



Domeniul Inginerie Mecanică

TEZĂ DE DOCTORAT

- REZUMAT -

**Analiza comportamentului mecanic al materialelor obținute prin
imprimare tridimensională cu aplicații în industria auto**

Student-doctorand:
Ing. László RÁCZ

Conducător științific:
Prof.Dr.Ing. Mircea Cristian DUDESCU

Comisia de evaluare a tezei de doctorat:

Președinte: Prof. Dr. Ing. **Dan MÂNDRU** - Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca;

Conducător științific: Prof. Dr. Ing. **Mircea Cristian DUDESCU** - Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca;

Referenți:

- Prof. Dr. Ing. **Liviu MARȘAVINA** - Universitatea Politehnica Timișoara;
- Prof. Dr. Ing. **Dan Mihai CONSTANTINESCU** - Universitatea Națională de Știință și Tehnologie, POLITEHNICA București;
- Prof. Dr. Ing. **Mihail HĂRDĂU** - Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca.

**- Cluj-Napoca -
2023**

Cuprins

1. Introducere în domeniul imprimării 3D	3
1.1. Prezentarea tehnologiei de imprimare tridimensională	3
1.2. Exemple de fabricație aditivă	3
1.2.1. FDM – Modelare prin extrudare termoplastică	3
2. Stadiul actual al evaluării comportamentului mecanic al materialelor imprimate 3D	4
2.1. Parametri de proces care influențează proprietățile materialelor imprimate 3D	4
2.2. Încercări mecanice ale materialelor imprimate 3D	4
2.2.1. Analiza pieselor FDM solicate mecanic	4
2.2.2. Modelul analitic bazat pe teoria materialelor compozite	5
2.2.3. Model analitic simplificat al comportamentului mecanic al modelelor FDM.....	5
2.2.4. Analiza cu elemente finite a materialelor FDM.....	5
3. Influența parametrilor de imprimare asupra comportamentului static al materialelor printate 3D.....	6
3.1. Principalii parametri de proces care influențează comportamentul mecanic al materialelor printate 3d	6
3.4.1. Analiza mezzo-structurii geometrice a epruvetelor tipărite prin FDM.....	9
3.4.2. Estimarea suprafețelor de contact ale epruvetelor imprimate	10
3.4.3. Analiza ce elemente finite a epruvetei imprimate 3D	11
3.4.4. Validarea rezultatelor simulării prin încercări de tracțiune	11
4. Influența parametrilor de imprimare asupra comportamentului dinamic al materialelor printate 3D.....	16
4.1.1. Influența ratei de umplere	16
4.2. Efectul modelului de umplere asupra caracteristicilor de oboseală ale materialelor imprimate 3D.....	18
4.2.1. Încercarea la oboseală	18
5. Studii de caz.....	21
5.2.1. Realizarea modelului pedalei prin inginerie inversă.....	23
6. Concluzii finale	25
6.1. Concluzii generale.....	25
6.2. Originalitatea și contribuțiile inovative ale tezei.....	28
6.3. Perspective de dezvoltare ulterioară	29
LISTĂ DE PUBLICAȚII	30

1. Introducere în domeniul imprimării 3D

1.1. Prezentarea tehnologiei de imprimare tridimensională

Imprimarea tridimensională este un proces de construcție a unui obiect tridimensional solid de orice formă, printr-un proces tehnologic aditiv prin adăugarea de straturi succesive de material. Tehnologia inovatoare de imprimare 3D permite crearea rapidă de piese direct dintr-un model geometric digital (CAD), fără a fi nevoie de echipamente suplimentare sau de asamblare. Modelarea prin extrudare termoplastică (FDM) este metoda de fabricație utilizată de imprimantele 3D comerciale care au prețuri accesibile. Prin depunerea unor straturi discrete de filament termoplastic extrudat, FDM creează o formă 3D. Tehnica de fabricație poate fi utilizată pentru a realiza rapid atât prototipuri cât și componente funcționale.

1.2. Exemple de fabricație aditivă

1.2.1. FDM – Modelare prin extrudare termoplastică

Metoda FDM este un proces de imprimare 3D inventat de Scott Crump în 1989. Aceasta utilizează o abordare strat cu strat pentru a crea un design conceptual, care este salvat în format CAD ca fișier IGS sau STL. Un software slicer este utilizat pentru a împărți fișierele CAD în straturi orizontale, iar rezultatul este transmis sub forma unui cod G. Procesul FDM este ghidat de parametri stabiliți și este orientat spre utilizarea materialelor termoplastice (polimeri care se transformă în lichid și solid la suprafață). Filamentul este lichefiat cu căldură în extruder, iar plasticul lichid este introdus pe platforma de construcție prin evacuarea extruderului. Procesul se repetă până la finalizarea construcției.

