

## INTEGRITATEA ȘI DURABILITATEA COMPONENTELOR OBȚINUTE PRIN PRINTARE 3D

### Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat *Inginerie Mecanică*

autor **ing. Cristina VĂLEAN (căs. LINUL)**

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Liviu MARȘAVINA

luna 09 anul 2023

Teza de doctorat tratează subiectul integrității și al durabilității componentelor din PLA (Acid Polilactic), fabricate prin tehnologia FDM (Modelare prin Depunere Fuzionată). Lucrarea de față a fost concepută și realizată cu scopul investigării caracteristicilor fizice (acuratețea dimensională și masică, timpul de printare) și mecanice (proprietățile elastice și de rezistență, deformațiile caracteristice, performanțele de absorbție a energiei etc.) ale pieselor din PLA solicitate mecanic (tracțiune, compresiune, rupere fragilă, impact și oboseală).

Fabricarea aditivă (AM), după cum sugerează și numele, adaugă materialul necesar strat după strat, pentru a obține un produs final tridimensional (3D). Prototiparea rapidă, imprimarea 3D, fabricarea în strat aditiv, fabricarea aditivă, fabricarea în straturi, procesele aditive și fabricarea în formă liberă sunt alte nume cunoscute pentru AM în comunitatea științifică [1]. În procesul AM, se face transformarea de la un model solid 3D computerizat (proiectare asistată de computer – CAD <Computer-Aided Design>) la un produs finalizat cu o acuratețe geometrică satisfăcătoare, fără a folosi dispozitive suplimentare sau unelte de tăiere, cum ar fi procesele convenționale de fabricație [2, 3], deși, în unele cazuri, este nevoie de postprocesare. Astfel, în acest sens, AM are o capacitate mai bună de a manipula materiile prime, deoarece există mai puține pierderi de material, și deschide posibilitatea formării unor componente geometrice mult mai complexe [3].

Figura 1 prezintă pașii implicați în procesul AM pentru a transforma elementul din lumea digitală în obiectul din lumea reală.

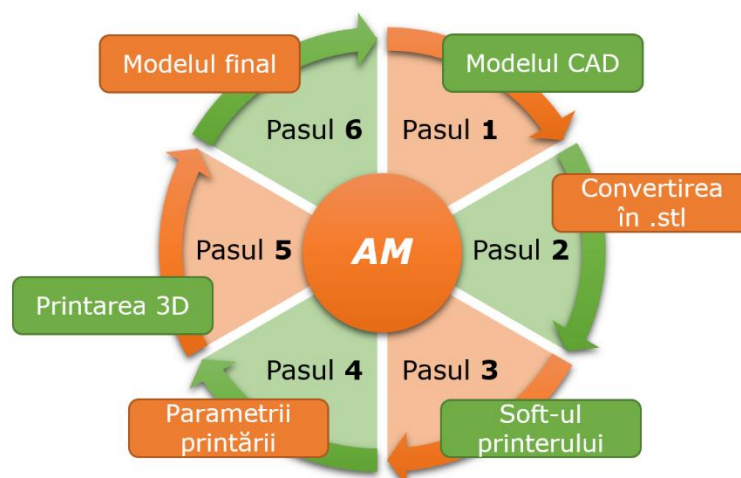


Fig. 1. Schema reprezentativă a procesului de fabricație aditivă

Lucrarea de față este structurată pe 7 capitole, 6 dintre acestea fiind de conținut, iar unul de concluzii și contribuții personale.

**Capitolul 1**, intitulat “**Introducere**”, tratează noțiuni generale de fabricație aditivă, și nu numai, concentrându-se în final pe procedeul de printare prin depunere fuzionată (FDM). Această tehnologie este utilizată, de altfel, pentru toate investigațiile din actuala lucrare.

În Figura 2 este reprezentat procesul de bază al printării prin tehnologia FDM.

