



ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea de Design de Mobilier și Inginerie a Lemnului

Antoniou NICOLAU

Studiu privind realizarea îmbinărilor pentru scaune cu ajutorul tehnologiei de imprimare 3D

Study on jointing chairs elements using 3D printing technology

REZUMAT

Conducător științific

Prof.dr. ing. Camelia COȘEREANU

BRAȘOV, 2024



CUPRINS

INTRODUCERE	5
CAPITOLUL 1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND UTILIZAREA FABRICAȚIEI ADITIVE PENTRU MOBILIER	9
1.1. Fabricația aditivă (AM) sau tehnologia de imprimare 3D	9
1.1.1 <i>Avantaje și dezavantaje ale AM</i>	9
1.2 Metode de fabricație aditivă.....	9
1.3 Materiale utilizate pentru tehnologia de imprimare 3D.....	10
1.4. Materiale cu potențial de utilizare în tehnologia de imprimare 3D pentru mobilier...	11
1.5 Structurile <i>Voronoï</i> în fabricația aditivă.....	11
1. 6. Aplicațiile tehnologiei de fabricație aditivă în industria mobilei.....	11
1.7. Testarea elementelor de asamblare „de tip L”	11
1.8. Concluzii	12
CAPITOLUL 2. SCOPUL ȘI OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT	13
CAPITOLUL 3. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRELIMINARE PENTRU SELECTAREA METODEI, MATERIALULUI ȘI POZIȚIEI DE IMPRIMARE 3D A CONECTORULUI	17
3.1. Modelul experimental	17
3.2. Materiale utilizate în cercetarea experimentală	19
3.2.1. <i>Specii lemnoase și materiale utilizate în fabricația aditivă. Caracteristici</i>	19
3.2.2. <i>Analiza micrografică a materialelor utilizate la imprimarea 3D a conectorului</i> ...	19
3.3. Imprimarea 3D a conectorilor utilizați în cercetarea experimentală.....	21
3.3.1. <i>Imprimarea 3D a conectorilor cu metoda FFF de fabricație aditivă</i>	21
3.3.2. <i>Imprimarea 3D a conectorilor cu metoda SLS de fabricație aditivă</i>	22
3.3.3. <i>Pozițiile conectorului pe platforma imprimantei</i>	22
3.3.4. <i>Investigarea la nivel microscopic a calității suprafețelor imprimate 3D prin metoda FFF cu PLA ranforsat cu fibre de sticlă</i>	22
3.4. Testarea rezistențelor mecanice ale îmbinării de colț „de tip L”	24
3.4.1. <i>Considerații teoretice</i>	24
3.4.2. <i>Testarea mecanică a conectorilor imprimați 3D în poziția 1 (orizontală) de așezare pe platformă</i>	24
3.4.3. <i>Investigația microscopică a defectelor de rupere a conectorilor imprimați 3D în poziția 1 (orizontală)</i>	25
3.4.4. <i>Testarea mecanică a conectorilor imprimați 3D în poziția 2 (verticală) de așezare pe platforma imprimantei</i>	26

3.4.5. <i>Investigația microscopică a defectelor de rupere a conectorilor imprimați 3D în poziția 2 (verticală)</i>	27
3.4.6. <i>Selectarea metodei, materialului și poziției de imprimare 3D pentru conectorul proiectat, pe baza rezultatelor cercetării experimentale</i>	28
3.5. Concluzii privind selectarea metodei, materialului și a poziției de imprimare 3D a conectorului.....	29
CAPITOLUL 4. TESTAREA PERFORMANȚEI MECANICE A ÎMBINĂRII DE COLȚ „DE TIP L” CU CONECTOR DIN PLA NEGRU ȘI ELEMENTE DIN LEMN DE FAG	31
4.1 Testarea mecanică a îmbinării clasice de tip cep propriu–scobitură din lemn de fag	31
4.2. Testarea îmbinărilor elementelor din lemn de fag cu conectori din PLA negru – varianta 1 (inițială).....	31
4.3. Analiza cu element finit (FEA) a îmbinării cu conector din PLA negru și lemn de fag (varianta inițială) la testul de compresiune	32
4.3.1. <i>Analiza cu element finit la solicitarea de compresiune pentru îmbinările elementelor din lemn de fag cu conectori din PLA negru – varianta 1 (inițială)</i>	32
4.3.2. <i>Analiza cu element finit la solicitarea de tracțiune pentru îmbinările elementelor din lemn de fag cu conectori din PLA negru – varianta 1 (inițială)</i>	34
4.4. Concluzii privind testarea asamblării dintre elementele din lemn de fag și conectorul din PLA negru, varianta 1 (inițială)	35
CAPITOLUL 5. CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA MODIFICĂRII CONECTORULUI ASUPRA PERFORMANȚELOR MECANICE ALE ÎMBINĂRII DE COLȚ CU ELEMENTE DIN LEMN DE FAG	37
5.1. Prezentarea propunerilor noi de modele experimentale de conectori.....	37
5.2. Analiza cu element finit (FEA) pentru îmbinarea cu conector în varianta 3 de proiectare la solicitarea de compresiune a îmbinării	37
5.3. Analiza cu element finit (FEA) pentru îmbinarea cu conector în varianta 3 de proiectare la solicitarea de tracțiune a îmbinării.....	38
5.4. Testarea mecanică a îmbinărilor „de tip L” între elementele din lemn de fag și conectorii în variantele de proiectare 2 și 3.....	38
CAPITOLUL 6. TESTAREA SCAUNULUI REALIZAT CU CONECTORI IMPRIMAȚI 3D	39
6.1. Prezentarea și realizarea produselor finale destinate testării	39
6.2. Analiza optică a deformațiilor 3D prin metoda DIC (Digital Image Correlation).....	39
6.3. Testarea rezistenței scaunelor	42
6.3 Concluzii referitoare la testarea scaunelor cu conectori imprimați 3D.....	42
Capitolul 7. CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DISEMINAREA REZULTATELOR. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE	43
7.1 Concluzii generale.....	43
7.2 Contribuții originale.....	44
7.3 Diseminarea rezultatelor	45

7.4 Direcții viitoare de cercetare.....	46
BIBLIOGRAFIE	47



INTRODUCERE

În prezent, tehnologia de fabricație aditivă (AM) este utilizată în multe domenii, cum ar fi cel al proteticii în medicină, componente pentru industria auto și aeronautică, în industria alimentară și construcții.

În industria mobilei există încercări de a înlocui componente realizate din lemn sau materiale pe bază de lemn, precum și elemente de asamblare între componente cu piese imprimate tridimensional (3D), în special pentru îmbinări ale panourilor pe bază de lemn, oferind acestora posibilitate de asamblare ușoară și demontabilitate. Înlocuirea îmbinărilor din lemn cu conectori imprimați 3D este o oportunitate, având în vedere faptul că tehnologia de execuție a îmbinărilor în lemn necesită utilaje specializate, iar operațiile de asamblare sunt consumatoare de timp și de manoperă.

În design s-a introdus conceptul de mobilier hibrid, care este o combinație între elemente componente din lemn și cele imprimate 3D, având rol estetic, ornamental și de rezistență, cu un potențial coloristic și de formă nelimitate. Prin urmare, designerii, proiectanții și inginerii din domeniul industriei mobilei pot profita de tehnologiile de imprimare 3D, simplificând structurile și realizând concepte de produs care necesită consum minim de material lemnos, de timp și de utilaje.

Conectorii imprimați 3D au multe avantaje în construcția scaunelor: posibilitatea de a îmbunătăți designul prin utilizarea de materiale colorate și concepte noi, fără constrângeri de formă și dimensiuni, evitând utilizarea adezivilor și a tehnologiilor complicate. Defectele apărute la nivelul îmbinărilor clasice ale scaunelor (curbare, crăpare și rupere) compromit iremediabil mobilierul. Apare astfel întrebarea oportună dacă îmbinările clasice ale scaunelor pot fi înlocuite cu conectori imprimați 3D, care să confere mobilierului aceleași rezistențe ca și îmbinările clasice, aducând în plus avantajul prelucrării simple a elementelor din lemn și reducerea lor dimensională, structura demontabilă a scaunului și transferarea operațiilor de asamblare către beneficiar. În felul acesta se poate prelungi și durata de viață a scaunului, prin înlocuirea conectorilor în cazul slăbirii în timp a îmbinărilor în anumite zone. Din cercetarea bibliografică referitoare la conectorii imprimați 3D pentru mobilier, s-a constatat că este un domeniu explorabil din punct de vedere al selecției materialului și metodei de fabricație aditivă, în special pentru construcția scaunelor, în contextul asigurării unor rezistențe suficiente ale acestora, comparabile cu cele realizate prin îmbinări clasice ale lemnului.

Prezenta cercetare își propune să verifice posibilitatea de utilizare a conectorilor imprimați 3D în asamblarea elementelor din structura de rezistență a unui model de scaun, parcurgând mai multe etape de selectare a metodei și materialului de imprimare 3D, a poziției piesei în imprimantă și a formei conectorului, bazate pe investigarea rezistenței îmbinării „de tip L” la tracțiune și compresiune pe diagonală în varianta cu conector, comparativ cu cea clasică de tip cep propriu-scobitură. Astfel, în teză se parcurg toate fazele de proiectare și de dezvoltare a unui produs nou, având la bază rezultatele cercetărilor teoretice și experimentale obținute în urma selecțiilor aplicate.

Pornind de la modelarea 3D a conectorului într-o primă variantă, o etapă preliminară în acest studiu este selectarea unui material, a unei metode de fabricație aditivă și a unei poziții de imprimare 3D a conectorului care să satisfacă cerințele de rezistență mecanică a unui scaun. În această cercetare experimentală s-au propus două metode de fabricație aditivă, patru materiale pentru imprimarea 3D a conectorului și două poziții de așezare a modelului pe platforma imprimantei, respectiv orizontală și verticală. Pentru piesele din lemn masiv s-a optat în această cercetare preliminară pentru alegerea unei

specii din lemn masiv cu performanțe mecanice moderate, dar care să fie utilizată în construcția scaunelor și s-a ales lemnul de larice (*Larix Decidua* Mill.), din care s-a construit o asamblare de referință clasică tip cep-scobitură, utilizată în mod uzual în construcția scaunelor.

S-a ales ca și criteriu de selecție a materialului, metodei și poziției de imprimare 3D a conectorului, cel al performanțelor mecanice la tracțiune și compresiune pe diagonală ale îmbinărilor de colț „de tip L” între elementele din lemn masiv și conectorii imprimați 3D în variantele menționate anterior. Această metodă de testare nu este standardizată, dar în literatura de specialitate este aplicată de mulți cercetători (Derikvand și Eckelman, 2015; Podlena et al., 2015; Smardzewski et al., 2016; Magrisso et al., 2018; Top et al., 2019; Ayrilmis et al., 2020; Krzyzaniak et al., 2021) pentru a putea face comparație între performanțele mecanice ale diferitelor îmbinări de colț.

Etapa următoare parcursă în cercetarea experimentală a tezei a fost cea de testare a performanței mecanice a conectorului selectat în asamblare cu o specie lemnoasă mai rezistentă, utilizată în mod obișnuit în construcția scaunelor și s-a ales lemnul de fag.

Etapa următoare în cercetare a fost cea de dezvoltare de produs, respectiv de modificare a formei și dimensiunilor conectorului, pentru a-l adapta/ alinia la rezistențele mecanice cerute de noua specie lemnoasă utilizată. Cele două noi variante de conector propuse au fost investigate în mod similar cu cea inițială, iar conectorul selectat la final în urma aplicării criteriului de performanță mecanică a fost utilizat în construcția unui scaun din lemn de fag, iar pentru comparație s-a realizat și un scaun de referință identic ca și dimensiuni și secțiuni ale reperelor componente, dar îmbinat în varianta clasică, cu cep propriu și legătură.

Ultima etapă a cercetării prezentată în teză se referă la verificarea conectorului proiectat în produsul final, respectiv în scaunul ales ca model. În acest scop, cercetarea s-a desfășurat pe două direcții:

- Testarea celor două scaune (cel cu conectori și cel de referință) cu ajutorul sistemului pentru analiza comportării structurilor în teste de oboseală și a sistemului pentru analiza optică a deformațiilor 3D pentru materiale și componente, prin metoda DIC (Digital Image Correlation) din cadrul *ICDT Braşov*, Centrul de cercetare „Simulare numerică, testări și mecanica materialelor compozite”.
- Testarea celor două scaune conform SR EN 1728:2012 pe standul de încercări omologat din cadrul *Laboratorului de Design, Prototipare și Testare* (Cluj Innovation Park, Centrul Regional de Excelență pentru Industrii Creative, ClujNapoca) – acreditat RENAR, pentru:
 1. Rezistența șezutului și spătarului (SR EN1728:2012 pct. 6.4)
 2. Rezistența picioarelor spre partea din față (SR EN 1728:2012 pct. 6.15)
 3. Rezistența picioarelor spre partea laterală (SR EN 1728:2012 pct. 6.16)

Teza de doctorat este structurată în șapte capitole, după cum urmează:

Capitolul 1 intitulat „STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND UTILIZAREA FABRICAȚIEI ADITIVE PENTRU MOBILIER” este o cercetare bibliografică, prin care se aprofundează cunoștințele legate de fabricația aditivă (AM), avantajele și dezavantajele utilizării AM, metode de imprimare 3D, imprimante și materiale utilizate pentru imprimare 3D, materiale cu potențial de utilizare în fabricarea mobilierului, structurile *Voronoi* în fabricația aditivă, testarea elementelor de asamblare de tip L. Acest capitol este

totodată o sinteză a tematicii de cercetare în această direcție și pune accentul pe rezultatele obținute de alți cercetători în realizarea și testarea elementelor de asamblare pentru mobilier și în special a celor care utilizează metode de fabricație aditivă. Prin acest studiu teoretic se structurează direcția de cercetare abordată în teza de doctorat, pornind de la stabilirea categoriei de materiale și a tehnicilor de imprimare 3D cu potențial de utilizare la fabricarea aditivă a conectorilor pentru mobilă și a metodelor lor de testare.

Capitolul 2 intitulat „SCOPUL ȘI OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT” prezintă obiectivul general al tezei și obiectivele specifice, stabilind strategia de cercetare pentru atingerea acestor obiective. Obiectivul principal pe care cercetarea din această teză de doctorat îl vizează este acela de a proiecta, dezvolta și investiga un element de conexiune obținut prin tehnologii moderne de fabricație aditivă, care să înlocuiască elementele de îmbinare clasică tip cep propriu-scobitură din construcția scaunelor și care să asigure cel puțin aceleași rezistențe mecanice cu cele originale, în condițiile simplificării procesului tehnologic de fabricație și sistemului constructiv al scaunului.

Capitolul 3 intitulat „CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRELIMINARE PENTRU SELECTAREA METODEI, MATERIALULUI ȘI POZIȚIEI DE IMPRIMARE 3D A CONECTORULUI” reprezintă o secțiune importantă în cercetarea experimentală a tezei, în care se propun două metode de fabricație aditivă utilizate și de alți cercetători în domeniul mobilierului, respectiv fabricare prin extrudarea filamentului (FFF) și sinterizare laser selectivă (SLS), însoțite de patru materiale corespunzătoare acestor tehnici de imprimare 3D și anume trei tipuri de filamente PLA și pulbere de poliamidă, în vederea obținerii unui conector proiectat pentru asamblarea elementelor componente din structura de rezistență a unui scaun. Obiectivul cercetării experimentale întreprinse în acest capitol este acela de a selecta materialul care conferă o rezistență suficientă conectorului și în acest sens, se utilizează ca metodă de selecție rezistența la tracțiune și compresiune pe diagonală a unei asamblări de colț „de tip L” între elementele din lemn masiv asociate componentelor scaunului (picior-elementele cadrului/ legături) cu ajutorul conectorului imprimat 3D. Pentru comparație, s-a stabilit ca probă de referință cea realizată cu ajutorul îmbinării clasice tip cep propriu-scobitură, utilizată în mod uzual în construcția scaunelor. În acest studiu preliminar s-a utilizat pentru realizarea îmbinărilor lemnul de larice (*Larix Decidua* Mill.), o specie cu rezistență moderată, care se utilizează în construcția scaunelor. Motivarea alegerii este aceea că se dorește o gradare a cercetării, pentru a corela dimensiunile conectorului cu rezistența speciei lemnoase, evitând supradimensionarea acestuia din faza incipientă a studiului, în cazul în care acesta ar utiliza o specie lemnoasă cu rezistență mai mare. O nouă variabilă introdusă în această cercetare este și poziția de imprimare a piesei (orizontală și verticală), care se dovedește a avea o influență importantă în rezistența conectorului.

Capitolul 4 intitulat „TESTAREA PERFORMANȚEI MECANICE A ÎMBINĂRII DE COLȚ „DE TIP L” CU CONECTOR DIN PLA NEGRU ȘI ELEMENTE DIN LEMN DE FAG” utilizează rezultatele și concluziile cercetării preliminare din capitolul anterior și testează performanțele mecanice ale conectorului selectat anterior pentru îmbinarea elementelor din lemn de larice pentru elemente similare din lemn de fag. Se dovedește că acest conector, cu forma și dimensiunile proiectate în prima variantă, nu atinge performanțele de rezistență ale probei de referință realizată în acest studiu din lemn de fag, motiv pentru care se trece la o nouă etapă, cea de reproiectare a conectorului, pentru a satisface această cerință. Studiul experimental din acest capitol este însoțit de un studiu teoretic cu ajutorul analizei cu

element finit (FEA), în care se urmăreşte deplasarea sistemului prin simularea celor două solicitări mecanice ale asamblării „de tip L” cu conector, vizualizând-se astfel și zonele din conector cu tensiuni și deformații maxime, informații prețioase pentru faza de reproiectare a conectorului.

Capitolul 5 intitulat „CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA MODIFICĂRII CONECTORULUI ASUPRA PERFORMANȚELOR MECANICE ALE ÎMBINĂRII DE COLȚ CU ELEMENTE DIN LEMN DE FAG” continuă cercetările experimentale din capitolul anterior, utilizând alte două variante de conector, modificate ca formă și dimensiuni, pentru a îndeplini condiția de rezistență urmărită pentru îmbinarea de colț „de tip L” la nivelul celei clasice de tip cep propriu-scobitură. O nouă analiză cu element finit asupra conectorului rezultat prin modificarea dimensiunilor variantei inițiale în zonele cu solicitări maxime, indică o reducere a tensiunilor și deformațiilor din zonele critice, dar nu dispariția acestora. În urma testelor mecanice efectuate asupra îmbinării cu acest tip de conector, aceste zone critice au cedat, producând ruperea piesei, dar forțele maxime de rupere s-au ridicat la valorile înregistrate de proba de referință, motiv pentru care s-au continuat cercetările cu utilizarea acestui conector.

Capitolul 6 intitulat „TESTAREA SCAUNULUI REALIZAT CU CONECTORI IMPRIMAȚI 3D” prezintă cercetările efectuate asupra produsului final, scaunul, care utilizează ca elemente de conexiune conectorii validați în capitolul anterior și având ca termen de comparație un scaun similar construit cu îmbinările clasice testate anterior. Cercetarea experimentală din această secțiune a tezei a urmat două direcții: testarea celor două scaune conform SR EN 1728:2012 pe standul de încercări omologat din cadrul Laboratorului de Design, Prototipare și Testare (Cluj Innovation Park, Centrul Regional de Excelență pentru Industrii Creative, ClujNapoca) – acreditat RENAR, pentru rezistența șezutului și spătarului, rezistența picioarelor spre partea din față și laterală și, a doua direcție, testarea cu ajutorul sistemului pentru analiza optică a deformațiilor 3D pentru materiale și componente, prin metoda DIC (Digital Image Correlation) din cadrul ICDT Braşov, Centrul de cercetare „Simulare numerică, testări și mecanica materialelor compozite”, pentru vizualizarea deformațiilor la nivelul îmbinărilor, în condițiile aplicării unor forțe mai mari decât cele aplicate fizic pe standul de încercări omologat, de 1300 N. Nici unul dintre testele efectuate nu a distrus cele două scaune, ambele rezistând la forțe care depășesc 15 000 N, fără a fi afectată structura lor de rezistență.

Capitolul 7 intitulat „CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DISEMINAREA REZULTATELOR. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE” încheie teza de doctorat, sintetizând rezultatele obținute în urma cercetărilor efectuate, precum și posibilități de valorificare a acestora în practică, indicând în același timp câteva direcții viitoare de cercetare deschise de această temă.

În ceea ce privește diseminarea rezultatelor acestei teze de doctorat, au fost publicate în total 4 lucrări științifice (două articole indexate ISI și un articol indexat în baze de date internaționale). Lucrările indexate ISI au fost prezentate în cadrul a două conferințe internaționale. Cel de-al patrulea articol este acceptat pentru publicare în Buletinul Universității Transilvania din Braşov, indexat în baze de date internaționale.