1.2.2. SLA – Stereolitografie

Procesul SLA, inventat pentru prima dată în 1970 de către cercetătorul japonez Hideo Kodama, este o metodă modernă de fabricare stereolitografică care utilizează lumina ultravioletă pentru a solidifica fotopolimerii fotosensibili. Charles W. Hull, care a inventat forma modernă a mașinilor, a brevetat ulterior tehnologia în 1986 și a cofondat 3D Systems. Procesul implică utilizarea unui laser UV pentru a polimeriza straturile fotopolimerizate, construcția având loc într-un bazin de rășină. Procesul se repetă până când construcția sau modelul este finalizat și poate necesita materiale specializate pentru suport.

1.2.4. PJP – Printare PolyJet cu Fotopolimeri

Printarea PolyJet cu Fotopolimeri (Material Jetting), patentat de Objet Ltd. în 1999, combină tehnologia jet de cerneală cu utilizarea fotopolimerilor. Aceasta oferă numeroase avantaje, inclusiv o rezoluție excelentă, suprafețe netede, o gamă largă de materiale și culori, costuri reduse și un timp de imprimare relativ scurt. PolyJet este denumirea oricărei tehnologii de imprimare 3D care injectează un lichid (material de construcție) într-un cap de imprimare, care este apoi solidificat prin lumină UV. Procesul de imprimare PolyJet se repetă până când obiectul este complet. Materia primă este stocată în cartușe și este conectată direct la duze. Pot exista mai multe aplicatoare de jet, permițând pulverizarea simultană a diferitelor materiale de construcție. Acest lucru permite crearea de obiecte cu diferite niveluri de flexibilitate în cadrul unei singure construcții. Imprimantele 3D PolyJet pot amesteca materiale flexibile și rigide pentru a crea modele cu rezistență și flexibilitate variabilă.

1.3. Domeniul de aplicare a pieselor imprimate 3D ca și componente funcționale

Imprimarea 3D, cunoscută și sub numele de fabricație aditivă, a fost dezvoltată inițial ca o tehnică de prototipare rapidă, dar a evoluat într-un veritabil proces de fabricație. Aceasta

oferă numeroase avantaje față de tehnicile de fabricație convenționale, cum ar fi personalizarea rapidă a produselor, o mai mare libertate de proiectare, reducerea deșeurilor și potențialul de a produce obiecte la prețuri rezonabile. Înțelegerea conceptelor de proiectare și a potențialului metodei este crucială pentru cele mai bune decizii privind imprimarea 3D.

1.3.1. Elemente realizate prin imprimare 3D în industria auto

Tehnologia de imprimare 3D a schimbat în mod semnificativ modul în care industriile proiectează, dezvoltă și fabrică produse noi. În industria auto, aceste tehnologii au dus la dezvoltarea unor structuri complexe și ușoare la cele mai mici costuri posibile. Deși imprimarea 3D este încă utilizată în principal pentru prototipuri rapide în dezvoltarea de noi modele de mașini sau de mașini concept, aceasta a fost integrată și în producția anumitor componente finale. Tehnologia oferă numeroase avantaje, cum ar fi producerea de prototipuri mici, precise și rapide, realizarea de prototipuri în timp foarte scurt și transferul rapid al proiectelor în realitate. Printre cele mai frecvente aplicații ale imprimării 3D în industria auto se numără Formula 1 și Motorsport, vehicule imprimate, prototipuri 3D, piese de schimb 3D și studii de proiectare a vehiculelor. Printre evoluțiile recente se numără introducerea unui supercar imprimat 3D de către Lamborghini și Stratasys, care a redus timpul de dezvoltare, costurile de producție și greutatea vehiculului.

2. Stadiul actual al evaluării comportamentului mecanic al materialelor imprimate 3D

2.1. Parametri de proces care influențează proprietățile materialelor imprimate 3D

Pentru a determina dacă materialele imprimate 3D pot fi utilizate pentru componente funcționale, trebuie determinate proprietățile mecanice fiind important să se prevadă nu numai rezistența, ci și rigiditatea și modul în care acestea se raportează la parametrii procesului de imprimare. Principalii parametri de producție care afectează comportamentul mecanic al componentelor fabricate prin FDM care au fost identificați și investigați pot fi rezumați după cum urmează:

- *Direcția de imprimare* (build orientation): se referă la orientarea piesei pe platformă.
- *Lățimea cordonului*: Este lățimea filamentului depus de duza FDM.
- *Grosimea stratului*: Grosimea cordonului depus.
- *Unghiul rasterului filamentelor/ orientarea filamentelor* (raster angle): reprezintă direcția filamentelor în raport cu axa X a mesei de construcție.
- *Lățimea rasterului*: Lățimea modelului de raster utilizat pentru interiorul pieselor.
- *Golul de aer* (air gap): Este spațiul dintre două filamente adiacente de pe același strat.
- *Numărul de contururi*: Filamentul depus de-a lungul marginii componentei.