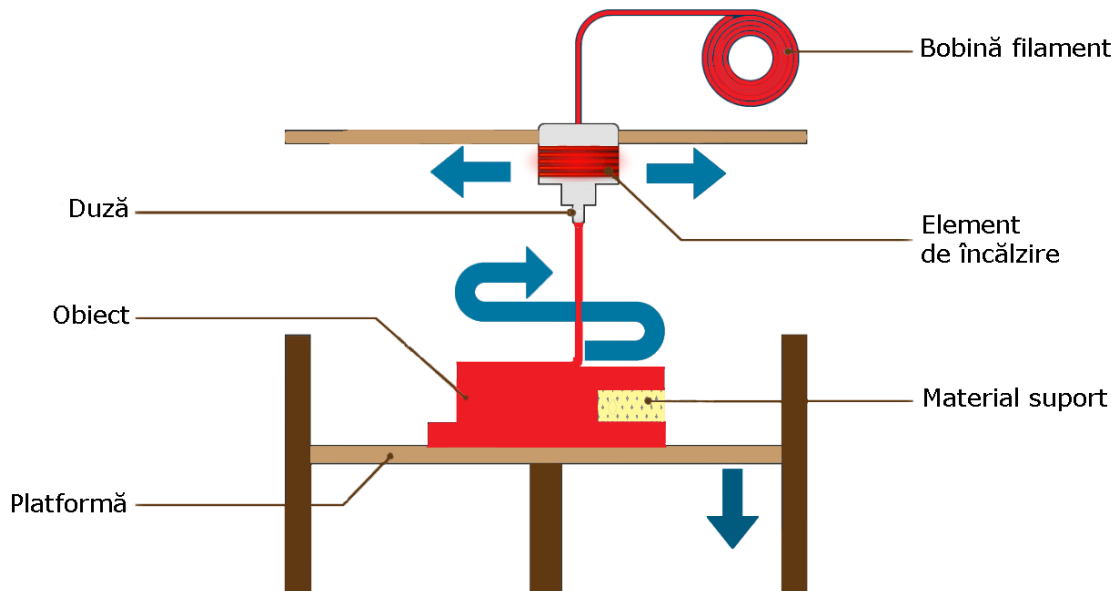


Fig. 2. Procesul de bază al printării prin tehnologia FDM

Imprimantele 3D care funcționează prin tehnologia FDM constau din platforma imprimantei, o duză (numită și cap de imprimantă) și materia primă sub formă de filament.

Platforma imprimantei (sau patul) este de obicei realizată din metal, ceramică sau plastic dur, iar fiecare strat succesiv este depus pe această platformă.

Duza imprimantelor FDM este atașată la un șasiu mecanic care folosește sisteme de curele și/sau șuruburi de plumb pentru a o deplasa. Întregul ansamblu de extrudare este lăsat să se deplaseze în dimensiunile X, Y și Z printr-un sistem motorizat. Un al patrulea motor, numit motor pas cu pas, este folosit pentru a avansa materialul termoplastice în duză. Toate mișcările capului și ale materiei prime sunt controlate de un computer.

Materia primă este de obicei termoplastice de producție, deși uneori se folosește și metalul. Materialul termoplastice poate fi topit în mod repetat, atunci când este expus la căldură, și re-solidificat când căldura este retrasă. Filamentul termoplastice sau firul metalic este înfășurat pe o bobină montată. Acesta este apoi alimentat prin duza imprimantei. Clasa mai bună de imprimante 3D FDM permite menținerea temperaturii duzei chiar aproape de temperatura de tranziție sticloasă a materialului care este extrudat. Acest lucru permite extrudarea materialului într-o stare semi-lichidă, dar să revină imediat la starea solidă. Acest lucru are ca rezultat o mai bună acuratețe dimensională.

Cei mai investigați parametri de proces din cadrul tehnologiei FDM includ golurile de aer, orientarea printării, temperatura de extrudare, densitatea de umplere, modelul de umplere, grosimea stratului, lățimea rasterului, unghiul rasterului și viteza de printare; acestea au efecte substanțiale asupra lipirii filamentului (inter-strat și intra-strat) și influențează astfel performanța mecanică a componentelor imprimate [4]. În plus, interacțiunile acestor parametri joacă un rol semnificativ din perspectiva proprietăților mecanice [5, 6].

**Capitolul 2**, intitulat “**Comportamentul la tracțiune**”, investighează efectul multiplu al parametrilor de proces (densitatea de umplere-DU, modelul de umplere-MU, orientarea printării-OP, grosimea stratului-GS, viteza de printare-VP, temperatura duzei-TD și numărul de straturi exterioare-NSE) asupra comportamentului la tracțiune al epruvetelor printate 3D