CAPITOLUL 1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND UTILIZAREA FABRICAȚIEI ADITIVE PENTRU MOBILIER

În literatura de specialitate există studii legate de posibilitatea de realizare a unor conectori prin tehnologia de fabricație aditivă (AM), utilizați cu predilecție pentru îmbinarea panourilor din mobilierul de depozitare, și mai puțin pentru componentele mobilierului de ședere, iar cercetările legate de rezistența îmbinărilor nu sunt suficient aprofundate.

La îmbinările în unghi drept (de tip L) pentru piesele de mobilier, se testează în general rezistența la tracțiune și compresiune. Există, de asemenea, o serie de cercetări care studiază rezistența și rigiditatea unor îmbinări imprimare 3D pentru mobilier de depozitare demontabil (mobilier modular) și care îl personalizează din punct de vedere al designului.

Studiul de față prezintă cercetările actuale din literatura de specialitate referitoare la tehnologia AM aplicată în domeniul fabricării mobilei, constituind un punct de plecare în cercetările din teza de doctorat.

1.1. Fabricația aditivă (AM) sau tehnologia de imprimare 3D

Fabricația aditivă (AM) sau tehnologia de imprimare 3D este tehnologia prin care un obiect este obținut prin depunerea succesivă a unor straturi de material ([Groth et al., 2014](#))

1.1.1 Avantaje și dezavantaje ale AM

Tehnologia de imprimare 3D are potențialul de a revoluționa industriile și de a schimba conceptul liniilor de producție clasice. Adoptarea tehnologiei de imprimare 3D va crește viteza de producție, reducând în același timp costurile ([Shahrubudina et al., 2019](#)).

1.2 Metode de fabricație aditivă

Există o gamă largă de metode de fabricație aditivă. Fiecare dintre acestea construiește obiecte în straturi succesive ([Lancea et al., 2018](#)).

După tipul materialului folosit ([Ramya și Vanapalli, 2016](#)), tehnologiile de imprimare 3D pot fi clasificate în procese:

- care utilizează material lichid;
- pe bază de pulbere;
- pe bază de material solid;
- bazate pe laminare.

Fabricare prin extrudarea filamentului (FFF) sau tehnologia de modelare prin extrudare termoplastică (FDM)

Metoda FFF (FDM ca acronim comercial), este metoda de depunere de straturi de o anumită grosime prin topirea filamentului din material termoplastic și este cea mai utilizată în fabricarea aditivă, datorită echipamentelor accesibile și ușurinței cu care se realizează imprimarea. Este utilizată pentru

prototipare, dar și în producție. Constă în aplicarea materialului sub presiune constantă printr-o duză, cu o viteză constantă și solidificare completă după ieșirea din duză, aderând la stratul de material anterior (Popescu *et al.*, 2018). Pentru susținerea piesei, în cazul geometriilor complexe, este nevoie de adăugarea de material suplimentar (Aydin, 2015). Structura suport este ulterior îndepărtată, în unele cazuri, cu oarecare dificultate.

Materialele termoplastice utilizate în FFF includ:

- acrilonitril butadien stiren (ABS);
- acrilonitril stiren acrilat (ASA);
- nylon 12 (PA12);
- policarbonat (PC);
- polieterimidă (PEI sau ULTEM);
- acid polilactic (PLA);
- poliuretan termoplastic (TPU).

Proprietățile materialelor, cum ar fi rezistența la raze ultraviolete (UV), bio-compatibilitatea, transparența sau duritatea le fac perfecte pentru industriile care produc componente cu destinație specială (Saad, 2016).

Sinterizare Laser Selectivă (SLS)

Tehnologia SLS utilizează o rază laser de mare putere pentru a sinteriza în straturi succesive materialul sub formă de pulbere, realizându-se în acest fel obiectul dorit. Piesa virtuală modelată 3D este convertită în planuri transversale, care sunt transmise software-ului imprimantei. În baza informațiilor primite, echipamentul de imprimare 3D controlează traseul razei laserului, care sinterizează stratul de pulbere din interiorul cuvei, respectându-se forma secțiunii transversale a modelului virtual. După realizarea sinterizării stratului de pulbere, platforma imprimantei este coborâtă în interiorul cuvei cu grosimea unui strat. Apoi se aplică următorul strat de pulbere, care este și el sinterizat. Procedul este repetat până când este finalizată construirea întregului model, în conformitate cu fișierul de modelare CAD. Pe toată durata imprimării, piesa este în permanență înglobată în pulberea nesinterizată, obținându-se astfel piese cu forme complexe, fără a fi necesară utilizarea de material suport. Avantajul acestei metode este faptul că pulberea reziduală din cuvă poate fi utilizată la construcțiile ulterioare (Finaa *et al.*, 2017).

Materialele utilizate pot fi: pulberi termoplastice (nylon, poliamidă, polistiren, elastomeri, materiale compozite), pulberi metalice (oțel, titan, aliaje), pulberi ceramice, pulberi din sticlă (Saad, 2016).

1.3 Materiale utilizate pentru tehnologia de imprimare 3D

Cele mai răspândite materiale utilizate la imprimarea 3D sunt polimerii, datorită disponibilității lor largi, proprietăților lor mecanice excelente, costurilor reduse și simplității de adaptare la diferite tehnici de imprimare 3D (Ranjan *et al.*, 2022). Polimerii sunt utilizați sub formă de pulbere, filamente și foi. Tehnologiile AM utilizează și polimerizarea activă a rășinilor fotosensibile (Stansbury și Idacavage, 2016). Polimerii termoplastici precum nylon-ul, acrilonitril-butadien-stirenul (ABS), polietilen tereftalat-ul (PET), policarbonatul (PC), acidul polilactic (PLA) și poliesterul termoplastic (TPC) se utilizează în imprimarea 3D cu ajutorul tehnologiei FFF, pentru a produce geometrii complexe (Shahrubudina *et al.*, 2019).

1.4. Materiale cu potențial de utilizare în tehnologia de imprimare 3D pentru mobilier

PLA și materiale compozite cu matrice de PLA

PLA este un bio-plastic, format dintr-un lanț repetat de acid lactic și este reciclabil folosind metode convenționale. În mod specific, PLA este un poliester alifatic termoplastice derivat din porumb și poate fi chiar compostat ca și alte materii organice. PLA este versatil, iar compozitele pe bază de PLA au fost investigate în literatură, inclusiv compozite cu fibre naturale, celuloză microfibrilată, fibre de celuloză și abaca artificiale, nanotuburi de carbon și chiar elemente de armare metalice (Pringle *et al.*, 2022).

PLA ranforsat cu fibră discontinuă de sticlă a fost studiat ca o soluție de material pentru filamentul folosit în tehnologia de imprimare 3D prin metoda FDM (Li *et al.*, 2018).

1.5 Structurile Voronoi în fabricația aditivă

Diagrama Voronoi este o partiție în regiuni apropiate de un set de puncte distribuite în plan numite semințe sau site-uri. Pentru fiecare sămânță există o regiune corespunzătoare formată din toate punctele planului mai apropiate de acea sămânță decât de oricare alta. Aceste regiuni se numesc celule Voronoi. Repetarea mai multor celule constituie diagrama Voronoi (Fig.1) (Aurenhammer, 1991; Martínez *et al.*, 2018; Merland *et al.*, 2014; Gan *et al.*, 2005).

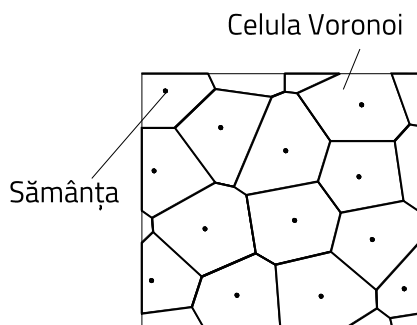


Fig. 1. Forma diagramei Voronoi (după Gan *et al.*, 2005)

1.6. Aplicațiile tehnologiei de fabricație aditivă în industria mobilei

În domeniul industriei mobilei, producția de masă este încă realizată cu metode tradiționale. Nivelul tehnologic de astăzi în fabricația aditivă permite însă realizarea îmbinărilor, a unor componente sau a pieselor întregi de mobilier cu ajutorul tehnologiei AM. Deși este utilizată în special în producția de prototipuri, există tendințe evidente ca AM să se utilizeze și în obținerea de produse de serie. În comparație cu tehnologiile tradiționale, tehnologia de imprimare 3D oferă libertate în proiectare și face posibilă producerea de geometrii complexe (Aydin, 2015).

1.7. Testarea elementelor de asamblare „de tip L”

Îmbinările cep și scobitură sunt încă utilizate pe scară largă în construcțiile din lemn. În ciuda utilizării din ce în ce mai mari a îmbinărilor cu cepuri aplicate, îmbinările cu cep propriu și scobitură sunt de neînlocuit pentru unele tipuri de construcții de mobilier, în special pentru cel de ședere.

Scaunele sunt expuse la diferite sarcini directe sau indirecte pe parcursul vieţii lor. În general, diferite tipuri de încărcare mecanică, cum ar fi tracţiunea, compresiunea, încovoierea, forfecarea şi torsiunea afectează îmbinările elementelor care alcătuiesc structura scaunului. Ca urmare a acestor sarcini, efectele negative cum ar fi curbarea, crăparea şi ruperea pot să apară în elementele de conexiune din structura scaunelor.

Testarea la compresiune şi tracţiune pe diagonală a îmbinărilor „de tip L” între elementele de scaun, realizate cu cep şi scobitură şi cu cepuri rotunde, în scopul de a determina comparativ performanţa mecanică a celor două tipuri de îmbinări au fost prezentate în studiul (Ayrilmis *et al.*, 2020). Conform rezultatelor testelor, îmbinarea cep şi scobitură a dat rezultate mai bune decât cea cu cepuri aplicate.

1.8. Concluzii

- Prototipurile de mobilier imprimate 3D şi realizate demonstrativ pentru a pune în valoare capacitatea imprimantei nu sunt testate din punct de vedere al rezistenţelor mecanice.
- Pentru verificarea rezistenţei mecanice a unei îmbinări, în literatura de specialitate se recomandă testarea unei asamblări de colţ (de tip L) la solicitările de tracţiune şi compresiune pe diagonală şi calcularea momentului de încovoiere (Derikvand şi Eckelman, 2015; Smardzewski *et al.*, 2016; Magrisso *et al.*, 2018; Top *et al.*, 2019; Ayrilmis *et al.*, 2020; Krzyzaniak *et al.*, 2021). Această metodă constituie un model de comparaţie a rezistenţelor mecanice ale îmbinărilor de colţ şi s-a aplicat în vederea selectării conectorului în funcţie de variabilele aplicate (material de imprimare 3D, poziţie de aşezare în imprimantă, formă şi dimensiuni) pentru construcţia produsului final, scaunul.
- În literatura de specialitate există studii legate de posibilitatea de realizare a unor conectori prin tehnologia de fabricaţie aditivă (AM), utilizaţi cu predilecţie pentru îmbinarea panourilor din mobilierul de depozitare, şi mai puţin pentru componentele mobilierului de şedere, iar cercetările legate de rezistenţa îmbinărilor nu sunt suficient aprofundate.
- Domeniul conectorilor imprimaţi 3D pentru scaune este insuficient explorat din punct de vedere al materialului şi metodei de fabricaţie aditivă, în contextul asigurării rezistenţelor comparabile cu cele ale scaunelor clasice.
- Conectorii imprimaţi 3D pot aduce avantaje în construcţia scaunelor: design liber, evitarea utilizării adezivilor şi a tehnologiilor complicate, demontabilitate şi transferarea operaţiilor de asamblare către beneficiar, prelungirea duratei de viaţă a scaunului prin înlocuirea conectorilor în cazul slăbirii unor îmbinări, economie de lemn masiv prin reducerea dimensiunilor componentelor scaunului şi nu în ultimul rând, reducerea costurilor de transport datorită micşorării ambalajelor.

CAPITOLUL 2. SCOPUL ŞI OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT

Obiectivul general al tezei de doctorat este acela de a investiga posibilitatea de înlocuire a elementelor de îmbinare clasice din construcţia scaunelor, respectiv îmbinarea cu cep propriu şi scobitură, cu elemente de conectare imprimate 3D, care să asigure cel puţin aceleaşi rezistenţe mecanice cu cele originale în condiţiile simplificării sistemului constructiv al scaunului.

Pornind de la obiectivul tezei, strategia cercetărilor experimentale şi teoretice presupune următoarele obiective specifice:

OS1. Stabilirea dimensiunilor pentru componentele scaunului îmbinate în varianta clasică (cep propriu-scobitură).

OS2. Modelarea 3D a unui conector care să înlocuiască îmbinarea cep propriu-scobitură între picior şi cele două legături ale scaunului.

OS3. Cercetarea experimentală privind rezistenţele mecanice ale îmbinării cu conectorul imprimat 3D, utilizând materiale şi tehnici de imprimare 3D diferite .

OS4. Simularea comportamentului asamblării cu conector imprimat 3D la compresiune şi tracţiune, utilizând analiza elementului finit (FEM), în vederea optimizării formei şi dimensiunilor conectorului.

OS5. Testarea rezistenţelor mecanice ale asamblării clasice cep propriu-scobitură între componentele scaunului luate în calcul în cercetarea experimentală, utilizând două specii lemnoase diferite: larice (*Larix decidua* Mill) şi fag (*Fagus sylvatica* L.).

OS6. Compararea rezultatelor şi selectarea speciei lemnoase, a metodei şi materialului de imprimare 3D pentru construcţia unui scaun cu conectori obţinuţi cu tehnologia AM.

OS7. Testarea rezistenţei scaunului realizat în varianta clasică şi cu conectori imprimaţi 3D într-un laborator specializat şi compararea rezultatelor.

Etapele parcurse în vederea atingerii obiectivelor:

- Cercetarea bibliografică referitoare la stadiul de dezvoltare actual al tehnologiei AM, metodele de imprimare şi materialele specifice, domeniile de utilizare, rezultate ale aplicării în fabricarea mobilei şi posibilităţi de testare.
- Modelarea 3D a conectorului care să înlocuiască îmbinarea cep propriu-scobitură .
- Cercetarea experimentală referitoare la rezistenţele mecanice ale asamblării elementelor de scaun cu ajutorul conectorului imprimat 3D prin aplicarea unor metode, materiale şi poziţii diferite de imprimare 3D:

- imprimarea 3D a conectorului cu metoda FFF în poziţia de aşezare fără strat suport, utilizând trei tipuri de materiale: PLA alb, PLA negru, PLA ranforsat cu fibre de sticlă ;

- realizarea asamblării de tip L şi testarea acesteia la tracţiune şi compresiune pe diagonală, prelucrarea datelor şi compararea rezultatelor;

- selectarea materialului care a obținut rezultatele mecanice cele mai bune și schimbarea poziției de imprimare;
 - imprimarea 3D a conectorului cu metoda SLS și utilizarea materialului PA12;
 - realizarea asamblării de tip L și testarea acesteia la tracțiune și compresiune, prelucrarea datelor și compararea rezultatelor cu cele obținute prin utilizarea conectorului imprimat 3D cu ajutorul tehnologiei de fabricație aditivă FFF;
 - selectarea metodei optime de imprimare 3D și a materialului cu rezultatele cele mai bune la testele mecanice;
 - Cercetarea experimentală referitoare la influența speciei lemnoase utilizate la realizarea asamblării asupra rezistenței mecanice la tracțiune și compresiune a acesteia:
 - imprimarea 3D a conectorului cu metoda și materialul selectat anterior;
 - realizarea asamblării de tip L și testarea acesteia la tracțiune și compresiune pe diagonală, utilizând două specii lemnoase: larice și fag;
 - prelucrarea datelor și compararea rezultatelor;
 - selectarea speciei lemnoase cu rezultatele mecanice cele mai bune în vederea testării finale în construcția unui scaun.
 - Cercetarea experimentală referitoare la influența formei și dimensiunii conectorului asupra rezistenței mecanice la tracțiune și compresiune a asamblării de tip L:
 - simularea comportamentului asamblării cu conector imprimat 3D la compresiune și tracțiune, utilizând analiza elementului finit (FEA);
 - modificarea formei conectorului în vederea îmbunătățirii rezistențelor mecanice;
 - imprimarea 3D și testarea mecanică în ansamblul „de tip L” a noului conector;
 - prelucrarea datelor și compararea rezultatelor, selectarea conectorului cu forma și dimensiunile finale pentru construcția scaunului în vederea testării finale.
 - Cercetarea experimentală privind rezistența unui scaun construit cu conectori printați 3D:
 - proiectarea unui scaun cu elementele componente testate anterior (păstrând aceleași dimensiuni pentru picior și legături, lonjeroanele și traversele cadrului de scaun);
 - fabricarea scaunului în construcție clasică (cu elemente de îmbinare cep propriu-scobitură);
 - fabricarea scaunului cu aceleași componente în sistemul constructiv propus cu conectori;
 - testarea scaunelor într-un laborator de testare specializat și compararea rezultatelor.
- Strategia de rezolvare a obiectivului tezei de doctorat este reprezentată schematic în Fig. 2.

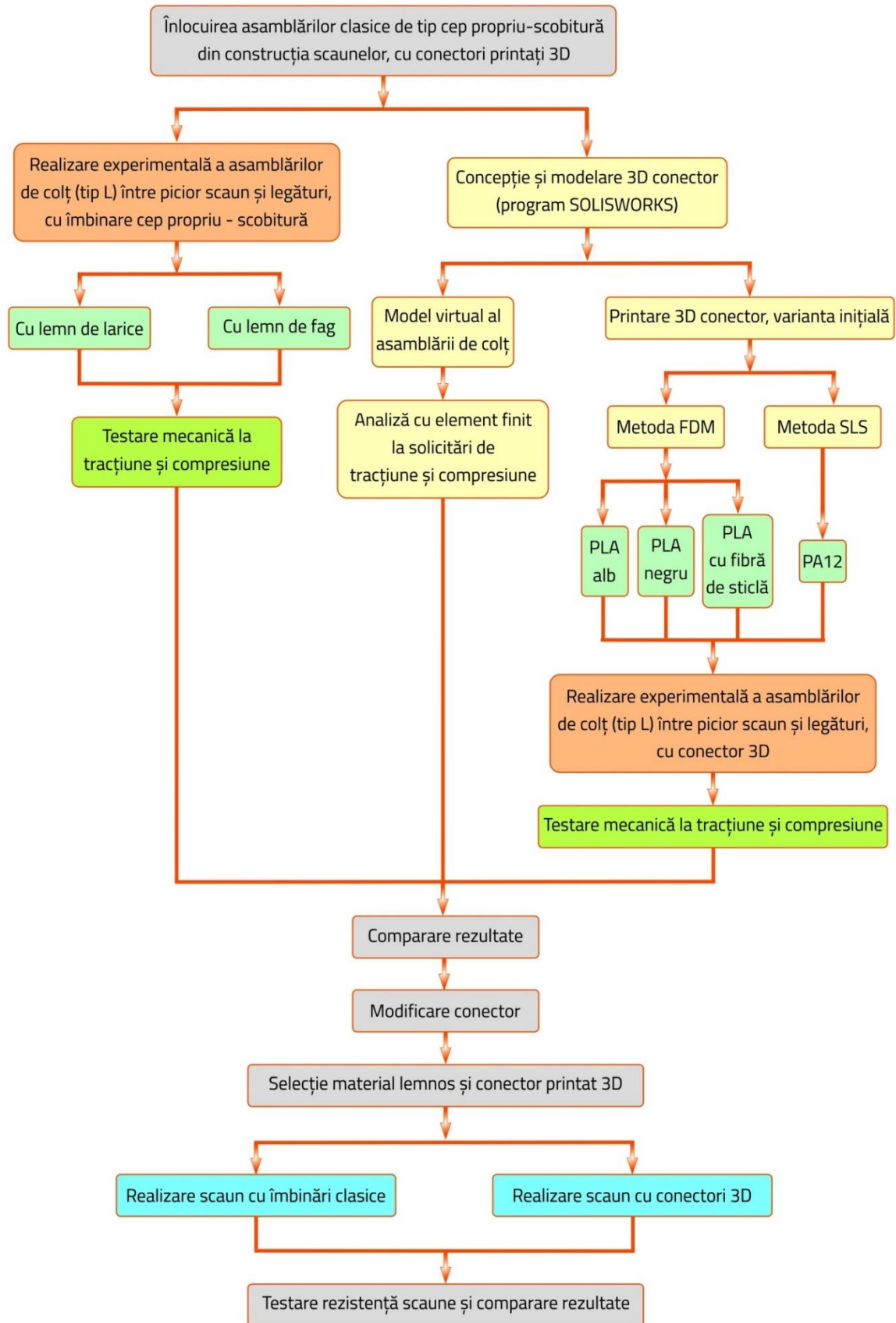


Fig. 2. Strategia de rezolvare a obiectivului tezei de doctorat



CAPITOLUL 3. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRELIMINARE PENTRU SELECTAREA METODEI, MATERIALULUI ŞI POZIȚIEI DE IMPRIMARE 3D A CONECTORULUI

În cercetarea experimentală preliminară prezentată în acest capitol al tezei, s-a pornit de la modelarea unui conector destinat îmbinării elementelor unui scaun (elementele cadrului, respectiv legăturile inferioare îmbinate cu picioarele scaunului).

