



ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea de Inginerie Tehnologică și Management Industrial

Drd. Ing. Mădălina-Ioana BLAJ

**Cercetări privind fabricarea pieselor din material compozit
cu fibre scurte de carbon utilizând procedeul FDM**

**Research on Parts Manufacturing from Composite Materials
with Short Carbon Fibers using FDM Process**

REZUMAT

Conducător științific

Prof.dr.ing. Gheorghe OANCEA

BRAȘOV, 2024

Cuprins

Cuprins	2
Introducere	3
1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR ÎN DOMENIUL FABRICAȚIEI ADITIVE PRIN PROCEDEUL FDM.....	5
2. OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT	7
3. CERCETĂRI PRIVIND DETERMINAREA PROPRIETĂȚILOR MECANICE ALE PIESELOR FABRICATE DIN MATERIAL COMPOZIT CU FIBRE SCURTE DE CARBON PRIN PROCEDEUL FDM.....	9
3.1. Concepte teoretice.....	9
3.2. Echipamente și materiale utilizate	10
3.3. Analiza microscopică a filamentului PET CF15	10
3.4. Fabricarea și testarea la tracțiune a specimenelor din PET CF15.....	11
3.5. Fabricarea și testarea la compresiune a specimenelor din PET CF15	15
3.6. Fabricarea și testarea la încovoiere a specimenelor din PET CF15.....	16
3.7. Fabricarea și testarea la forfecare a specimenelor din PET CF15.....	17
4. PRELUCRAREA STATISTICĂ A DATELOR EXPERIMENTALE PENTRU SOLICITAREA DE TRACȚIUNE	18
5. CERCETĂRI PRIVIND DETERMINAREA PROPRIETĂȚILOR MECANICE ALE PIESELOR FABRICATE DIN POLIMERUL MATERIALULUI COMPOZIT CU FIBRE SCURTE DE CARBON, PRIN PROCEDEUL FDM	19
5.1. Fabricarea și testarea la tracțiune a specimenelor din PET	19
5.2. Fabricarea și testarea la compresiune a specimenelor din PET.....	19
5.3. Fabricarea și testarea la încovoiere a specimenelor din PET	20
5.4. Fabricarea și testarea la forfecare a specimenelor din PET	21
6. INFLUENȚA FIBRELOR DE CARBON ASUPRA COMPORTAMENTULUI MECANIC AL MATERIALULUI PET	22
7. SIMULAREA FEM A SPECIMENELOR UTILIZATE LA SOLICITAREA DE TRACȚIUNE	27
8. CERCETĂRI PRIVIND REFABRICAREA UNOR REPERE DIN COMPONENTA DRONEI DJI PHANTOM 3 PRO	28
9. CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. DISEMINAREA REZULTATELOR. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE	33
9.1. Concluzii finale	33
9.2. Contribuții personale	35
9.3. Diseminarea rezultatelor.....	36
9.4. Direcții viitoare de cercetare	37
Bibliografie (Selecție)	38

Introducere

În prezent, principiile tehnologiilor aditive utilizate în proiectarea și fabricarea produselor industriale sunt subiectele unui amplu proces de reevaluare și restructurare a proceselor tradiționale de proiectare și fabricație, acestea reprezentând o importantă direcție de cercetare în ingineria industrială. Considerată a fi parte a celei de-a patra revoluții industriale, fabricația aditivă este de mare actualitate, fiind utilizată în diverse domenii cum ar fi: industria constructoare de mașini, industria aerospațială, medicină, construcții civile sau doar ca aplicații pentru hobby [BLA24A]. Prezenta teză de doctorat intitulată *Cercetări privind fabricarea pieselor din material compozit cu fibre scurte de carbon utilizând procedeul FDM* utilizează, pe lângă fabricația aditivă o tehnică de mare actualitate, și anume cea de Reverse engineering, în principal pentru studiul de caz elaborat în vederea validării rezultatelor cercetărilor [SRI16]. Lucrarea se încadrează în **domeniul Inginerie industrială**.

Teza de doctorat se axează pe desfășurarea unor cercetări referitoare la fabricarea prin procedeul de extrudare termoplastică a materialului - FDM/FFF, cu scopul de a maximiza caracteristicile mecanice ale pieselor rezultate în urma fabricării. Motivele principale de alegere ale acestei tehnologii sunt costurile relativ mici ale echipamentelor și materiei prime. În majoritatea cercetărilor, acestea sunt considerate a fi mai mici în comparație cu alte procedee de fabricație aditivă. Actualitatea acestui subiect de cercetare a rezultat și în urma interesului mare al cercetătorilor pentru dezvoltarea acestui procedeu de fabricație, datorită multiplelor avantaje identificate.

Pe lângă avantaje, nu trebuie neglijată nici compatibilitatea procesului de fabricație cu o gamă variată de materiale, de la polimeri, la materiale compozite, cu o capacitate vastă de extindere a materialelor ce pot fi utilizate. În funcție de aplicație, se urmărește ca materialul utilizat să conducă la maximizarea diverselor proprietăți, cum ar fi proprietățile termice, chimice, optice, mecanice și reologice [WIC20], [KAF21].

Deoarece se dorește o abordare a modului în care sunt fabricate piese cu rol structural, o provocare pentru aceste aplicații constând în maximizarea valorilor proprietăților mecanice, deoarece în acest sens, un mare dezavantaj al pieselor fabricate prin procedeul FDM/FFF este vizat de comportamentul anizotrop al materialului. În practică, de regulă apar solicitări multidirecționale, iar îmbunătățirea procesului impune cunoașterea elementelor ce influențează rezultatele finale și determinarea acelorora cu un impact mai mare.

Cercetările desfășurate în cadrul programului de studii doctorale urmăresc mai multe paliere: costurile materialelor, timpul de implementare și apropierea de realitate pentru ipotezele enunțate.

Etapele parcurse, care țin cont de palierele enunțate anterior sunt structurate și pe capitole după cum urmează.

În primul capitol se studiază literatura de specialitate, evidențiindu-se stadiul actual al cercetărilor pentru procedeul FDM/FFF de fabricație, influența parametrilor de fabricație asupra proprietăților mecanice (diverse tipuri de solicitări) ale pieselor, dar și comportamentul materialelor, cu preponderență al filamentelor compozite cu fibre de carbon.

Al doilea capitol, în baza concluziilor enunţate la finalul primului capitol, se stabilesc obiectivele cercetărilor, iar în următoarele capitole se prezintă modul de rezolvare a acestora.

În cel de-al treilea capitol se stabilesc conceptele teoretice de lucru, se identifică și se descriu materialele și echipamentele utilizate în cercetare. Utilizând baza materială prezentată anterior, se fabrică speci­menele din filament compozit cu fibre scurte de carbon care ulterior sunt testate la trac­țiune, compresiune, încovoiere și forfecare. După testare, sunt analizate la nivel macroscopic și microscopic și sunt determinate criteriile de cedare.

În cel de-al patrulea capitol, considerând rezultatele obținute în capitolul 3 pentru speci­menele de trac­țiune, după o prelucrare statistică a datelor experimentale se elaborează un model de regresie ce poate fi utilizat pentru a determina valori ale proprietăților mecanice de trac­țiune pentru orice valoare a parametrilor de fabricație luați în considerare în cercetările experimentale.

În capitolul cinci, ca și în al treilea capitol, se realizează aceleași analize și teste pentru epruvete realizate din polimerul materialului studiat.

Cel de-al șaselea capitol prezintă modul în care se determină influența adăugării fibrelor de carbon în polimer din punctul de vedere al comportamentului mecanic, al aspectului și al defectelor de fabricație.

Al șaptelea capitol descrie matematic materialul studiat și prezintă cum se realizează analiză FEM pentru a compara simulările cu testele efectuate experimental la trac­țiune.

În cel de-al optulea capitol se realizează un studiu de caz pentru două repere din componența unei drone, utilizând materialul PET CF15. Pentru efectuarea studiilor de caz se aleg reperele, se reproiectează, sunt refabricate din materialul studiat și sunt testate pentru cazul de solicitare axială pe verticală.

Capitolul nouă este dedicat prezentării concluziilor finale ale cercetărilor, contribuțiilor personale aduse în domeniul tezei de doctorat, modului în care au fost diseminate cercetările și direcțiile viitoare de cercetare.

Ca metodologie de lucru, pentru a determina modul prin care se pot obținute rezultate mai bune, în special din punctul de vedere al proprietăților mecanice, inițial se optează pentru un studiu amănunțit al literaturii de specialitate cu privire la utilizarea în cadrul procedurii FDM/FFF a polimerilor simpli, dar și a celor compoziți ce conțin fibre scurte și continue, cu scopul de a identifica și diferenția diverse tipuri de materiale, pentru a identifica avantajele și dezavantajele acestora. Pe parcursul cercetărilor, în cadrul tezei de doctorat se consideră metode de cercetare teoretică care sunt corelate cu metode de cercetare experimentală prin teste de laborator, fiind susținute de simulări în mediu virtual, cum ar fi analiza cu elemente finite (Finite Element Analysis - FEA) și metode de proiectare experimentală (Design of Experiments - DoE). Pentru acestea sunt emise ipoteze de lucru în baza concluziilor obținute în urma realizării stadiului actual, coroborate cu concepte teoretice și similitudini cu materiale deja studiate.

1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR ÎN DOMENIUL FABRICAȚIEI ADITIVE PRIN PROCEDEUL FDM

Modelarea prin extrudare termoplastică provine prin traducere și adaptare din limba engleză a denumirii Filament Deposition Modeling, prescurtat fiind cunoscută cu abrevierea FDM. Procedeul FDM are la bază principiul de extrudare a materialului. Astfel, materialul din rola de filament este topit și cu o presiune constantă cu ajutorul unei duze este distribuit uniform pe traseul pe care îl urmează capul de printare, așa cum este prezentat și în Figura 1. Materialul extrudat se solidifică aproximativ cu forma generată de duză și aderă la materialul depus anterior, pentru a forma stratul printat și ulterior întreaga piesă. Pe măsură ce materialul este extrudat, mașina controlează depunerea de material pentru a genera secțiunea piesei paralelă cu masa de construcție, existând astfel posibilitatea realizării altor straturi din piesă, până la finalizarea acesteia.

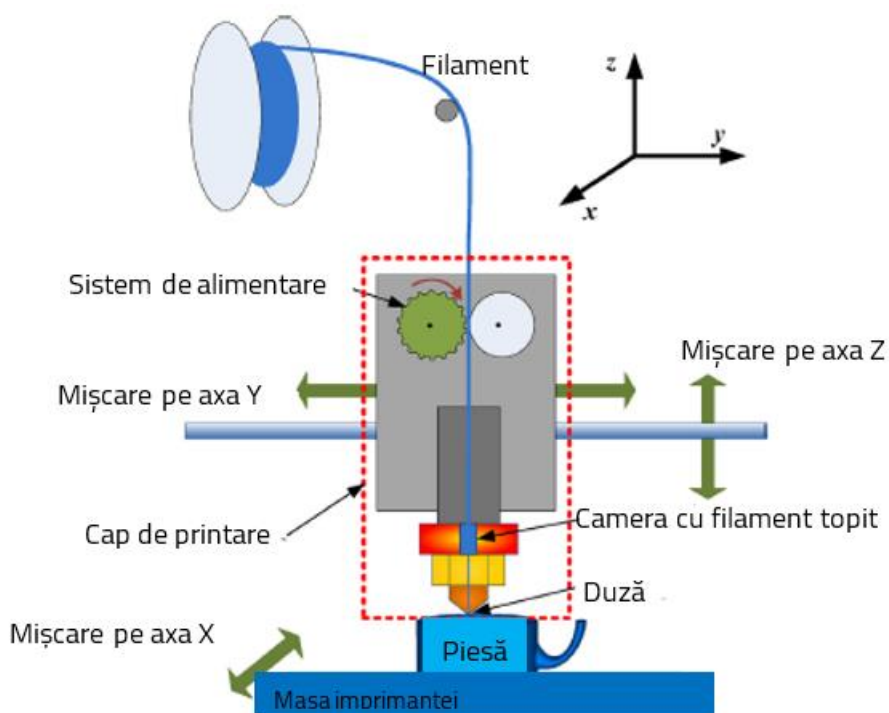


Figura 1 Schema de bază a sistemului de extrudare [JIN15], [BLA21]

Procedeul de fabricație aditivă FDM este un procedeu pentru care, în funcție de materialul utilizat și parametrii de lucru, proprietăților mecanice finale ale piesei pot fi diferite. În literatura de specialitate se evidențiază că există o serie de parametri de fabricație care pot influența semnificativ proprietățile mecanice ale pieselor, cum ar fi grosimea stratului de material, infill-ul, orientarea piesei pe masa imprimantei, temperatura utilizată etc [MAZ19], [WIC20], [KAF21]. Se specifică faptul că prin cunoașterea influenței parametrilor de fabricație, se poate ajunge la controlul procesului de fabricație. Există o strânsă corelație între parametrii de fabricație și proprietăților mecanice ale pieselor. În practică, se recomandă să se cunoască scopul aplicației pentru a se minimiza apariția defectelor de fabricație.

Cea mai mare influență o are grosimea de material depus, orientarea piesei pe masa imprimantei și infill-ul, acești parametri fiind luați în considerare pentru cercetarea desfășurată în cadrul prezentei teze de doctorat. De asemenea, se abordează și aspectul ce vizează stabilitatea geometrică – se

constată faptul că inițial este recomandat să se realizeze conturul exterior al piesei, urmată de depunerea materialului pentru a finaliza suprafața dorită.

Referitor la defectele de fabricație, se constată faptul că prezența acestora are un impact ridicat asupra caracteristicilor mecanice ale pieselor, în literatura de specialitate fiind evidențiată problematica golurilor de material și a unei adeziuni scăzute ale fibrelor de carbon la matrice [BLA22B].

În urma cercetărilor s-a constatat faptul că piesele fabricate prin procedeul FDM au un comportament asemănător cu cel al materialelor compozite, iar datorită similitudinii cu acestea și pentru faptul că nu există standarde de testare pentru fabricarea aditivă a pieselor din materiale compozite, se recurge la utilizarea standardelor de testare pentru materialele compozite.

Referitor la fabricarea pieselor din materiale compozite prin procedeul FDM/FFF, în urma consultării literaturii de specialitate, următoarele direcții pot fi abordate în cercetări:

- Determinarea valorilor optime a parametrilor de fabricație;
- Determinarea unei similitudini cu materiale deja studiate;
- Determinarea comportamentului mecanic sub acțiunea diverselor tipuri de solicitări a materialului compozit, inclusiv asupra polimerului;
- Studiul influenței conținutului de fibre asupra polimerului;
- Elaborarea unor modele matematice pentru calcularea proprietăților mecanice în funcție de parametrii de fabricație;
- Identificarea defectelor de fabricație și a metodelor de combatere a apariției acestora;
- Identificarea criteriilor de cedare și cauzalitatea acestora;
- Determinarea abaterilor dimensionale ale pieselor fabricate prin FDM/FFF;
- Identificarea unor metode de testare și validare a pieselor obținute prin FDM/FFF.

2. OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT

Studiul parametrilor de fabricație reprezintă o preocupare majoră a cercetătorilor, deoarece în prezent nu există o metodă sau procedură standardizată pentru a fi utilizată drept referință în procesul de proiectare și fabricare prin procedeul FDM/FFF a pieselor care să aibă caracteristicile impuse de către utilizatorul final.