Caracterizarea mecanică a componentelor pe bază de PLA, fabricate prin diferite tehnici de fabricație aditivă, este de mare interes în rândul cercetătorilor, dat fiind faptul că proprietățile lor și influența parametrilor de printare sunt încă ambigue. Mai mult, procesul FDM, este departe de nivelul de maturitate și se află în continuă actualizare/dezvoltare, necesitând o înțelegere mai profundă a comportării mecanice a diferitelor materiale și componente structurale. De exemplu, lucrările [7-12] raportează că cele mai mari proprietăți de întindere sunt obținute pentru orientarea de printare de 0°, în timp ce lucrările [13, 14] susțin că orientarea de printare de 90° oferă cele mai bune proprietăți. Mai mult, Referințele [9, 10, 13-15] raportează că valorile maxime ale proprietăților sunt obținute pentru grosimi mici de strat, iar Referințele [11, 16] subliniază faptul că grosimile mari de strat conduc la proprietăți maxime. Pe de altă parte, Birosz și colab. [17] afirmă că modelul de umplere Honeycomb este mai adecvat, în timp ce Rao și colab. [15] afirmă că modelul Cubic. Și, desigur, exemplele pot continua pentru ceilalți parametri de proces menționați mai sus. Prin urmare, după cum se poate observa în literatura de specialitate, încă există contradicții cu privire la efectul anumitor parametri de proces asupra proprietăților mecanice ale pieselor printate 3D.

Capitolul de față investighează experimental proprietățile la tracțiune cvasi-statică ale epruvetelor din PLA obținute prin tehnologia FDM. Studiul se concentrează pe efectul multiplu al parametrilor de proces asupra comportamentului la tracțiune al epruvetelor printate 3D.

Parametrii investigați sunt următorii:

- modelul de umplere (Grid, Triangular și Honeycomb);
- densitatea de umplere (40, 70 și 100%);
- orientarea epruvetelor în plan (0, 45 și 90°);
- grosimea stratului (0,10; 0,15 și 0,20 mm);
- viteza de printare (20, 40 și 60 mm/s);
- temperatura duzei (200, 210 și 220°C);
- numărul de straturi exterioare (1, 2 și 3).

Au fost investigate proprietățile de rezistență și deformațiile aferente acestora, precum și energia de rupere. După investigarea parametrilor de proces amintiți, au fost printate și testate epruvete optimizate. Rezultatele optimizate sunt comparate cu datele din literatură ale epruvetelor din PLA obținute atât prin procesele de printare, cât și prin turnare prin injecție.

În plus, erorile relative pentru grosime și lățime ale epruvetelor printate 3D au fost investigate din perspectiva dimensională.

Filamentul de PLA a fost folosit ca material de printare (vezi Figura 3).



Fig. 3. Filamentul din PLA utilizat în evaluarea proprietăților la tracțiune: caracteristici (a) și procesul ambalare-utilizare (b)

Datorită proprietății sale de a fi printat la o temperatură mai scăzută, materialul PLA este un material termoplastic foarte popular în domeniul printării 3D. Este potrivit pentru aproape toate tipurile de imprimante 3D și este ușor de procesat (nu necesită un pat de printare încălzit).

Forma și dimensiunile epruvetelor folosite au fost conform standardului ISO 527-2 [18], care reglementează încercarea de tracțiune a materialelor plastice.

Etapa experimentală a cuprins o serie de încercări de tracțiune cvasi-stactice efectuate pe epruvete "dublu T" sau "os de câine" (*dog-bone*) de diferite configurații, urmând standardul ISO 527-2 [18]. Testele experimentale au fost efectuate la temperatura camerei pe mașina universală de testare Zwick Roell 005 de 5 kN.

Valorile inițiale și optimizate ale rezistenței la tracțiune pentru PLA obținute prin tehnologia FDM sunt în bună concordanță cu cele raportate în literatura de specialitate pentru același material. În majoritatea cazurilor, în special rezultatele optimizate, acestea sunt net superioare celor din literatură. Mai mult, rezultatele obținute se încadrează în limitele celor injectate, cu o preponderență în regiunea mijlocie-superioară.

**Capitolul 3**, intitulat “**Comportamentul la compresiune**”, prezintă un studiu de optimizare la compresiune al epruvetelor din PLA fabricate prin tehnologia FDM. Optimizarea ține cont de influența a trei parametri de proces (densitatea de umplere, modelul de umplere și forma epruvetelor) asupra principalelor proprietăți la compresiune (proprietățile elastice și de rezistență, precum și performanțele de absorbție a energiei).

Analizând proprietățile la compresiune studiate de către alți cercetători s-a constatat că acestea se concentrează în totalitate pe două categorii de proprietăți: elastice și de rezistență. Cu toate acestea, având în vedere că prototiparea rapidă oferă o gamă variată de parametri de proces, comportamentul mecanic al componentelor printate 3D poate fi abordat și din prisma capacităților de absorbție a energiei.

Pentru determinarea comportamentului la compresiune s-au folosit epruvete cubice. Inițial, epruvetele cubice printate 3D au fost supuse, din punct de vedere constructiv și dimensional, unui control de calitate. Valorile celor trei dimensiuni (înălțimea și lățimile în plan ale epruvetelor), rezultate în urma procesului de printare 3D, au fost prelucrate statistic și validate înainte de testare. Ulterior, epruvete considerate neconforme (cu erori mai mari de  $\pm 5\%$ ) au fost înlocuite.