Criteriul de selecție a materialului, metodei și poziției de imprimare 3D a fost acela al performanței mecanice a conectorilor într-o îmbinare de colț „de tip L” supusă solicitărilor de tracțiune și compresiune pe diagonală, în ideea de a satisface cerințele de rezistență mecanică necesare pentru construcția unui scaun.

În această cercetare experimentală s-au propus două metode de fabricație aditivă, patru materiale pentru imprimarea 3D a conectorului și două poziții de așezare a modelului pe platforma imprimantei, respectiv:

- Metoda FFF de fabricație aditivă, cu următoarele materiale:
 - PLA alb;
 - PLA negru;
 - PLA compozit cu inserție de sticlă.
- Metoda SLS de fabricație aditivă, cu următorul material:
 - PLA alb;
 - PLA negru;
 - Pulberea de poliamidă *DuraForm PA Plastic*.

Cele două poziții de așezare a modelului pe platforma imprimantei:

- Orizontală, fără suport de sprijin.
- Verticală, cu suport de sprijin.

Pentru piesele din lemn masiv s-a optat în această cercetare preliminară pentru lemnul de larice (*Larix Decidua* Mill.), o specie lemnoasă cu performanțe mecanice moderate, dar care este utilizată în construcția scaunelor. Asamblarea clasică tip „cep propriu-scobitură” utilizată în mod curent în construcția scaunelor a servit ca probă de referință.

3.1. Modelul experimental

Modelul experimental are în vedere realizarea unei asamblări de colț „de tip L”, care să cuprindă piciorul scaunului și legăturile acestuia, așa cum se poate observa în detaliul din Fig. 3. Același sistem constructiv se aplică și pentru cadrul scaunului, format din cele patru picioare ale scaunului și lonjeroanele și traversele care fac legătura între ele.

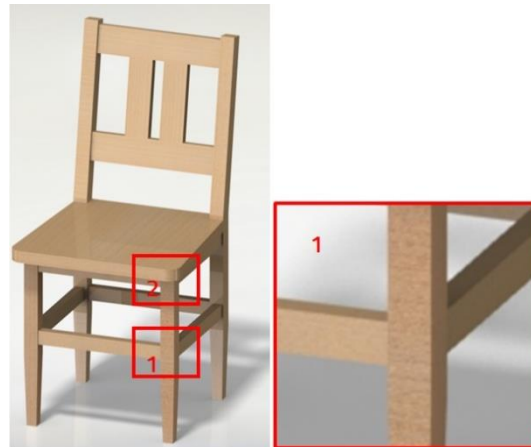


Fig. 3. Modelul de scaun luat în calcul pentru proiectarea conectorului, respectiv pentru îmbinarea „de tip L” dintre picioare și legături (detaliul 1) și dintre traversa și lonjeronul scaunului cu piciorul (asamblarea 2).

Pentru această îmbinare la 90° se are în vedere proiectarea unui conector care să realizeze îmbinarea în așa fel, încât procesele pentru prelucrarea lemnului să fie cât mai simple, fără a necesita manoperă și timpi de prelucrare mari. În varianta clasică de prelucrare, pentru structurile din lemn de acest tip se utilizează îmbinările cu cep propriu și scobitură

Modelul de scaun proiectat 3D pentru această cercetare, care utilizează conectori imprimați cu tehnologia de fabricație aditivă pentru îmbinarea la 90° a legăturilor, traverselor și lonjeroanelor cadrului cu piciorul, este prezentat în Fig. 4a, iar modelul de conector proiectat este prezentat în Fig. 4b.

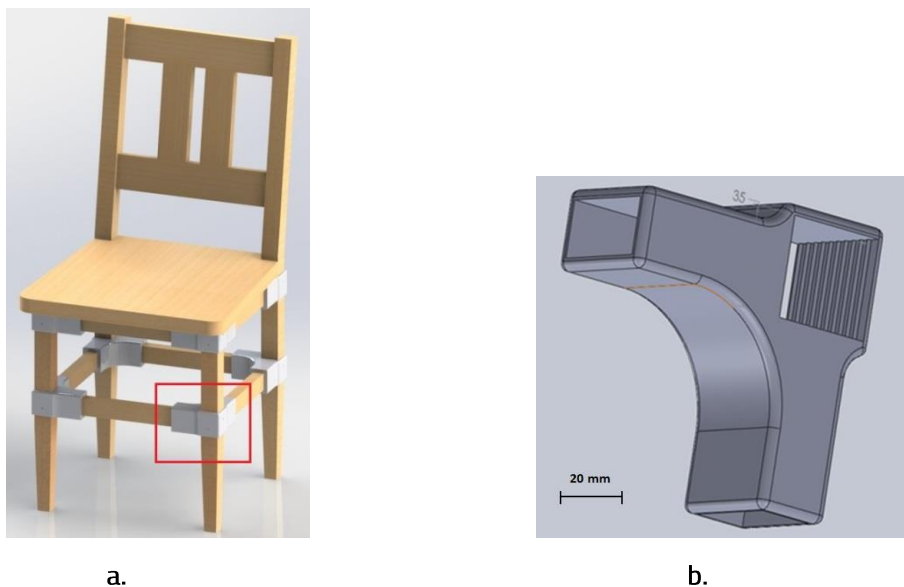


Fig. 4. Sistemul constructiv cu conector proiectat: a. Modelarea 3D a scaunului cu conector; b. Modelul 3D proiectat pentru conector.

Software-ul utilizat la modelarea 3D a scaunului și a elementului de îmbinare pentru componentelor cadrului de scaun și a legăturilor cu piciorul este SolidWorks 3D CAD, versiunea 2016 dezvoltat de Dassault Systèmes, Franța.

3.2. Materiale utilizate în cercetarea experimentală

3.2.1. Specii lemnoase și materiale utilizate în fabricația aditivă. Caracteristici

Pentru cercetarea experimentală din prezenta teză de doctorat s-au avut în vedere două specii de lemn utilizate în construcția scaunelor: o specie de rășinoase, respectiv lemnul de larice (*Larix Decidua* Mill.) și o specie de foioase, respectiv lemnul de fag (*Fagus sylvatica* L.).

Densitatea lemnului de larice, determinată prin calcul la umiditatea de 9,2% a fost de 607 kg/m³, iar cea a lemnului de fag, ca raport între masele și volumele probelor la un conținut de umiditate de 8,5%, a fost de 698 kg/m³. Pentru îmbinarea clasică de tip cep propriu-scobitură s-a utilizat adezivul polivinilic comercial *Novobond D2*.

Pentru realizarea conectorului prin tehnologia FFF s-au utilizat ca materiale filamente de PLA alb, PLA negru și un compozit din PLA alb armat cu fibra de sticlă (PLA–Glass 041-285-750), pentru a avea posibilitatea de a compara performanțele mecanice ale conectorului imprimat 3D din materiale diferite.

Pentru metoda de imprimare 3D a conectorului cu ajutorul tehnologiei SLS s-a ales ca material pulberea *DuraForm PA Plastic* fabricată de *3D Systems* (Hertfordshire, Regatul Unit).

3.2.2. Analiza micrografică a materialelor utilizate la imprimarea 3D a conectorului

Investigarea microscopică a mostrelor de filament a avut drept scop evidențierea unor defecte de fabricație, care să anticipeze calitatea imprimării 3D și a rezistențelor mecanice ale pieselor obținute.

S-a utilizat un microscop digital *Emspira 3* (Leica Microsystems, Danaher Corporation, Washington DC, SUA) cu putere de mărire de 86x pentru filamentele din PLA alb și negru și microscopul optic *Nikon OMNIMET-BUEHLER* (Tokyo, Japonia) cu putere de mărire de 50x, 100x și 200x pentru filamentele din PLA cu fibră de sticlă. Microscopul digital *Emspira 3* cu obiectiv *PlanApo 1.0x* are un raport de zoom 8:1 cu intervale de mărire de 26x-206x, iar microscopul optic *Nikon OMNIMET-BUEHLER* este dotat cu o rezoluție de până la 1000x și software-uri adecvate analizelor structurale cantitative mai fine. Au fost utilizate cinci focalizări (86x, 50x, 100x și 200x) pentru micrografiile din secțiuni longitudinale și transversale ale filamentelor de PLA alb, PLA negru și PLA ranforsat cu fibră de sticlă, tăiate longitudinal și transversal și încorporate în rășină tehnică *Dentacryl Technicky* (Prolep vos, České Budějovice, Republica Cehă) (Fig. 5).

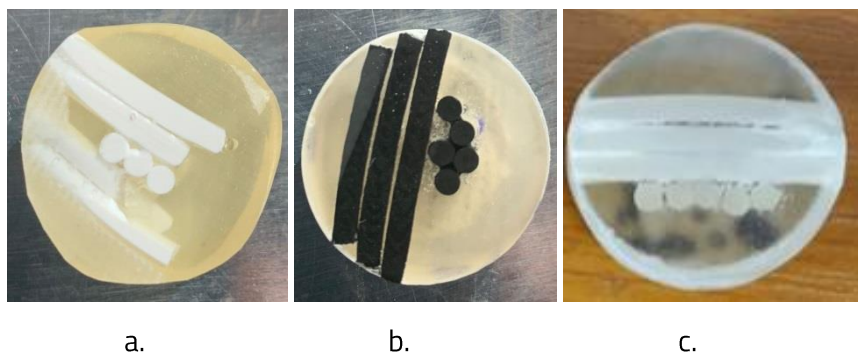


Fig. 5. Probe ale filamentelor utilizate la imprimarea 3D a conectorilor, încorporate în rășină tehnică: a. PLA alb; b. PLA negru; c. PLA alb ranforsat cu fibre de sticlă.

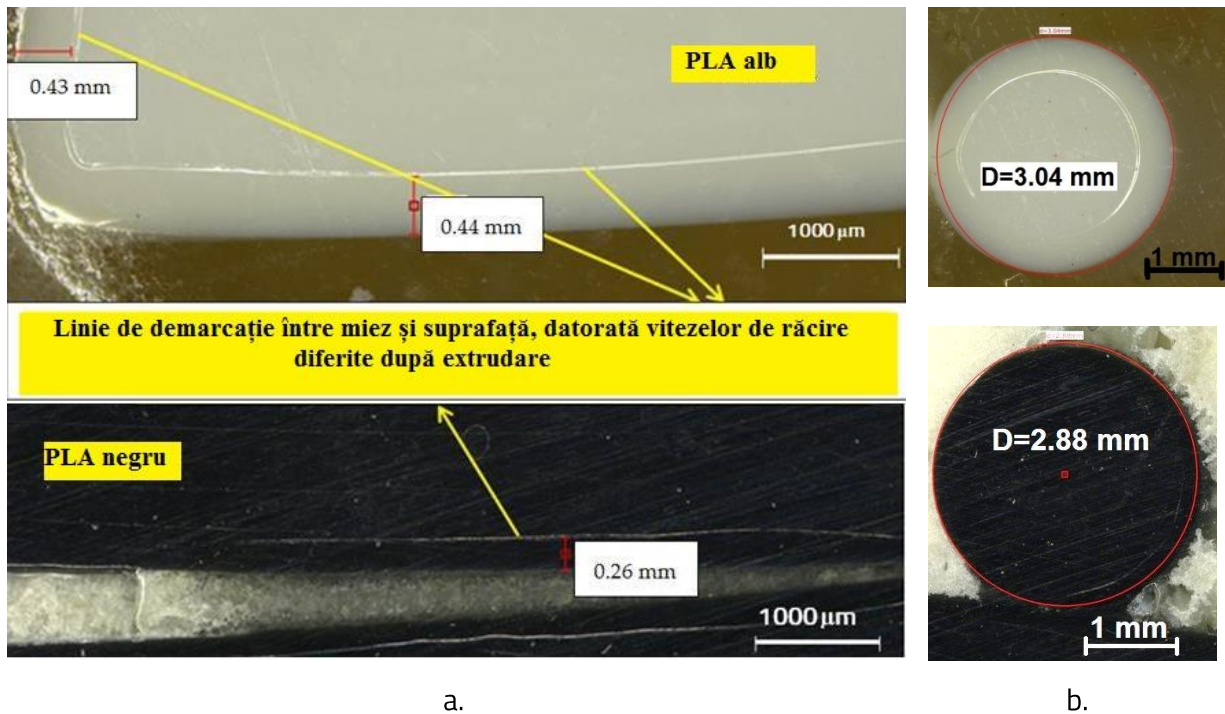


Fig. 6. Imagini mărite de 86x pentru filamentele din PLA alb și negru: a. în secțiune longitudinală; b. în secțiune transversală.

La analiza microscopică a filamentelor din PLA alb și PLA negru (Fig. 6) se observă că materialul din compoziția filamentelor este omogen, atât în secțiune longitudinală, cât și în secțiune transversală și nu se observă defecte în structura filamentului de tipul golurilor, fisurilor, aglomerărilor de material.

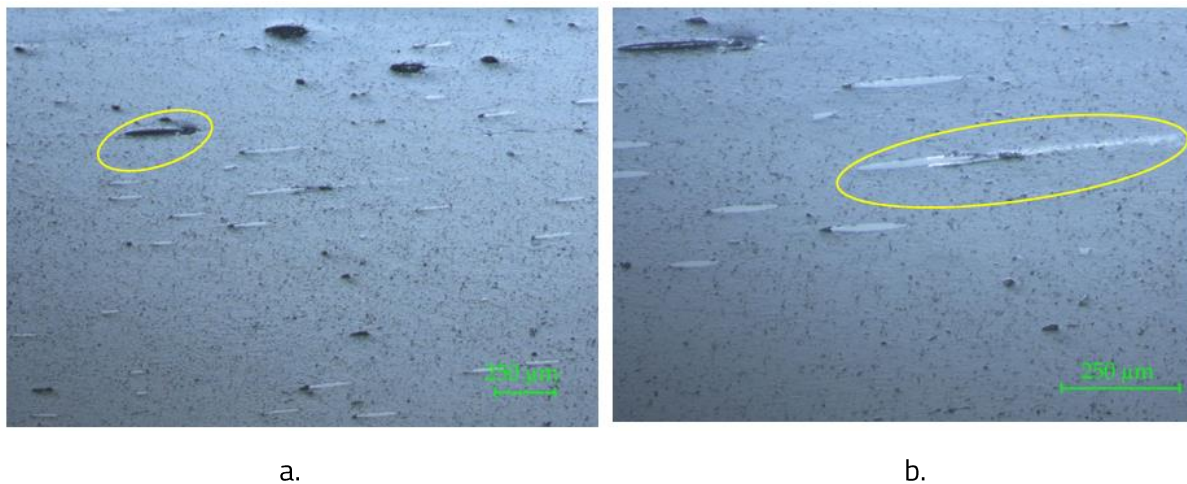


Fig.7. Micrografia secțiunii longitudinale a filamentului din PLA armat cu fibra de sticlă; a. mărire de 50x; b. mărire de 100x.

În urma analizei microscopice a secțiunilor filamentului de PLA alb armat cu fibră de sticlă s-au constatat o serie de defecte de fabricație cum ar fi distribuția neuniformă a fibrei de sticlă cu zone de aglomerări ale fibrei și porțiuni de filament în care fibra de sticlă lipsește. S-au evidențiat de asemenea evulsioni ale armăturii din fibră de sticlă din matrice.

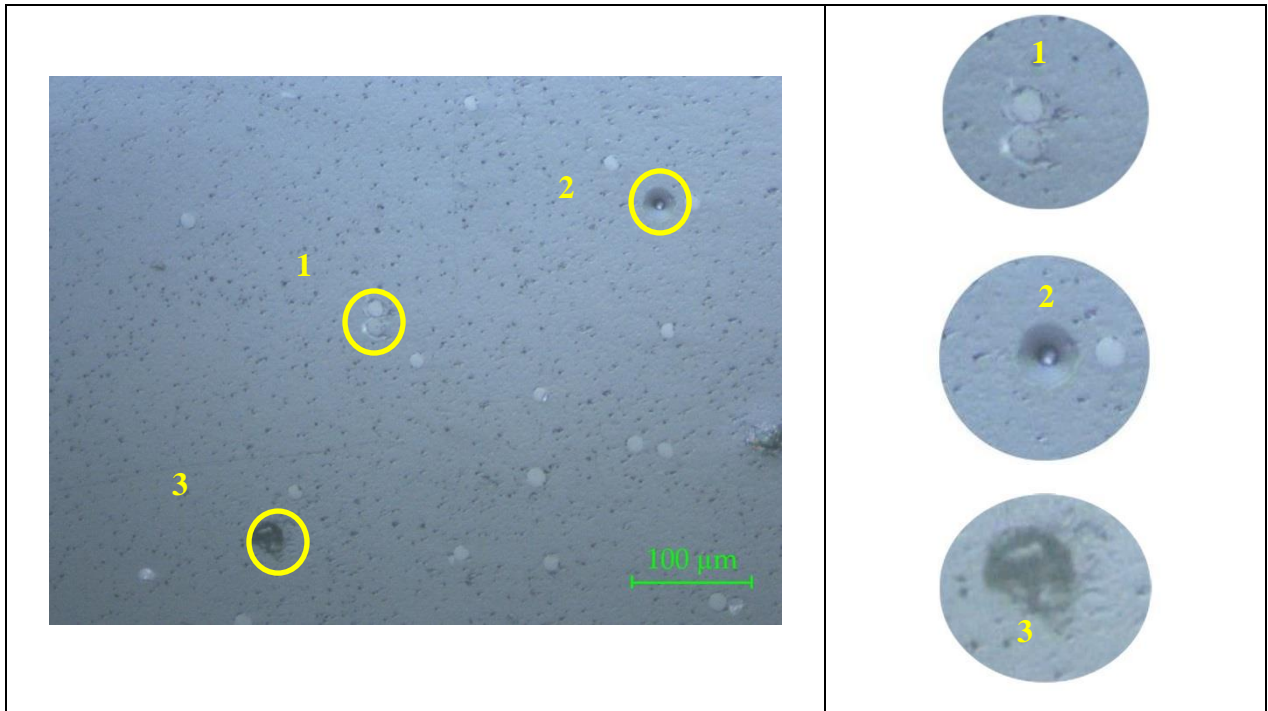


Fig. 8. Micrografia secţiunii transversale a filamentului din PLA cu fibră de sticlă mărire de 200× (Nicolau et al. 2022).

3.3. Imprimarea 3D a conectorilor utilizaţi în cercetarea experimentală

3.3.1. Imprimarea 3D a conectorilor cu metoda FFF de fabricaţie aditivă

La imprimarea 3D a conectorilor cu filamentele din PLA alb, PLA negru și PLA ranforsat cu fibre de sticlă s-a utilizat metoda de fabricare prin extrudarea filamentului FFF.

Depunerea inițială de filament are rolul de a crea baza pentru depunerea straturilor următoare și de a defini un contur închis. Acesta va fi denumit perimetrul (P) conectorului imprimat 3D. Depunerea strat cu strat recomandată pentru obținerea unei performanțe mecanice bune a piesei obținute este la un unghi de înclinare de 45° raportat la direcția perimetrului și perpendicular pe stratul anterior (Fig. 9).

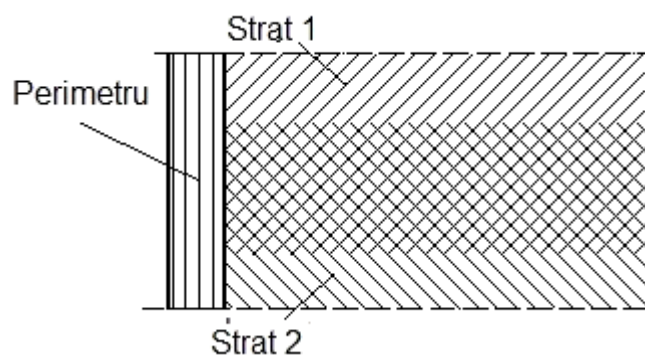


Fig.9. Depunerea perimetrală și în straturi a filamentului în tehnologia FFF (Nicolau et al., 2022).

3.3.2. Imprimarea 3D a conectorilor cu metoda SLS de fabricație aditivă

Tehnologia SLS utilizată pentru imprimarea 3D a conectorilor din această cercetare experimentală utilizează un fascicul laser de mare putere, care, prin topirea (sinterizarea) pulberii în straturi alternative de 100 µm, duce la obținerea piesei imprimate 3D.