În urma parcurgerii stadiului actual (primul capitol al lucrării) obținut în baza cercetării literaturii de specialitate, pentru desfășurarea cercetărilor privind fabricarea pieselor din material compozit cu fibre scurte de carbon utilizând procedeul FDM se definesc opt obiective ale tezei de doctorat. Pentru îndeplinirea celor opt obiective, în anumite situații, se propun și obiective intermediare. Acestea sunt următoarele:

1. Determinarea unei similitudini în comportamentul materialului pieselor fabricate prin procedeul aditiv FDM/FFF, cu materiale cunoscute;
2. Studiul principalilor parametri de fabricație (grosimea stratului de material, infill-ul și orientarea piesei pe masa imprimantei) în vederea determinării valorilor optime în cazul utilizării unui filament compozit de din tip Innofil/Ultrafuse cu 15 % fibre scurte de carbon cu o matrice de polietilenă tereftalat (PET):
 - a. Elaborarea unei metodologii pentru determinarea valorilor parametrilor de fabricație;
 - b. Identificarea metodelor de testare la tracțiune, compresiune, încovoiere și forfecare;
 - c. Fabricarea, testarea, analiza și verificarea macroscopică și microscopică a specimenelor de tracțiune;
 - d. Fabricarea, testarea, analiza și verificarea macroscopică și microscopică a specimenelor de compresiune;
 - e. Fabricarea, testarea, analiza și verificarea macroscopică și microscopică a specimenelor de încovoiere;
 - f. Fabricarea, testarea, analiza și verificarea macroscopică și microscopică a specimenelor de forfecare;
 - g. Determinarea defectelor de fabricație care influențează caracteristicile mecanice;
 - h. Determinarea principalelor criterii de cedare ale specimenelor testate în laborator.
3. Studiul comportamentului mecanic pentru speciemenele realizate din polimerul materialului (polietilenă tereftalat - PET) considerat pentru studiul principalilor parametri de fabricație considerați la obiectivul 2:
 - a. Fabricarea, testarea, analiza și verificarea macroscopică și microscopică a specimenelor de tracțiune;
 - b. Fabricarea, testarea, analiza și verificarea macroscopică și microscopică a specimenelor de compresiune;
 - c. Fabricarea, testarea, analiza și verificarea macroscopică și microscopică a specimenelor de încovoiere;



- d. Fabricarea, testarea, analiza și verificarea macroscopică și microscopică a speci­menelor de forfecare;
 - e. Determinarea defectelor de fabricație care influențează caracteristicile mecanice pentru materialul realizat doar din polimerul materialului considerat pentru studiu;
 - f. Determinarea principalelor criterii de cedare ale speci­menelor testate în laborator.
4. Influența parametrilor de fabricație și a materialelor studiate asupra dimensiunilor speci­menelor;
 5. Determinarea influenței fibrelor scurte de carbon asupra proprietăților speci­menelor;
 6. Elaborarea unui model matematic pentru determinarea proprietăților mecanice de tracțiune;
 7. Enunțarea ipotezei de calcul pentru simularea cu ajutorul FEA a speci­menelor considerate anterior:
 - a. Enunțarea unei ipoteze de calcul prin similitudine cu alte materiale și prin concepte teoretice de calcul;
 - b. Definirea materialului compozit în baza ipotezei enunțate;
 - c. Testarea în mediu virtual a speci­menelor de tracțiune;
 - d. Viabilitatea ipotezei - Comparație cu teste­le de laborator.
 8. Verificarea și validarea rezultatelor obținute prin studii de caz:
 - a. Alegerea a două repere din industria aerospațială pentru elaborarea studiilor de caz pentru care se aplică procedeul de fabricație FDM/FFF;
 - b. Utilizarea conceptului de Reverse Engineering pentru cele două repere;
 - c. Refabricarea celor două repere;
 - d. Validarea practică a celor două repere prin testarea produsului din care fac parte.

3. CERCETĂRI PRIVIND DETERMINAREA PROPRIETĂŢILOR MECANICE ALE PIESELOR FABRICATE DIN MATERIAL COMPOZIT CU FIBRE SCURTE DE CARBON PRIN PROCEDUREUL FDM

3.1. Concepte teoretice

În scopul realizării cercetării teoretice și experimentale cu privire la determinarea valorilor parametrilor de fabricație, grosimea stratului printat și a infill-ului, pentru procedeul Fused Deposition Modeling la fabricarea pieselor din filament Innofil/Ultrafuse cu 15 % fibre scurte de carbon, cu un polimer de polietilenă tereftalat (PET), dar și din filament din PET, se aleg câte 3 valori pentru fiecare parametru [BLA22B], [BLA24A]:

- Grosimea stratului printat: 0.15 mm, 0.20 mm și 0.25 mm.
- Infill: 100%, 75% și 25%.

Acești parametri au fost stabiliți în urma celor menționate în stadiul actual ca fiind cei cu un grad ridicat de influență asupra proprietăților mecanice ale pieselor care sunt obținute prin procedeul de fabricare FDM. Conform cu cele concluzionate în etapa de cercetare a stadiului actual, orientarea principală a materialului după care se realizează studiul este cea longitudinală. După această direcție se realizează testele și experimentele inițiale. Pentru rezultatele cele mai avantajoase din punctul de vedere al proprietăților mecanice, se realizează testele aferente pentru a obține detalii și pentru celelalte direcții de orientare ale materialului. Pentru aceste valori se realizează o descriere a materialului din punctul de vedere al solicitărilor de compresiune, încovoiere și forfecare pe principalele 3 axe de orientare. În paralel, bazat pe aceleași rezultate, se realizează teste de tracțiune, compresiune, încovoiere și forfecare pentru cele 3 axe principale de orientare ale materialelor PET CF15 și PET, pentru a observa comportamentul polimerului și influența fibrelor de carbon în matrice.

În cercetare, pentru a identifica specițiile în funcție de tipul solicitării, material, direcția de depunere a acestuia și valoarea parametrilor aleși pentru studiu, se utilizează următoarea notație: *Material_Solicitare_Infill_GrosimeStrat_AxaOrientarePiesă*,

în care: materialul poate să fie PET CF15 sau PET, Solicitare poate să fie T pentru tracțiune, C pentru compresiune I pentru încovoiere și F pentru forfecare.

Pentru densitatea de material depus (infill), se utilizează valoarea procentuală: 100, 75 sau 25, iar pentru Grosime Strat se utilizează cele 2 zecimale ale grosimii unui strat de material, din parametrii aleși (cum ar fi 15, 20 sau 25). Axa Orientare Piesă se referă la orientarea piesei pe masa imprimantei, având ca și codificare direcția longitudinală X, transversală Y sau cea verticală Z [BLA22B], [BLA24A].

Conform celor specificate în literatura de specialitate, piesele realizate prin procedeul FDM sunt considerate a fi asemănătoare cu cele fabricate din materialele compozite, materialul acestora fiind considerat anizotrop, datorită diferențelor referitoare la proprietățile mecanice care apar pe toate direcțiile de orientare ale materialului [TUT13], [BLA22A]. În acest caz, materialul este considerat a fi ortotrop, adică are proprietăți fizice și mecanice diferite pe 3 direcții ale unui sistem ortogonal fix, fiind un caz particular de anizotropie [BLA22A]. De asemenea, ca ipoteză de lucru se utilizează și faptul că materialul este considerat a fi omogen.

Datorită similitudinii cu materialele compozite, pentru testare se folosesc următoarele standarde:

- Pentru solicitarea de tracţiune – standardul ASTM D638 [AST14A];
- Pentru solicitarea de compresiune – standardul ASTM D695 [AST15];
- Pentru solicitarea de încovoiere – standardul ASTM D790 [AST17];
- Pentru solicitarea de forfecare – standardul ASTM F606 [AST14B].

3.2. Echipamente și materiale utilizate

Ca material de studiu în cercetări se utilizează filamentul Innofil/Ultrafuse cu 15% fibre scurte de carbon cu o matrice de polietilenă tereftalat – PET. Pentru a evidenția influența fibrelor de carbon asupra polimerului PET, în cercetări se utilizează și un filament Innofil/Ultrafuse PET.

În procesul de fabricație se utilizează imprimanta BCN3D Epsilon W50, care este o imprimantă industrială cu dimensiuni mari ale platformei de lucru (420 mm x 300 mm x 400 mm).

Pentru testele de tracţiune, compresiune și încovoiere, se utilizează mașina universală de testat WDW-150S produsă de IE Corporation, Jinan, China, iar pentru solicitarea de forfecare se utilizează mașina de testat MTS Criterion C43.504, produsă de MTS System Corporation, SUA.

Pentru analiza vizuală a specimenelor se utilizează microscopul Nikon T1-SM produs de către compania Nikon Industrial Metrology din Japonia, microscopul Leica Emspira 3 produs de către compania Leica Microsystems din Germania și microscopul Hitachi S3400N tip II, produs în Japonia, pentru analize de tip SEM.

3.3. Analiza microscopică a filamentului PET CF15

Întrucât calitatea filamentului este importantă pentru rezultatul final al pieselor obținute, se realizează o analiză vizuală cu ajutorul microscopului Nikon T1-SM și a microscopului Hitachi S3400N Tip II.

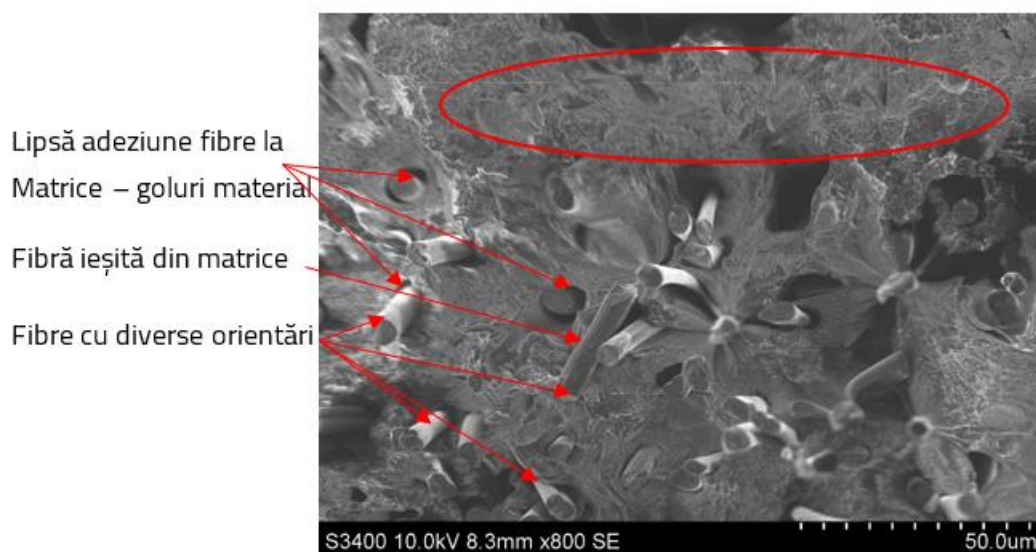


Figura 2 Secțiune transversală a filamentului PET CF15 – Microscop Hitachi S3400N Tip II [BLA24A]-Detaliu

Pentru zonele considerate pentru inspecția vizuală, se constată faptul că secțiunile transversale considerate prezintă abateri de circularitate, goluri de material de dimensiuni variabile, conglomerate de fibre scurte de carbon sau zone în care fibrele de carbon nu sunt prezente. De asemenea, se constată prezența unor fibre de carbon care nu sunt orientate pe direcție perpendiculară la secțiunea considerată sau fibre de carbon care sunt ieșite din matrice, ca în exemplu din Figura 2.

3.4. Fabricarea și testarea la tracțiune a specimenelor din PET CF15

Inițial se recurge la fabricarea și testarea specimenelor la tracțiune pe direcție longitudinală. Se prindează câte un set de câte 5 specimene pentru fiecare combinație de parametri. În urma fabricării celor 9 seturi a câte 5 epruvete fiecare s-a constatat faptul că la nivel vizual, suprafețele/piese realizate cu ajutorul acestei imprimante sunt de o bună calitate [BLA24A]. Timpul de fabricație a variat de la 4 până la 8 ore, cu mențiunea că specimenele au aceeași poziție pe platforma imprimantei.

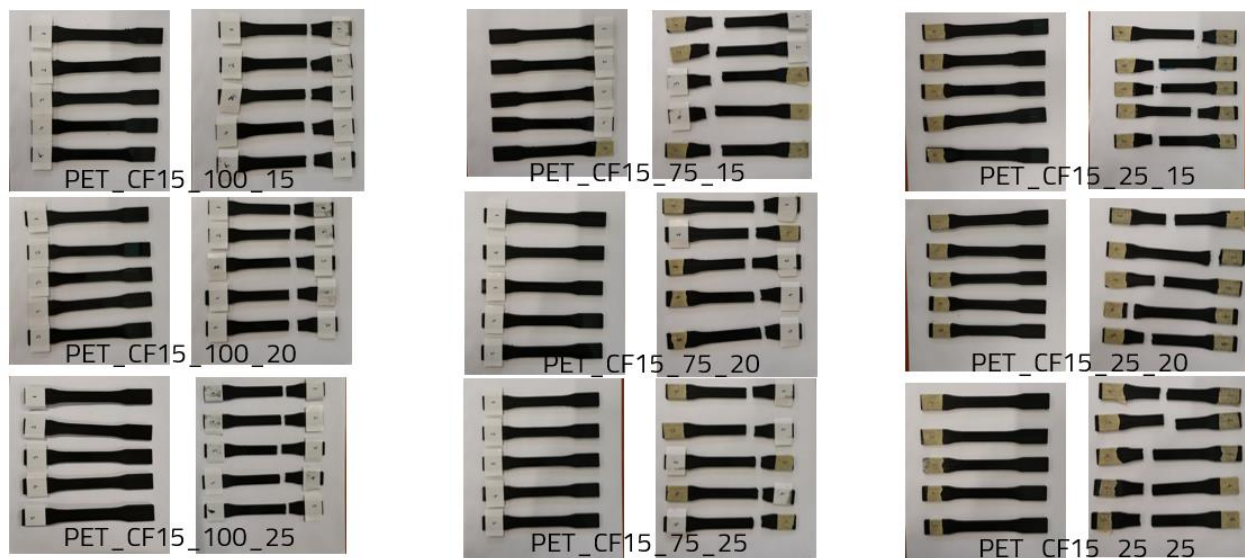


Figura 3 Specimene tracțiune - direcție longitudinală – înainte și după testare [BLA24A]

În Figura 3 sunt prezentate specimenele de tracțiune fabricate cu orientarea materialului deșus pe direcție longitudinală, înainte și după testare, pentru fiecare set considerat – bazat pe codificarea aferentă. În urma solicitării de tracțiune, se constată faptul că pentru setul în care densitatea materialului este 100% și grosimea stratului de material este 0.15 mm, se obțin cele mai omogene rezultate, secțiunea de rupere fiind relativ similară și în aproximativ în aceeași locație. Influența infill-ului este vizibilă odată cu scăderea valorii până la 25 %, unde se constată cele mai slabe caracteristici din punct de vedere vizual: zone cu delaminări mai accentuate comparativ cu celelalte specimene (cu alte valori ale infill-ului), dar și zone în care ruperea se produce în puncte aleatorii ale specimenelor, neexistând o similitudine între acestea.