Programul experimental a cuprins o serie de încercări de compresiune efectuate pe epruvete cubice. Testele mecanice au fost efectuate la temperatura camerei pe mașina de testare LBG TC100 de 100 kN (Figura 4).



Fig. 4. Mașina universală de testare LBG TC100 de 100 kN

Încercările de compresiune au fost efectuate în controlul deplasării, cu o viteză de încărcare de 10 mm/min. Pentru a obține o reproductibilitate a rezultatelor, pentru fiecare configurație s-au testat câte patru epruvete.

Studiul de optimizare prezentat în Capitolul 3 scoate în evidență parametrii optimi care trebuie utilizați pentru a obține proprietăți maxime ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM, și anume: densitatea de umplere: 30%, modelul de umplere: STAR și geometria epruvetei: CUB.

**Capitolul 4**, intitulat “**Comportamentul la rupere fragilă**”, este dedicat influenței parametrilor de proces (grosimea stratului, grosimea epruvetelor, direcția de printare, tipul creștăturii și tipul de imprimantă) asupra comportamentului la rupere (în modul I și II pur de încărcare) al epruvetelor din PLA fabricate prin tehnologia FDM. Pentru determinarea proprietăților de rupere (tenacitatea la rupere, energia de rupere și modul de propagare a fisurii în modurile I și II de rupere) s-a utilizat epruveta cu o creștătură laterală (vezi Figura 5).

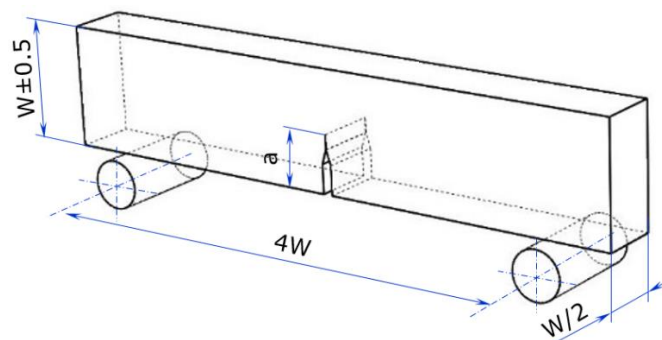


Fig. 5. Geometria și dimensiunile epruvetei SENB printate 3D

Pentru obținerea modului I s-a realizat o încărcare simetrică a epruvetei, pe când modul II de rupere a fost obținut printr-o încărcare asimetrică (vezi Figura 6).

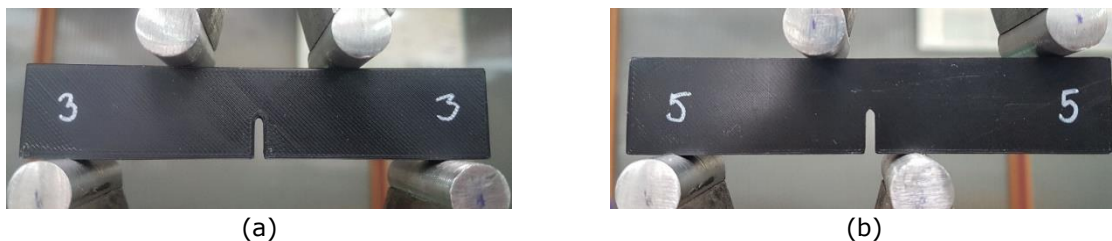


Fig. 6. Poziționarea epruvetei SENB pe dispozitivul de fixare al masinii Walter+bay de 10 kN: modul I (a) și modul II (b) de încărcare

În aplicațiile practice se regăsesc diferite condiții de încărcare, astfel că posibilitatea de inițiere și propagare a fisurilor în componentele printate 3D este foarte mare. Cu toate acestea, literatura de specialitate raportează doar câteva rezultate pentru tenacitatea la rupere în modul II a pieselor din PLA. Majoritatea datelor sunt raportate pe epruvete din ABS printate prin tehnologia FDM sau pe epruvete din PA obținute prin tehnologia SLS.

Tenacitatea la rupere în modul I,  $K_{IC}$ , a fost determinată utilizând o configurație de încărcare în patru puncte simetrică (Symmetric Four Point Bending-SFPB) (Figura 6a), în timp ce pentru tenacitatea la rupere în modul II,  $K_{IIC}$ , au fost luate în considerare epruvete încărcate asimetric în patru puncte (Asymmetric Four Point Bending-AFPB) (Figura 6b).