Straturile s-au sinterizat în alternanță pe direcția X și Y pentru a se obține o densitate mare, așa cum se recomandă în literatura de specialitate (Simchi și Pohl, 2003).

3.3.3. Pozițiile conectorului pe platforma imprimantei

În prima parte a cercetării, pentru fabricarea conectorilor prin metoda FFF din filamentele selectate pentru cercetarea experimentală, respectiv PLA alb, PLA negru și PLA alb ranforsat cu fibre scurte de sticlă s-a ales poziția de așezare orizontală a modelului pe platforma imprimantei, denumită „poziția 1” (Fig.10)

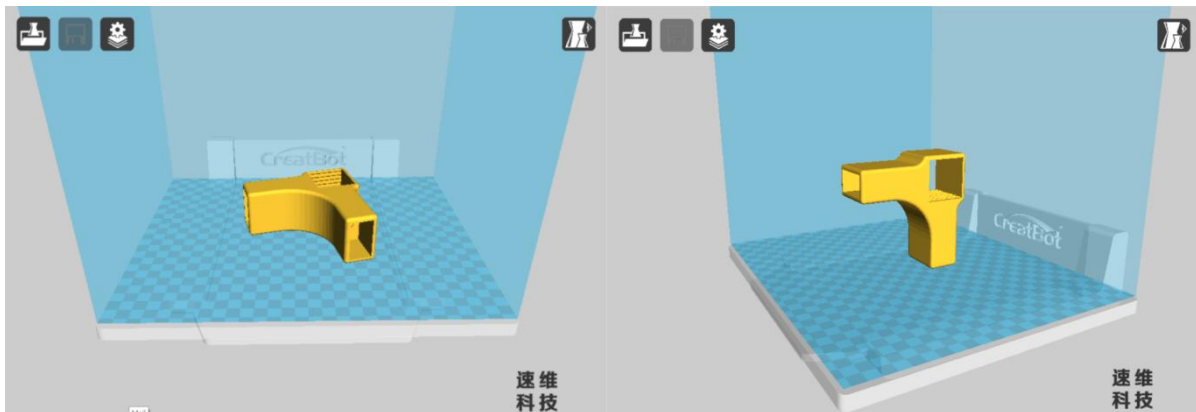


Fig.10. Poziția 1 (orizontală) de imprimare 3D a conectorului.

Fig. 11. Poziția 2 de imprimare 3D a conectorului

Conectorii imprimați 3D în această poziție au fost utilizați la construirea îmbinărilor de colț de tip „L”, împreună cu elementele din lemn de larice. Aceste îmbinări au fost supuse testelor de tracțiune și compresiune pe diagonală, pentru evaluarea performanțelor lor mecanice.

Scopul testelor mecanice este acela de a selecta filamentul, sau filamentele cu care se obțin performanțele mecanice cele mai bune ale conectorului imprimat 3D prin metoda de fabricație aditivă FFF, iar aceste filamente vor fi utilizate în continuare pentru a obține conectori imprimați 3D în poziție verticală, denumită „poziția 2” (Fig. 11), care va constitui o nouă variabilă în cercetarea experimentală referitoare la rezistența mecanică a conectorilor într-o îmbinare „de tip L”.

Pentru imprimarea 3D cu ajutorul tehnologiei SLS, s-a ales ca material pudra de poliamidă *DuraForm PA Plastic*, iar conectorii fabricați cu acest material au fost imprimați atât în poziția 1, cât și 2.

3.3.4. Investigarea la nivel microscopic a calității suprafețelor imprimate 3D prin metoda FFF cu PLA ranforsat cu fibre de sticlă

Investigarea microscopică a mostrelor extrase din doi conectori imprimați 3D a fost efectuată la microscopul optic NIKON OMNIMET-BUEHLER (Tokyo, Japonia). Au fost utilizate trei focalizări (50×,

100× și 200×), iar analiza microscopică s-a realizat atât pe secțiunile longitudinale, cât și cele transversale ale acestora. Tăieturile longitudinale și transversale ale pieselor au fost încorporate în rășină tehnică *Dentacryl Technicky* (Fig. 12).



Fig. 12. Mostrele pregătite pentru evaluarea calității suprafețelor imprimate 3D prin metoda FFF, cu filament compozit cu fibre de sticlă (Nicolau *et al.*, 2022)

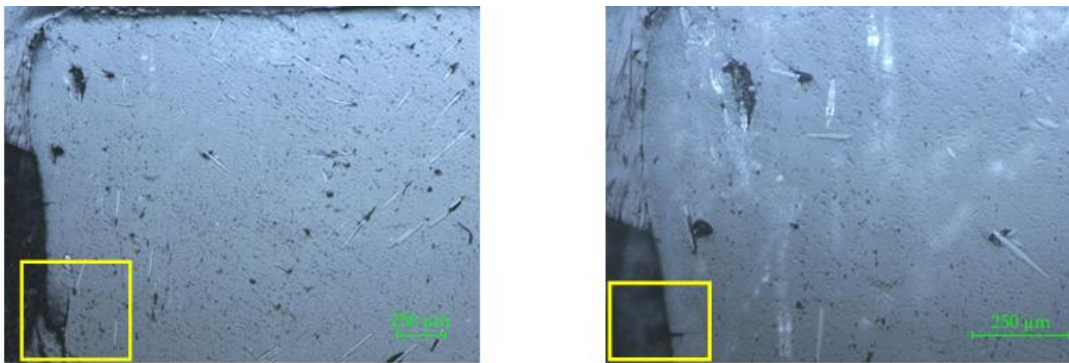


Fig. 13. Cercetare microscopică a secțiunii longitudinale a conectorului imprimat 3D cu PLA cu inserții de fibre de sticlă.

În Fig. 13 sunt vizibile mai multe defecte, respectiv fisuri în zona perimetrului și smulgeri ale elementelor de armare acolo unde au existat aglomerări ale acestora.

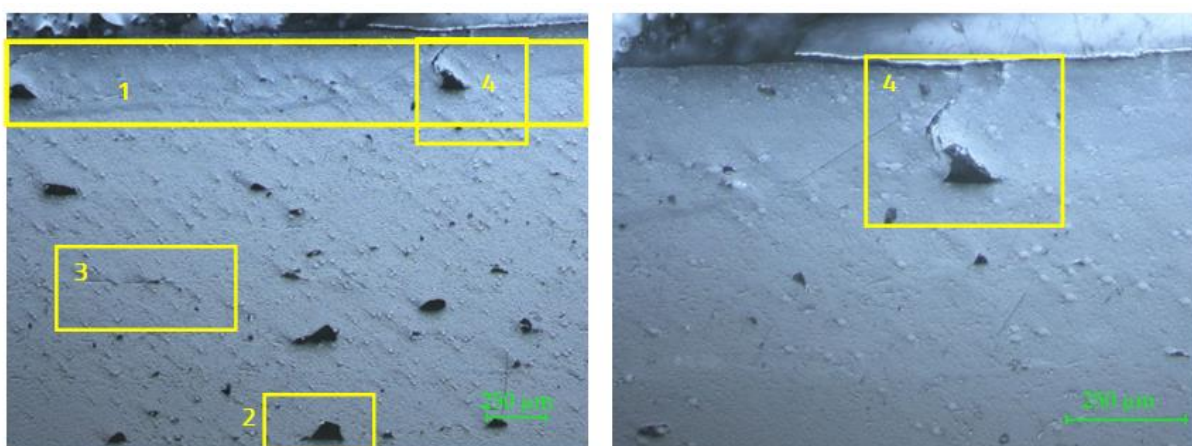


Fig. 14. Cercetare microscopică asupra secțiunii transversale a conectorului imprimat 3D cu PLA cu inserții din fibră de sticlă

Microscopia secțiunii transversale a conectorului imprimat 3D cu PLA cu inserții din fibră de sticlă indică o serie de defecte de printare cum ar fi microfisuri, rupturi ale fibrei de armare, defecte de capăt și distribuții neuniforme ale materialului de armare în matrice.

3.4. Testarea rezistenţelor mecanice ale îmbinării de colţ „de tip L”

În prima etapă a cercetărilor experimentale legate de rezistenţele mecanice ale îmbinărilor de colţ „de tip L” s-au testat conectorii imprimaţi 3D în „poziţia 1” cu cele două metode de fabricaţie aditivă, respectiv FFF şi SLS, utilizând toate materialele de imprimare 3D propuse în cercetarea experimentală. Pentru comparaţie, se testează în paralel şi o îmbinare „de tip L” clasică, cu cep propriu şi scobitură. Specia utilizată pentru construcţia asamblărilor este lemnul de larice.

Rezultatele comparative ale acestor teste mecanice stau la baza selectării materialelor de imprimare 3D care îndeplinesc condiţia de rezistenţă mecanică şi cu care se continuă cercetarea experimentală.

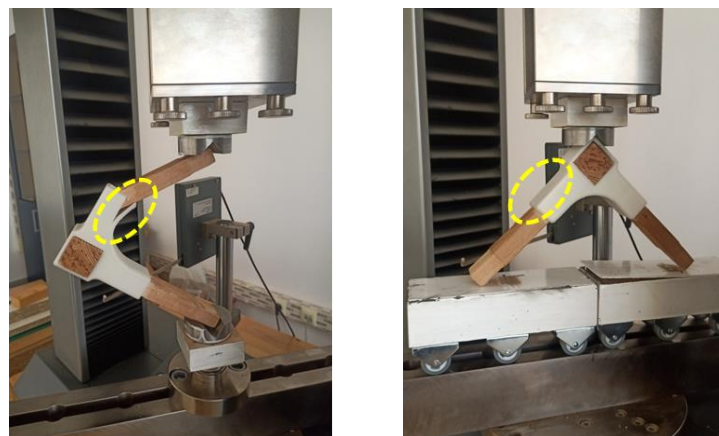
3.4.1. Consideraţii teoretice

Epruvetele de asamblare de colţ (de tip L) au fost testate atât la compresiune, cât şi la tracţiune, utilizând modelele descrise în literatura de specialitate ([Yerlikaya, 2013](#); [Ayrimis et al., 2020](#); [Kasal et al., 2023](#)).

Testele au fost efectuate pe maşina de testare universală *Zwick/Roell Z010* (Ulm, Germania) pentru câte cinci epruvete din fiecare categorie, cu o viteză de 7 mm/min.

3.4.2. Testarea mecanică a conectorilor imprimaţi 3D în poziţia 1 (orizontală) de aşezare pe platformă

Comportamentul epruvetelor cu conector, ilustrat în Fig. 15.a pentru solicitarea la tracţiune şi în Fig. 15.b pentru cea de compresiune, este una comună acestor tipuri de epruvete. În general, fisurile şi defectele de rupere au apărut în conector, de-a lungul muchiei la care forţa de împingere exercitată de piesa din lemn din interior către exterior este maximă.



a.

b.

Fig. 15. Defectele specifice de rupere ale conectorului la îmbinarea de colţ „de tip L” sub solicitarea de: a. tracţiune; b. compresiune (Nicolau et al., 2022).

3.4.3. Investigația microscopică a defectelor de rupere a conectorilor imprimați 3D în poziția 1 (orizontală)

Pentru investigarea la nivel microscopic au fost selectate acele defecte reprezentative pentru fiecare tip de material utilizat la imprimarea 3D, mai puțin cel de PLA compozit cu inserții de fibre de sticlă, pentru care s-a luat decizia de a fi exclus din cercetările experimentale următoare, datorită rezultatelor slabe obținute la testarea rezistențelor mecanice la tracțiune și compresiune pe direcție diagonală. Au fost utilizate două puteri de mărire (50x, 100x), iar analiza microscopică s-a realizat atât pe secțiunile longitudinale, cât și pe cele transversale ale pieselor.

Conector din PLA alb – poziția 1 de imprimare 3D

În Fig. 16.a se observă că ruperea materialului solicitat la compresiune s-a produs exclusiv sub forma unei delaminări între două straturi alăturate.

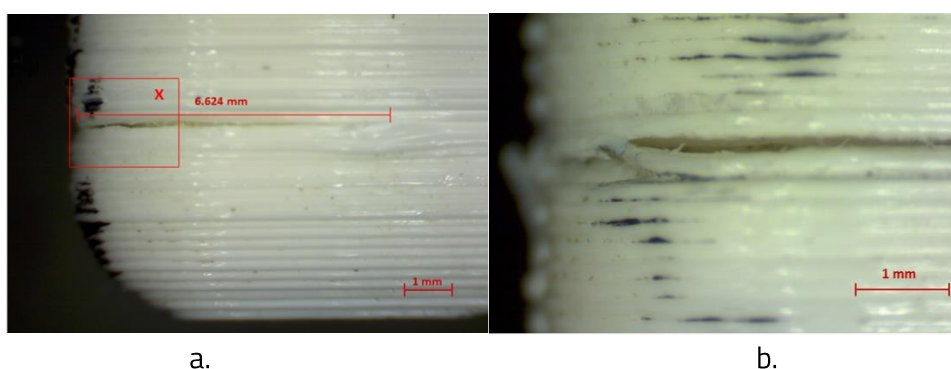


Fig. 4. Delaminare a conectorului imprimat 3D din PLA alb (poziția 1) solicitat la: a. compresiune; b. tracțiune.

În Fig. 16.b sunt redată defectele apărute după solicitarea la tracțiune în poziția 1, caracterizate prin delaminare între două straturi adiacente.

Conector din PLA negru – poziția 1 de imprimare 3D

În Fig. 17 sunt prezentate defectele de rupere apărute după solicitarea la compresiune a conectorului din PLA negru. Ruptura s-a extins pe mai multe straturi de depunere. Explicația ar putea fi faptul că adeziunea straturilor în acest caz este mai bună decât în cazul fabricației cu PLA alb. Același tip de defect de rupere se observă și în secțiunea transversală, de data aceasta în perimetrul piesei imprimate 3D (Fig. 17 b), cu mențiunea că depunerile de filament pe piesă nu au avut de suferit.

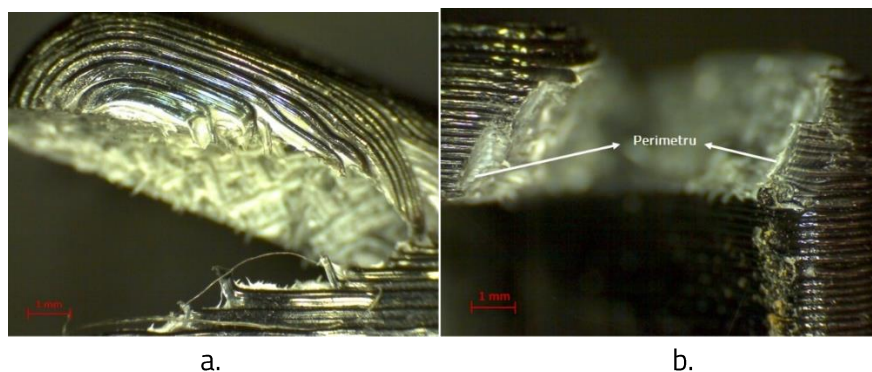


Fig. 5. Delaminări ale conectorului imprimat 3D din PLA negru (poziția 1) solicitat la compresiune secțiune longitudinală (a), secțiune transversală (b)

În Fig. 18.a se poate observa perimetrul și stratul de depunere a materialului, precum și dispunerea la 90° a celor două straturi succesive. Foarte frecvent, în cazul pieselor imprimate 3D cu PLA negru au apărut defecte de rupere în zona perimetrului. În Fig. 18.b s-a evidențiat secționarea efectivă a straturilor de depunere a materialului până la golul în care a fost introdusă piesa din lemn (legătura), materialul cedând practic sub acțiunea forței exercitate de muchia piesei din lemn.

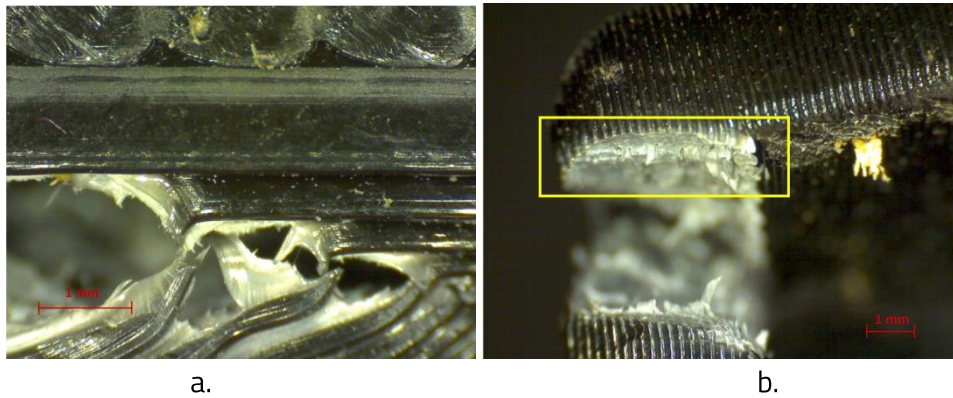


Fig. 6. Ruperi ale conectorului imprimat 3D din PLA negru (poziția 1) solicitat la tracțiune, secțiune longitudinală (a), secțiune transversală (b)

Conector din DuraForm PA Plastic – poziția 1 de imprimare 3D

Imaginile din Fig. 19.a și Fig. 19.b ilustrează modul general de rupere a pieselor în direcție longitudinală, respectiv transversală, foarte asemănătoare pe ambele secțiuni.

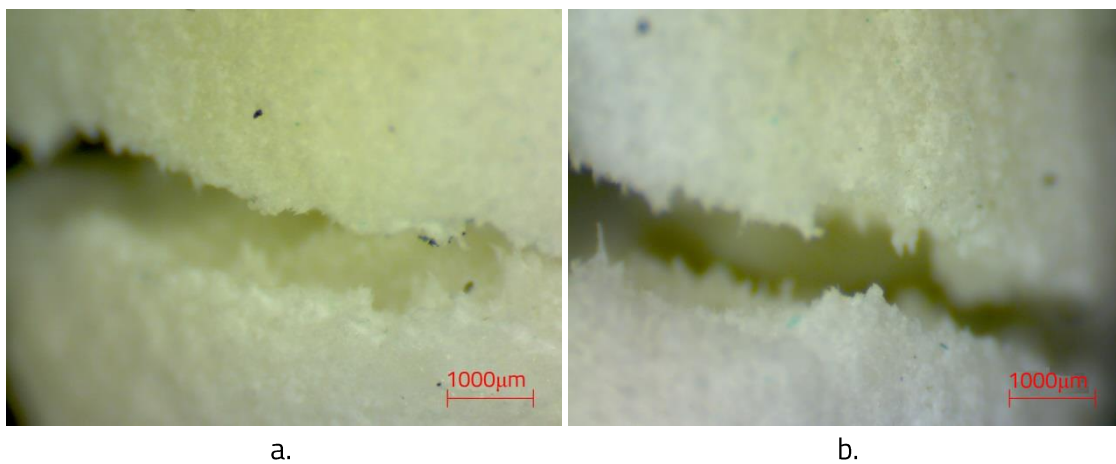


Fig. 7. Defecte ale conectorului imprimat prin metoda SLS cu DuraForm PA Plastic în poziția 1 încercarea la compresiune, secțiune longitudinală (a), încercarea la compresiune, secțiune transversală (b)

3.4.4. Testarea mecanică a conectorilor imprimați 3D în poziția 2 (verticală) de așezare pe platforma imprimantei

Câte cincisprezece conectori imprimați 3D în poziția 2 (poziție verticală, cu material suport), din filamente de PLA alb și PLA negru, obținuți prin metoda FFF de fabricare aditivă și din pulbere DuraForm PA Plastic cu metoda SLS de fabricație aditivă au fost utilizați pentru confecționarea îmbinărilor de colț „de tip L” pentru elementele din lemn masiv de larice.

În urma efectuării testelor, s-au înregistrat valorile medii ale forțelor maxime de rupere la tracțiune și compresiune ale îmbinărilor investigate și s-au calculat cu relațiile (1) și (2) valorile medii ale momentelor de încovoiere pentru cele două testări.

3.4.5. Investigația microscopică a defectelor de rupere a conectorilor imprimați 3D în poziția 2 (verticală)

Conector din PLA alb– poziția 2 de imprimare 3D

În Fig. 20 sunt prezentate imagini microscopice cu defecte de rupere reprezentative pentru conectorii din PLA alb supuși testului de tracțiune pe diagonală în îmbinarea de colț „de tip L”, cu puteri de mărire de 86x.

