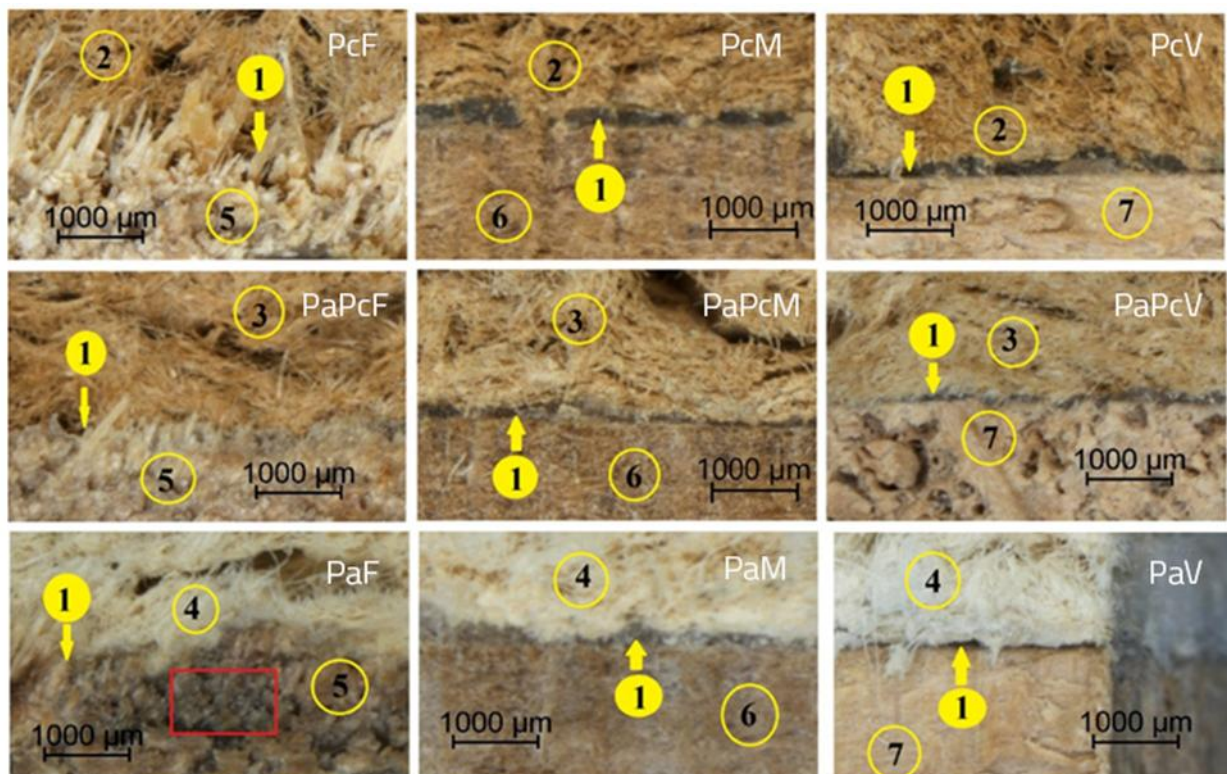
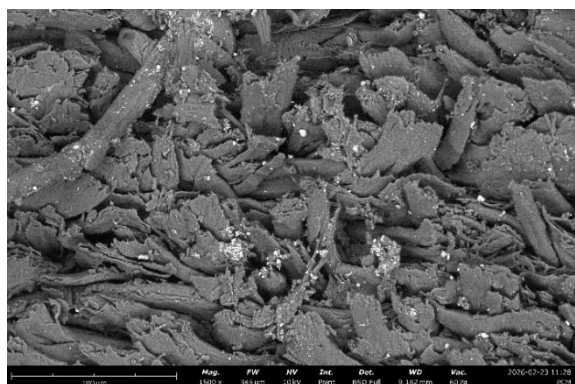
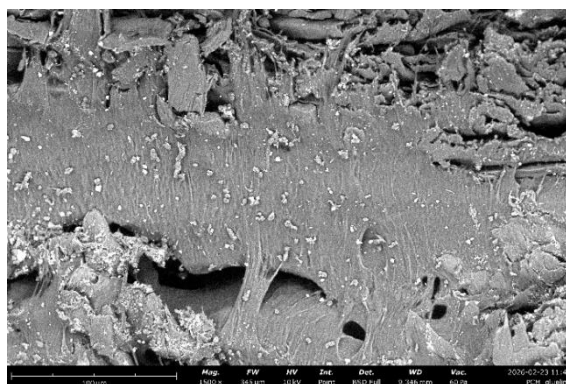