2.2. Încercări mecanice ale materialelor imprimate 3D

2.2.1. Analiza pieselor FDM solicitate mecanic

În literatura de specialitate pot fi găsite mai multe publicații și studii care prezintă diferite metode și tehnici de modelare a prototipurilor imprimate 3D prin FDM. În procesul de fabricație FDM, se observă că rezistența mecanică a componentelor (cum ar fi rezistența la tracțiune, rezistența la încovoiere) și rugozitatea suprafeței sunt foarte anizotrope. Rezistența, rugozitatea și acuratețea geometrică a pieselor finale fabricate depind de diverși parametri de

proces, cum ar fi lăţimea conturului, unghiul de raster, lăţimea rasterului, grosimea stratului, orientarea piesei, spaţiul de aer şi setările maşinii. S-a investigat şi influenţa temperaturii materialului depus, a lăţimii rasterului, a spaţiului de aer, a unghiului rasterului şi a culorilor materialului asupra rezistenţei la tracţiune şi compresiune a probelor. Influenţa acestor parametri a fost investigată utilizând atât tehnici experimentale, cât şi tehnici de modelare numerică şi analitică. Analiza temperaturii din interiorul imprimantei (camera de construcţie), a temperaturii de extrudare şi a lăţimii filamentului extrudat asupra calităţii lipirii filamentelor adiacente în procesul FDM constituie factori importanţi care influenţează creşterea zonei de contact între filamente şi lipirea lor.

2.2.2. Modelul analitic bazat pe teoria materialelor compozite

În literatura de specialitate pot fi găsite mai multe publicaţii şi studii care prezintă diferite metode şi tehnici de modelare a structurilor imprimate 3D FDM. Deosebit de importantă pentru studiul nostru este metoda prezentată de L. Li şi Q. Sun, care au propus o metodă de reprezentare a structurilor tipărite FDM 3D ca materiale compozite. Piesele din ABS realizate prin procedeele FDM constau, în esenţă, din filamente ABS parţial lipite. Proprietăţile mecanice ale pieselor FDM sunt guvernate de mezo-structurile lor (structura la scara filamentelor extrudate), care sunt determinate de parametrii de fabricaţie, inclusiv lăţimea filamentelor, grosimea stratului, orientarea depunerii şi dimensiunile spaţiilor dintre filamente. Prin selectarea parametrilor de fabricaţie, procesele FDM pot produce elemente cu proprietăţile dorite. Pentru a exploata pe deplin acest potenţial, ar trebui să se investigheze aspectele privind procesul de fabricaţie şi proprietăţile mecanice ale pieselor FDM. Dintre parametrii de fabricaţie, direcţiile de depunere a straturilor şi dimensiunile spaţiilor dintre filamente sunt cei mai importanţi parametri pentru controlul proprietăţilor mecanice. Astfel, este esenţial să se stabilească modele de material ale pieselor FDM în raport cu aceşti doi parametri de fabricaţie. Modelele pot fi apoi utilizate pentru a proiecta piese cu proprietăţile mecanice dorite prin intermediul proprietăţilor controlate local.

2.2.3. Model analitic simplificat al comportamentului mecanic al modelelor FDM

Un alt model analitic important pentru studiul nostru a fost prezentat de Croccolo, et al. Modelul analitic a fost dezvoltat în conformitate cu câteva ipoteze, şi anume: în conformitate cu standardul ASTM D638-10 epruvetele FDM pot fi considerate grinzi subţiri, a căror lungime este mult mai mare decât lăţimea şi înălţimea, în consecinţă, pare a fi rezonabil să se presupună o lungime infinită a gabaritului epruvetei; pe măsură ce se aplică sarcina exterioară, zona calibrată a epruvetei se deformează cu o deformare uniform distribuită.

Zona calibrată este constituită dintr-o serie de elemente simplificate formate din bare ale căror caracteristici sunt definite în mod corespunzător pentru fiecare tip de probă. În fiecare dintre aceste elemente, sarcina totală este împărţită între straturile longitudinale şi cele înclinate, astfel încât alungirea axială a acestora să fie menţinută constantă. Cu alte cuvinte, toate barele cooperează pentru a susţine sarcina totală, lucrând în paralel.