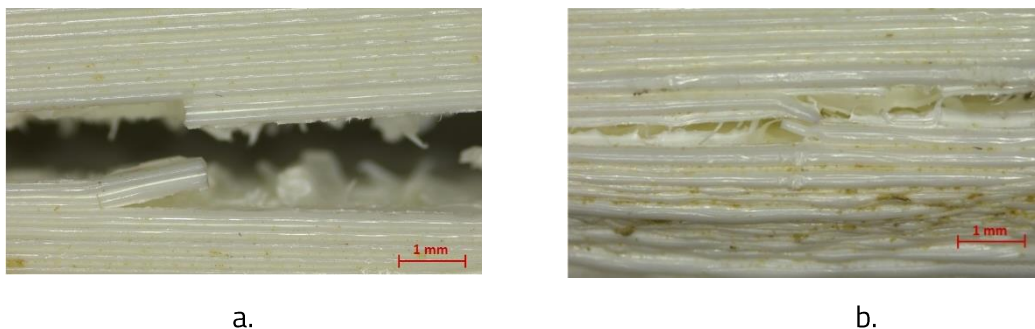


Fig. 20. Defectele de rupere ale conectorilor din PLA alb (poziția 2) în urma solicitărilor mecanice la: a. tracțiune; b. compresiune

Conector din PLA negru– poziția 2 de imprimare 3D

Reprezentarea la nivel microscopic a defectelor de rupere parțială apărute în conectorii din PLA negru în urma testărilor mecanice este evidențiată în Fig. 21.a și Fig. 21.b pentru testul de tracțiune și compresiune. Aceste imagini au fost obținute cu putere de mărire de 86x.

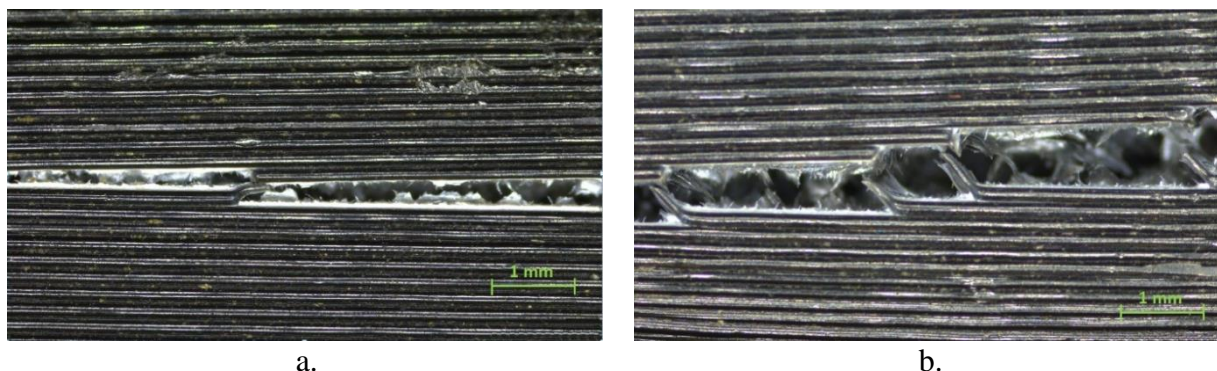


Fig.21. Investigarea microscopică a defectelor de rupere parțială apărute în conectorul imprimat 3D în urma solicitărilor mecanice: a. la testului de tracțiune; b. detaliul X; c. la testului de compresiune; d. detaliul Y .

Analiza defectelor de rupere parțială de material din imaginile microscopice relevă un comportament interesant al PLA-ului negru și anume faptul că, deși piesele au prezentat delaminări între mai multe straturi alăturate, totuși s-au păstrat anumite legături de material între acestea, care au menținut rezistența piesei, lucru care a permis atingerea unor valori mai mari ale forțelor maxime de rupere decât în celelalte cazuri studiate până acum.

Conector din DuraForm PA Plastic – poziția 2 de imprimare 3D

Imaginile din Fig. 22.a,b prezintă micrografiile defectelor de rupere ale conectorilor, considerate a fi generice, indiferent de solicitare.

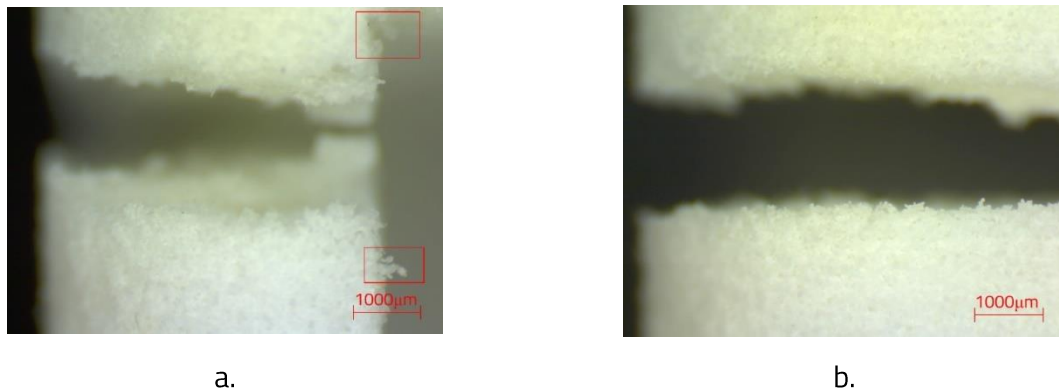


Fig.22.Defecte ale conectorului imprimat prin metoda SLS cu DuraForm PA Plastic, în poziția 2: a. încercarea la tracțiune, secțiune longitudinală; b. încercarea la tracțiune, secțiune transversală

Conectorii imprimați 3D prin metoda SLS de fabricație aditivă au dovedit un caracter casant. Ruperea conectorilor s-a produs la forțe mici comparativ cu a celor la care s-au utilizat ca materiale PLA alb și PLA negru.

Performanța scăzută a acestui material în condițiile de imprimare utilizate în acest studiu nu îl recomandă pentru continuarea cercetărilor pe această direcție, ci constituie o direcție viitoare de cercetare.

3.4.6. Selectarea metodei, materialului și poziției de imprimare 3D pentru conectorul proiectat, pe baza rezultatelor cercetării experimentale

Criteriul de selecție a materialului și a metodei de imprimare 3D a fost acela de a compara performanța mecanică a conectorilor într-o îmbinare de colț „de tip L” supusă solicitărilor de tracțiune și compresiune.

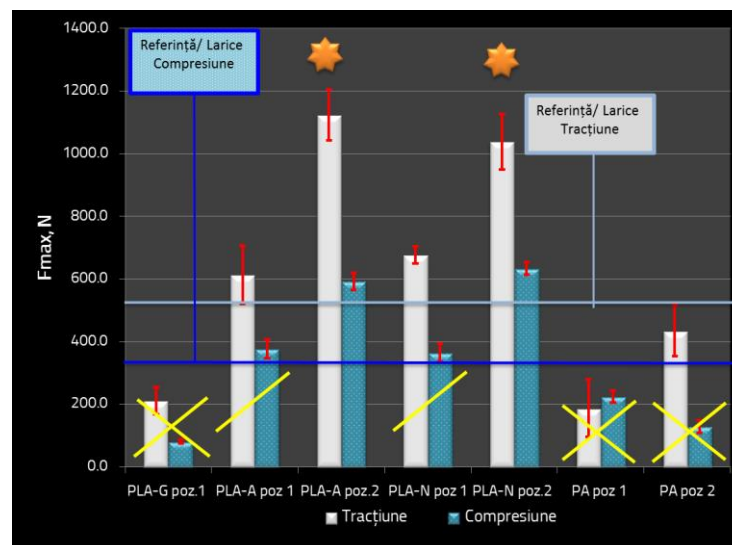


Fig. 8. Diagrama comparativă a forțelor maxime de rupere la solicitările de tracțiune și compresiune pe diagonală pentru îmbinările de colț „de tip L” cu conectori imprimați 3D.

În acest scop s-au utilizat două metode de fabricație aditivă și patru materiale pentru imprimarea 3D a conectorului, două poziții de imprimare 3D și o singură specie lemnoasă pentru piesele din lemn îmbinate, respectiv lemnul de larice.

Din analiza graficului prezentat în Fig. 23 se poate observa că au fost eliminate pe criteriul performanțelor mecanice din punct de vedere al forței F_{max} următoarele materiale de imprimare 3D: PLA-G (utilizat ca filament cu metoda FFF) și PA (poziția 1 și 2 de imprimare 3D).

Pentru continuarea cercetărilor experimentale au rămas pentru selectarea finală cele două filamente de PLA (alb și negru), a căror performanță mecanică este favorizată de poziția 2 de imprimare 3D.

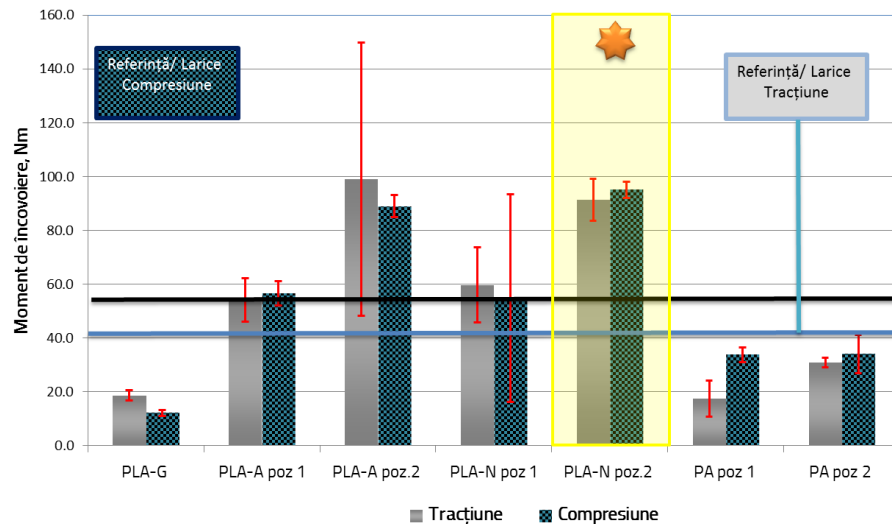


Fig. 24. Diagrama comparativă a momentelor de încovoiere la solicitările de tracțiune și compresiune pe diagonală pentru îmbinările de colț „de tip L” cu conectori imprimați 3D.

Analizând și graficul comparativ din Fig. 24 pentru momentele de încovoiere la tracțiune și compresiune pe diagonală, se constată că PLA alb se comportă mai bine la testele de tracțiune, în timp ce PLA negru se comportă mai bine la testele de compresiune, iar valorile momentelor de încovoiere sunt destul de apropiate.

S-a selectat în final pentru continuarea investigațiilor filamentul de PLA negru, care a dovedit o aderență mai bună la depunerea straturilor în procesul de fabricație aditivă.

3.5. Concluzii privind selectarea metodei, materialului și a poziției de imprimare 3D a conectorului

- Materialul din compoziția filamentelor din PLA alb și PLA negru este omogen, atât în secțiune longitudinală, cât și în secțiune transversală și nu se observă defecte în structura filamentului de tipul golurilor, fisurilor, aglomerărilor de material.
- Investigația microscopică a filamentului de PLA alb armat cu fibră de sticlă a arătat distribuția aleatorie a fibrei de sticlă în matrice, cu zone în care prezența armăturii nu a fost detectată și zone în care fasciculele de fibră de sticlă au aglomerat matricea, în special în miez, unde aderența dintre aceste fibre și matricea au fost sărace.

- Pulberea de poliamidă *DuraForm PA Plastic* utilizată la imprimarea 3D a conectorului prin metoda SLS nu a conferit acestuia rezistenţa mecanică necesară continuării cercetărilor experimentale. Investigaţiile microscopice au arătat că sinterizarea particulelor în anumite zone este insuficientă şi aderenţa straturilor depuse prin procesul de fabricaţie aditivă este slabă, motiv pentru care forţele maxime la care au cedat conectorii au avut valori foarte joase. O soluţie de îmbunătăţire a rezistenţelor mecanice ar putea fi optimizarea parametrilor de printare, dar acest subiect necesită o serie de teste şi încercări şi poate constitui o direcţie viitoare de cercetare.
- Ruptura predominantă în cazul conectorului din PLA negru este cea caracteristică materialelor casante (fragile) şi nu prezintă o delaminare continuă între două straturi adiacente, ci este mai degrabă o spargere (fracturare) a materialului, dar la forţe de rupere mari, ceea ce arată că este solicitată rezistenţa materialului şi nu aderenţa între straturile depuse în timpul imprimării 3D.
- Comparativ cu rezultatele testelor efectuate pe îmbinările clasice de tip cep propriu şi scobitură între elemente din lemn masiv de larice, valorile medii ale forţelor maxime şi ale momentelor de încovoiere pentru îmbinările cu conectori din PLA cu fibră de sticlă şi din poliamidă (PA) sunt mult mai mici, astfel încât aceste materiale nu reprezintă în momentul de faţă o alternativă viabilă pentru înlocuirea îmbinărilor clasice ale elementelor de scaun.
- Imprimarea conectorilor în poziţie verticală s-a dovedit soluţia cea mai bună pentru fabricarea unor conectori cu rezistenţe mai buna la testele mecanice ale îmbinărilor.

CAPITOLUL 4. TESTAREA PERFORMANŢEI MECANICE A ÎMBINĂRII DE COLŢ „DE TIP L” CU CONECTOR DIN PLA NEGRU ŞI ELEMENTE DIN LEMN DE FAG

4.1 Testarea mecanică a îmbinării clasice de tip cep propriu–scobitură din lemn de fag

Asamblarea cu îmbinarea de tip cep propriu–scobitură este considerată de referinţă în cercetarea experimentală din această etapă, pentru comparaţie cu performanţele asamblării cu conectorul imprimat 3D din filament de PLA negru, prin metoda FFF de fabricaţie aditivă, în poziţia 2 de printare, selectat pentru continuarea cercetărilor experimentale.

Componentele din lemn (asimilate cu piciorul şi legăturile/ elementele cadrului scaunului) au fost realizate din lemn de fag (*Fagus sylvatica* L.), cu umiditatea de 8,5% şi densitatea, determinată prin calcul, de 698 kg/m³. Îmbinarea de colţ „de tip L” a respectat dimensiunile şi construcţia îmbinării clasice din lemn de larice, utilizată în cercetarea preliminară.

Testele de tracţiune şi compresiune pe diagonală pentru îmbinările de colţ au fost efectuate pe maşina de testare universală *Zwick/Roell Z010* (Ulm, Germania) pentru câte şase probe din fiecare categorie. (Fig. 25).

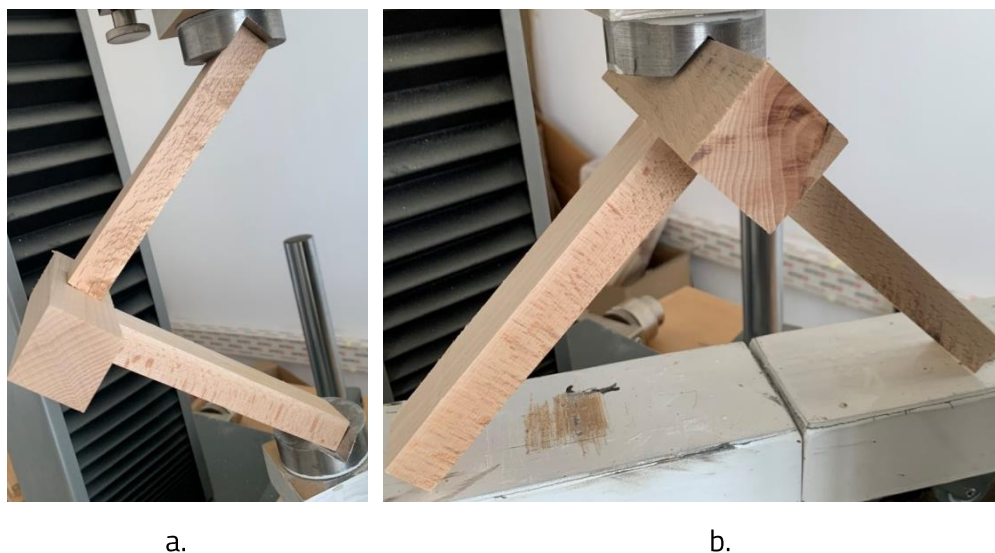


Fig. 25. Testarea îmbinărilor de tip cep propriu–scobitură din lemn de fag la: a. solicitarea de compresiune; b. solicitarea de tracţiune.

Ruptura predominantă prin desprinderea longitudinală a fibrei este caracteristică lemnului de larice. Atât în cazul pieselor supuse testului de compresiune, cât şi în cazul celor solicitate la tracţiune, la lemnul de larice ruptura s-a propagat cu predilecţie longitudinal pe segmentul de picior, ceea ce dovedeşte că, aşa cum era de aşteptat, lemnul de fag este mai rezistent la cele două solicitări, iar ruperile s-au produs preponderent în secţiunea transversală a cepului.

4.2. Testarea îmbinărilor elementelor din lemn de fag cu conectori din PLA negru – varianta 1 (iniţială)

Comparativ cu rezultatele obţinute de probele de referinţă din lemn de larice şi lemn de fag (Fig. 26), conectorul proiectat în prima variantă a cedat mult mai repede solicitărilor de tracţiune şi compresiune.

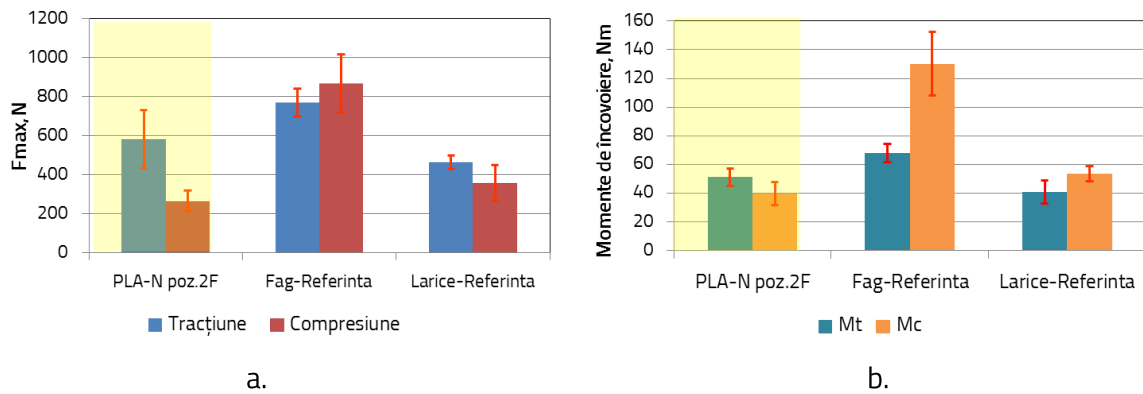


Fig. 26. Rezultatele comparative ale performanțelor mecanice între probele cu conector din PLA negru în poziția 2 de imprimare 3D cu lemn de fag (PLA-N poz.2F) și probele de referință din lemn de fag și lemn de larice.

Având în vedere rezultatele slabe obținute de conectorul proiectat în varianta 1 la solicitările mecanice, s-a considerat necesară continuarea cercetărilor cu modificarea conectorului, cu îngroșarea pereților în zonele de contact cu legăturile, acolo unde s-a observat solicitarea maximă a conectorilor și ruperea acestora, în special la solicitarea de compresiune (Fig. 26.b).

4.3. Analiza cu element finit (FEA) a îmbinării cu conector din PLA negru și lemn de fag (varianta inițială) la testul de compresiune

Analiza cu element finit, dezvoltată cu ajutorul software-ului dezvoltat de *Siemens Software*, a avut drept scop studiul câmpului de deplasări în timpul solicitării la compresiune (cu rezultatele cele mai slabe ale îmbinării cu conector din PLA negru), tensiunile și deformațiile specifice în conector.

4.3.1. Analiza cu element finit la solicitarea de compresiune pentru îmbinările elementelor din lemn de fag cu conectori din PLA negru – varianta 1 (inițială)

Modelul de analiză FEA a implicat mai multe etape:

- Transferarea modelului CAD realizat în soft-ul Solidworks către Simcenter simulation software (din suita Siemens PLM Software) pentru modelul CAE și discretizare (Fig 27. a);
- Definirea conexiunilor între conector și cele trei elemente din lemn masiv a presupus stabilirea unor legături rigide între segmentul de picior și conector.
- Stabilirea indicilor de elasticitate pentru lemnul de fag și PLA negru, după cum urmează:

Pentru lemnul de fag s-au utilizat indicii de elasticitate din literatura de specialitate ([Curtu și Ghelmeziu 1984](#)), iar pentru PLA negru, cei din fișa tehnică.

În FEA s-a aplicat rafinarea discretizării zonelor din modelul conectorului considerate critice, în care s-a urmărit o precizie mai mare, în timp ce s-a păstrat o discretizare ceva mai grosieră în zonele considerate a fi mai puțin critice (Fig. 27, Fig. 28).