Figura 52. Zonele de încleiere dintre miezuri și straturile de acoperire ale compozitelor tip sandwich, la o mărire de 22,5x (1 – zona adezivului; 2 – miez de carton; 3 – miez mixt de hârtie și carton; 4 – miez de hârtie; 5 – strat de acoperire din fibră de curmal; 6 – strat de acoperire din MDF; 7 – strat de acoperire din furnir).

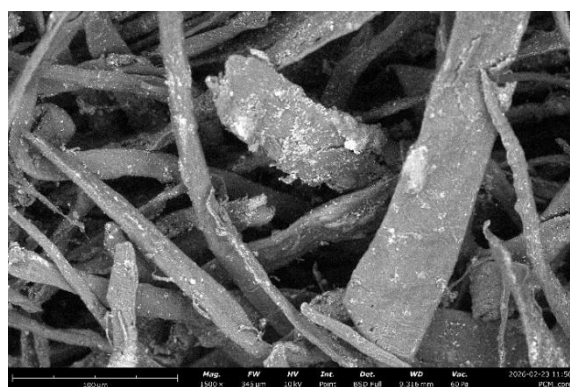
Micrografiile SEM ale panoului PaPcM (Figura 53) oferă dovezi directe ale mecanismelor interfaciale observate la stereomicroscopie. Stratul adeziv se distinge clar și prezintă o penetrare substanțială în golurile dintre fibrele miezului PaPc, umplând parțial microporii și formând punți adezive continue între fibrele adiacente.



MDF



Glueline



PaPc

Figura53 . Imagini SEM ale panoului compozit cu miez PaPc care arată structura fibroasă și porozitatea diferită a stratului de acoperire MDF, a miezului PaPc și a interfeței dintre cele două straturi.

Dovezile microscopice combinate demonstrează că integritatea este determinată de interacțiunea dintre porozitatea miezului și permeabilitatea stratului superior. Pătrunderea adâncă a adezivului în straturile fibroase superioare îmbunătățește interconectarea mecanică, în timp ce miezurile mai dense și mai omogene favorizează straturi de încleiere uniforme și un transfer eficient al tensiunilor. Aceste caracteristici microstructurale oferă o susținere morfologică directă pentru comportamentul mecanic, termic și acustic observat în compozitele-sandwich.

5.4 Evaluarea performanțelor mecanice

Performanța mecanică a compozitelor-sandwich a fost evaluată prin testarea MOE și MOR; rezultatele sunt rezumate în Figura 54. Analiza statistică a confirmat că ambii parametri au fost afectați semnificativ de tipul suprafeței și de compoziția miezului ($p < 0,05$), demonstrând rolul critic al structurii sandwich în determinarea performanței la încovoiere.

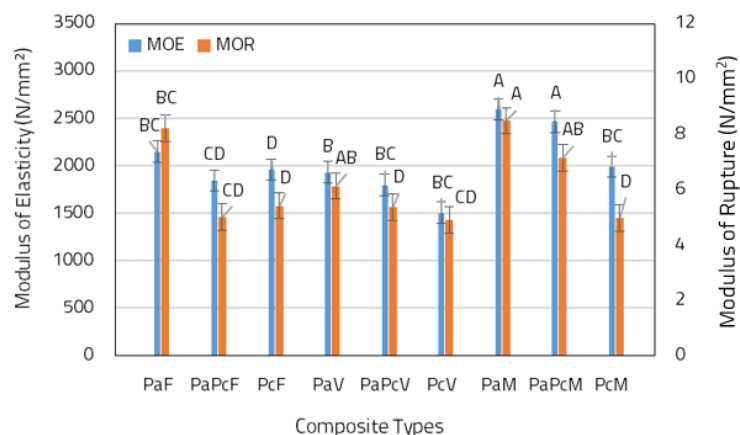


Figura54 . Valorile proprietăților de încovoiere ale epruvetelor de tip sandwich.