Din punct de vedere vizual, pentru parametrul de variație al grosimii stratului de material deșus nu se pot trage concluzii după o analiză macroscopică, din cauza rezultatelor similare în privința ruperii și a secțiunilor generate. Influența acestui parametru este analizată cu ajutorul microscopului [BLA24A].

De asemenea, pentru fiecare set de specimene se definesc curbele de material, însă în Figura 4 sunt prezentate curbele de material pentru setul cu cele mai bune rezultate, pentru setul în care densitatea materialului este 100% și grosimea stratului de material este 0.15 mm.

Analizând Figura 4 se observă un comportament similar pentru toate cele 5 specimene. În zona liniară a curbei se observă o suprapunere aproape identică a acestora, zona în care Legea lui Hooke este aplicabilă. Începând cu zona în care are loc tranziția din regim elastic în regim plastic, adică zona în care are loc o creștere mai bruscă a elongațiilor, speciamentele încep să se diferențieze, însă diferențele nu sunt majore, având un comportament similar. După depășirea punctului în care apar deformații remanente, piesa începe să aibă deformații plastice, care duc la continuarea regimului de diferențiere a curbelor, materialul comportându-se diferit, înregistrându-se puncte diferite pentru rezistența la tracțiune, înregistrate la valori diferite ale elongațiilor.

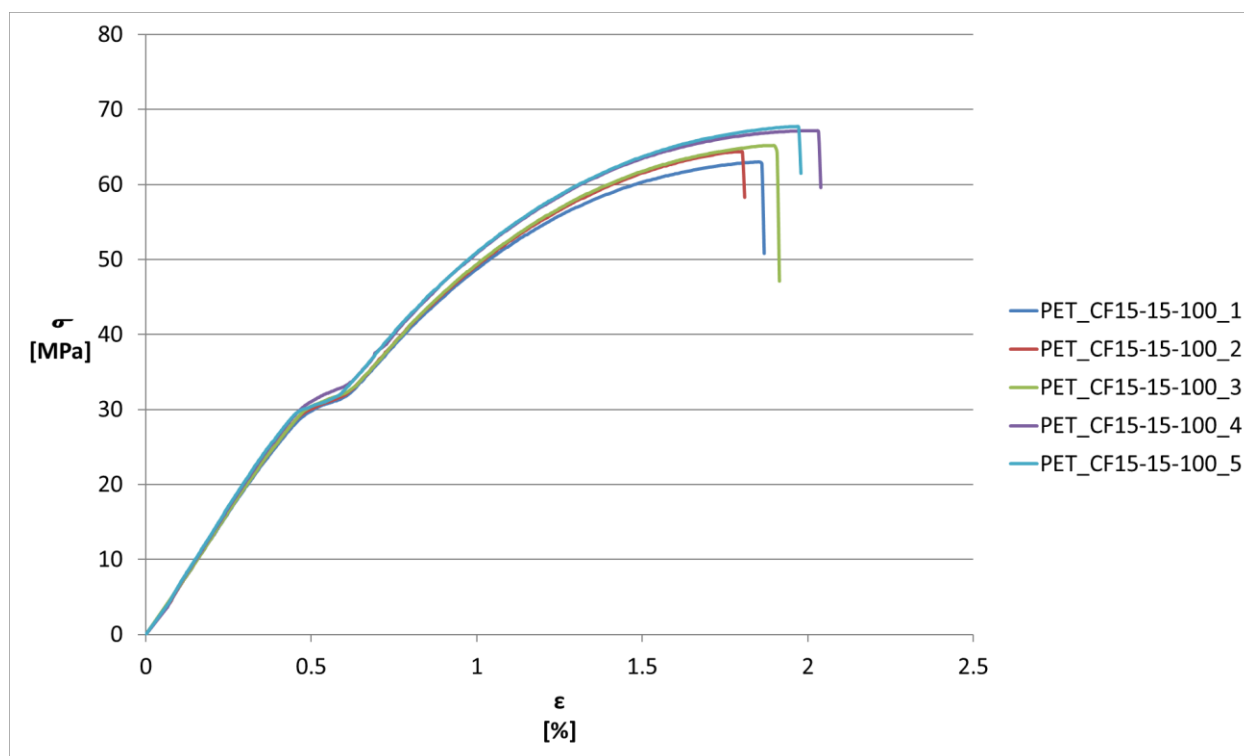


Figura 4 Curba caracteristică de tracțiune pentru PET CF15_15_100 – longitudinal [BLA24A]

Valorile reprezentative care vor fi utilizate pentru a descrie matematic materialul PET CF15 în direcție longitudinală sunt prezentate în Tabelul 1. Din valorile menționate în tabelul anterior menționat, se înregistrează o rigiditate identică pentru toate speciamentele, calculându-se și valorile medii ale întregului set de specimene ce este utilizat în continuare pentru comparații și analize. Pentru rezistența la tracțiune se înregistrează o valoare maximă de 68 MPa, iar valoarea minimă este de 63 MPa. Limita de elasticitate are o valoare maximă de 55 MPa și o valoare minimă de 49 MPa. Valoarea maximă a elongației la rupere este de 2.05%, iar valoarea minimă este de 1.82 %. Valoarea maximă pentru tensiuni este înregistrată la specimenul numărul 5, valoarea minimă, la specimenul numărul 1. Valoarea maximă pentru elongații este înregistrată la specimenul numărul 4, iar cea minimă, la specimenul numărul 2.

Acestea sunt valorile parametrilor de fabricație care vor fi utilizate mai departe în descrierea materialului, cât și pentru alte comparații, dar și pentru studiul de caz. Mai mult, parametrii de

fabricație sunt utilizați pentru continuarea studiului de tracțiune pentru celelalte direcții, cât și pentru determinarea comportamentului materialului la compresiune, încovoiere și forfecare.

Tabelul 1. Rezultate teste tracțiune pentru direcția longitudinală a epruvetelor PET_CF15_15_100 [BLA24A]

Specimen	Parametru					
	Fm [kN]	Rm [MPa]	Fp [kN]	Rp[kN]	E [GPa]	ϵ [%]
PET_CF15_15_100_1	2.661	63	2.066	49	9	1.88
PET_CF15_15_100_2	2.718	64	2.133	50	9	1.82
PET_CF15_15_100_3	2.753	65	2.146	51	9	1.91
PET_CF15_15_100_4	2.837	67	2.228	53	9	2.05
PET_CF15_15_100_5	2.86	68	2.326	55	9	1.99
Media	2.77	65.40	2.18	51.60	9	1.93

În lucrarea se realizează, în mod similar, analize detaliate pentru fiecare set de specimene. Cele mai dezavantajoase rezultate sunt obținute pentru setul în care infill-ul este 25% și grosimea stratului de material este 0.25 mm. Valorile medii ale acestora sunt: Rm de 65.40 MPa, Rp de 51.60 MPa, modulul lui Young de 9 GPa și ϵ la rupere de 1.93%.

Se realizează și o analiză dimensională a speciimenelor. Abaterile sunt calculate pentru grosimea nominală a speciimenului de 3.2 mm și la lățimea nominală a acestuia de 13 mm. Prin prisma rezultatelor obținute, se constată că piesele cele mai stabile dimensional sunt piesele cu valoarea infill-ului cea mai mică, iar grosimea stratului de material nu are un impact major în această analiză. Există specimene care din cauza unor defecte de fabricație înregistrează abateri dimensionale cu valori extreme, în general acestea fiind mai mari decât dimensiunile nominale propuse de standard. Cele mai mari abateri sunt înregistrate la lățimea speciimenelor.

Similar cu metoda de fabricație și testare a speciimenelor pe direcție longitudinală, se parcurg aceleași etape pentru a obține rezultate pentru speciimenele de tracțiune cu material depus pe direcție transversală. În acest caz se constată faptul că acest set de specimene are un comportament mai casant în comparație cu seturile cu material depus în direcția X. Astfel, pentru direcția transversală, Rm este 41 MPa, Rp este 9 MPa, E este 7 GPa și elongația la rupere este 1.00% [BLA24A]. Din punctul de vedere al abaterilor dimensionale, în acest caz nu există specimene care înregistrează abateri dimensionale cu valori extreme, în general acestea fiind mai mari decât dimensiunile nominale propuse de standard.

Aceleași etape sunt parcurse și pentru speciimenele de tracțiune cu material depus pe direcție verticală, unde valorile proprietăților mecanice sunt: Rm este 3 MPa, Rp este 1 MPa, E este 1 GPa și elongația la rupere este 0.23%. Speciimenele cu materialul depus în această direcție au cel mai imprevizibil comportament, în aplicațiile practice fiind necesară evitarea fabricării pieselor cu materialul depus în această manieră. Din punctul de vedere al analizei dimensionale, se constată că speciimenele nu sunt compacte, înregistrându-se și valori extreme, chiar dacă acestea sunt fabricate în același set și condiții.

Astfel, în Tabelul 2 sunt prezentate rezultatele testelor de tracțiune pentru speciimenele din PET CF15, valori ce vor fi utilizate mai departe în cadrul cercetărilor.

Tabelul 2. Rezultatele testelor de tracţiune a epruvetelor PET CF15 [BLA24A]

Specimen tracţiune	Parametru			
	Rm [Mpa]	Rp[Mpa]	E [Gpa]	ϵ [%]
PET_CF15_X	65.4	51.6	9	1.93
PET_CF15_Y	41	9	7	1.00
PET_CF15_Z	3	1	1	0.23

După finalizarea testelor de tracţiune, fiecare specimen este inspectat vizual în vederea identificării defectelor de fabricaţie şi pentru determinarea criteriilor de cedare. Pentru o bună inspecţie vizuală, se utilizează microscopul prezentat anterior.

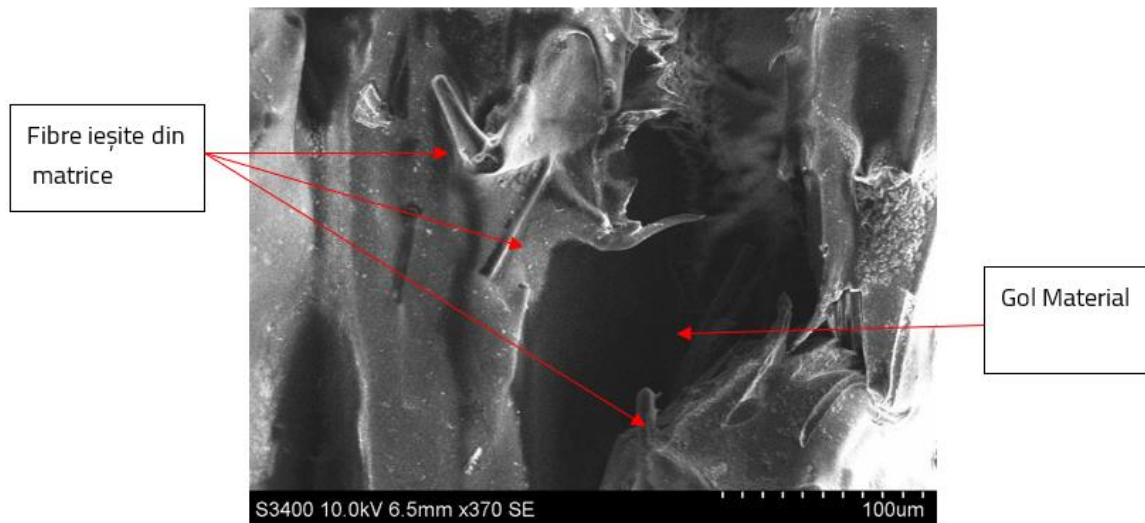


Figura 5 Defecte de fabricaţie Tracţiune X - PET CF15 – Defecte material (370X) – Microscop Hitachi S3400N Tip II

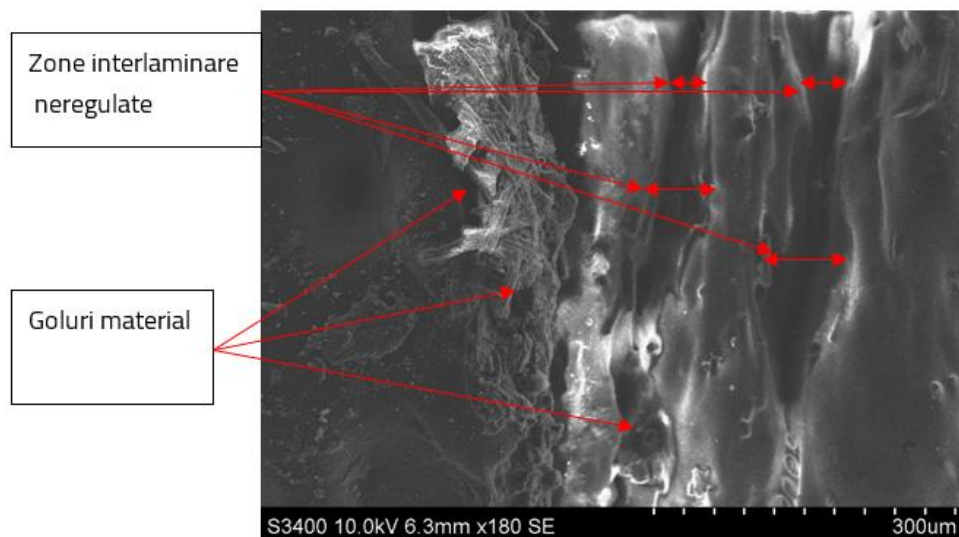


Figura 6 Defecte de fabricaţie Tracţiune X - PET CF15 – Defecte material (180X) – Microscop Hitachi S3400N Tip II [BLA24A]

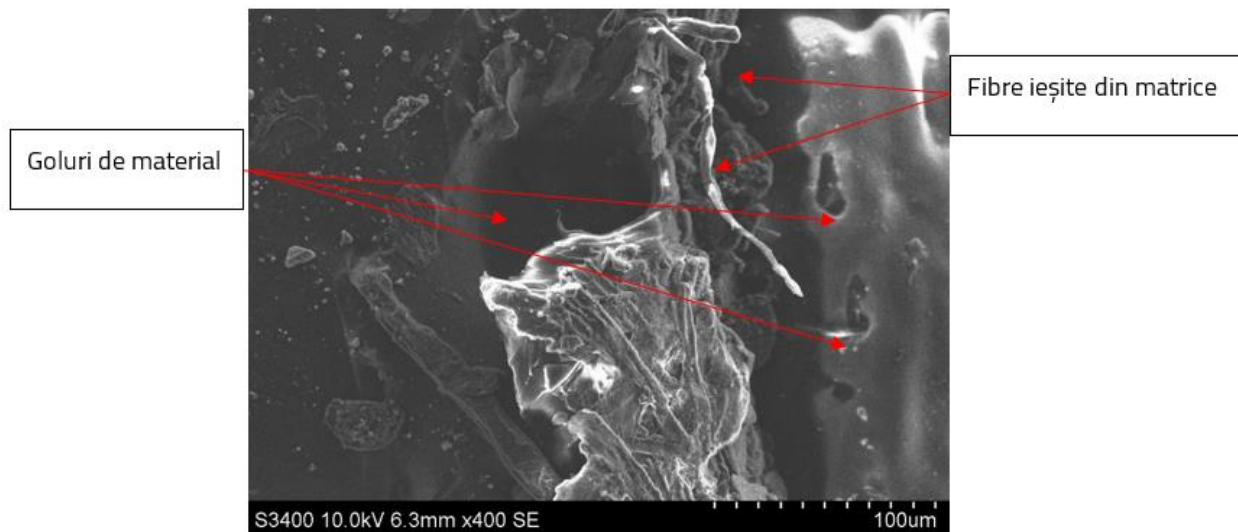


Figura 7 Defecte de fabricație Tracțiune X - PET CF15 – Defecte material (400X) – Microscop Hitachi S3400N Tip II [BLA24A]

În urma procesării informațiilor din cadrul imaginilor obținute la microscop, se constată faptul că există defecte de fabricație în toate speciunile, în toate fiind identificate goluri de material la care dimensiunea și ocurența acestora diferă, neputând fi prezise. Există și defecte de fabricație ale speciunelor care au o recurență mult mai scăzută, acestea depinzând atât de calitatea filamentului, cât și de procesul de fabricație aditivă. Printre acestea se numără zone cu material lipsă între straturile depuse, zone cu straturi de material care au dimensiuni diferite față de dimensiunile nominale ale acestora, fibre ieșite din matrice, zone cu lipsă de aderență între straturi, fibre scurte de carbon orientate aleatoriu, prezența unor conglomerate de material care afectează dimensiunile straturilor învecinate, zone cu depuneri neconforme de material, zone cu suprapuneri și solidificări defectuase de material sau zone interlaminare neregulate. În Figura 5, Figura 6 și Figura 7 sunt prezentate câteva exemple de defecte întâlnite la speciunile analizate.