Valorile  $K_{IC}$  și  $K_{IIC}$  au fost determinate folosind forța maximă,  $P_{max}$ , înregistrată în timpul testelor de încovoiere, conform ecuațiilor din literatură.

Conform rezultatelor experimentale, tenacitatea la rupere a epruvetelor printate cu

orientări diferite este puternic dependentă de parametrii de fabricație. În acest scenariu, probele printate cu orientarea de  $45^\circ$  se caracterizează printr-o valoare  $K_{IC}$  mai scăzută, în timp ce valori mai mari au fost obținute pentru epruvetele printate cu orientări de  $0^\circ$  și  $90^\circ$ . Acest comportament poate fi explicat prin înțelegerea clară a efectului unghiului dintre creștătura epruvetelor și liniile raster. Acest unghi este egal cu  $\pm 45^\circ$ ,  $0^\circ/90^\circ$  și  $\pm 45^\circ$  pentru epruvetele SENB printate cu orientări de construcție de  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  și  $90^\circ$ . Având în vedere modul I de încărcare pentru orientări de  $0^\circ$  și  $90^\circ$ , dacă fisura încearcă să se propage de-a lungul liniei bisectoare, ar trebui să rupă două seturi de fibre înclinate cu unghiuri de  $\pm 45^\circ$ . Pe de altă parte, dacă fisura se propagă pe direcția de  $45^\circ$ , există un singur set de fibre (jumătate din numărul de fibre rezistente) care împiedică creșterea fisurii. Acesta poate fi motivul propagării fisurilor la  $45^\circ$  pentru epruvetele printate la  $0^\circ$  și  $90^\circ$  și, respectiv, la  $0^\circ$  pentru epruvetele printate la  $45^\circ$ .

În ceea ce privește starea de încărcare în modul II, diferența majoră în cazurile testate este deplasarea la cedare/ruptură, în timp ce  $K_{IIC}$  a prezentat variații mai mici între diferitele cazuri. Conform criteriului tensiunii tangențiale maxime (Maximum Tangential Stress-MTS), unghiul de inițiere a fisurii pentru un material izotrop este de aproximativ  $70,5^\circ$  [19]. Folosind același argument ca și în cazul modului I de încărcare, în probele în care unghiul dintre tensiunea tangențială maximă și unghiurile raster este mai mic, se așteaptă ca rezistența la fisurare să fie mai mică. Luând în considerare un unghi de  $70,5^\circ$  pentru tensiunea tangențială maximă, acest unghi ar fi egal cu  $19,5^\circ$  pentru epruvetele printate la  $45^\circ$  și  $25,5^\circ$  pentru cele printate la  $0^\circ$  și  $90^\circ$ , rezultând astfel o valoare  $K_{IIC}$  puțin mai mică pentru epruvetele obținute la  $45^\circ$ .

**Capitolul 5**, intitulat “**Comportamentul la impact**”, se concentrează pe comportamentul la impact simplu și impact multiplu al probelor din PLA printate prin tehnologia FDM.

Literatura de specialitate raportează unele studii privind comportamentul de impact al epruvetelor printate 3D. Cu toate acestea, studiile se concentrează fie pe diferite configurații de testare, fie pe diferite materiale (ABS, PEEK, TPE, PC, PETG, HIPS) sau tehnologii AM (FDM, SLS, DLP). Prin urmare, investigațiile actuale raportează *primele rezultate* privind comportamentul la impact simplu și multiplu al probelor PLA printate.

Pentru evaluarea comportamentului mecanic la impact s-au folosit diferite tipuri de impactori (emisferic cu diametrul de 10 mm, emisferic cu diametrul de 20 mm și trunchi de con), precum și diferite energii de impact (5, 10, 20, 30 și 40 J). Pentru analiza comparativă au fost determinate proprietățile de rezistență și performanța energetică de absorbție. Proprietățile de interes au fost reprezentate de absorbția de energie (absorbția totală de energie și absorbție specifică de energie) și integritatea structurii (forțele maxime suportate de epruvete).

În final, probele au fost supuse unei inspecții radiografice, după fiecare test efectuat. Aceste rezultate permit generarea unei baze de date mari care poate fi utilizată de către proiectanții de componente prototipate rapid și ghidează cercetările viitoare privind comportamentul la rupere a materialelor din PLA printate prin tehnologia FDM.

Filamentul PLA constituie materialul utilizat pentru printarea 3D a epruvetelor investigate la impact. Caracteristicile acestuia sunt prezentate în Figura 3.