Rezultatele privind rezistența la încovoiere demonstrează că atât compoziția miezului, cât și materialul de acoperire influențează semnificativ performanța mecanică a panourilor tip sandwich. Acoperirile din MDF au oferit cele mai mari îmbunătățiri în ceea ce privește rigiditatea și rezistența, în special atunci când au fost combinate cu miezuri mai dense pe bază de hârtie sau mixte, care permit transferul eficient al sarcinii. Fețele din fibră de palmier au demonstrat o performanță promițătoare și competitivă, în special în cazul miezurilor pe bază de hârtie, datorită capacității lor de a redistribui tensiunile și de a spori rezistența la rupere. Straturile de furnir au oferit o armare moderată, dar au fost mai puțin eficiente atunci când au fost combinate cu miezuri de carton foarte poroase.

5.5 Compararea performanțelor între panourile compozite cu miez poros și panourile compozite cu structură tip sandwich dezvoltate în teza de doctorat

Trecerea de la panouri compozite poroase la panouri compozite cu structură tip sandwich reprezintă un progres funcțional evident. Panourile-miez au oferit densitate redusă, porozitate ridicată, izolare termică și eficiență acustică. Atunci când au fost integrate în sisteme tip sandwich, aceste proprietăți au fost păstrate, iar performanța mecanică a fost îmbunătățită. Rezultatul este un panou compozit multifuncțional care combină un modul de elasticitate îmbunătățit, un modul de rupere crescut, un raport rigiditate-greutate îmbunătățit, o conductivitate termică redusă și o absorbție acustică în bandă largă.

Prin urmare, alegerea materialelor PaSY 450-300, PcSY 450-300 și PaPcSY 450-300 ca materiale de miez a fost justificată științific pe baza caracteristicilor lor microstructurale și funcționale echilibrate. Dezvoltarea acestora în panouri compozite cu structură tip sandwich demonstrează modul în care optimizarea proiectării structurale poate transforma materialele ușoare și ecologice în sisteme compozite eficiente din punct de vedere mecanic, izolante termic și optimizate acustic, potrivite pentru aplicații în construcții durabile.

5.6 Concluzii

- Măsurătorile de densitate au confirmat că structurile sandwich modifică proprietățile fizice ale miezurilor ușoare, iar fețele încheiate contribuie la compactitatea generală a panourilor.

Panourile acoperite cu MDF au prezentat cele mai mari densități, urmate de panourile acoperite cu fibră de curmal, în timp ce straturile de furnir au prezentat densități comparativ mai mici.

- ▣ Conductivitatea termică a fost puternic corelată cu densitatea, deoarece panourile cu densități mai mari au prezentat, în general, coeficienți de conductivitate termică mai mari.
- ▣ Panourile acoperite cu furnir și foi din fibre de palmier au atins valori mai scăzute ale conductivității termice, în special atunci când au fost combinate cu miezuri pe bază de carton sau hibride. Acest comportament evidențiază importanța structurii porilor și a discontinuităților interfaciale în reducerea fluxului de căldură, dincolo de efectul densității aparente.
- ▣ Performanța termică intermediară observată la panourile-sandwich cu miez hibrid demonstrează că tipul fibrelor și arhitectura stratificată pot echilibra compactitatea structurală cu izolația termică eficientă, consolidând potențialul panourilor din hârtie și carton reciclat pentru aplicații de construcții durabile.
- ▣ Caracterizarea acustică a relevat faptul că performanța panourilor tip sandwich depinde în mare măsură de frecvență și este puternic influențată de grosime, perforare și interacțiunea dintre miez și stratul de acoperire. Creșterea grosimii panoului a îmbunătățit constant absorbția fonică, în special în gama de frecvențe joase, prin extinderea lungimii traseului acustic și prin creșterea disipării energiei interne.