Din totalitatea defectelor prezentate, nu toate pot fi anticipate și diminuate. Din acest motiv, pentru fiecare material nou utilizat, se recomandă o monitorizare manuală sau automată pentru a identifica defectele de material uzuale, dar și pentru a determina comportamentul acestuia pentru defecte care nu pot fi estimate. Pentru diverse aplicații, se recomandă o validare a calității pieselor prin încercări/teste de laborator [BLA24A].

Modalitățile de cedare sunt influențate de prezența defectelor de fabricație identificate anterior. Printre acestea se numără fibre de carbon ieșite din matrice după cedarea materialului în urma solicitării de tracțiune, ceea ce apare în urma unei slabe adeziuni între fibre de polimer, delaminări, apariția fisurilor sau ruperi în secțiuni neuniforme a materialului.

3.5. Fabricarea și testarea la compresiune a speciunelor din PET CF15

Studiul pentru solicitarea de compresiune se realizează pentru speciunile fabricate cu grosimea stratului de 0.15 mm și infill de 100%. În urma testelor, se constată un comportament al speciunelor: în funcție de direcția de depunere a materialului, se obține atât un comportament casant pentru direcțiile de orientare a materialului în X și Y, cât și un comportament mai flexibil pentru

direcția de depunere pe Z. În Tabelul 3 sunt prezentate rezultatele testelor de compresiune pentru speciunile din PET CF15.

Tabelul 3. Rezultatele testelor de compresiune a epruvetelor PET CF15

Specimen compresiune	Parametru			
	Rcu [MPa]	Rcy[MPa]	E [GPa]	ε [%]
PET_CF15_C_X	70.6	62	2.22	1.47
PET_CF15_C_Y	70.6	62	2.22	1.47
PET_CF15_C_Z	108.8	56.8	1.41	9.81

Toate piesele înregistrează abateri dimensionale față de dimensiunile nominale ale specimenului, însă în acest caz, valorile abaterilor sunt mici.

Ca defecte de fabricație, speciunile studiate prezintă goluri de material care pot fi cauzate de o slabă aderență a fibrelor la matricea de PET care conduc la delaminare și tasarea straturilor de material din structura internă. Există și defecte care nu pot fi estimate, acestea fiind influențate și de calitatea filamentului, dar și de procesul de fabricație. Printre acestea se enumără: prezența zonelor cu lipsă de material, lipsa de aderență a fibrelor de carbon la matricea din PET, dar și lipsa de aderență a straturilor de material cu lățimi diferite după depunere.

Ca modalități de cedare, în cazul orientării depunerii materialului pe direcția X și Y, se constată apariția delaminărilor și a flambajului, în schimb, pentru direcția verticală de depunere a materialului se constată că nu toate speciunile au cedat, înregistrarea valorilor fiind limitată de sistemul software al mașinii universale de testat.

3.6. Fabricarea și testarea la încovoiere a speciunelor din PET CF15

Cercetările pentru solicitarea de încovoiere se realizează pentru speciunile fabricate cu grosimea stratului de 0.15 mm și infill de 100%, pentru toate cele 3 direcții de orientare specificate. Pentru solicitarea de încovoiere a speciunelor realizate din PET CF15, se constată un comportament casant al epruvetelor. Cel mai slab rezultat este obținut pentru speciunile cu materialul depus pe direcția Z, unde se constată o slabă aderență a straturilor de material.

În Tabelul 4 sunt prezentate valorile înregistrate pentru speciunile din PET CF15 care vor fi utilizate în cercetări. Se constată faptul că pe direcția Y, în acest caz, s-au obținut rezultatele cele mai bune.

Tabelul 4. Rezultatele testelor de încovoiere a epruvetelor PET CF15

Specimen încovoiere	Parametru		
	Rbru [MPa]	Rbry [MPa]	Eb [GPa]
PET_CF15_I_X	105	98.8	4.1
PET_CF15_I_Y	122.4	120.8	6.5
PET_CF15_I_Z	35	28	3.5

Toate piesele înregistrează abateri dimensionale reduse față de dimensiunile nominale ale specimenului.

Ca defecte de fabricație, speciunile studiate prezintă goluri de material care pot fi cauzate de o slabă aderență a fibrelor la matricea de PET care conduc la cedarea epruvetelor. Există și defecte care

nu pot fi estimate, acestea fiind influențate de calitatea filamentului, dar și de procesul de fabricație, acestea fiind similare cu cele prezentate pentru solicitările de tracțiune și compresiune.

Ca modalități de cedare, în cazul orientării depunerii materialului pe direcția X și Y, se constată apariția cedărilor materialului în aproximativ același loc, ceea ce evidențiază o stabilitate și o relativă omogenitate a pieselor din lot. În schimb, pentru speciamentele cu material depus pe direcția Z, se constată faptul că ruperea se realizează în zone diferite.

3.7. Fabricarea și testarea la forfecare a speciamentelor din PET CF15

Pentru solicitarea de forfecare a epruvetelor realizate din PET CF15, se constată un comportament similar pentru toate speciamentele, abaterile fiind reduse. Rezultatele sunt obținute pentru parametrii de fabricație: grosimea stratului de 0.15 mm și infill de 100%.

Ca modalitate de cedare, se constată o rupere într-o secțiune neuniformă a speciamentelor. Față de epruvetele caracteristice altor tipuri de solicitări în cazul depunerii materialului pe direcția Z, se constată faptul că cedarea nu are loc în zona interlaminară. În Tabelul 5 sunt prezentate valorile înregistrate la solicitarea de forfecare pentru speciamentele din PET CF15, care pot fi utilizate în cercetări.

Tabelul 5. Rezultatele testelor de forfecare a epruvetelor PET CF15

Specimen forfecare	Parametru			
	Rsu [MPa]	Rsy[MPa]	G [GPa]	γ [%]
PET_CF15_F_X	70.5	38.8	2.71	1.83
PET_CF15_F_Y	70.5	38.8	2.71	1.83
PET_CF15_F_Z	47.2	37.3	2.95	1.65

Toate piesele înregistrează abateri dimensionale față de dimensiunile nominale ale speciamentului, însă în acest caz, valorile abaterilor sunt relativ mici.

4. PRELUCRAREA STATISTICĂ A DATELOR EXPERIMENTALE PENTRU SOLICITAREA DE TRACŢIUNE

Pentru o determinare rapidă a valorii rezistenţei la rupere în funcţie de valorile parametrilor de fabricaţie, se recurge la proiectarea a experimentelor în vederea elaborării unui model matematic. Scopul este de a descrie influenţa variabilelor considerate în cazul experimentelor menţionate în capitolul 3 (grosimea stratului şi infill-ul) asupra rezistenţei la rupere pentru solicitarea de tracţiune. În definirea modelului matematic sunt considerate rezultatele obţinute pentru speci­menele de tracţiune pentru direcţie longitudinală cu scopul de a identifica şi din punct de vedere matematic importanţa parametrilor de fabricaţie.

În acest studiu se consideră 2 parametri care au câte 3 niveluri, a câte 5 repetări. În acest caz, se construieşte un model matematic de regresie, deoarece prin proiectarea experimentelor se pot anticipa informaţii referitoare la o variabilă, în funcţie de cealaltă. Cu ajutorul sistemului software MiniTab, se determină ordinea stabilită pentru desfăşurarea cercetărilor experimentale.

În acest caz, determinarea modelului de regresie este un proces iterativ, în care se consideră ca variabilă dependentă rezistenţa la rupere – R_m . Valorile independente considerate pentru fiecare determinare sunt densitatea materialului (Infill-ul) [%] şi grosimea stratului de material depus [mm].

Se completează în Minitab valorile obţinute din teste ale tuturor speci­menelor, acestea definind domeniul de eşantionare, în acest caz $Y=R_m$, iar $X_1=Infill$ [%] şi $X_2=grosimea$ stratului de material depus [mm]. După un procesul iterativ de selecţie, se obţine următoarea ecuaţie de gradul 2, în care I este densitatea de material (Infill-ul) şi t este grosimea stratului de material [BLA24A]:

$$R_m = 67.7 + 0.2739 \cdot I - 3.15 \cdot t + 0.0653 \cdot t^2 \quad (1)$$

În Minitab se obţine un rezumat al modelului de regresie care se regăseşte în Tabelul 6. Valorile coeficienţilor R^2 fiind peste 90%, modelul matematic prezintă o funcţionalitate ridicată, acesta putând fi utilizat şi pentru a obţine valori în afara intervalelor de referinţă ale parametrilor independenţi utilizaţi [BLA24A].

Tabelul 6. Rezumatul modelului de regresie pentru predicţia lui R_m [BLA24A]

S	R-sq	R-sq [adj]	R-sq [pred]
2.3268	94.08%	93.65%	92.85%

Termenii ecuaţiei sunt corelaţi cu diagrama Pareto a modelului de regresie. În acest caz, se observă influenţa cea mai ridicată a Infill-ului în comparaţie cu ceilalţi termeni ai relaţiei.

Coeficientul de determinaţie de peste 90% recomandă utilizarea modelului matematic obţinut pentru calculul caracteristicilor mecanice la tracţiune (rezistenţa la rupere) pentru epruvete fabricate din materialul PET CF15 în funcţie de parametrii de intrare consideraţi: grosimea stratului de material şi Infill-ul [BLA24A].

5. CERCETĂRI PRIVIND DETERMINAREA PROPRIETĂŢILOR MECANICE ALE PIESELOR FABRICATE DIN POLIMERUL MATERIALULUI COMPOZIT CU FIBRE SCURTE DE CARBON, PRIN PROCEDEUL FDM

Epruvetele fabricate din PET sunt obținute cu grosimea stratului de 0.15 mm și infill de 100% și testate în aceleași condiții cu specișenele fabricate din PET CF15, pentru a evidenția influența adăugării fibrelor de carbon în polimerul PET.

5.1. Fabricarea și testarea la tracțiune a specișenelor din PET

Pentru solicitarea la tracțiune a specișenelor fabricate din PET cele mai bune rezultate sunt înregistrate pentru epruvetele poziționate pe direcție longitudinală (X). În baza acestor rezultate, se continuă analiza materialului și pentru celelalte direcții, și anume Y și Z.

Cu cât se modifică orientarea piesei pe masa imprimantei, se constată faptul că zonele de cedare sunt poziționate diferit, epruvetele devenind mai casante, mai ales pentru piesele cu material depus în direcția Z.

În Tabelul 7 sunt prezentate valorile înregistrate pentru solicitarea de tracțiune pentru specișenele din PET.

Tabelul 7. Rezultatele testelor de tracțiune a epruvetelor PET

Specimen tracțiune	Parametru			
	Rm [MPa]	Rp[MPa]	E [GPa]	ϵ [%]
PET_X	32.6	26.8	2.2	2.03
PET_Y	31	7	2	0.94
PET_Z	7	3	1.5	0.35

Ca defecte de fabricație, specișenele studiate prezintă goluri de material care pot fi cauzate de o slabă aderență a fibrelor la matricea de PET. Există și defecte care nu pot fi estimate, acestea fiind influențate atât de calitatea filamentului, cât și de procesul de fabricație. La specișenele cu materialul depus în direcția Z se constată cea mai slabă aderență între straturile de material.

Modurile de cedare observabile ale materialului în urma solicitării de tracțiune sunt determinate, în principal, de delaminare.

Toate epruvetele înregistrează abateri dimensionale față de dimensiunile nominale, însă acestea sunt influențate de modul de orientare al piesei pe masa imprimantei. În unele cazuri, se constată și valori mari, cu diferențe majore față de restul specișenelor, însă acestea sunt rezultatul unor defecte de fabricație.

5.2. Fabricarea și testarea la compresiune a specișenelor din PET

Pentru solicitarea de compresiune a specișenelor realizate din PET, se constată un comportament diferit. În funcție de direcția de depunere a materialului, se obține atât un comportament casant pentru direcțiile de orientare a materialului în direcțiile X și Y și un comportament mai flexibil pentru direcția de depunere pe Z.

Ca modalitate de cedare, în cazul orientării depunerii materialului pe direcția X și Y, se constată apariția delaminărilor, în schimb, pentru direcția verticală de depunere a materialului se constată că nu toate speciamentele au cedat, înregistrarea valorilor fiind limitată de sistemul software al mașinii universale de testat. În Tabelul 8 sunt prezentate valorile înregistrate pentru speciamentele din PET care vor fi utilizate în cercetare.

Tabelul 8. Rezultatele testelor de compresiune a epruvetelor PET

Specimen compresiune	Parametru			
	R _{cu} [MPa]	R _{cy} [MPa]	E [GPa]	ε [%]
PET_C_X	48.2	44.2	1.09	1.41
PET_C_Y	48.2	44.2	1.09	1.41
PET_C_Z	71.2	64.6	2.17	4.62

Ca defecte de fabricație, toate speciamentele studiate prezintă goluri de material, delaminări și tasări ale straturilor de material din structura internă. Piesele înregistrează abateri dimensionale față de dimensiunile nominale ale speciamentului, însă în acest caz, valorile abaterilor sunt relativ mici pentru procedeul de fabricație studiat.

5.3. Fabricarea și testarea la încovoiere a speciamentelor din PET

Pentru solicitarea de încovoiere a speciamentelor realizate din PET, se constată un comportament fragil al materialului. Cel mai slab rezultat este obținut pentru speciamentele cu materialul depus pe direcția Z, unde se constată o slabă aderență a straturilor de material. În Tabelul 9 sunt prezentate valorile înregistrate pentru speciamentele din PET care vor fi utilizate mai departe în cercetări, se constată faptul că pe direcția Y în acest caz s-au obținut rezultate mai bune.

Tabelul 9. Rezultatele testelor de încovoiere a epruvetelor PET

Specimen încovoiere	Parametru		
	R _{bru} [MPa]	R _{bry} [MPa]	E _b [GPa]
PET_I_X	85	83	4.3
PET_I_Y	96	85	4.5
PET_I_Z	50	31	4

Ca modalitate de cedare, în cazul orientării depunerii materialului pe cele 3 direcții, se constată faptul că ruperea se realizează în locuri diferite, la unele speciamente existând și zone multiple de cedare.