Figura 7 prezintă o imagine de ansamblu a epruvetelor printate 3D, împreună cu procesul de fabricație al acestora.



Fig. 7. Epruvetele printate 3D utilizate pentru testele de impact: imagine de ansamblu (a) și procesul de fabricație (b)

Pentru fabricarea epruvetelor s-a ținut cont de studiul de optimizare efectuat în Capitolul 3. Așadar, epruvetele utilizate pentru determinarea comportamentului la impact au prezentat următoarele caracteristici:

- densitatea de umplere: 30%;
- modelul de umplere: STAR;
- forma epruvetelor: CUB.

Prima fază a testelor de impact s-a concentrat pe identificarea nivelului de energie necesar pentru cedarea completă a epruvetei, adică valoarea energiei la care masa de impact pătrunde în epruvetele testate. Prin urmare, au fost efectuate teste la diferite energii de impact (între 5-40 J), conform unei abordări de tip *încercare și eroare*.

A doua fază a avut ca scop evaluarea răspunsului la impacturi multiple ale energiei în creștere, pentru fiecare formă de indentor. Prin urmare, s-au efectuat teste de impact repetat începând cu o energie de 5 J și crescând-o până la 20 J, cu un pas de 5 J pentru fiecare tip de indentor.

În final, epruvetele au fost supuse unei analize radiografice pentru identificarea modurilor de cedare. Analiza a fost efectuată atât în funcție de tipul impactorului, cât și în funcție de energia de impact utilizată. Inspecția radiografică este procesul de evaluare a materialului folosind tehnologia cu raze X sau cu raze gamma. Este una dintre cele mai amănunțite metode de testare nedistructivă care este utilizată pentru a evalua componente pentru semne de defecte care ar putea interfera cu funcționalitatea.

În Figura 8 sunt prezentate imagini radiografice ale epruvetelor testate în funcție de tipul impactorului (H10) și energia de impact (20 și 30 J).

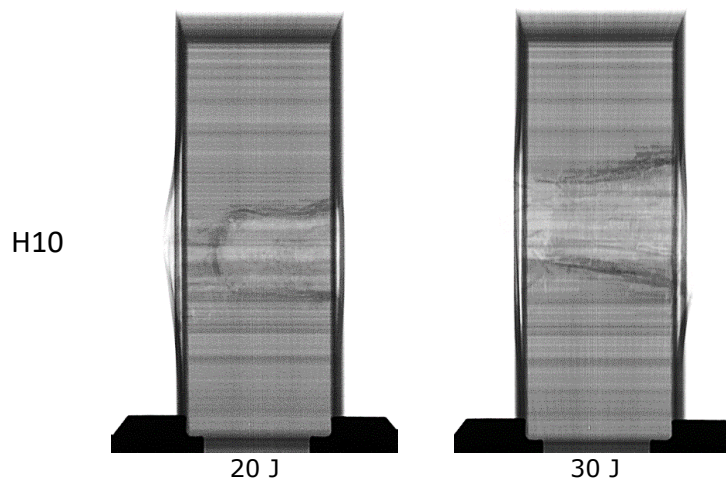


Fig. 8. Imagini radiografice ale epruvetelor testate în funcție de energia de impact

**Capitolul 6**, intitulat “**Comportamentul la oboseală**”, are ca obiectiv determinarea comportamentului la oboseală al epruvetelor din PLA prin efectuarea unor teste de oboseală de tipul *compresiune - compresiune*.

Studiile de oboseală din literatură, efectuate asupra componentelor din PLA printate prin tehnologia FDM, se bazează în marea lor majoritate pe condiții de încărcare tracțiune - tracțiune. Astfel, cercetătorii au utilizat epruvete tipice testelor de tracțiune. Scopul investigațiilor curente a fost de a determina comportamentul la oboseală al epruvetelor din PLA prin efectuarea unor teste de oboseală de tipul *compresiune - compresiune*. În acest sens, s-au folosit epruvete cubice și s-au determinat caracteristicile tipice la oboseală precum limita de viață și mecanismele de cedare. Parametrii de proces ai epruvetelor testate au fost obținuți în urma unui amplu proces de optimizare prezentat în detaliu în Capitolul 3

Noțiunile fundamentale legate de geometria, modelarea, procesarea și fabricarea epruvetelor au fost prezentate în Capitolul 3. Figura 9 prezintă o imagine de ansamblu a epruvetelor printate 3D prin tehnologia FDM, împreună cu un detaliu privind structura internă a acestora.