CAPITOLUL 6. Concluzii, contribuție originală, oportunități viitoare de cercetare, diseminarea cercetării

6.1 Concluzii generale

Prin utilizarea agenților de expandare ecologici și a proceselor de prelucrare durabile, cercetarea a abordat atât performanța materialelor, cât și obiectivele economiei circulare, contribuind la satisfacerea cererii crescânde de materiale de construcție ecoeficiente obținute din fluxurile de deșeuri.

Rezultatele au demonstrat că fibrele reciclate pe bază de celuloză pot fi transformate cu succes în panouri compozite multifuncționale cu proprietăți fizice, termice, acustice și mecanice personalizate.

Procesul de spumare cu bicarbonat de sodiu și drojdie s-a dovedit robust și reproductibil, permițând formarea unor rețele poroase omogene.

Caracterizarea termică a confirmat că distribuția dimensiunilor porilor, conectivitatea și suprafața internă joacă un rol dominant în controlul transferului de căldură în compozite.

Testele acustice au relevat o absorbție puternică a sunetului în domeniile de frecvență joasă și înaltă, sistemele de fibre hibride și configurațiile tip sandwich prezentând performanțe deosebit de favorabile. Introducerea ansamblurilor multistrat, a perforațiilor și a acoperirilor de suprafață a îmbunătățit semnificativ răspunsul acustic dependent de frecvență, demonstrând capacitatea lor de proiectare diferențiată.

Rezultatele confirmă faptul că fibrele de hârtie și carton reciclate pot fi valorificate în panouri compozite de înaltă performanță, potrivite pentru componente de construcție neportante, pereți despărțitori interiori, panouri acustice și aplicații de izolare termică. Materialele dezvoltate combină densitate redusă, multifuncționalitate și durabilitate, oferind o alternativă ecologică promițătoare la produsele convenționale de izolare pe bază de petrol sau minerale.

6.2 Contribuție originală

Contribuția originală a acestei teze de doctorat constă în dezvoltarea sistematică și validarea experimentală a panourilor compozite ușoare, fără liant, derivate exclusiv din fibre de hârtie și carton reciclate, care răspund atât cerințelor de performanță ale materialelor, cât și imperativelor de durabilitate din sectorul construcțiilor.

Această cercetare demonstrează că panourile structurale coerente și multifuncționale pot fi produse prin metode de prelucrare ecologice care exploatează interacțiunile fizice dintre fibre și mecanismele de expandare, pe baza unui proces tehnologic inovator propus în această teză.

O noutate științifică cheie a acestei lucrări este aplicarea cu succes și evaluarea comparativă a mai multor sisteme de spumare ecologice, în special a bicarbonatului de sodiu combinat cu drojdie, pentru a genera structuri poroase omogene, fără a utiliza lianți chimici.

Cercetarea stabilește relații structură-proprietate care leagă tipul de fibră (hârtie, carton și combinația lor), morfologia porilor și metoda de procesare de izolația termică, absorbția acustică și performanța mecanică. Această înțelegere integrată extinde cunoștințele actuale dincolo de modelele de performanță bazate pe densitate, evidențiind rolurile dominante ale porilor și structurii interfaciale.

A fost utilizat un cadru experimental de evaluare în mai multe domenii funcționale. Teza combină caracterizarea fizică, termică, acustică, mecanică, microstructurală și chimică, susținută de spectroscopia FTIR și analiza microscopică, pentru a oferi o evaluare holistică a performanței, rar raportată pentru materialele de izolație pe bază de hârtie și carton.

Includerea configurațiilor de tip sandwich sporește și mai mult originalitatea cercetării, demonstrând modul în care designul stratificat, fețele și integritatea interfacială pot fi utilizate strategic pentru a adapta comportamentul la încovoiere și răspunsul acustic, fără a compromite sustenabilitatea.

În plus, utilizarea fețelor cu fibre naturale de curmal reprezintă un pas inovator către sisteme compozite complet ecologice și adaptabile la nivel regional.

Această cercetare doctorală oferă o contribuție științifică solidă și relevantă din punct de vedere practic în domeniul materialelor de construcție durabile. Ea utilizează hârtia și cartonul reciclate nu doar ca materii prime secundare, ci și ca resurse viabile, capabile să producă compozite multifuncționale de mare valoare.