Ca defecte de fabricație, speciamentele studiate prezintă goluri de material care pot fi influențate de o slabă aderență a fibrelor la matricea de PET care conduc la cedarea speciamentelor. Există și defecte care nu pot fi estimate, acestea fiind cauzate de calitatea filamentului, dar și de procesul de fabricație.

Toate piesele înregistrează abateri dimensionale față de dimensiunile nominale ale speciamentului, însă în acest caz, valorile abaterilor sunt mici.

5.4. Fabricarea și testarea la forfecare a speci­menelor din PET

Pentru solicitarea de forfecare a speci­menelor fabricate din PET, se constată un comportament similar pentru toate speci­menele, abaterile fiind relativ mici. În Tabelul 10 sunt prezentate valorile înregistrate pentru speci­menele din PET care pot fi utilizate în cercetări.

Tabelul 10. Rezultate teste forfecare epruvete PET

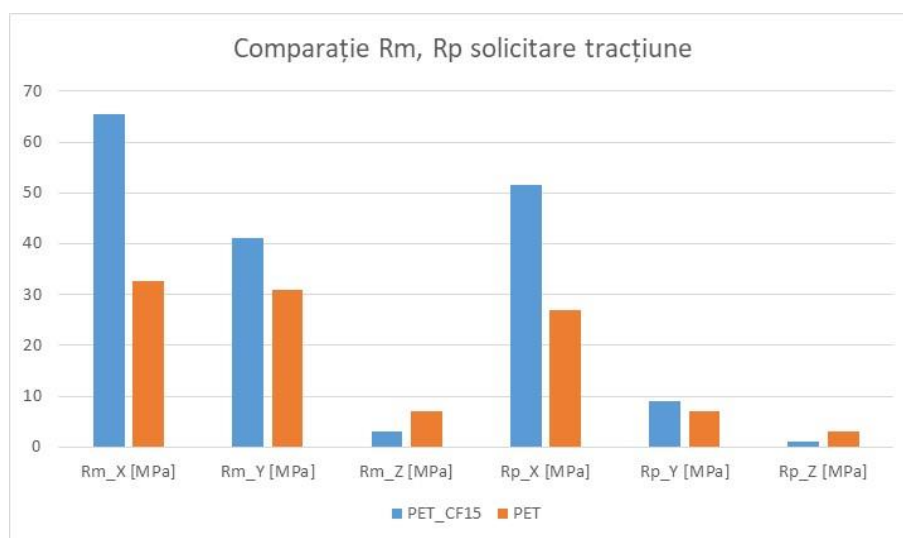
Specimen forfecare	Parametru			
	Rsu [MPa]	Rsy[MPa]	G [GPa]	γ [%]
PET_F_X	52.3	47.2	2.36	2.03
PET_F_Y	52.3	47.2	2.36	2.03
PET_F_Z	49.9	39.6	1.83	2.25

Ca modalitate de cedare, se constată că ruperea are loc într-o secțiune neuniformă a speci­menelor. Față de speci­menele altor tipuri de solicitări în cazul speci­menelor cu materialul depus pe direcția Z se evidențiază faptul că cedarea nu are loc în zona interlaminară.

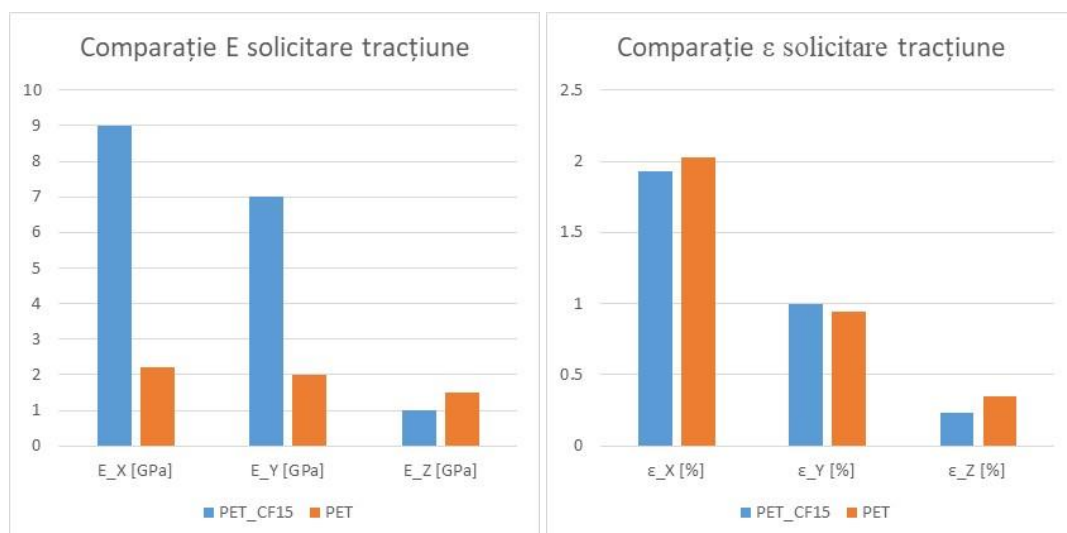
Toate piesele înregistrează abateri dimensionale față de dimensiunile nominale ale speci­menului, însă în acest caz, valorile abaterilor sunt mici.

6. INFLUENŢA FIBRELOR DE CARBON ASUPRA COMPORTAMENTULUI MECANIC AL MATERIALULUI PET

În acest capitol se realizează o comparație a rezultatelor obținute în capitolele 3 și 5 pentru a evidenția influența fibrelor scurte de carbon asupra materialului PET care constituie polimerul materialului compozit PET CF15, din punctul de vedere al proprietăților mecanice, dar și a defectelor de fabricație și al modului de cedare în urma diverselor solicitări ale epruvetelor studiate. Din punctul de vedere al rezultatelor obținute pentru proprietățile mecanice, se realizează o comparație a valorilor obținute și prezentate în Tabelul 1-Tabelul 5 și Tabelul 7-Tabelul 10. Astfel, analizând rezultatele din tabelele anterioare, se constată faptul că adaosul de 15% de fibre scurte de carbon în materialul PET are un efect benefic asupra proprietăților mecanice, acestea fiind, de regulă, îmbunătățite, indiferent de direcția de depunere a materialului.



a)

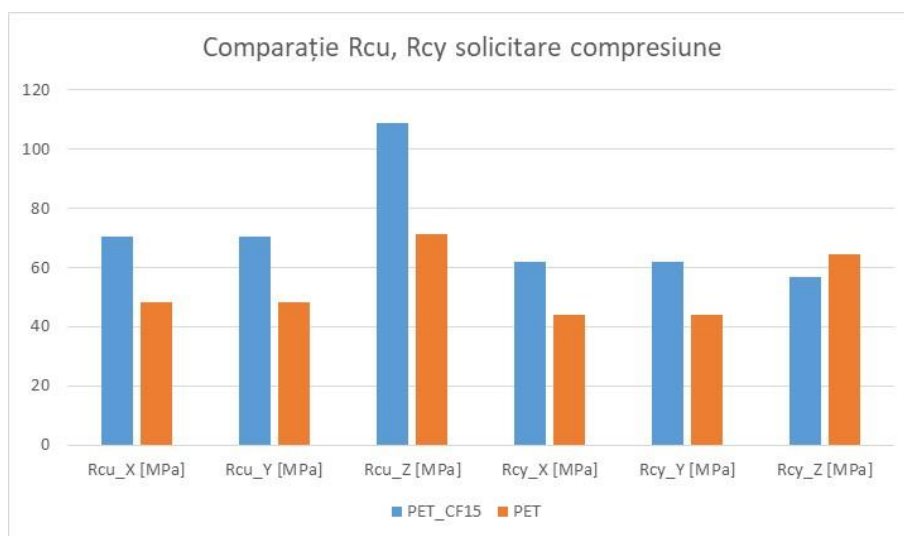


b)

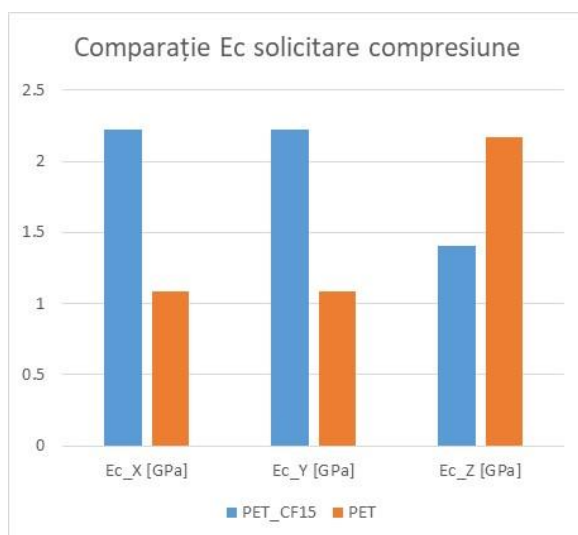
c)

Figura 8 Comparație valori proprietăți mecanice pentru solicitarea de tracțiune – PET CF15 vs PET: a) Comparație Rm [MPa], Rp [MPa]; b) Comparație E [GPa]; c) Comparație ε[%].

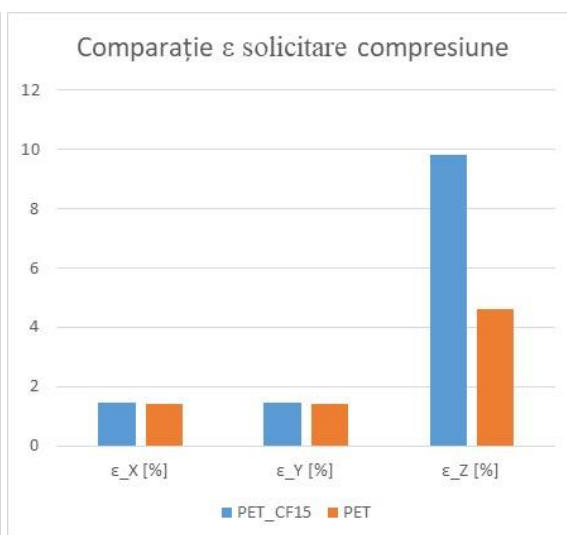
La tracţiune pe direcţia X (direcţia longitudinală), se constată o creştere substanţială a proprietăţilor mecanice (o dublare a valorilor pentru R_m , R_p şi de aproximativ 4 ori mai mare modulul longitudinal de elasticitate E). Pe direcţia Y (direcţie transversală) este o creştere în jur de 30% a mărimilor R_m , R_p şi 3,5 ori a modulul longitudinal de elasticitate (E). Pentru ambele materiale, cele mai slabe rezultate sunt înregistrate pentru speci­menele cu materialul depus pe direcţia Z, acestea nefiind 100% relevante. În acest caz, explicaţia constă în faptul că straturile de material depuse nu prezintă o aderenţă ridicată între acestea, faţă de celelalte direcţii de depunere, înregistrându-se, cu preponderenţă, goluri de material, rezultând nişte speci­mene cu un caracter casant, care nu au înregistrat valori pentru testările aferente. În baza datelor centralizate în Tabelul 2 şi Tabelul 7, se realizează o comparaţie grafică pentru a se evidenţia influenţa fibrelor scurte de carbon în PET - Figura 8.



a)



b)

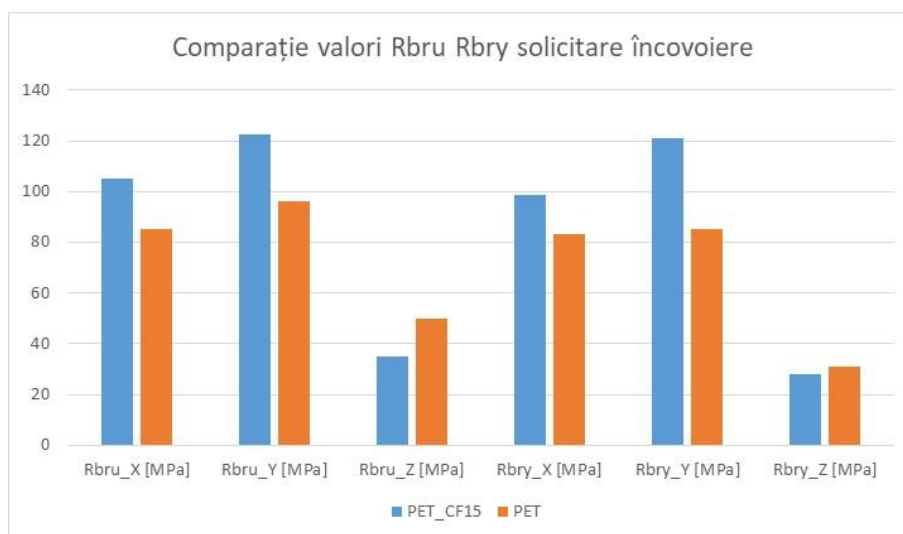


c)

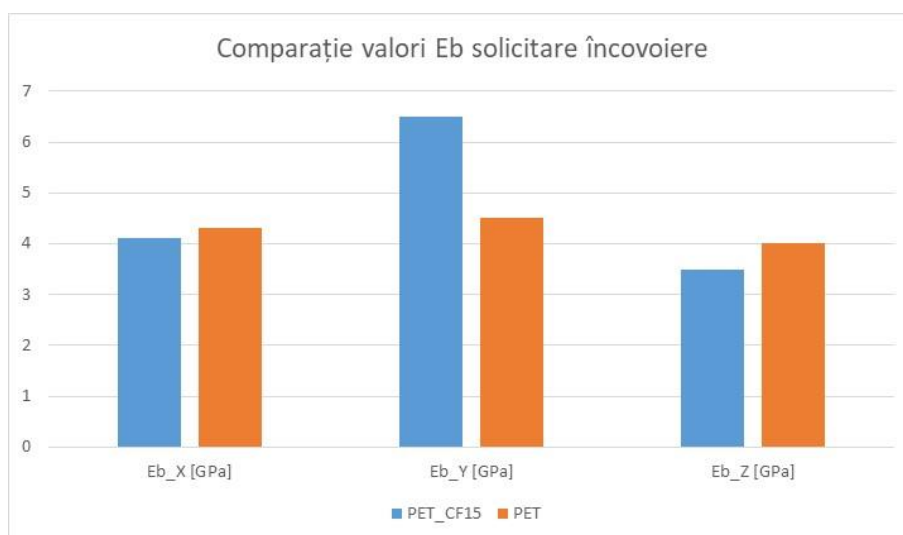
Figura 9 Comparație valori proprietăți mecanice pentru solicitarea de compresione – PET CF15 vs PET: a) Comparație Rcu [MPa], Rcy [MPa]; b) Comparație Ec [GPa]; c) Comparație ε[%].