Fig. 9. Epruvetele printate 3D pentru testele de oboseală: imagine de ansamblu (a) și structura internă (b)

Pentru a determina limita de curgere a epruvetelor printate, au fost efectuate teste preliminare de compresiune cvasi-statică. Testele au fost efectuate pe epruvete cubice din PLA, utilizând mașina universală de testare LBG TC100 de 100 kN (Figura 4). Încercările experimentale au fost efectuate în controlul deplasării, cu o viteză de încărcare de 10 mm/min. Pentru a asigura o reproductibilitate a rezultatelor, testele de compresiune au fost repetate pe un număr de patru epruvete, conform standardelor ASTM D1621-16 [20] și ISO 844:2021 [21].

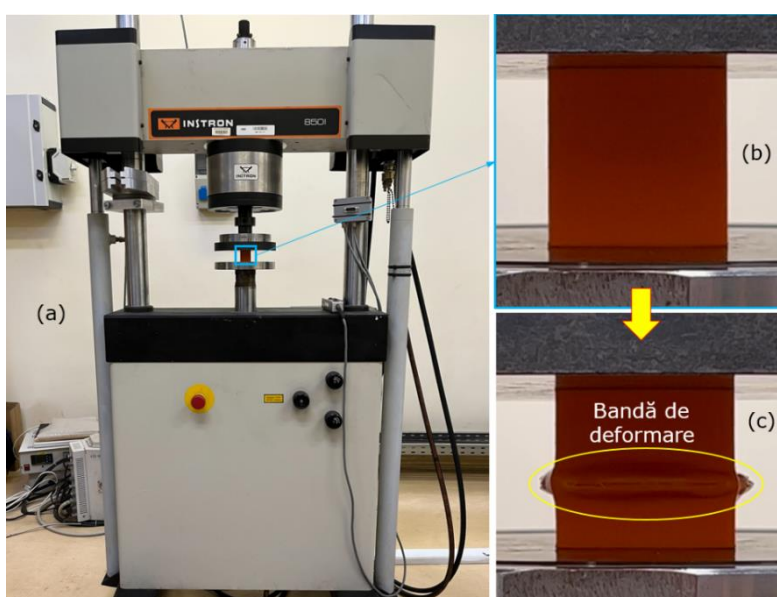


Fig. 10. Configurația experimentală: mașina universală Instron 8501 de 100 kN (a), fixarea epruvetei în dispozitivul mașinii de testare (b) și epruveta testată (c)



În urma efectuării testelor de oboseală oligociclică, ruperea epruvetelor s-a produs brusc. S-a observat că apariția unei benzi de deformare pe toată lățimea epruvetelor, normală pe direcția de încărcare, a dus la creșterea deformării (Figura 10). Astfel, apariția benzii orizontale a fost identificată ca fiind principalul mecanism de cedare al epruvetelor solicitate la oboseală. În final, cu rezultatele obținute la oboseală, s-a trasat curba Wöhler împreună cu limitele de încredere.

**Capitolul 7**, intitulat “**Concluzii și contribuții personale. Direcții noi de cercetare**”, prezintă structurat toate rezultatele investigațiilor din teza de doctorat.

De asemenea, se evidențiază contribuțiile personale ale autorului, dintre care se pot aminti:

- Elaborarea unui amplu studiu bibliografic privind prototiparea rapidă, tehnologiile de fabricație aditivă, precum și caracteristicile definatorii (parametrii de proces, materialele pentru filament, proprietățile, domeniile de utilizare, avantajele și dezavantajele) ale componentelor obținute cu ajutorul procesului de modelare prin depunere fuzionată.
- Conceperea și realizarea unui studiu de optimizare la tracțiune privind efectul a șapte parametri de proces (modelul de umplere, densitatea de umplere, orientarea printării, grosimea stratului, viteza de printare, temperatura duzei și numărul de straturi exterioare) asupra principalelor proprietăți la tracțiune (acuratețea dimensională, tensiunile și deformațiile caracteristice, energia de rupere) ale componentelor printate 3D.
- Prezentarea unei diagrame privind influența procentuală a celor șapte parametri de proces investigați asupra rezistenței la tracțiune, deformației corespunzătoare rezistenței la tracțiune și energiei de rupere.
- Integrarea în premieră, în cadrul componentelor printate 3D, a diagramelor de absorbție a energiei (asociate materialelor celulare - în special spumelor polimerice), în vederea identificării densității de umplere optime.
- Aplicarea în premieră, în cadrul componentelor printate 3D, a Matricei Decizionale (Matricea Pugh sau Analiza Grid), pentru identificarea corectă a modelului de umplere optim al epruvetelor.
- Determinarea proprietăților de mecanica ruperii, pe epruvete paralelipipedice cu o crestătură laterală, prin teste de încovoiere în patru puncte simetrice (modul I) și asimetrice (modul II).
- Raportarea în premieră a proprietăților de absorbție a energiei (absorbția totală de energie și absorbție specifică de energie) și integritate a structurii (încărcările maxime suportate de epruvete) pentru teste de impact cu viteză redusă.
- Determinarea numărului de cicluri până la rupere în funcție de nivelul de încărcare aplicat epruvetei.
- Trasarea curbei de durabilitate Wöhler împreună cu limitele de încredere.