Metodologiile, concluziile și conceptele de proiectare prezentate în această teză oferă o bază solidă pentru viitoare cercetări academice, eforturi de standardizare și dezvoltare la scară industrială a panourilor ecologice, fără lianți, pe bază de celuloză, pentru aplicații în interiorul clădirilor.

6.3 Oportunități de cercetare viitoare

Deși studiul de față stabilește o bază cuprinzătoare pentru panourile compozite din hârtie și carton reciclate, pot fi identificate mai multe direcții de cercetare viitoare pentru a avansa în continuare în acest domeniu:

- ▣ Optimizarea materialelor: Lucrările viitoare ar putea explora amestecuri alternative de fibre și tehnici avansate de fibrilare pentru a adapta și mai mult arhitectura porilor și pentru a îmbunătăți performanța multifuncțională.
- ▣ Dezvoltarea lianților și a aditivilor: Utilizarea lianților ecologici, a aditivilor ignifugi și a tratamentelor hidrofobe ar putea îmbunătăți durabilitatea, rezistența la foc și stabilitatea la umiditate, menținând în același timp compatibilitatea cu mediul.
- ▣ Performanță și durabilitate pe termen lung: Studiile de îmbătrânire prelungită în condiții de umiditate ciclică, fluctuații de temperatură și încărcare mecanică ar oferi informații valoroase despre comportamentul pe termen lung și durata de viață în medii reale de construcție.
- ▣ Performanța la foc și performanța de mediu: Studiile cuprinzătoare privind reacția la foc, generarea de fum și evaluarea ciclului de viață (LCA) sunt esențiale pentru a evalua pe deplin performanța de mediu și de siguranță a materialelor dezvoltate.
- ▣ Extinderea la scară industrială și integrarea producției: Testele de producție la scară pilot și studiile de optimizare a proceselor ar sprijini tranziția de la fabricarea în condiții de laborator la implementarea industrială, incluzând analiza costurilor și evaluarea fezabilității producției.

- Cercetările viitoare s-ar putea concentra pe transformarea acestor panouri ușoare în materiale ecologice, potrivite pentru aplicații de mobilier la prețuri reduse, punând accentul pe optimizarea performanței, durabilității și scalabilității.

În concluzie, această teză demonstrează că materialele reciclate pe bază de celuloză pot fi transformate în panouri compozite multifuncționale de mare valoare, care se aliniază principiilor de sustenabilitate și cerințelor de performanță ale construcțiilor moderne. Rezultatele nu numai că avansează înțelegerea științifică a biomaterialelor poroase și de tip sandwich, ci oferă și o platformă solidă pentru inovarea viitoare, aplicațiile industriale și cercetarea continuă în ingineria materialelor sustenabile.

6.4 Diseminarea cercetării

Lista publicațiilor științifice rezultate din această cercetare doctorală este prezentată mai jos:

- **Mazaherifar, M. H., Hizioglu, S., Brenci, L. M., & Coșereanu, C. (2025).** Properties of insulation-type green composite panels manufactured from recycled cardboard. *Applied Sciences*, 15(19), 10378. <https://doi.org/10.3390/app151910378>. The content of this article was presented at the *International Conference on Wood Science and Engineering (ICWSE)*, 2025, 6-8 November, Brasov.
- **Mazaherifar, M. H., Timar, M. C., Georgescu, S. V., & Coșereanu, C. (2025).** Sustainable thermal and acoustic insulating panels from recycled cardboard. *BioResources*, 20(2), 4115–4135. <https://doi.org/10.15376/biores.20.2.4115-4135>.
- **Mazaherifar, M. H., Lungu, A., Timar, M. C., Georgescu, S. V., Ispas, M., & Coșereanu, C. (2025).** Properties of green foam-type composites made from recycled paper and cardboard. *Recycling*, 10(6), 196. <https://doi.org/10.3390/recycling10060196>
- **Mazaherifar, M. H., Coșereanu, C., Timar, M. C., & Georgescu, S. V. (2024).** Physical and mechanical properties of foam-type panels manufactured from recycled cardboard. *Construction and Building Materials*, 411, 134685. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134685>.
- **Mazaherifar, M. H., & Coșereanu, C. (2025).** Sustainable foam composites made from recycled cardboard. *Pro Ligno*, 21(2), 38–46. https://www.proligno.ro/en/articles/2025/2/MAZAHERIFAR_Final.pdf
- **Mazaherifar, M. H., Coșereanu, C., Timar, M. C., & Georgescu, S. V. (2024).** Method to recycle corrugated cardboard in eco-friendly composites. *Proceedings of the 10th International Conference on Advanced Composite Materials Engineering (COMAT)*, Brasov, 22-23 October 2024.
- **Mazaherifar, M. H.** Composites Made of Recycled Cardboard. Doctoral Conference DoCo 2024, Universitatea Transilvania din Brașov. https://www.unitbv.ro/Detailed_Programme.pdf