Pentru compresione cele mai avantajoase rezultate sunt obținute pentru direcția Z. În acest caz se constată un comportament diferit al materialelor: PET CF15 are un caracter casant, în schimb PET

având un caracter mai flexibil. Acest comportament este evidențiat atât în rezultatul final al inspecției vizuale în urma testării, dar și în modul de realizare a curbelor de material. Pentru speci­me­nele din PET se constată apariția efectului de butoi (la speci­me­nele fabricate cu materialul depus pe direcția Z), având o capacitate ridicată de deformare față de speci­me­nele din PET CF15. Astfel, pentru direcția Z se constată o creștere de aproximativ 1.5 ori a valorii pentru R_{cu} și de aproximativ 2.1 ori pentru elongație, însă pentru R_{cy} și E , adăugarea fibrelor scurte au o influență negativă, valorile acestor mărimi scăzând la aproximativ 0.87 ori pentru R_{cy} și 0.64 ori pentru E . Totuși pentru direcția longitudinală/transversală, adăugarea fibrelor scurte de carbon reprezintă o îmbunătățire de 1.5 ori a valorilor mărimilor R_{cu} și R_{cy} și o dublare a valorii rigidității. Valoarea elongației este similară. Valorile prezentate în Tabelul 3 și Tabelul 8 sunt materializate în format grafic (Figura 9), în acest fel se vizualizează comparativ influența fibrelor scurte de carbon asupra materialului PET.



a)

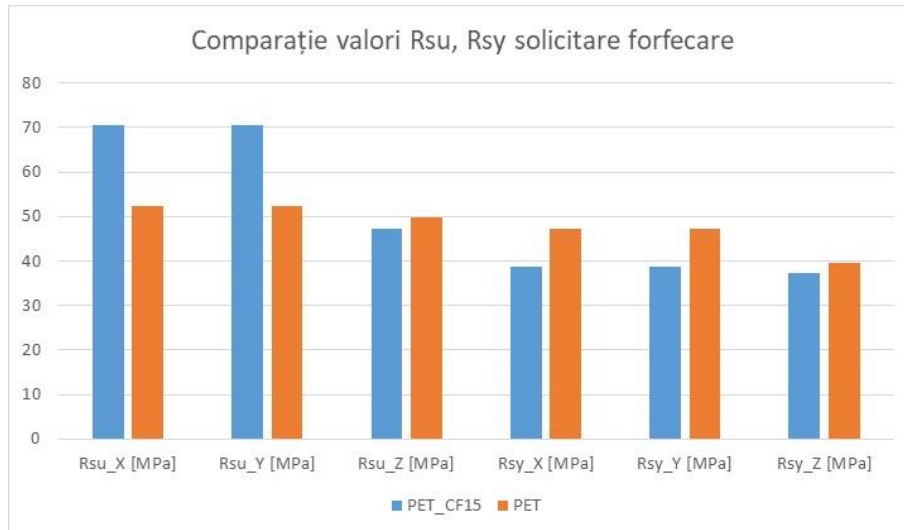


b)

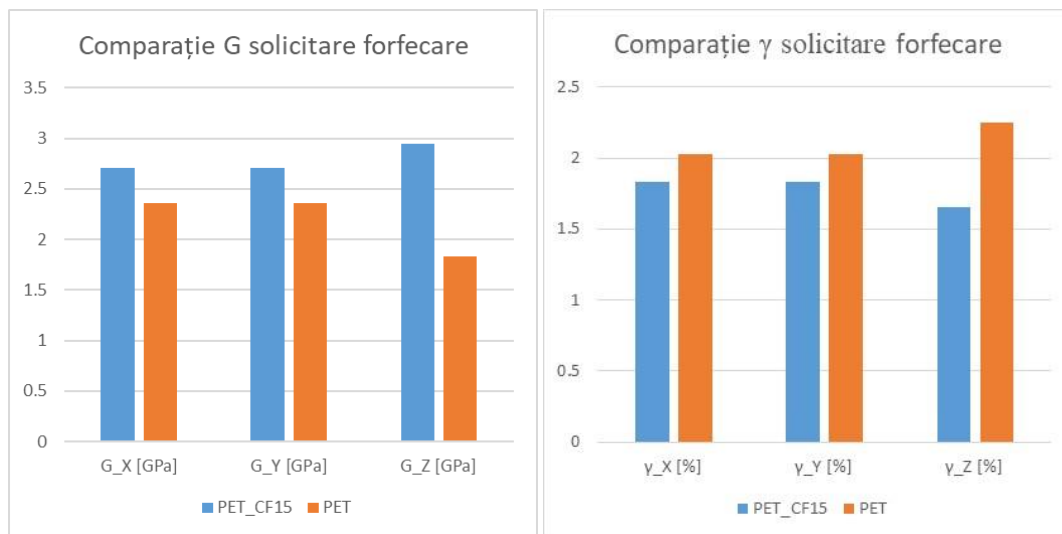
Figura 10 Comparație valori proprietăți mecanice pentru solicitarea de încovoiere – PET CF15 vs PET: a) Comparație R_{bru} [MPa], R_{bry} [MPa]; b) Comparație E_b [GPa].

Pentru încovoiere cele mai avantajoase rezultate sunt cele obținute pentru direcția Y, iar cele mai slabe pentru direcția Z. În acest caz sunt prezente defecte de fabricație similare ca în cazul

specimenelor de tracţiune. Caracterul flexibil al materialului este evidenţiat în special pentru speci­mele cu material depus pe direc­ţia Z, unde pentru R_{bru} se înregistrează o valoare de 0.7 ori mai mică în urma adăugării fibrelor de carbon. R_{bry} şi E scad de aproximativ 0.9 ori. Pentru celelalte direc­ţii (X şi Y), se înregistrează îmbunătăţiri ale valorilor cuprinse între aproximativ 1.2-1.4 ori. Pentru solici­tarea de încovoiere valorile din Tabelul 4 şi Tabelul 9 sunt reprezentate grafic şi prezentate în Figura 10.



a)



b)

c)

Figura 11 Comparație valori proprietăți mecanice pentru solici­tarea de forfecare – PET CF15 vs PET : a) Comparație R_{su} [MPa], R_{sy} [MPa]; b) Comparație G [GPa]; c) Comparație γ [%].

Pentru solici­tarea de forfecare cele mai avantajoase rezultate sunt obținute pentru speci­mele cu direc­ția materialului depus pe direc­ția X,Y. În acest caz, pentru direc­ția Z se constată faptul că cedarea interlaminară nu a existat, ci doar existența unor sec­țiuni neregulate. Adăugarea fibrelor de carbon în PET are un efect pozitiv pentru situa­ția în care materialul este depus pe direc­ție longitudinală/transversală – se înregistrează o creștere de aproximativ 1.3 ori a valorii mărimii R_{su} și de 1.14 ori a rigidității. În rest, adăugarea fibrelor de carbon reprezintă un dezavantaj, valorile mărimilor scăzând de până la aproximativ 0.7 ori pentru γ , atunci când materialul este depus pe

direcția Z. Pentru aceeași mărime, în cazul depunerii materialului pe direcția X,Y, valorile scad de aproximativ 0.9 ori. Având în vedere valorile prezentate în Tabelul 5 și Tabelul 10, se realizează comparația grafică (Figura 11) în care se evidențiază influența fibrelor scurte de carbon în materialul PET, la forfecare.

Pentru specițiile studiate sunt înregistrate goluri de material. Acestea sunt mai frecvente și de dimensiuni mai mari pentru specițiile cu adaos de fibre de carbon, rezultat susținut și de alte cercetări și explicat prin faptul că matricea nu aderă 100% la fibrele scurte de carbon. Acest aspect se reflectă și printr-o slabă aderență a straturilor de material din PET CF15 față de cele din PET.

Față de specițiile fabricate doar din PET se înregistrează și alte defecte și criterii de cedare, și anume în urma diverselor solicitări sunt înregistrate cazuri în care fibrele scurte de carbon au ieșit din matrice sau au cedat prin rupere.

7. SIMULAREA FEM A SPECIMENELOR UTILIZATE LA SOLICITAREA DE TRACŢIUNE

În baza ipotezei prin care materialul este un material ortotrop, omogen, rezultă definirea acestuia prin constantele ingineresti care sunt definite și în capitolul anterior [BLA22A]. Aceste valori sunt utilizate și în sistemele software de analiză cu elemente finite.

Se definește materialul PET CF15 cu valorile prezentate anterior în formularul din MSC Patran 2008 [MSC12]. Considerându-se a fi un material liniar elastic și omogen, se atribuie proprietăți de material elementelor de tip HEX [BLA22A].

În etapa premergătoare analizei, se creează cazul de calcul pentru tracțiune cu valoarea medie a forței de 2770 N preluată din Tabelul 1 prin încăstrarea specimenului la un capăt, iar la celălalt se aplică forța de tracțiune cu ajutorul unui RBE3. Acest tip de element are un nod central în care este aplicată forța și prin setarea la o deplasare 0, se aplică uniform distribuit pe întreaga lățime a specimenului, ca în Figura 12 [MSC12].

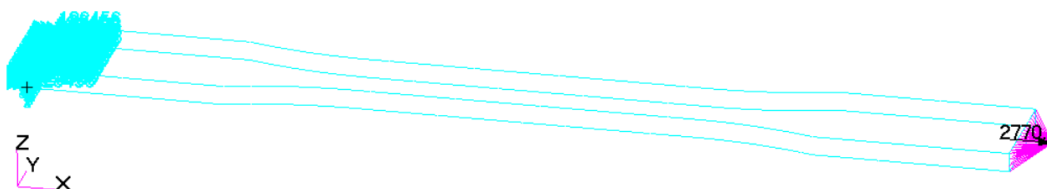


Figura 12 Specimen Tracțiune – Caz de calcul tracțiune în MSC Patran 2008

Soluția de calcul aleasă este SOL 101, care reprezintă un calcul Liniar Static. În Figura 13 este prezentat rezultatul, în ipoteza în care materialul este modelat omogen și ortotrop [BLA22A]. Dacă în teste se obține R_m mediu de 65.4 MPa, în FEM se obține un rezultat de 70 MPa, cu 7.03% mai mult decât în testele de laborator. Această diferență este explicată prin prezența defectelor de fabricație care nu pot fi surprinse în modelarea matematică din FEM. În această situație nu sunt surprinse nici golurile de material ce rămân între straturile de material, care apar în cazul pieselor obținute prin fabricare aditivă, procedeul FDM/FFF.

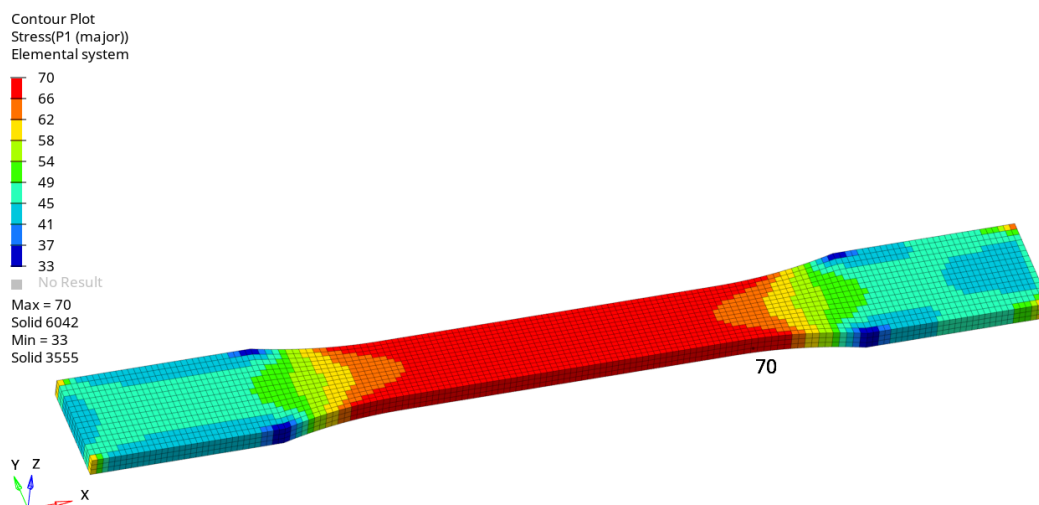


Figura 13 Specimen Tracțiune – Caz de calcul tracțiune în MSC Patran 2008

8. CERCETĂRI PRIVIND REFABRICAREA UNOR REPERE DIN COMPONENTA DRONEI DJI PHANTOM 3 PRO

În cazul cercetărilor prin care se validează practic utilizarea materialului PET CF15, a fost aleasă drona DJI Phantom 3 Pro [WWW12], prezentată în Figura 14. Drona DJI Phantom 3 Pro este propusă pentru studiu în urma intenției de a refabrica piese prin procedeul de fabricație aditivă FDM/FFF, piese care sunt deteriorate în urma unui incident. Acesta a survenit datorită coliziunii dronei cu un copac, rezultând un accident cu drona în picaj, fără posibilitate de redresare, deoarece bateria dronei s-a pierdut. După accident, au fost identificate deformații remanente în cazul trenului de aterizare și ruperea ghimbalului. Din cauza impactului, placa de susținere a ghimbalului a prezentat fisuri și rupturi.



Figura 14 Drona DJI Phantom 3 Pro [WWW12]

Astfel, pentru studiile de caz sunt identificate 2 repere: trenul de aterizare (două piese identice) - Figura 15 și placa de susținere a ghimbalului - Figura 16.



Figura 15 Tren de aterizare DJI Phantom 3 Pro– vedere din interior și din exterior (raportat la modul de montare) [BLA24B]



Figura 16 Placă susținere ghimbal DJI Phantom 3 Pro– vedere din interior și din exterior (raportat la modul de montare) [BLA24B]

Având în vedere rolul reperelor în structura dronei, este necesară o reproiectare a acestora, luând în considerare regulile de proiectare pentru fabricație aditivă, dar și rezultatele obținute în urma studiului materialului PET CF15.

Ca și caz de calcul considerat pentru aceste repere, se consideră o situație de acționare pe axa Z asupra dronei.

Pentru reproiectarea reperelor se utilizează tehnica de reverse engineering, care presupune, în primă fază, scanarea 3D a pieselor (Figura 17 și Figura 18).