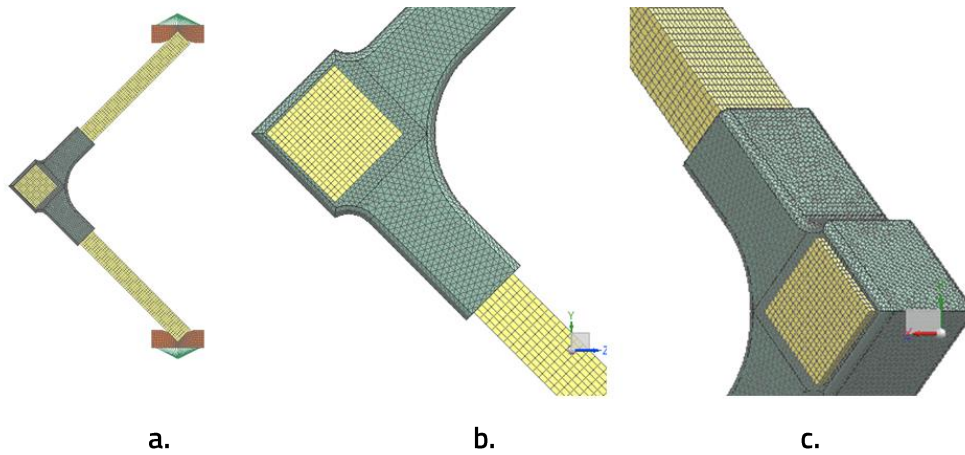


Fig. 27. Construirea modelului pentru FEA la solicitarea de compresie și discretizarea: a. modelul transferat către Simcenter simulation software; b. discretizarea pe componentele ansamblului și stabilirea axelor OX și OZ; c. discretizarea mai complexă a conectorului și stabilirea axei OX.

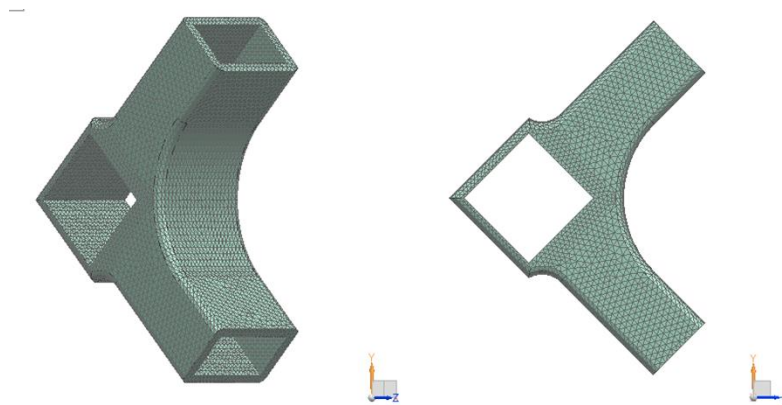


Fig. 28. Modul de discretizare diferențiată a conectorului, în funcție de zonele considerate a fi critice.

Rezultatele analizei cu element finit sunt prezentate în Fig. 29, Fig. 30 și Fig. 31 pentru vizualizarea deplasărilor în ansamblul dintre conector și elementele din lemn masiv de fag, pentru mărimea tensiunilor și respectiv a deformațiilor din conector.

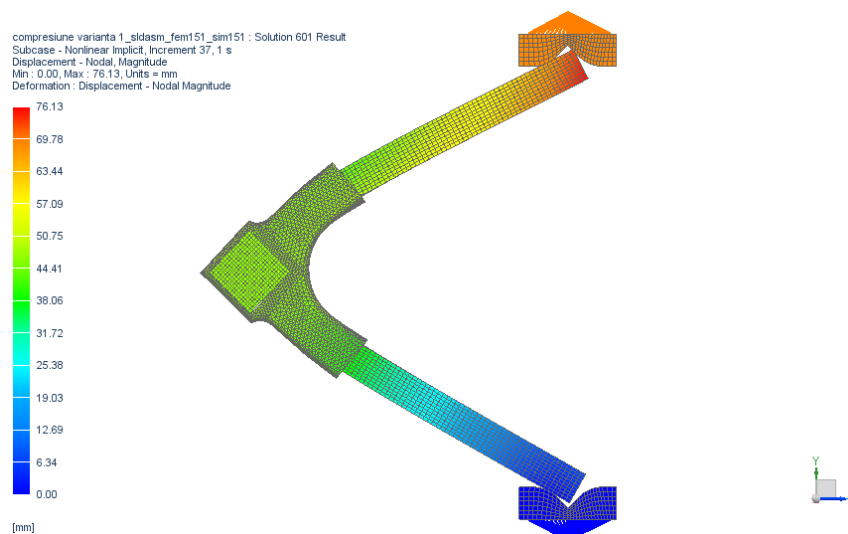


Fig. 29. Rezultatul câmpului de deplasări determinat cu FEA pentru solicitarea la compresie.

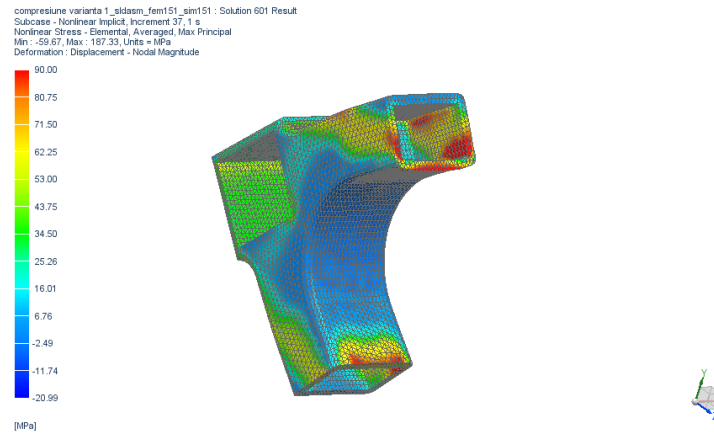


Fig. 30. Rezultatul tensiunilor din conector determinate cu FEA pentru solicitarea la compresie.

Deformațiile rezultate în urma analizei cu element finit și ilustrate în Fig. 31 indică zonele de colț din partea curbată a conectorului.

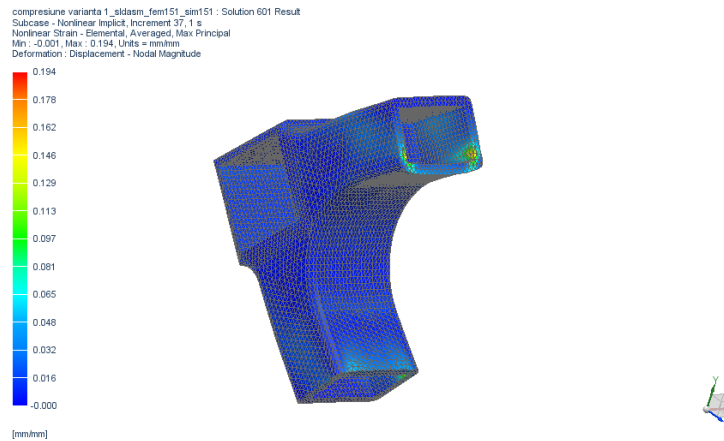


Fig. 31. Rezultatul deformațiilor specifice în conector, conform FEA, pentru solicitarea la compresie

4.3.2. Analiza cu element finit la solicitarea de tracțiune pentru îmbinările elementelor din lemn de fag cu conectori din PLA negru – varianta 1 (inițială)

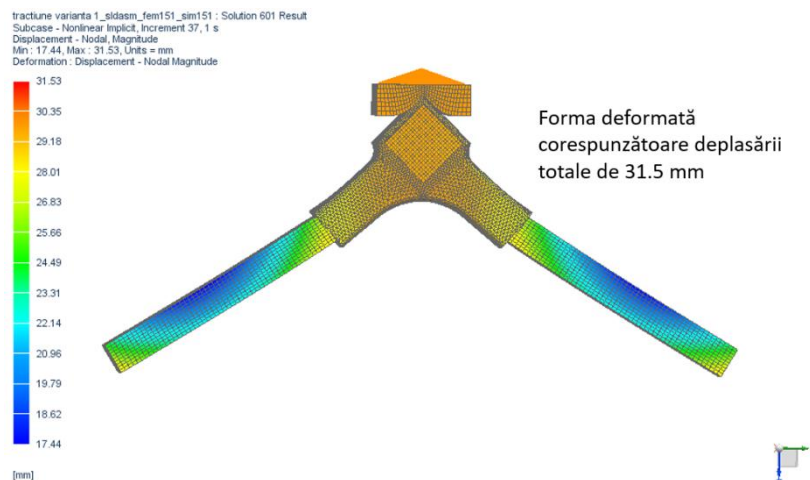


Fig. 32. Rezultatul câmpului de deplasări determinat cu FEA pentru solicitarea la tracțiune.

Câmpul deplasărilor în ansamblul dintre conector și elementele din lemn masiv de fag se poate vizualiza în imaginea din Fig. 32. Deplasările maxime, corespunzătoare zonei în care acționează forța ajung la valoarea aproximativă de 30 mm. Se remarcă și deplasările legăturilor în zona de îmbinare cu conectorul, evaluate la aprox. 28 mm, ceea ce simulează tendința de ieșire a legăturii din conector, așa cum s-a întâmplat și în testul experimental real.

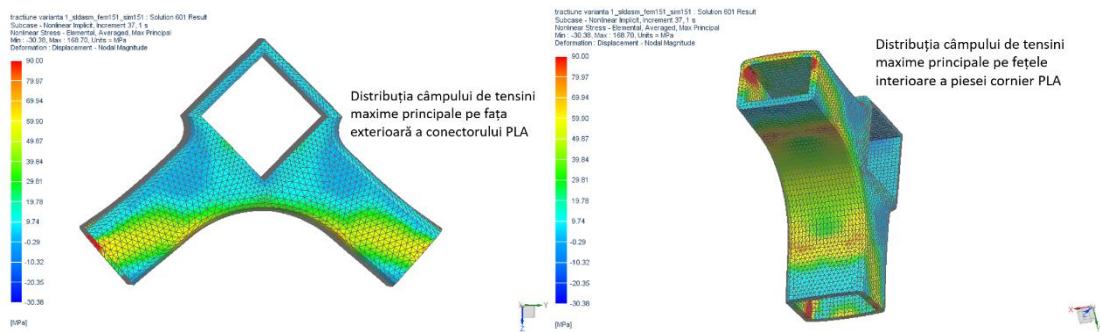


Fig. 33. Rezultatul tensiunilor din conector determinate cu FEA, pentru solicitarea la tracțiune.

Rezultatul tensiunilor din conector, prezentate în Fig. 33, indică valorile maxime pe muchia de la marginea conectorului, în partea superioară, acolo unde piesele din lemn au tendința de a ieși din îmbinare. În acea zonă tensiunile ajung la valoarea maximă de 90 MPa.

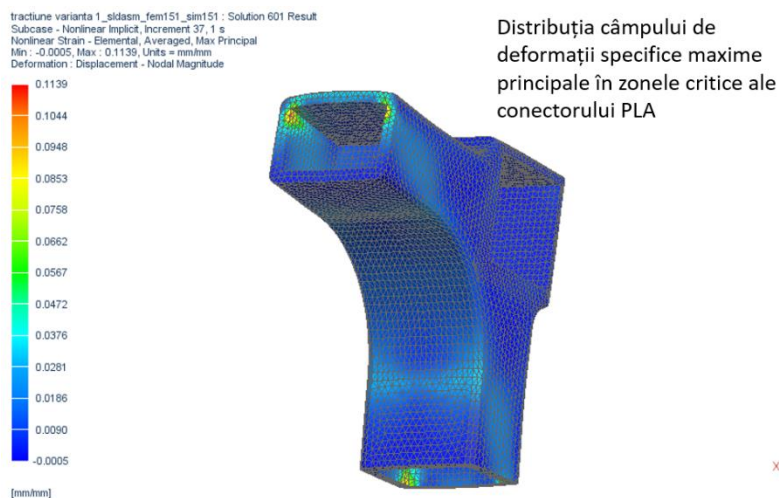


Fig.34. Rezultatul deformațiilor specifice în conector, conform FEA, pentru solicitarea de tracțiune

Deformațiile rezultate în urma analizei cu element finit și ilustrate în Fig. 34 indică zonele de colț ale conectorului.

4.4. Concluzii privind testarea asamblării dintre elementele din lemn de fag și conectorul din PLA negru, varianta 1 (inițială)

- Conectorul din PLA negru imprimat 3D în poziția 2 (verticală) a înregistrat valori mai mici ale forțelor maxime de rupere și ale momentelor de încovoiere, atât la tracțiune, cât și la compresiune, comparativ cu probele de referință din lemn de fag, situându-se la momentul e compresiune chiar sub pragul atind de asamblarea de referință din lemn de larice.

- Performanța slabă a îmbinării poate fi explicată prin faptul că lemnul de fag, fiind un lemn cu densitate mai mare, acționează mai puternic asupra pereților conectorului decât lemnul de larice, producând ruperea legăturilor între straturile de depunere cu o forță mai mare și deteriorarea mai serioasă a piesei imprimată 3D .
- Analiza cu element finit (FEA) a confirmat zonele cu solicitare maximă, care au cedat prin rupere la testele mecanice efectuate.
- Rezultatele obținute prin simularea cu FEA se suprapun destul de bine peste rezultatele modelului real. Valorile deplasărilor la compresiune și tracțiune se suprapun peste cele obținute la testele efectuate experimental.
- Datorită performanțelor scăzute ale conectorului proiectat inițial, s-a considerat necesară continuarea cercetărilor cu modificarea conectorului. S-a optat pentru îngroșarea pereților conectorului în zonele de contact cu legăturile, acolo unde FEA a arătat că tensiunile sunt maxime (până la 90 MPa) și unde s-a produs ruperea acestora.

CAPITOLUL 5. CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA MODIFICĂRII CONECTORULUI ASUPRA PERFORMANȚELOR MECANICE ALE ÎMBINĂRII DE COLȚ CU ELEMENTE DIN LEMN DE FAG

Avându-se în vedere faptul că la testele de tracțiune și compresiune pe diagonală conectorul s-a dovedit a fi partea cea mai slabă din ansamblul testat, pentru îmbunătățirea proprietăților mecanice ale îmbinării de colț „de tip L” s-a luat decizia remodelării conectorului cu modificarea grosimii zonei de îmbinare a conectorului cu legăturile din lemn, acolo unde s-au constatat tensiunile maxime și defectele de rupere în urma desfășurării testelor mecanice.

5.1. Prezentarea propunerilor noi de modele experimentale de conectori

Pornindu-se de la varianta inițială, denumită în continuare în cercetarea experimentală „Varianta 1”, s-au elaborat alte două variante constructive diferite pentru conector (Fig. 35). Materialul de imprimare 3D rămâne în continuare cel selectat în urma cercetării preliminare, respectiv filamentul de PLA negru, poziționat vertical în imprimantă (în poziția 2).

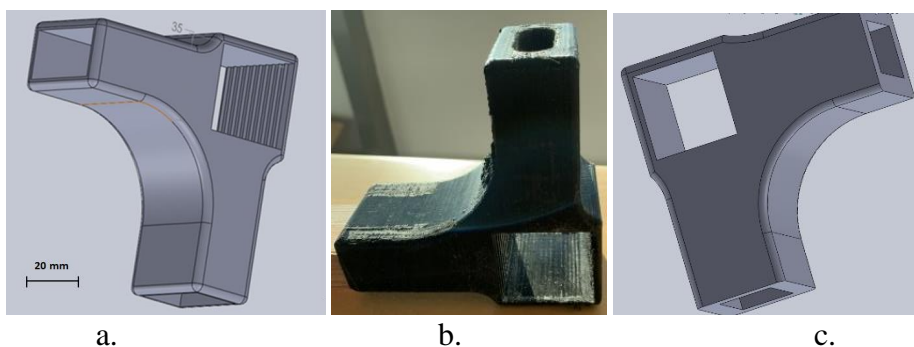


Fig. 35. Variante ale conectorului: a. Varianta 1; b. Varianta 2; c. Varianta 3

Adâncimea de asamblare a conectorului în varianta a 2-a (Fig. 35.b) rămâne egală cu cea a conectorului inițial (varianta 1). În schimb, rotunjirea conturului scobiturii are drept scop eliminarea concentratorilor de tensiune de la muchiile ascuțite ale golului. Legăturile vor necesita o prelucrare suplimentară față de varianta 1 și anume prelucrarea cepului.

În varianta 3 din Fig. 35.c se utilizează aceleași elemente din lemn masiv ca și în varianta 1, fără a mai fi necesară vreo prelucrare suplimentară a lemnului. Modelul 3 de conector se modifică față de varianta 1 prin grosimea pereților în zona de îmbinare cu legăturile, dar și cu piciorul, astfel încât grosimea peretelui la îmbinarea cu legăturile crește de la 3 mm la 8 mm, iar în zona de îmbinare cu piciorul de la 3 mm la 5 mm.

5.2. Analiza cu element finit (FEA) pentru îmbinarea cu conector în varianta 3 de proiectare la solicitarea de compresiune a îmbinării

În varianta a 3-a de proiectare a conectorului s-a păstrat forma inițială a acestuia, dar s-au îngroșat pereții conectorului, ceea ce înseamnă că acei concentratori de tensiuni de la muchiile conectorului pot continua să producă defecte de rupere în acele zone. Pentru a investiga magnitudinea acestor tensiuni, s-a repetat analiza FEA pentru noul model. S-a observat o micșorarea zonelor cu tensiuni maxime, dar

și a deformațiilor, ceea ce ar trebui să aibă ca rezultat o comportare mai bună a acestui conector la solicitarea de compresiune a îmbinării.

5.3. Analiza cu element finit (FEA) pentru îmbinarea cu conector în varianta 3 de proiectare la solicitarea de tracțiune a îmbinării

În urma analizei cu element finit la tracțiune pentru îmbinarea cu conector în varianta a 3-a de proiectare, s-a constatat micșorarea zonelor cu tensiuni maxime, dar și a deformațiilor în conector, astfel că se așteaptă o comportare mai bună a acestuia la solicitarea de tracțiune a îmbinării.

5.4. Testarea mecanică a îmbinărilor „de tip L” între elementele din lemn de fag și conectorii în variantele de proiectare 2 și 3

Testele de tracțiune și compresiune pe diagonală pentru asamblările cu noii conectori s-au desfășurat la aceeași mașină de testare universală Zwick/Roell Z010 (Ulm, Germania) pentru câte șase mostre la fiecare tip de conector..

Comparația performanțelor mecanice între asamblările elementelor din lemn de fag cu conectori imprimați în cele trei variante de proiectare și proba de referință din lemn de fag, este prezentată în diagramele din Fig. 36.a pentru forțele maxime și Fig. 36.b pentru momentele de încovoiere.

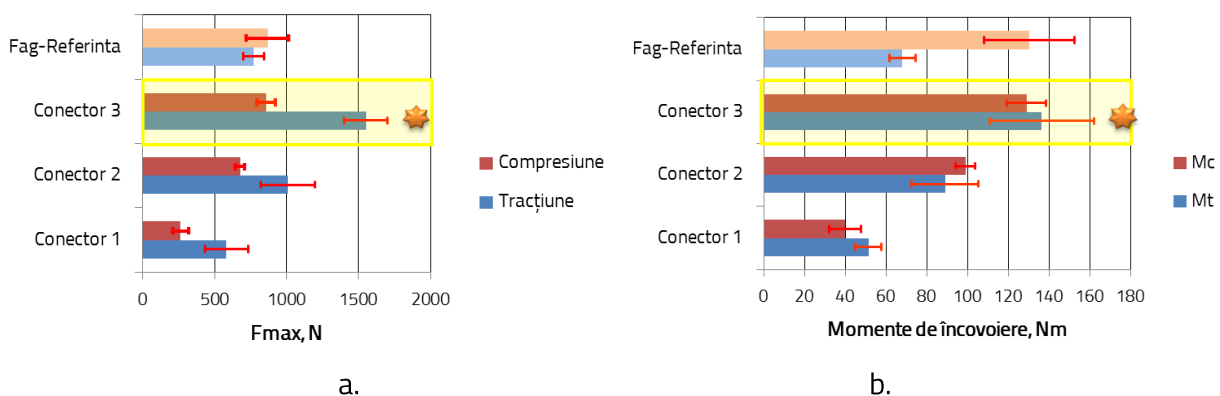


Fig. 36. Comparația performanțelor mecanice între asamblările elementelor din lemn de fag cu conectori imprimați în cele trei variante: a. forțele maxime; b. momentele de încovoiere.

Așa cum se poate observa în graficele comparative din Fig. 36, conectorul proiectat în varianta a 3-a a îndeplinit performanțele asamblării de referință din lemn de fag. La tracțiune, asamblarea cu acest tip de conector a obținut chiar valori superioare.

5.5. Concluzii referitoare la rezultatele testărilor îmbinărilor cu variantele 2 și 3 ale conectorilor

- În urma testelor de compresiune și tracțiune a îmbinărilor pentru care s-a utilizat varianta a 2-a de conector, o singură epruvetă s-a rupt în zona de solicitare maximă (zona de îmbinare a conectorului cu legătura scaunului). Zona vulnerabilă s-a dovedit a fi la îmbinarea conectorului cu segmentul de picior.
- Varianta care a îndeplinit performanțele mecanice ale îmbinării clasice de referință din lemn de fag este cea cu conectorul imprimat în varianta a 3-a. În urma solicitărilor mecanice, acest tip de conector a suferit distrugereri mai puțin grave decât cel de-al 2-lea, pentru care s-au înregistrat ruperi totale.