Pe lângă publicațiile axate direct pe compozitele din hârtie și carton reciclat, celelalte articole științifice au contribuit semnificativ la fundamentul teoretic, la strategia de selecție a materialelor și la principiile de proiectare a compozitelor hibride aplicate în această teză. Aceste lucrări au susținut înțelegerea armării cu fibre naturale, a mecanismelor de hibridizare, a comportamentului de legare interfacială și a optimizării performanțelor mecanice în sistemele de compozite pe bază biologică. Cunoștințele

generate în aceste studii au fost integrate în cadrul conceptual și în proiectarea experimentală a prezentei cercetări doctorale.

Aceste publicații complementare includ:

- **Mazaherifar, M. H.**, Zeleniuc, O., Cerbu, C., Georgescu, S. V., Lungu, A., & Coșoreanu, C. (2025). Performance of carbon fiber-reinforced date palm midrib composites. *Fibers*, 13(5), 57. <https://doi.org/10.3390/fib13050057>.
- Zeleniuc, O., **Mazaherifar, M. H.**, Coșoreanu, C., & Suciuc, A. (2024). Date-palm-based sustainable hybrid composite with cotton and Kevlar fibre participation. *Applied Sciences*, 14(3), 1008. <https://doi.org/10.3390/app14031008>.
- **Mazaherifar, M. H.**, Hosseinabadi, H. Z., Coșoreanu, C., Cerbu, C., Timar, M. C., & Georgescu, S. V. (2022). Investigation on Phoenix dactylifera / Calotropis procera fibre-reinforced epoxy hybrid composites. *Forests*, 13(12), 2098. <https://doi.org/10.3390/f13122098>.

REFERINȚE BIBLIOGRAFICE

Ayrilmis, N., Candan, Z. and Hiziroglu, S. (2008). Physical and mechanical properties of cardboard panels made from used beverage carton with veneer overlay. *Materials & Design* 29(10), pp. 1897–1903. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.04.030>.

Bajpai, P. (2024). *Recycling and deinking of recovered paper*. 2nd ed. Elsevier.

Betts, D., Sadeghian, P. and Fam, A. (2020). Structural behavior of sandwich beams with flax fiber–reinforced polymer faces and cardboard cores under monotonic and impact loads. *Journal of Architectural Engineering* 26(4), 04020013. Doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000409](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000409).

EN 12939:2001—Thermal performance of building materials and products: Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance. British Standards Institution (BSI), London, UK.

Buratti, C., Belloni, E., Lascaro, E., Lopez, G.A. and Ricciardi, P. (2016). Sustainable panels with recycled materials for building applications: Environmental and acoustic characterization. *Energy Procedia* 101, pp. 972–979. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.123>.

EN 310:1993; Wood-based panels—Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 1993.

EN 317:1993; Particleboards and fibreboards—Determination of swelling in thickness after immersion in water. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 1996.

EN 319:1993; Particleboards and fibreboards—Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 1993.

EN 326-1:1994; Wood-based panels—Sampling, cutting and inspection—Part 1: Sampling and cutting of test pieces and expression of test results. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 1994.