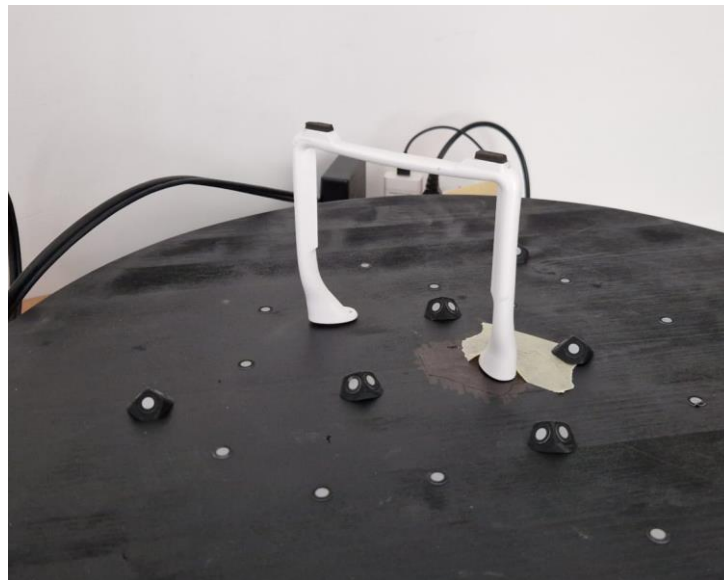


Figura 17 DJI Phantom 3 Pro – tren de aterizare – poziție piesă pentru scanarea 3D [BLA24B]

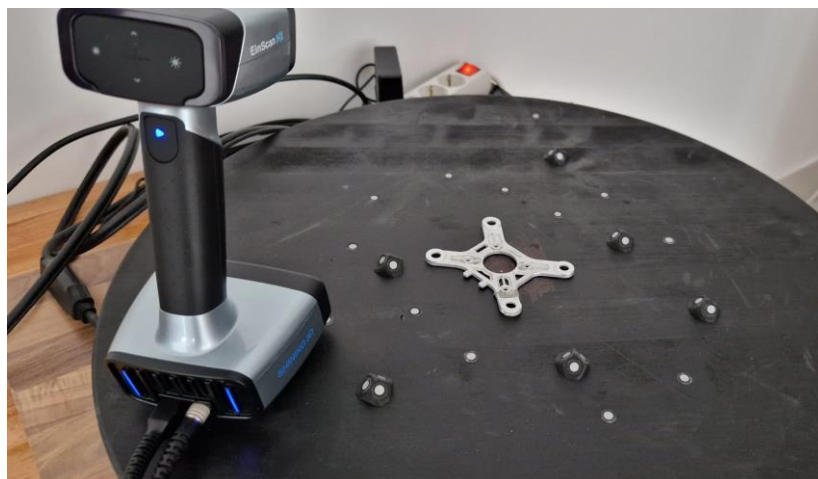


Figura 18 DJI Phantom 3 Pro – placă susținere ghimbal – dispunerea 1 piesă pentru scanarea 3D [BLA24B]

Ca etape de lucru, după scanarea pieselor cu ajutorul scannerului EinScan HX, are loc o prelucrare a norilor de puncte obținuți (Figura 19) într-un mediu CAD (Catia) (Figura 20), cu scopul de a remodela piesele pentru a obține obiecte solide care ulterior vor fi fabricate aditiv prin procedeul FDM/FFF.

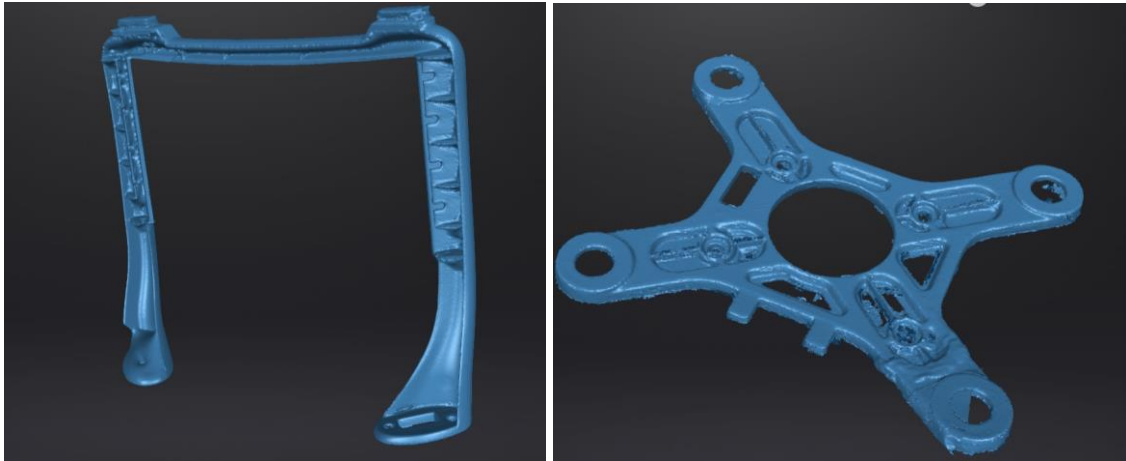


Figura 19 DJI Phantom 3 Pro – tren de aterizare și placă susținere ghimbal – rezultat scanare 3D în EX Scan HX [BLA24B]

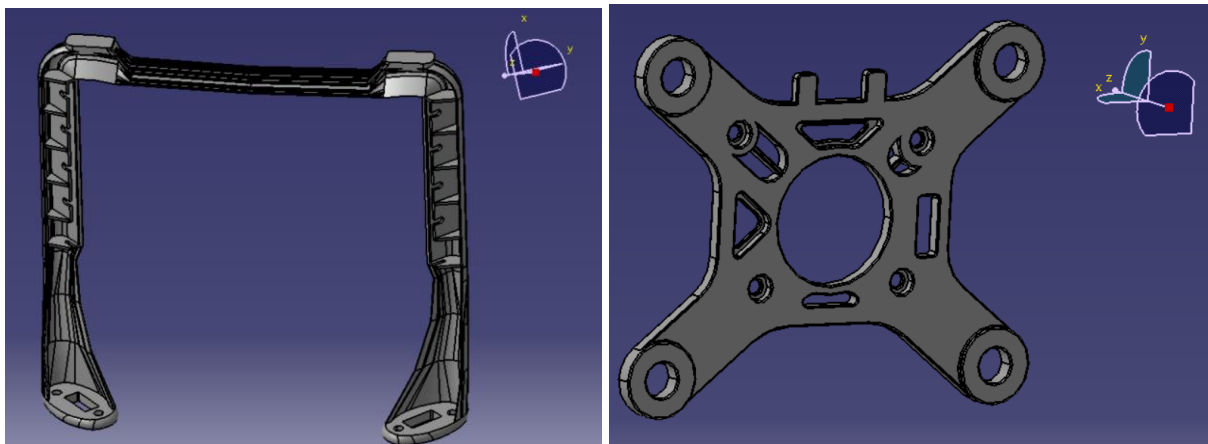


Figura 20 DJI Phantom 3 Pro – tren de aterizare și placă susținere ghimbal – rezultat model CAD în Catia [BLA24B]

Luând în considerare informațiile din stadiul actual, dar și rezultatele testelor efectuate pentru materialul PET CF15 pentru parametrii de fabricație cu cele mai bune rezultate (marime strat de 0.15 mm și infill de 100%) se pregătesc cele două repere considerate în studiu pentru a fi refabricate (Figura 21 și Figura 22).

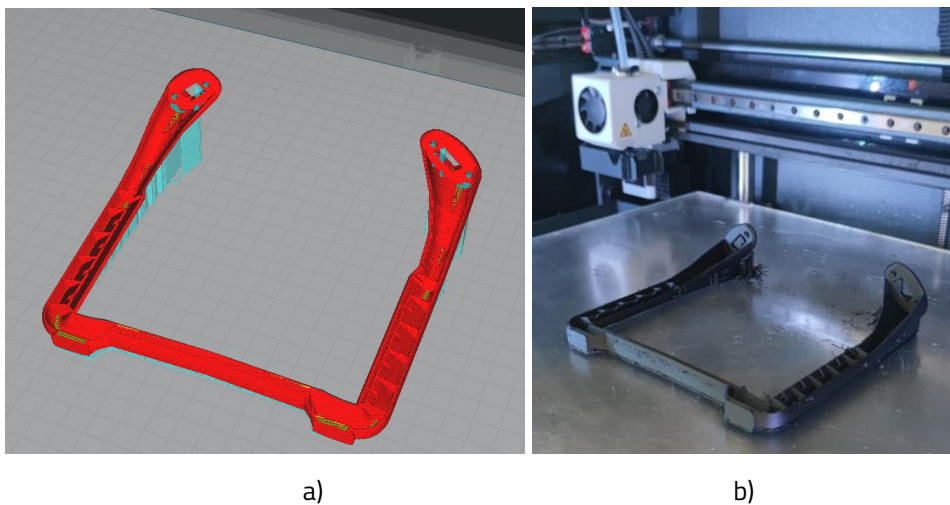


Figura 21 DJI Phantom 3 Pro – tren de aterizare– reprezentare în BCN3D Stratos și pe masa imprimantei BCN3D Epsilon [BLA24B]

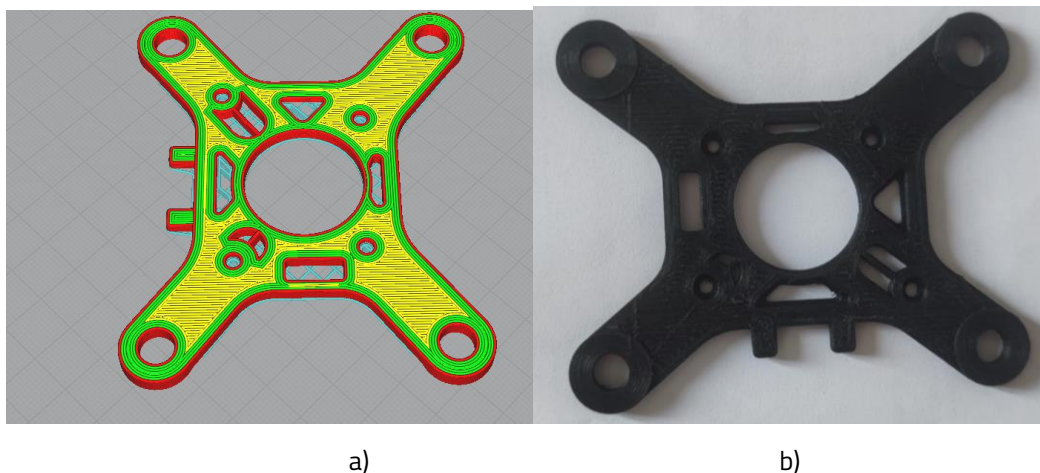


Figura 22 DJI Phantom 3 Pro – placă susținere ghimbal– reprezentare în BCN3D Stratos și după fabricație [BLA24B]



Figura 23 DJI Phantom 3 Pro – drona după asamblarea pieselor reproiectate și refabricate [BLA24B]

Piesele refabricate se montează pe dronă pentru a fi testate în stare asamblată (Figura 23). Pentru a se realiza o comparație între drona cu piese originale și cea cu piesele refabricate prin procedeul de fabricație aditivă FDM/FFF, se utilizează mașina de testat WDW 150S, testându-se o dronă cu piesele refabricate, dar și o dronă cu piesele originale. Se testează pe rând fiecare dronă la cazul de calcul propus.

Deoarece nu se cunosc materialele celorlalte componente ale dronei, se analizează comportamentul întregului sistem pentru a observa deplasările pieselor de interes, a întregii structuri, dar și apariția deformațiilor remanente și a cedărilor pieselor.

Pentru drona cu piesele originale, deformațiile remanente apar la 710 N, la o deplasare de aproximativ 9 mm. Structura cedează la o solicitare de aproximativ 1690 N. În mod similar se realizează și încercarea pentru drona cu piesele reproiectate și refabricate prin procedeul de fabricație aditivă FDM/FFF. Comportamentul este relativ similar, în acest caz forța la care apar deformațiile remanente fiind de 960 N cu o deplasare maximă de aproape 6 mm, iar cedarea survenind la 1440 N. Din perioada desfășurării testului se constată un comportament mult mai rigid pentru drona cu piesele refabricate, iar deformațiile pe direcțiile laterale nefiind atât de mari.

Faptul că deformațiile remanente apar la 960 N față de 710 N în cazul piesei originale, conduce la ideea că materialul PET CF15 poate fi utilizat cu succes pentru această aplicație. Prin metoda de reproiectare aleasă, zona de protecție a ghimbalului este asigurată, păstrând în acest fel elementele importante ale dronei.



Figura 24 DJI Phantom 3 Pro – test dronă cu piese originale – inspecție vizuală structură după teste [BLA24B]



Figura 25 DJI Phantom 3 Pro – test dronă cu piese reproiectate – inspecție vizuală structură după teste [BLA24B]

În urma analizei rezultatelor, se poate evidenția că, în primul caz, drona prezintă deformații remanente în zona trenului de aterizare și cedarea carcasei inferioare, așa cum este prezentat în Figura 24. În al doilea caz prezentat în Figura 25, drona prezintă cedarea trenului de aterizare. În acest caz apare o rupere neregulată care poate să fie cauzată pe apariția unor eventuale defecte de fabricație. De asemenea, se constată și apariția delaminărilor unor zone care sunt prezentate în aceeași figură. De menționat este și faptul că pentru această dronă carcusele nu prezintă deformații remanente.

Pentru placa de susținere a ghimbalului, nefiind o piesă cu rol structural nu se constată modificări structurale pentru nici un caz testat. Aceasta este protejată de carcusele care au un grad de deformare ridicat.

În acest capitol, se validează practic, atât piesele reproiectate și refabricate, cât și materialul utilizat în aplicație, PET CF15, drona cedând, în acest caz, la valori mai mari ale forței de acțiune pe direcția Z.

9. CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. DISEMINAREA REZULTATELOR. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

9.1. Concluzii finale

Concluziile generale referitoare la cercetările desfășurate și prezentate în teza de doctorat, pot fi sintetizate astfel:

a) Concluzii din cercetarea stadiului actual:

- Procesul de fabricare FDM/FFF este în plină dezvoltare, având o capacitate ridicată de a înlocui o parte din procedeele tradiționale datorită avantajelor sale, cum ar fi în special capacitatea de a se fabrica piese cu geometrie complexă, la costuri scăzute, dar cu materiale diverse: de la polimeri simpli, la filamente compozite ce pot avea în componența lor fibre scurte sau continue de material;
- Procesul de fabricație este influențat de o serie de parametri, fiecare având un grad diferit de influență asupra rezultatelor finale. Aceștia vizează aspecte de la calitatea filamentului utilizat, la factori din mediul ambiant, dar și setări de funcționalitate a imprimantei. Printre parametrii de fabricație cu cel mai mare grad de influență se pot evidenția: grosimea stratului de material, orientarea piesei pe masa imprimantei, infill-ul, temperatura utilizată (temperatura de topire a filamentului, temperatura masei imprimantei, temperatura mediului ambiant). De asemenea, se urmărește și obținerea unei stabilități din punct de vedere dimensional. În acest caz, este recomandat ca inițial să se realizeze conturul exterior al piesei, urmată de depunerea materialului pentru a finaliza suprafața dorită.
- Se remarcă necesitatea evidențierii defectelor de fabricație care sunt prezente în piesele fabricate cu ajutorul acestui procedeu – apar în special goluri de material, iar la filamentele compozite se constată o aderență scăzută a fibrelor la matrice. Se constată faptul că acestea prezintă un impact ridicat asupra proprietăților mecanice ale pieselor.
- Pentru a proiecta piese care sunt fabricate prin acest procedeu de fabricație se recomandă cunoașterea aplicației (exemplu: modul și mediul de exploatare) pentru a minimiza defectele de fabricație. În acest mod, prin directa influență asupra proprietăților mecanice, comportamentul în practică al pieselor se poate îmbunătăți considerabil.

b) Concluzii rezultate în urma desfășurării cercetărilor:

- În cercetările prezentate în lucrare au fost considerați următorii parametri de fabricație: grosimea de material depus, orientarea piesei pe masa imprimantei și infill-ul. Pentru fiecare parametru se consideră câte 3 valori, iar în urma testelor realizate pe specimene fabricate în urma combinării acestora, se alege varianta cea mai bună.
- În urma analizei materialului studiat (PET CF15) se constată faptul că acesta prezintă defecte, cele mai uzuale fiind cele de abatere de la circularitate și o distribuție neuniformă a fibrelor scurte de carbon: există conglomerate cu fibre sau există zone în care este evidențiat doar polimerul. Se mai regăsesc și fibre de carbon ieșite din matricea polimerului, dar și fibre de carbon care nu sunt orientate în direcția filamentului.