CAPITOLUL 6. TESTAREA SCAUNULUI REALIZAT CU CONECTORI IMPRIMAȚI 3D.

6.1. Prezentarea și realizarea produselor finale destinate testării

În Fig. 37.a este prezentat modelul 3D al scaunului cu conectori, proiectat în programul *SolidWorks 3D CAD Design*, iar în Fig. 37.b, modelul 3D al aceluiași scaun în varianta de proiectare clasică.

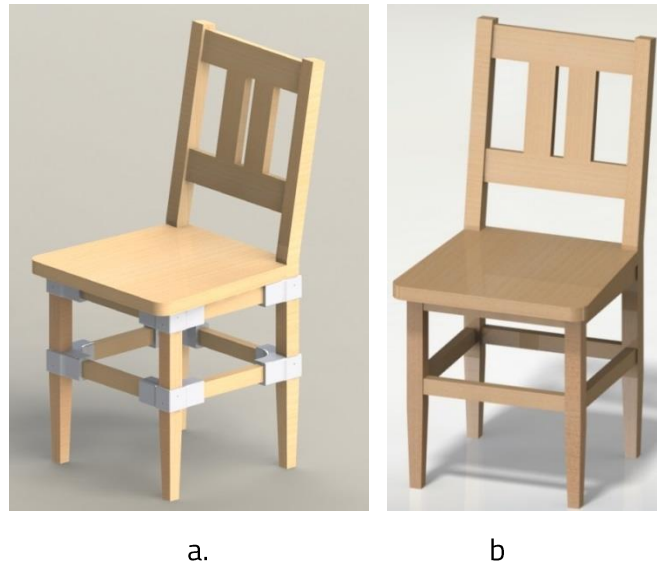


Fig. 37. Modelele 3D ale scaunelor realizate în programul de proiectare *SolidWorks 3D CAD Design Software*: a. scaunul cu conectori imprimați 3D; b. scaunul cu îmbinări clasice.

Prototipurile celor două scaune au fost realizate în cadrul Atelierului Polifuncțional al Facultății de Design de Mobilier și Inginerie a Lemnului, în câte două exemplare fiecare, pentru a fi testate astfel:

- Analiza optică a deformațiilor 3D prin metoda DIC (Digital Image Correlation) în cadrul *ICDT Braşov*, Centrul de cercetare „Simulare numerică, testări și mecanica materialelor compozite”.
- Testarea conform SR EN 1728:2012 pe standul de încercări, pentru:
 1. Rezistența șezutului și spătarului (SR EN1728:2012 pct. 6.4)
 2. Rezistența picioarelor spre partea din față (SR EN 1728:2012 pct. 6.15)
 3. Rezistența picioarelor spre partea laterală (SR EN 1728:2012 pct. 6.16)

6.2. Analiza optică a deformațiilor 3D prin metoda DIC (Digital Image Correlation)

În vederea analizei optice a deformațiilor 3D ale celor două scaune (cel cu conectori și cel de referință) s-au utilizat două echipamente din cadrul Centrului de cercetare „Simulare numerică, testări și mecanica materialelor compozite” al *ICDT Braşov*.

- Sistemul pentru analiza comportării structurilor în teste de oboseală, seria 1451, K22305 (fabricat de Walter & Bai – Switzerland).
- Sistemul pentru analiza optică a deformațiilor 3D pentru materiale și componente, prin metoda DIC (Digital Image Correlation) - *ARAMIS SRX*(ZEISS GOM Metrology).

Testarea scaunelor pentru studierea deformărilor acestora în zona îmbinărilor a fost realizată cu ajutorul unui traductor de forță GTM și a unui sistem de monitorizare a deplasării punctelor selectate în zona îmbinărilor dintre legătura și piciorul scaunului prin metoda de corelare a imaginii.

Imaginea celor două echipamente combinate este prezentată în Fig. 38.

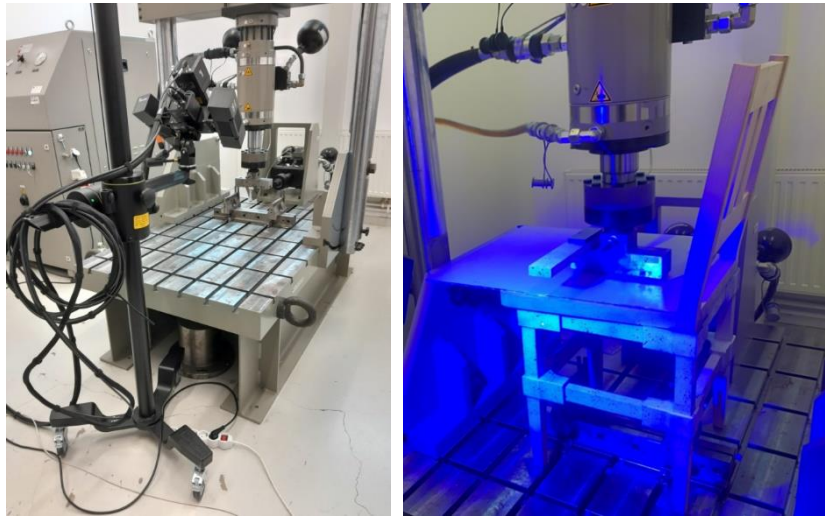


Fig. 38. Sistem pentru analiza comportării structurilor în teste de oboseală cuplat cu Sistemul pentru analiza optică a deformațiilor 3D prin metoda DIC.

Pentru studierea deplasărilor apărute în scaunele încărcate cu sarcină statică, s-a procedat la vopsirea suprafețelor monitorizate, astfel încât să se obțină un grid de puncte (markeri), prin care se vizualizează deformațiile (Fig. 39).



a.

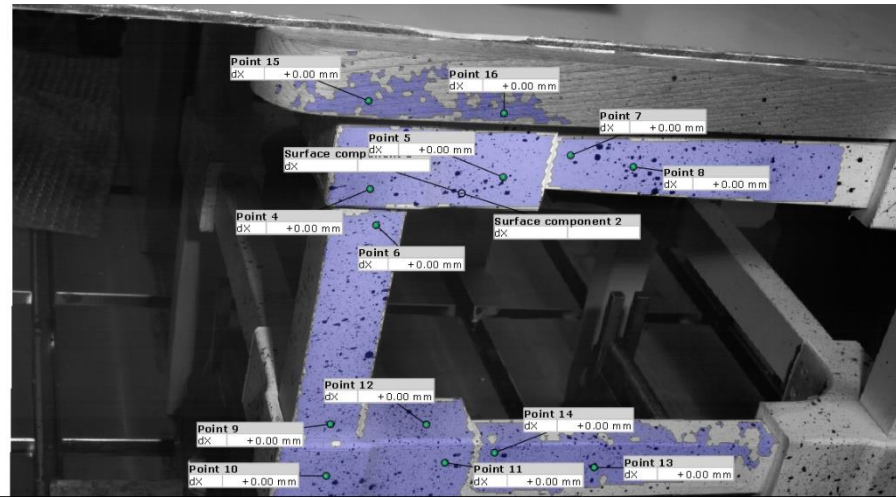
b.

Fig. 39. Pregătirea scaunelor pentru testare: a. scaunul cu conectori; b. scaunul cu îmbinări clasice.

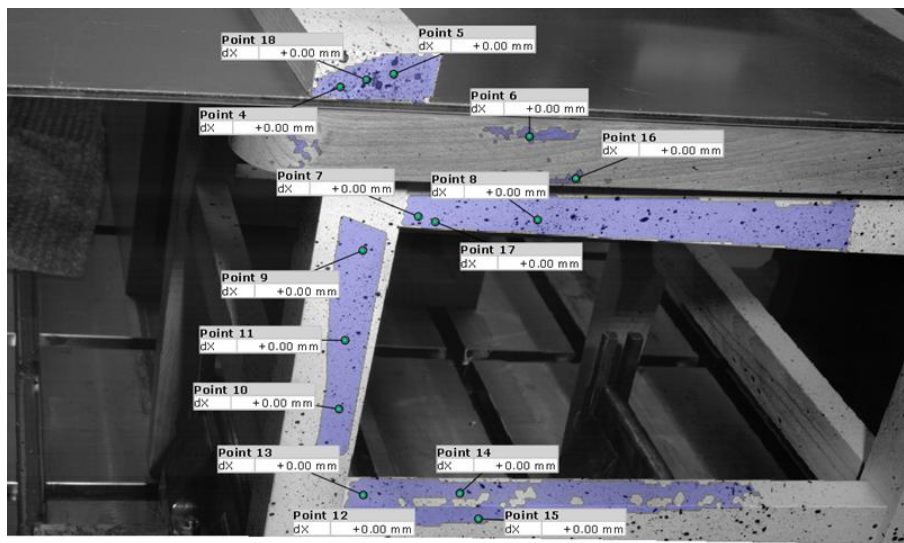
Testarea scaunelor în cadrul acestui studiu intenționează să analizeze deplasările celor 16, respectiv 18 puncte selectate (Fig. 40).

Parametrii cu care s-a desfășurat testul, au fost următorii:

- Deplasarea poansonului traductorului de forță s-a stabilit la o valoare fixă de 5 mm;
- viteza de deplasare a poansonului: 0,02 mm/s;
- realizarea a 400 de cadre cu frecvența fixă a cadrelor de 2Hz.

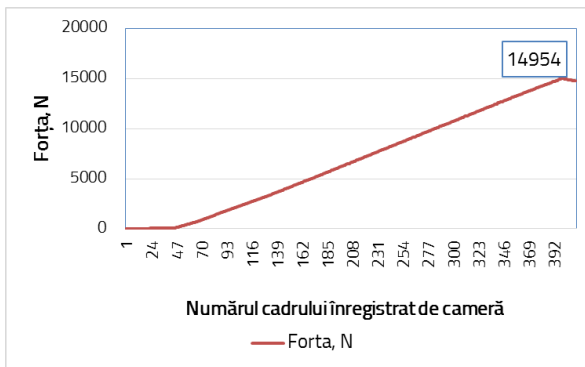


a.

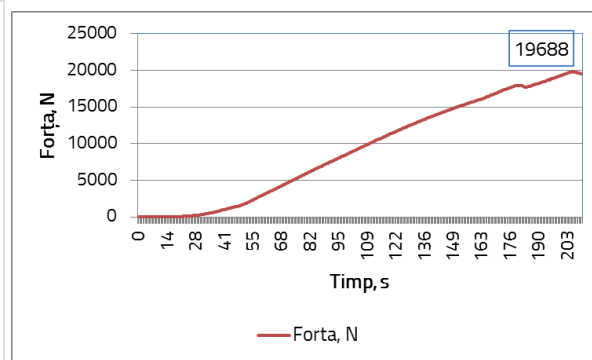


b.

Fig. 40. Punctele selectate pentru măsurarea deplasărilor: a. scaunul cu conector; b. scaunul în construcție clasică, de referință.



a.



b.

Fig. 41. Mărimea forțelor maxime suportate de cele două scaune la analiza optică a deformațiilor 3D prin metoda DIC: a. scaunul cu conectori imprimați 3D; b. scaunul de referință cu îmbinări clasice tip cep propriu și scobitură.

Aşa cum rezultă din graficul din Fig. 41.a scaunul cu conectori a rezistat la o forţă de 14 954 N, echivalenţi cu 1495 kgf, mult mai mult decât este necesar pentru rolul său funcţional. Cât despre scaunul cu îmbinări clasice, deplasarea poansonului cu 5 mm a determinat forţe de apăsare de 19 688 N (Fig. 41.b), la care s-au înregistrat deplasări de ordinul zecimilor de mm.

6.3. Testarea rezistenţei scaunelor

Scaunele au fost testate pe standul de încercări cu echipament de la Hegewald & Peschke Meß- und Prüftechnik GmbH (Nossen, Germania) din cadrul Laboratorului de Design, Prototipare şi Testare (Cluj Innovation Park, Centrul Regional de Excelenţă pentru Industrii Creative, ClujNapoca).

Încercările la care au fost supuse ambele tipuri de scaune (cu îmbinări clasice şi cu conectori imprimaţi 3D) pe standul de testare au avut drept scop determinarea rezistenţelor şi anume :

- Rezistenţă şezut şi spătar (SR EN1728:2012 pct. 6.4) – Fig. 42.a;
- Rezistenţa picioarelor spre partea din faţă (SR EN 1728:2012 pct. 6.15) – Fig. 42.b;
- Rezistenţa picioarelor spre partea laterală (SR EN 1728:2012 pct. 6.16) – Fig. 42.c.

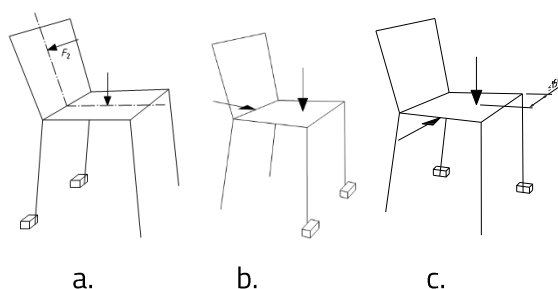


Fig. 42. Testarea rezistenţei şezutului şi spătarului conform: a. SR EN1728:2012 pct. 6.4; b. SR EN 1728:2012 pct. 6.15; c. SR EN 1728:2012 pct. 6.16 (SR EN1728:2012)

Ambele tipuri de scaune au rezistat acestor solicitări, fără să aibă după finalizarea testelor rupturi, îmbinări slăbite, sau deformări ale structurii, conform buletinelor de încercare primite.

Rezultatele testelor efectuate, au relevat faptul că îmbinarea cu conectori conferă mobilierului de şedere rezistenţa cerută de standardele în vigoare. Nu s-a remarcat nici o diferenţă în timpul testului şi după efectuarea acestuia între rezistenţa scaunului cu îmbinări clasice şi a scaunului cu conectori imprimaţi 3D.

6.3 Concluzii referitoare la testarea scaunelor cu conectori imprimaţi 3D

- În urma testelor efectuate pe standul de încercări omologat s-a dovedit faptul că îmbinarea cu conectori imprimaţi 3D poate fi o alternativă viabilă la îmbinarea clasică tip cep propriu şi scobitură în construcţia scaunelor.
- Ambele scaune au trecut cu bine testele de rezistenţă conform SR EN1728:2012 punctele 6.4, 6.15 şi 6.16, lucru dovedit de buletinul de încercare eliberat de laboratorul acreditat RENAR care le-a efectuat.
- Ambele scaune au rezistat la încărcări pe şezut de 1300 N şi pe spătar de 400 N, fără să apară defecte de rupere după terminarea testului.

Capitolul 7. CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DISEMINAREA REZULTATELOR. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

7.1 Concluzii generale

- S-au găsit puține lucrări științifice în literatura de specialitate referitoare la proiectarea și testarea unor elemente de conexiune pentru mobilier obținute prin metode de fabricație aditivă, ceea ce dovedește elementul de noutate al prezentei cercetări din teza de doctorat.
- Modalitățile de testare recomandate pentru verificarea rezistenței mecanice a unei îmbinări și aplicate în literatura de specialitate, sunt metoda cu element finit și testarea unei asamblări de colț (de tip L) la solicitările de tracțiune și compresiune pe diagonală și calcularea momentului de încovoiere pentru cele două solicitări.
- Investigațiile microscopice asupra filamentelor din PLA alb, PLA negru și PLA alb armat cu fibră de sticlă au arătat că primele două au o structură omogenă, fără defecte de tipul golurilor, fisurilor, sau aglomerărilor de material, în timp ce filamentul compozit a arătat o distribuție aleatorie a fibrei de sticlă în matrice, cu zone în care prezența armăturii nu a fost detectată și zone în care fasciculele de fibră de sticlă au aglomerat matricea.
- Este posibil ca structura omogenă a filamentelor din PLA alb și PLA negru să fie un argument pentru rezistențele mecanice mai bune ale conectorului imprimat 3D cu aceste materiale.
- Pulberea *DuraForm PA Plastic* utilizată la imprimarea 3D a conectorului prin metoda SLS nu a conferit acestuia rezistența mecanică necesară continuării cercetărilor experimentale.
- Rezultatele testelor mecanice și investigarea microscopică a defectelor de rupere au arătat că aderența straturilor de PLA alb este mai slabă decât cea a filamentului de PLA negru, din cauza delaminărilor lungi între straturi.
- Ruptura predominantă în cazul conectorului din PLA negru este cea caracteristică materialelor casante și nu prezintă o delaminare continuă între două straturi adiacente, ci este mai degrabă o spargere (fracturare) a materialului.
- Valorile medii ale forțelor maxime și ale momentelor de încovoiere pentru îmbinările cu conectori din PLA cu fibră de sticlă și din poliamidă (PA) sunt mult mai mici decât referința, astfel încât aceste materiale nu reprezintă în momentul de față o alternativă viabilă pentru înlocuirea îmbinărilor clasice ale elementelor de scaun.
- Imprimarea conectorilor în poziție verticală s-a dovedit soluția cea mai bună pentru fabricarea conectorilor cu rezistențe mai bune la testele mecanice ale îmbinărilor.
- Analiza cu element finit (FEA) a confirmat zonele cu solicitare maximă, care au cedat prin rupere la testele mecanice efectuate.
- Rezultatele obținute prin simularea cu FEA se suprapun destul de bine peste rezultatele modelului real. Valorile deplasărilor la compresiune și tracțiune se suprapun peste cele obținute la testele efectuate experimental.
- Datorită performanțelor scăzute ale conectorului proiectat inițial în varianta de asamblare a elementelor din lemn de fag, s-a considerat necesară continuarea cercetărilor cu reproiectarea conectorului.

- Modificarea dimensională a conectorului în zonele în care FEA a arătat că tensiunile sunt maxime (până la 90 MPa) și unde s-a produs ruperea acestora, s-a dovedit benefică pentru îmbinările pieselor din lemn de fag.
- Modificarea conectorului în cea de-a doua variantă, prin eliminarea concentratorilor de tensiuni vizualizați cu ajutorul FEA (la colțuri, în zona de asamblare cu legăturile), mută zona vulnerabilă la îmbinarea conectorului cu segmentul de picior, iar forțele maxime de rupere nu ating performanța probei de referință.
- La îmbinările cu varianta a 3-a de conector (rezultată după modificarea grosimii conectorului inițial în zonele de îmbinare cu piesele din lemn), în urma testelor mecanice ale asamblării de colț, conectorul a cedat în zona de îmbinare cu legăturile, dar nu și în elementele din lemn.
- Performanța mecanică comparabilă și chiar mai bună decât cea a probei de referință din lemn de fag, dar și simplitatea procesului de prelucrare pentru elementele din lemn masiv, recomandă conectorul proiectat în varianta a 3-a în construcția demontabilă a scaunelor.
- În urma testelor efectuate pe standul de încercări omologat s-a dovedit faptul că îmbinarea cu conectori imprimați 3D poate fi o alternativă viabilă la îmbinarea clasică tip cep propriu și scobitură în construcția scaunelor.
- Scaunul construit în varianta demontabilă cu conectori a trecut cu bine testele de rezistență pentru șezut, spătar, traversa și lonjeronul cadrului, conform SR EN1728:2012 punctele 6.4, 6.15 și 6.16, lucru dovedit de buletinul de încercare eliberat de laboratorul acreditat RENAR care le-a efectuat.
- Forțele de încărcare a șezutului la care au rezistat cele două scaune, în urma măsurării deplasărilor la sistemul de analiză optică a deformațiilor 3D prin metoda DIC, au fost de cel puțin 10 ori mai mari decât cele stipulate în standardul SR EN1728:2012.

7.2 Contribuții originale

- Rezolvarea unei teme cu caracter inovativ, care a parcurs toate fazele de proiectare și dezvoltare specifice unui produs nou, fiecare fază fiind rezultatul unei etape de cercetare teoretică și experimentală, în baza unui protocol de cercetare având ca obiect de studiu un conector destinat asamblării elementelor de rezistență ale unui scaun, respectiv elementele cadrului de scaun și legăturile, asamblate cu picioarele acestuia.
- Proiectarea și modelarea 3D a unui conector pentru asamblarea elementelor de rezistență din structura unui scaun în programul *SolidWorks 3D CAD Design Software* și generarea fișierului pentru imprimarea 3D și pentru FEA.
- Proiectarea și modelarea 3D a unui scaun în același software, utilizând dimensiunile și secțiunile recomandate de normativele de proiectare existente, în două variante de asamblare: fixă, cu îmbinări de tip cep propriu – scobitură și demontabilă, cu ajutorul conectorilor proiectați.
- Stabilirea unui protocol de cercetare experimental pentru testarea rezistenței conectorului și a scaunului construit cu acest concept.
- Imprimarea 3D a unui total de 116 conectori, cu 4 materiale diferite (PLA negru, PLA alb, PLA alb ranforsat cu fibre de sticlă), prin utilizarea a două metode de fabricație aditivă (FFF și SLS) și a două poziții de imprimare diferite pentru piesele obținute.