- Frías, M., Vegas, I., Villa, R. and Giménez, R.G. (2011). Recycling of waste paper sludge in cements: Characterization and behavior of new eco-efficient matrices. *Integrated Waste Management* 2, pp. 301–318.
- González-García, S., Lozano, R. G., Estévez, J. C., Pascual, R. C., Moreira, M. T., Gabarrell, X., ... & Feijoo, G. (2012). Environmental assessment and improvement alternatives of a ventilated wooden wall from LCA and DfE perspective. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(4), 432–443. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0384-0>.
- Gupta, G.K., Liu, H. and Shukla, P. (2019). Pulp and paper industry–based pollutants, their health hazards and environmental risks. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 12, pp. 48–56. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.09.010>.
- Haigh, R., Bouras, Y., Sandanayake, M., & Vrcelj, Z. (2022). The mechanical performance of recycled cardboard kraft fibres within cement and concrete composites. *Construction and Building Materials*, 317, 125920. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125920>.
- Hietala, M., Varrio, K., Berglund, L., Soini, J. and Oksman, K. (2018). Potential of municipal solid waste paper as raw material for production of cellulose nanofibres. *Waste Management* 80, pp. 319–326. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.033>.
- Holik, H. (Ed.) (2006). *Handbook of paper and board*. John Wiley & Sons.
- ISO 8301:1991—Thermal insulation: Determination of steady-state thermal resistance and related properties—Heat flow meter apparatus. International Organization for Standardization (ISO). ISO, Geneva, Switzerland.
- ISO 10534-2:2023. Acoustics — Determination of acoustic properties in impedance tubes —Part 2: Two-microphone technique for normal sound absorption coefficient and normal surface impedance. International Organization for Standardization (ISO)ISO, Geneva, Switzerland.
- ISO 11654:1997; Acoustics—Sound absorbers for use in buildings—Rating of sound absorption. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Khan, M.M.H., Laitinen, V., Havukainen, J. and Horttanainen, M. (2021). Carbon footprint of different recovery options for the repulping reject from liquid packaging board waste treatment process. *Waste Management* 136, pp. 93–103. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.10.003>.
- Liuzzi, S., Rubino, C., Martellotta, F. and Stefanizzi, P. (2023). Sustainable materials from waste paper: Thermal and acoustical characterization. *Applied Sciences* 13(8), 4710. Doi: <https://doi.org/10.3390/app13084710>.
- Martínez, B., Bernat-Maso, E., & Gil, L. (2025). Durability, recyclability and life cycle of green insulating panels hemp shiv based. *Journal of Building Engineering*, 105, 111890. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.111890>.
- Mazaherifar, M.H., Coşoreanu, C., Timar, C.M. and Georgescu, S.V. (2024). Physical and mechanical properties of foam-type panels manufactured from recycled cardboard. *Construction and Building Materials* 411, 134685. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134685>.

- Mazaherifar, M.H., Hiziroglu, S., Brenci, L.M. and Coşoreanu, C. (2025). Properties of insulation-type green composite panels manufactured from recycled cardboard. *Applied Sciences* 15(19), 10378. Doi: <https://doi.org/10.3390/app151910378>.
- McCracken, A. and Sadeghian, P. (2018). Corrugated cardboard core sandwich beams with bio-based flax fiber composite skins. *Journal of Building Engineering* 20, pp. 114–122. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.07.009>.
- Monte, M.C., Fuente, E., Blanco, A. and Negro, C. (2009). Waste management from pulp and paper production in the European Union. *Waste Management* 29(1), pp. 293–308. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.002>.
- Provost-Savard, A., Legros, R., & Majeau-Bettez, G. (2023). Parametrized regionalization of paper recycling life-cycle assessment. *Waste Management*, 156, 84–96. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.11.018>.
- Secchi, S., Asdrubali, F., Cellai, G., Nannipieri, E., Rotili, A. and Vannucchi, I. (2016). Experimental and environmental analysis of new sound-absorbing and insulating elements in recycled cardboard. *Journal of Building Engineering* 5, pp. 1–12. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.10.005>.
- Virtanen, Y. and Nilsson, S. (2013). *Environmental Impacts of Waste Paper Recycling*. Routledge. Doi: <https://doi.org/10.4324/9781315070377>.
- Xie, M., Qiao, Q., Sun, Q. and Zhang, L. (2013). Life cycle assessment of composite packaging waste management—A Chinese case study on aseptic packaging. *International Journal of Life Cycle Assessment* 18, pp. 626–635. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0516-6>.