- Cunoaşterea comportamentului materialului reprezintă o etapă necesară în abordarea diverselor aplicații practice – nu se poate anticipa comportamentul acestuia, având un caracter anizotrop. Din acest motiv, în baza concluziilor rezultate în urma consultării literaturii de specialitate, se enunță ipotezele de lucru pentru definirea materialului, acesta fiind considerat ortotrop și omogen.
- Fabricarea și testarea specimenelor realizate din PET CF15 începe cu solicitarea de tracțiune. Se realizează câte 5 specimene pentru fiecare combinație de parametri. În urma analizei rezultatelor experimentale, se constată faptul că cele mai bune se obțin pentru speci­menele fabricate cu o grosime a stratului de material depus de 0.15 mm și infill-ul de 100%, acestea fiind orientate pe direcția longitudinală a platformei: R_m este 65.4 MPa, Modulul de elasticitate este 9 GPa și ϵ este 1.93%. Pentru întreg setul de specimene analizat se constată variații mici între rezultate, fapt ce dovedește gradul de omogenitate al materialului pe direcție longitudinală.
- Considerând setul de parametri și valorile prezentate anterior, se realizează speci­menele și pentru celelalte solicitări: compresiune, încovoiere și forfecare. În urma testelor, pentru compresiune se obține o rezistență maximă (pe direcția Z) de 108.8 MPa, cu un Modul de elasticitate de 1.41 GPa și ϵ de 9.81%. Pentru încovoiere rezultatele sunt: rezistența pentru solicitarea de încovoiere este de 105 MPa, cu un Modul de elasticitate de 4.1 GPa. Pentru forfecare rezistența maximă este de 70.5 MPa, cu un modul de elasticitate pentru forfecare de 2.71 GPa și γ de 1.83%.
- Pentru speci­menele analizate se constată prezența defectelor de fabricație, în principal goluri de material. Se mai constată o lipsă de adeziune a fibrelor scurte de carbon la polimerul PET, uneori o distribuție aleatorie a fibrelor în matrice (sunt prezente conglomerate de fibre scurte de carbon sau zone în care există doar polimer). De asemenea, printre defecte se înregistrează și zone în care grosimea stratului nu este respectată – acesta are o dimensiune mai mică (subextruziune) sau mai mare (cantitatea de material depusă este mai mare). Aceste tipuri de defecte nu pot fi anticipate și au o influență negativă asupra proprietăților mecanice ale pieselor.
- Datorită multitudinii de factori ce influențează acest proces de fabricație se recomandă elaborarea unor modele matematice bazate pe studii de material pentru a economisi în special timp și resurse financiare. În cazul prezentelor cercetări s-a elaborat un model matematic ce ia în considerare rezultatele obținute pentru solicitarea de tracțiune pe direcție longitudinală, iar în urma analizei statistice a parametrilor de intrare, se constată faptul că cea mai mare influență este dată de parametrul infill, urmată apoi de grosimea stratului de material.
- În mod similar cu fabricarea și testarea specimenelor din PET CF15, se realizează aceleași analize experimentale și pentru speci­mene fabricate din matricea filamentului compozit, PET. Astfel, pentru tracțiune se înregistrează valoarea pentru rezistența la tracțiune de 32.6 MPa, modulul de elasticitate de 2.2 GPa și ϵ de 2.03%. La compresiune și în acest caz se înregistrează tot pe direcția Z o rezistență maximă de 71.2 MPa, cu un modul de elasticitate de 2.17 și ϵ de 4.62%. La încovoiere rezistența maximă este de 85 MPa, cu un modul de

elasticitate de 4.3 GPa, iar la forfecare rezistenţa maximă este de 52.3 MPa, cu modulul de elasticitate pentru forfecare de 2.36 GPa și γ de 2.03 GPa.

- Ca o paralelă referitoare la defectele de fabricație înregistrate, și în cazul pieselor fabricate din PET golurile de material sunt prezente la speciemenele studiate, însă adeziunea materialului este mai ridicată. Se constată și faptul că adăugarea fibrelor de carbon transformă materialul din unul cu o oarecare flexibilitate într-un material casant – din cauza defectelor de filament și de fabricație a epruvetelor din material PET CF15.
- Simularea FEM nu este relevantă 100% datorită numărului mare de factori ce nu pot fi surprinși matematic în modelul realizat. Se recomandă o bună cunoaștere a materialului și a comportamentului acestuia prin realizarea testelor experimentale. În cazul analizei FEM realizate, se constată o diferență asupra valorilor obținute – aceasta se explică prin faptul că defectele de fabricație nu pot fi surprinse în modelul FEM [BLA19], chiar dacă a fost realizat un test pentru o stare plană de tensiune.
- Pentru efectuarea studiului de caz se utilizează parametrii cu valorile determinate experimental ca fiind cele mai bune: grosimea stratului de material de 0.15 mm, cu infill-ul de 100%, iar pentru orientare se analizează traseele de eforturi pentru fiecare piesă și caz de calcul și în funcție de acestea se alege poziționarea pe masa imprimantei. Ca piese sunt alese 2 componente din drona DJI Phantom 3 Pro care sunt reproiectate, refabricate și apoi testate. Testele sunt realizate și pentru piesele originale pentru a putea compara influența schimbării materialului asupra întregului sistem de rigiditate. Ca rezultate, se constată apariția deformațiilor remanente la o valoare mai ridicată a forței de acționare pe direcția Z în cazul dronei cu piesele fabricate din PET CF15.

9.2. Contribuții personale

În urma cercetărilor desfășurate în cadrul programului individual de pregătire prezentate în teza de doctorat, au fost aduse o serie de contribuții personale în domeniul fabricării aditive a pieselor din materiale compozite cu fibre scurte de carbon prin procedeul FDM/FFF. Acestea sunt următoarele:

1. Elaborarea, în urma studierii literaturii de specialitate, a unei sinteze a stadiului actual al cercetărilor referitoare la domeniul fabricației aditive în general, respectiv la procedeul FDM/FFF, în particular, cu evidențierea principalelor aspecte și tendințe în dezvoltarea unor noi cercetări (Capitolul 1);
2. Realizarea unei cercetări aprofundate privind comportamentul mecanic (tracțiune, compresiune, încovoiere și forfecare), conform standardelor în vigoare, al speciemenelor fabricate prin procedeul FDM/FFF, din filament Innofil/Ultrafuse cu 15 % fibre scurte de carbon cu un polimer de polietilenă tereftalat – PET CF 15 (Capitolul 3);
3. Determinarea, în vederea obținerii celui mai bun comportament mecanic, a principalilor parametri de fabricație și a valorilor aferente recomandate a fi utilizate în practică. Parametrii sunt: grosimea stratului de material, infill-ul și orientarea piesei pe masa imprimantei, iar valorile recomandate: grosimea stratului - 0.15 mm, infill - 100% orientarea piesei pe masa imprimantei – longitudinală, direcția X (Capitolul 3);

4. Evidențierea la nivel macro și microscopic, atât a principalelor criterii de cedare ale epruvetelor fabricate din materialul compozit luat în studiu, testate experimental în laborator, cât și a defectelor de fabricație care influențează caracteristicile mecanice ale materialului compozit studiat (Capitolul 3);
5. Utilizând tehnica Design of Experiments și sistemul software Minitab a fost elaborat un model matematic care exprimă dependența dintre rezistența la rupere (tracțiune) și parametrii studiați, infill și mărimea stratului (Capitolul 4);
6. Realizarea unei cercetări privind comportamentul mecanic (tracțiune, compresiune, încovoiere și forfecare), conform standardelor în vigoare, al epruvetelor fabricate cu parametrii stabiliți anterior pentru materialul compozit studiat, prin procedeul FDM/FFF, din polimerul materialului compozit, polietilenă tereftalat - PET (Capitolul 5);
7. Evidențierea influenței fibrelor scurte de carbon asupra proprietăților specimenelor fabricate din materialul compozit ales și polimerul polietilenă tereftalat (PET) (Capitolul 6);
8. Utilizarea datelor obținute pe cale experimentală, în procesul de descriere a materialului studiat într-un mediu FEM (MSC Patran/MSC Nastran, Altair HyperWorks 2021) și simularea comportamentului epruvetelor fabricate și testate, la tracțiune (Capitolul 7);
9. Elaborarea a două studii de caz care permit validarea rezultatelor teoretice și practice, pentru două repere din componența unei drone parțial distrusă, pentru care s-au utilizat tehnica Reverse Engineering și procedeului FDM/FFF în vederea reproiectării și refabricării acestora din materialul PET CT 15 (Capitolul 8);
10. Validarea practică a reperelor prin asamblare și apoi testare experimentală, cu determinarea valorilor aferente proprietăților mecanice (Capitolul 8).

9.3. Diseminarea rezultatelor

Rezultatele cercetărilor efectuate în perioada studiilor doctorale și cuprinse în cadrul tezei de doctorat au fost valorificate prin publicarea unui număr de 5 lucrări științifice, toate în calitate de prim autor, repartizate astfel: două în jurnale indexate Clarivate-WoS și trei în volumele unor conferințe (una indexată Clarivate WoS - CPCI, una SCOPUS și una BDI). De asemenea, cele trei lucrări publicate în volumele conferințelor au fost prezentate de către doctorandă, prin participare directă la conferință.

Lucrările elaborate sunt următoarele:

1. Mădălina-Ioana Blaj, Sebastian Marian Zaharia, Cristin Olimpiu Morariu, Alin Pop, Gheorghe Oancea, *Tensile Behavior of Parts Manufactured Using a Material Extrusion Process from a Filament with Short Carbon Fibers and PET Matrix, Processes* (<https://www.mdpi.com/2227-9717/12/2/334>, indexată Clarivate Analytics WoS-Article, jurnal Q2) Factor de impact 3.5 (2024).
2. Mădălina-Ioana Blaj, Sebastian Marian Zaharia, Alin Pop, Gheorghe Oancea, *Tensile Properties and Manufacturing Defectives of Short Carbon Fiber Specimens Made with the FDM Process*, Materiale plastice (<https://revmaterialeplastice.ro/pdf/4%20BLAJ%201%2022.pdf>, indexată Clarivate Analytics WoS-Article) Factor de impact 0.782(2021), prezentată la conferința PPE21;

3. Mădălina-Ioana Blaj, Gheorghe Oancea, *Parametric design of a complex part in a FEM environment* MATEC Web of Conferences (https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/abs/2019/48/matecconf_mtem2019_03005/matecconf_mtem2019_03005.html), indexată Clarivate Analytics WoS-CPCI), prezentată la conferința indexată Clarivate ISI MTeM2019 (<https://mtem.utcluj.ro/>);
4. Mădălina-Ioana Blaj, Gheorghe Oancea, *Fused deposition modelling process: A literature review*, - IOP Conference Series Materials Science and Engineering (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1009/1/012006/pdf>), prezentată la conferința CoSME (indexată SCOPUS);
5. Mădălina-Ioana Blaj, Gheorghe Oancea, *FEM hypothesis which can be applied for FDM Applications*, (<https://www.afahc.ro/ro/afases/2022/lucrari/22-M%C4%83d%C4%83linaloanaBLAJ,GheorgheOANCEA.pdf>) prezentată la Conferința AFASES – Academia Forțelor Aeriene “Henri Coandă” (indexare BDI)

9.4. Direcții viitoare de cercetare

Direcțiile viitoare de cercetare care ar putea fi abordate în domeniul tezei de doctorat, sunt:

- Identificarea unor metode de diminuare a defectelor de fabricație;
- Identificarea unor metode complexe de surprindere a comportamentului materialului în modele matematice;
- Dezvoltarea ipotezelor de calcul și identificarea unei metode optimizate de simulare;
- Dezvoltarea unor ipoteze ce ajută la identificarea tiparelor de fabricație în funcție de defectele rezultate și recurența acestora;
- Extinderea cercetărilor prin analogie la filamente compozite cu alt conținut de fibre scurte de carbon sau cu alți polimeri;
- Realizarea unor instrumente software pentru crearea modelelor CAD în mod automat, în funcție de fișierele GCODE pentru a surprinde, de exemplu, zonele interlaminare și zonele cu material lipsă dintre acestea;
- Cercetarea impactului variației termice asupra materialului studiat.

Bibliografie (Selecție)

- [AST14A] ASTM D638-14 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, 2014
- [AST14B] ASTM F606-14 Standard Test Methods for Determining the Mechanical Properties of Externally and Internally Threaded Fasteners, Washers, Direct Tension Indicators, and Rivets, 2014
- [AST15] ASTM D695-15 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics, 2015
- [AST17] ASTM D790-17 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, 2017
- [BLA19] **Blaj, M.I., Oancea, Gh., Parametric design of a complex part in a FEM environment, *MATEC Web of Conferences* 299, 3005 (2019).**<https://doi.org/10.1051/mateconf/201929903005>
- [BLA21] **Blaj, M.I., Oancea, Gh., Fused deposition modelling process: a literature review, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1009 (2021)** <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1009/1/012006>
- [BLA22A] **Blaj, M.I., Oancea, Gh., FEM hypothesis which can be applied for FDM Applications, *SCIENTIFIC RESEARCH AND EDUCATION IN THE AIR FORCE Conference* (2022).**
<http://dx.doi.org/10.19062/2247-3173.2022.23.22>
- [BLA22B] **Blaj, M.I., Zaharia, S.M., Pop, A., Oancea, Gh., Tensile Properties and Manufacturing Defectives of Short Carbon Fiber Specimens Made with the FDM Process, *Materiale Plastice* 59, 33-43 (2022).**
<https://doi.org/10.37358/MP.22.1.5557>
- [BLA24A] **Blaj, M.I., Zaharia, S.M., Morariu, C.O., Pop, M.A., Cosnita, M., Oancea, Gh., Tensile Behavior of Parts Manufactured Using a Material Extrusion Process from a Filament with Short Carbon Fibers and PET Matrix, *Processes* 12, 334 (2024).** <https://doi.org/10.3390/pr12020334>
- [BLA24B] **Blaj, M.I., Oancea, Gh., Remanufacturing of damaged parts from an UAV – în evaluare, 2024**
- [JIN15] Jin, Y., Li, H., He, Y., Fu, J., Quantitative analysis of surface profile in fused deposition modelling”, *Additive Manufacturing Elsevier* 8, 142-148 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.10.001>
- [KAF21] Kafle, A., Luis, E., Silwal, R., Pan, H. M., Shrestha P. L., Bastola, A. K., 3D/4D Printing of Polymers: Fused Deposition Modelling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), and Stereolithography (SLA), *Polymers* 13, 3101 (2021). <https://doi.org/10.3390/polym13183101>
- [MAZ19] Mazzanti, V., Malagutti, L., Mollica, F., FDM 3D Printing of Polymers Containing Natural Fillers: A Review of their Mechanical Properties, *Polymers* 11, 1094 (2019).
<https://doi.org/10.3390/polym11071094>
- [MSC12] Patran 2012 – Users Guide, MSC Software, 2012
- [SRI16] Srivatsan, T. S., Sudarshan, T. S., Additive Manufacturing – Innovations, Advances, and Applications, CRC Press, SUA, 2016
- [TUT13] Tuttle, M. E., Structural Analysis of POLYMERIC Composite Materials Second Edition, CRC Press, SUA, 2013
- [WIC20] Wickramasinghe, S., Do, T., Tran, P., FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments, *Polymers* 12, 1529 (2020).
<https://doi.org/10.3390/polym12071529>
- [WWW12] <https://www.dji.com/phantom-3-pro> - Accesat 06.07.2023