- Realizarea îmbinărilor „de tip L” pentru subansamblurile cu conectori și pentru cele în variantă clasică cu cep propriu și scobitură, destinate testărilor la tracțiune și compresiune pe diagonală, utilizând pentru elementele din lemn masiv două specii: larice și fag.
- Testarea tuturor variantelor de îmbinări”de tip L” la tracțiune și compresiune pe diagonală și prelucrarea datelor rezultate.
- Realizarea analizei cu element finit pentru simularea încercărilor la tracțiune și compresiune, în vederea vizualizării deplasărilor sistemului, a tensiunilor și deformațiilor din conector.
- Pe baza rezultatelor FEM, s-a realizat reproiectarea și remodelarea 3D a conectorului în alte două variante, pentru mărirea rezistenței în asamblarea cu lemn de fag, devenită critică.
- Testarea experimentală a noilor modele de conectori în îmbinările de colț ale elementelor din lemn de fag, prin supunerea lor la cele două solicitări: tracțiune și compresiune pe diagonală și compararea rezultatelor cu cele ale modelului de referință din lemn de fag.
- Reluarea FEA pentru noul model considerat optim și interpretarea rezultatelor.
- Construirea a patru prototipuri de scaun, două în varianta clasică cu sistem constructiv fix și două în varianta demontabilă - asamblate cu conectorii validați anterior.
- Verificarea și validarea conectorului proiectat în produsul final prin două metode de testare:
 1. Testarea scaunului cu conectori și a scaunului de referință (clasic) cu ajutorul sistemului pentru analiza comportării structurilor în teste de oboseală și a sistemului pentru analiza optică a deformațiilor 3D, prin metoda DIC (Digital Image Correlation).
 2. Testarea celor două scaune conform SR EN 1728:2012 pe standul de încercări omologat din cadrul Laboratorului de Design, Prototipare și Testare (Cluj Innovation Park, Centrul Regional de Excelență pentru Industrii Creative, ClujNapoca) – acreditat RENAR.
- Obținerea în premieră a unor imagini și valori ale deplasărilor care au loc în puncte diferite ale zonei de îmbinare a scaunului sub acțiunea unor forțe mari de presare a șezutului, cu ajutorul sistemului pentru analiza optică a deformațiilor 3D.
- Testarea limitelor de rezistență ale scaunelor ajutorul sistemului pentru analiza optică a deformațiilor 3D.
- Abordarea multidisciplinară a subiectului tratat în teza de doctorat, pornind de la noțiuni de proiectare și modelare pe calculator cu un software dedicat, de rezistența materialelor, analiză cu element finit, utilizarea de echipamente și software modern pentru cercetări experimentale, prelucrarea și interpretarea datelor.

7.3 Diseminarea rezultatelor

1. Nicolau, A.; Pop, M.A.; Coșereanu, C. (2022). 3D Printing Application in Wood Furniture Components Assembling. *Materials*, 15, 2907. <https://doi.org/10.3390/ma15082907>. (Articol prezentat la conferința internațională BRAMAT 2022, Braşov, 9-12 martie, 2022).
2. Nicolau, A.; Pop, M.A.; Georgescu, S.V.; Coșereanu, C. (2023). Application of Additive Manufacturing Technology for Chair Parts Connections. *Appl. Sci.*, 13, 12044. <https://doi.org/10.3390/app132112044>. (Articol prezentat la conferința internațională ICWSE 2023, Braşov, 2-4 noiembrie, 2023).

3. Nicolau, A.; Coşereanu, C. Mechanical Properties of L-Type Corner Joints Connected with 3D Printed PLA Connectors Using FFF Technology, *Pro Ligno* 20(2), 2024.

4. Nicolau, A; Coşereanu, C.; Brenci, L.M; Pop, M.A.; Cioacă, C. (2024). Evaluation of tensile and compression bending moment of L-type joints having 3D printed connectors, *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, 2024. Articolul a fost prezentat în cadrul Doctoral Conference DoCo2024 - 26-27 iunie, 2024, Universitatea Transilvania Braşov (acceptat spre publicare).

7.4 Direcții viitoare de cercetare

- Continuarea cercetărilor pentru utilizarea pulberii de poliamidă *DuraForm PA Plastic* pentru imprimarea 3D prin metoda SLS a unor elemente de asamblare similare și urmărirea îmbunătățirii rezistențelor mecanice ale pieselor obținute prin optimizarea parametrilor de acționare a laserului.
- Testarea și a altor materiale de imprimare (filamente și pulberi) decât cele testate în prezenta teză de doctorat.
- Continuarea dezvoltării conceptului de conector studiat în cercetarea de față, prin abordarea lui din punct de vedere estetic pentru produsul final, scaunul.
- Elaborarea unei structuri *Voronoi* pentru conectorul propus, utilizând un software dedicat, care să țină cont de tensiunile evidențiate cu FEA și care să-i imprime un design atrăgător.
- Cercetarea influenței culorii filamentului de PLA asupra rezistenței piesei imprimate 3D.
- Proiectarea și testarea altor tipuri de conectori inovativi, destinați asamblării cu ușurință a mobilierului de ședere, sau depozitare.
- Proiectarea unor conectori imprimați 3D care să permită asamblări diferite de unghiuri de 90° și conceperea unor metode de testare a rezistenței lor în îmbinare.
- Implementarea unor soluții inovative bazate pe fabricație aditivă, care să înlocuiască tehnologii complexe de prelucrarea lemnului, soluții constructive dificile și care să economisească resursa atât de prețioasă în zilele noastre, lemnul.
- Testarea la îmbătrânire a subansamblului dintre piesele din lemn și conector, pentru a cerceta comportamentul lemnului în combinație cu materialul conectorului la diverse variații de temperatură și umiditate.
- Testarea la oboseală a scaunului realizat cu conectori imprimați 3D, pentru a studia durabilitatea îmbinării.
- Continuarea cercetărilor de rezistență a conectorilor utilizând și alte poziții de imprimare 3D (la 45°) și alte variante de depunere a straturilor.
- Aplicarea altor variante de testare mecanică a îmbinărilor de colț „de tip L”, în vederea anticipării comportamentului îmbinărilor în structura scaunului.

BIBLIOGRAFIE

1. Aiman, A., Sanusi, H., Haidiezu, A., Cheong, H. (2020). *Design and structural analysis of 3D-printed modular furniture joints.*- IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 932, 012101. Doi: 10.1088/1757-899X/932/1/012101.
2. Ayrilmis, N. (2018). *Effect of layer thickness on surface properties of 3D printed materials produced from wood flour/PLA filament.* Polym Testing 71, 2018, pp. 163-166.
3. Ayrilmis, N. , As, N., DüNDAR, T., Şendağ, A. (2020). *Determination of Bending Moment of L-Type Corner Joints Used in Chair Production and Their Effects on Mechanical Performance of Chairs.* Mat. Int. 2, pp. 0318-0323.
4. Aurenhammer, F. (1991). *Voronoi Diagrams - A Survey of a Fundamental Geometric Data Structure.* ACM Computing Surveys, 23(3), pp. 345-405.
5. Aydın, M. (2015). *Additive Manufacturing: Is It a New Era for Furniture Production?.* Journal of Mechanics Engineering and Automation 5, pp. 338-347. Doi: 10.17265/2159-5275.
6. Bárnik, F., Vaško, M., Sága, M., Handrik, M., Sapietová, A, (2019). *Mechanical properties of structures produced by 3D printing from composite materials.* MATEC Web of Conferences 254, 01018.
7. Bugin, L., Fagundes, C., Bruscatto, U., Cândido, L (2020). *Exploration of data-driven midsole algorithm design based in biomechanics data and Voronoi 3D to digital manufacturing.* Design & Tecnologia 10(21). DOI: 10.23972/det2020iss21pp01-10.
8. Chen, Z., Li, Z., Li, J., Liu, C., Lao, C., Fu, Y., Liu, C., Li, Y., Wang, P., He Y. (2019). *3D printing of ceramics: A review.* Journal of the European Ceramic Society 39, pp. 661-687
9. Chen, K. ,Yu, L., Cui, Y., Jia, M. ,Pan, K. (2021). *Optimization of printing parameters of 3D-printed continuous glass fiber reinforced polylactic acid composites.* Thin-Walled Structures 164, 107717.
10. Cismaru, M., Salca, E-A, Porojan, M. (2004). *Wooden Structures (Structuri din lemn) - în limba engleză,* Editura Universităţii "Transilvania", Braşov, ISBN 973-635-334-6.
11. Curtu, I., Ghelmeziu, N. (1984). *Mecanica lemnului și materialelor pe bază de lemn.* Editura Tehnică, Bucureşti.
12. Das, A., Agar, D., Rudolfsson, M., Larsson, S. (2021). *A review on wood powders in 3D printing: processes, properties and potential applications.* Journal of Materials Reserch and Technology 15, pp. 241-255.
13. Das, S., Bourell, D. and Babu, S. (2016). *Metallic materials for 3D printing.* MRS Bulletin 4, pp. 729-741
14. Derikvand, M., Eckelman, C. (2015). *Bending Moment Capacity of L-Shaped Mitered Frame Joints Constructed of MDF and Particleboard.* BioResources 10(3), pp. 5677-5690.
15. Dermeik, B. și Travitzky, N. (2020). *Laminated Object Manufacturing of Ceramic-Based Materials.* Adv. Eng. Mater. 22, 2000256.

16. Dickson , A., Abourayana, H., Dowling, D. (2020). *3D Printing of Fibre-Reinforced Thermoplastic Composites Using Fused Filament Fabrication-A Review*. Polymers 12, 2188. Doi: 10.3390/polym12102188.
17. DIN EN 1730: 2012. Metode de testare pentru determinarea stabilității, rezistenței și durabilității meselor.
18. Dou, H., Cheng, Y., Ye, W., Zhang, D., Li, J., Miao, Z., Rudykh, S. (2020). *Effect of Process Parameters on Tensile Mechanical Properties of 3D Printing Continuous Carbon Fiber-Reinforced PLA Composites*. Materials 13, 3850. Doi: 10.3390/ma13173850.
19. Farid, S., Shirazi, S., Gharekhani, S., Mehrali, M., Yarmand, H., Metselaar, H., Kadri N., Osman, N. (2015). *A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: selective laser sintering and inkjet 3D printing*. Sci. Technol. Adv. Mater. 16, 033502. Doi: 10.1088/1468-6996/16/3/033502.
20. Felek, S. A. (2020). *New Era in Furniture Production: 3d Printer*. 6th International Conference on Knowledge & Innovation in Engineering, Science & Technology, 6-8 martie, Budapesta, Ungaria.
21. Finaa, F., Goyanesb, A., Gaisforda, S., Basita, A., (2017) *Selective laser sintering (SLS) 3D printing of medicines*. International Journal of Pharmaceutics 529, pp. 285–293.
22. Finnes T. (2015). *High Definition 3D Printing – Comparing SLA and FDM Printing Technologies*. The Journal of Undergraduate Research 13, Article 3.
23. Form Futura Technical Data Sheet. Product name: *Premium PLA (negru)*. Eliberat la data de 29 octombrie 2015, versiunea 2.
24. Gan, Y., Chen, C., Shen, Y. (2005). *Three-dimensional modeling of the mechanical property of linearly elastic open cell foams*. International Journal of Solids and Structures 42, pp. 6628–6642.
25. Groth, C., Kravitz N., Jones P., Graham M., Redmond, R. (2014). *Three-Dimensional Printing Technology*. Journal of Clinical Orthodontics XLVIII, 8, pp. 275-285
26. Han, W.; Kong, L.; Xu, M. (2022). *Advances in selective laser sintering of polymers*. Int. J. Extrem. Manuf. 4, 042002.
27. Kasal, A.; Smardzewski, J.; Kuşkun, T.; Güray, E. (2023). *Analyses of L-Type Corner Joints Connected with Auxetic Dowels for Case Furniture*. Materials 16, 4547. <https://doi.org/10.3390/ma16134547>.
28. Khadilkar, A., Wang, J., Rai R. (2019). *Deep learning-based stress prediction for bottom-up SLA 3D printing process*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 102, pp. 2555–2569.
29. Khoo, Z., Teoh, J., Liu, Y., Chua, C., Yang, S., An, J., Leong, K., Yeong, W. (2015). *3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing*. Virtual and Physical Prototyping 10(3), pp. 103-122.

30. Krzyzaniak, Ł., Kuskun, T., Kasal, A., Smardzewski, J. (2021). *Analysis of the Internal Mounting Forces and Strength of Newly Designed Fastener to Joints Wood and Wood-Based Panels*. *Materials* 14, 7119.
31. Kuo, Chil-Chyuan & Chen, Jia-You & Chang, Yuan-Hao. (2021). *Optimization of Process Parameters for Fabricating Polylactic Acid Filaments Using Design of Experiments Approach*. *Polymers* 13,1222. Doi: 10.3390/polym13081222.
32. Lancea, C., Chicos, L., Zaharia, S., Pop, A., Semenescu, A., Florea, B., Chivu, O. (2018). *Accelerated Corrosion Analysis of AlSi10Mg Alloy Manufactured by Selective Laser Melting (SLM)*. *REV.CHIM.* 69(4), pp. 975-981.
33. Li, X., Ni, Z., Bai, S., Lou, B. (2018). *Preparation and Mechanical Properties of Fiber Reinforced PLA for 3D Printing Materials*. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 322, 022012. Doi: 10.1088/1757-899X/322/2/022012.
34. Lica, D., Coşereanu C., (2012). *Mobilă. Mobilă de şedere*. Editura Universităţii Transilvania Braşov, ISBN: 978-973-598-780-0.
35. Lica, D., Coşereanu, C., (2013). *Tehnologia mobilierului tapiţat*. Editura Universităţii Transilvania din Braşov. ISBN: 978-606-19-0283-5
36. Liu, Z., Zhang, M., Bhandari, B., Wang, Y. (2017). *3D printing: Printing precision and application in food sector*. *Trends in Food Science & Technology* 69. Doi: 10.1016/j.tifs.2017.08.018.
37. Magrisso, S., Mizrahi, M., Zoran, A. (2018). *Digital Joinery for Hybrid Carpentry*. Published in: *International Conference on Human Factors and Computing Systems, Engineering, Materials Science*, 19 aprilie. Doi: 10.1145/3173574.3173741
38. Martínez, J., Dumas, J., Lefebvre, S., (2016). *Procedural Voronoi Foams for Additive Manufacturing*. *ACM Transactions on Graphics, Association for Computing Machinery* 35, pp.1 - 12.
39. Martínez, J., Hornus, S., Song, H., Lefebvre, S. (2018). *Polyhedral Voronoi diagrams for additive manufacturing*. *ACM Trans. Graph.* 37(4), 129.
40. Merland, R., Caumon, G., Levy, B., Collon-Drouaillet, P. (2014). *Voronoi grids conforming to 3D structural features*. *Comput Geosci* 18, pp. 373-383. Doi: 10.1007/s10596-014-9408-0.
41. Moukarzel, C. (1993). *Voronoi foams*. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 199(1), pp. 19-30, available at: [https://doi.org/10.1016/0378-4371\(93\)90093](https://doi.org/10.1016/0378-4371(93)90093).
42. Nicolau, A., Pop, M.A., Coşereanu, C. (2022). *3D Printing Application in Wood Furniture Components Assembling*. *Materials* 15, 2907. <https://doi.org/10.3390/ma15082907>. (Articol prezentat la conferinţa internaţională BRAMAT 2022, Braşov, 9-12 martie 2022).
43. Nicolau, A., Pop, M.A., Georgescu, S.V., Coşereanu, C. (2023). *Application of Additive Manufacturing Technology for Chair Parts Connections*. *Appl. Sci.* 13, 12044. <https://doi.org/10.3390/app132112044>. (Articol prezentat la conferinţa internaţională ICWSE 2023, Braşov, 2-4 noiembrie 2023).

44. Nicolau, A., Coşereanu, C. (2024a). *Mechanical Properties of L-Type Corner Joints Connected with 3D Printed PLA Connectors Using FDM Technology*. Pro Ligno 20(2), 2024.
45. Nicolau, A., Coşereanu, C., Brenci, L.M., Pop, M.A., Cioacă, C. (2024b). *Evaluation of tensile and compression bending moment of L-type joints having 3D printed connectors*, Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering (aprobat spre publicare, decembrie 2024).
46. Podlena, M., Boruvka, V., Bomba, J. (2015). *The Strength Determination of Corner joints used for Wooden Windows*, Annals of Warsaw University of Life Sciences, Forestry and Wood Technology 91, pp.149–153.
47. Pomazan, V., Pomazan, A. (2015). *Soluții estetice pentru ranforsări*. Buletinul AGIR nr. 1/2015, ianuarie-martie.
48. Popescu, D., Zapciu, A., Amzab, C., Baciuc, F., Marinescu, R. (2018) . *FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review*. Polymer Testing 69, pp.157–166.
49. Przystacki, D.; Sieniawski, J.; Stambolov, G.; Lisiak, P. (2015). *An Overview of Selective Laser Sintering Technologies*. Archives of Mechanical Technology and Materials 16, pp. 23-32.
50. Pringle, A., Rudnicki, M., Pearce, J. (2022). *Wood Furniture Waste–Based Recycled 3-D Printing Filament*. Forest Products Journal 68(1), pp. 86-95.
51. Ramya, A., Vanapalli, S. (2016). *3D Printing Technologies in various applications*. CAD Conference and Exhibition Singapore, 24-26 iunie, pp. 243-248.
52. Ranjan, R., Kumar, D., Kundu, M., Moi, S. (2022). *A critical review on Classification of materials used in 3D printing process*. Materials Today: Proceedings 61, pp. 43–49.
53. Saad R. (2016). *The revolution of Materials used in 3D Printing applications in Furniture & Interior Design*. Creative Commons Attribution 4.0 International License, 1st of July ,pp. 143-163.
54. Shahrubudina, N., Leea, T., Ramlana., R. (2019). *An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications*. Procedia Manufacturing 35, pp. 1286–1296.
55. Simchi, A., Pohl, H. (2003). *Effects of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder*. Mater. Eng. A 359, pp. 119–128.
56. Sinclair, F. (2021). *Exploring flexible structures in 3D- printed bio-based materials to closely mimic the flexibility of foam*. Published by Department of Design Sciences Faculty of Engineering LTH, Lund University, Sweden.
57. Singh, T., Kumar, S., Sehgal, S. (2020). *3D printing of engineering materials: A state of the art review*. Materials Today: Proceedings 28, pp. 1927–1931.
58. Smardzewski, J., Rzepa, B., Kılıç, H. (2016). *Mechanical Properties of Externally Invisible Furniture Joints Made of Wood-Based Composites*. BioResources 11(1), pp. 1224-1239.
59. SR EN 1728: 2012. Metode de testare pentru determinarea rezistenței și durabilității mobilierului de ședere.

60. Stansbury, J., Idacavage, M. (2016). *3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities*. Dental Materials 32, pp. 54–64.
61. Tolochko, N.K.; Mozzharov, S.E.; Yadroitsev, I.A., Laoui, T., Froyen, L., Titov, V.I., Ignatiev, M.B. (2004). Balling processes during selective laser treatment of powders. *Rapid Prototyping Journal* 10, pp. 78–87.
62. Top, N., Şahin, I., Gökçe, H. (2019). *Topology Optimization for Furniture Connection Part and Production with 3d Printer Technology*. The 29th International Conference: Research for Furniture Industry - September 2019, Ankara, Turkey, pp. 671-677.
63. Valiyousefi, M., Alihedarloo, A. (2019). *Study the impact of 3D-printed joints on the complex wooden structures*. International Congress on Science & Engineering University of Tokyo, 14-15 octombrie.
64. Yerlikaya, N.C. (2013) *Failure load of corner joints, which are reinforced with glass-fiber fabric in case-type furniture*. Sci. Res. Essays 8, 325–339.
65. Zacal, J., Dostál, P., Šustr, M., Barboutis, I. (2016). *Design and Testing of Low Cost Chair with Round Mortise and Tenon Joints*. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis 64(20), pp. 567-572. <http://dx.doi.org/10.11118/actaun201664020567>
- Pagini website:
67. Suntem 3D. www.suntem3D.ro, accesat la data de 04.03.2024
68. Form Werk. <https://www.eshop.formwerk.ro/cumpara/filament-philament-pla-glass-reinforced-1550>, accesat la data de 04.03.2024
69. Filaticum Miscolz, <https://filaticum.com/termek/filaticum-pla/>, accesat la data de 04.03.2024