Capitolul 7 se încheie cu prezentarea principalelor direcții de cercetare pe care autorul le are în vedere.

Teza este foarte bine ancorată în stadiul actual al cercetărilor în domeniul fabricației aditive. Întreaga lucrare este bazată pe mai mult de 350 de titluri bibliografice, majoritatea de dată recentă și largă vizibilitate internațională.

## Bibliografie

- [1] W.E. Frazier, Metal Additive Manufacturing: A Review, *J. Mater. Eng. Perform.* 23 (2014) 1917-1928.
- [2] T. Pereira, J.V. Kennedy, J. Potgieter, A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job, *Procedia Manuf.* 30 (2019) 11-18.
- [3] S.H. Huang, P. Liu, A. Mokasdar, L. Hou, Additive manufacturing and its societal impact: A literature review, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 67 (2012) 1191-1181.
- [4] D. Popescu, A. Zapciu, și colab., FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review, *Polym. Test.* 69 (2018) 157–166.
- [5] H. Li, T. Wang, Z. Yu, The quantitative research of interaction between key parameters and the effects on mechanical property in FDM, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2017 (2017) 1–15.
- [6] A.K. Sood, R.K. Ohdar, S.S. Mahapatra, Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts, *Mater. Des.* 31 (2010) 287–295.
- [7] T. Kozior, C. Kundera, Evaluation of the influence of parameters of FDM technology on the selected mechanical properties of models, *Procedia Engineering* 192 (2017) 463-468.
- [8] C. Vălean, L. Marșavina, M. Mărghitaș, și colab., Effect of manufacturing parameters on tensile properties of FDM printed specimens, *Proc. Struct. Integr.*, 26 (2020) 313–320.
- [9] A. Szust, G. Adamski, Using thermal annealing and salt remelting to increase tensile properties of 3D FDM prints, *Engineering Failure Analysis* 132 (2022) 105932.
- [10] J.M. Chacón, M.A. Caminero, E. García-Plaza, P.J. Núñez, Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection, *Mater. Des.* 124 (2017) 143-157.
- [11] L. Marșavina, C. Vălean, M. Mărghitaș, E. Linul, S.M.J Razavi, F. Berto, R. Brighenti, Effect of the manufacturing parameters on the tensile and fracture properties of FDM 3D-printed PLA specimens, *Engineering Fracture Mechanics* 274 (2022) 108766.
- [12] M.M. Hanon, R. Marczis, L. Zsidai, Influence of the 3D Printing Process Settings on Tensile Strength of PLA and HT-PLA, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 65(1) (2021) 38-46.
- [13] Y. Zhao, Y. Chen, Y. Zhou, Novel mechanical models of tensile strength and elastic property of FDM AM PLA materials: Experimental and theoretical analyses, *Materials & Design* 181 (2019) 108089.
- [14] T. Yao, J. Ye, Z. Deng, K. Zhang, Y. Ma, H. Ouyang, Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: Experimental and theoretical analyses, *Composites Part B: Engineering* 188 (2020) 107894.
- [15] V.D.P. Rao, P. Rajiv, V.N. Geethika, Effect of fused deposition modelling (FDM) process parameters on tensile strength of carbon fibre PLA, *Materials Today: Proceedings* 18 (2019) 2012-2018.
- [16] G. Atakok, M. Kam, H.B. Koc, Tensile, three-point bending and impact strength of 3D printed parts using PLA and recycled PLA filaments: A statistical investigation, *Journal of Materials Research and Technology* 18 (2022) 1542-1554.
- [17] M.T. Birosz, D. Ledenyak, M. Ando, Effect of FDM infill patterns on mechanical properties, *Polymer Testing* 113 (2022) 107654.
- [18] ISO 527-2, *Plastics — Determination of tensile properties — Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics*, 2012.
- [19] F. Erdogan, G.C. Sih, On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear, *J Basic Engn* 85 (1963) 519-525.
- [20] ASTM D1621-16, *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics*, 2016.
- [21] ISO 844:2021, *Rigid cellular plastics — Determination of compression properties*, 2021.