2.2.4. Analiza cu elemente finite a materialelor FDM

În lucrarea prezentată de Garg, A. şi Bhattacharya, A. , se realizează modelarea şi simularea cu elemente finite pentru o epruvetă FDM de acrilonitril butadien stiren (ABS) folosind pachetul de elemente finite (FE) ABAQUS. Epruvetele sunt proiectate la trei grosimi diferite ale stratului (0,178, 0,254 şi 0,330 mm) şi trei unghiuri de înclinare a filamentelor (0°, 90° şi 0°/90°) utilizând software-ul de modelare CAD Pro/Engineer 5.0. Modelele create sunt exportate în ABAQUS în format de fişier STEP. Dimensiunile totale pentru epruvetele de testare la tracţiune sunt stabilite conform standardului ASTM D638. Modelul geometric al

epruvetei FDM este pregătit prin generarea de straturi la diferite unghiuri de înclinare pentru diferite grosimi ale materialului. În loc să se utilizeze secțiunea transversală circulară teoretică a straturilor, după depunere, straturile sunt plasate într-o secțiune transversală eliptică cu efect de îngustare sau gâtuire intra-strat. Efectul " gâtuire" este un fenomen de difuzie care depinde de timp și ia forma finală după solidificarea modelului. În plus, se observă o regiune de suprapunere între două straturi de filamente adiacente, cunoscută sub numele de gâtuire inter-strat. Aceste măsurători sunt utilizate pentru a genera un model geometric mai realist al eprubetei FDM. Pentru a construi întregul model, secțiunea transversală este creată cu ajutorul măsurătorilor microscopice și apoi se generează modele (în ceea ce privește grosimea și decalajul de filament) pentru a pregăti un model dreptunghiular. Metoda prezentată de de Garg, A. și Bhattacharya, A., conduce la unele concluzii cu privire la relația dintre setările procesului de fabricație (înălțimea filamentului și orientarea rasterului) și proprietățile mecanice ale materialului rezultat.

3. Influența parametrilor de imprimare asupra comportamentului static al materialelor printate 3D

3.1. Principalii parametri de proces care influențează comportamentul mecanic al materialelor printate 3d

Acest capitol își propune să analizeze proprietățile la tracțiune ale epruvetelor create cu o imprimantă 3D FDM obișnuită și să evalueze parametrii tehnici (software-ul de imprimare și setările de preprocesare) asupra proprietăților mecanice ale epruvetelor imprimate. Principalii parametri care trebuie luați în considerare sunt diferitele orientări și modele de imprimare, procentul și rata de umplere. Principalii parametri de proces care influențează producția pieselor 3D FDM sunt raportul de umplere (infill rate), dimensiunea și filamentelor, numărul de contururi, orientarea construcției (build orientation) și modelul de umplere (infill pattern). "Modelul de umplere" poate fi variabil și se poate schimba în funcție de procentul de "infill" (1-100%). Modelul nu se va schimba odată cu creșterea procentului de umplere ci doar "densitatea". Software-ul de tipărire definește modelele de umplere, diferite software-uri oferind modele diferite.

3.2. Analiza experimentală a efectului orientării rasterului, a ratei de umplere și a tiparului de umplere asupra proprietăților mecanice ale materialelor imprimate 3D

Studiul investighează impactul parametrilor de proces asupra caracteristicilor mecanice ale pieselor FDM tipărite 3D. Un model geometric este creat cu ajutorul instrumentelor de modelare CAD și transferat într-un fișier stereolitografic (STL) pentru a începe procesul de imprimare FDM. Geometria obținută este apoi convertită în cod G cu ajutorul software-ului de procesare Simplify3D. Pentru imprimate FDM a fost utilizată imprimanta Wanhao Duplicator i3. Materialul utilizat pentru pregătirea trasabilității a fost filamentul ABS, un material utilizat în mod obișnuit pentru piese FDM. Proprietățile mecanice ale filamentului ABS sunt $E_f=2140$ MPa, $\sigma_f=43$ MPa, iar deformarea specifică la tracțiune $\varepsilon_f=2,7\%$. Modelul geometric al epruvetelor imprimate 3D este realizat în conformitate cu ISO 527-2-2012. S-au efectuat teste la tracțiune uniaxială pentru a investiga proprietățile mecanice ale materialului imprimat 3D. Epruvetele au fost testate într-o mașină de testare universală INSTRON 3366 cu o capacitate de 10 kN. Un extensometru uniaxial a fost utilizat pentru măsurarea deformației specifice. Au fost create trei tipuri de epruvete, folosind diferite variații parametriche: a) rata de umplere, b) modelul de umplere și c) orientarea filamentelor.

Pentru a determina proprietățile mecanice ale epruvetelor tipărite 3D și variabilitatea acestor proprietăți atunci când sunt utilizați diferiți parametri de imprimare, acest studiu a

analizat relația dintre rata de umplere, modelul de umplere și orientarea filamentelor (rasterului) cu rezistența la tracțiune, deformarea specifică corespunzătoare rezistenței la tracțiune și modulul lui Young. Un set de cinci epruvete din fiecare dintre combinațiile variabilelor de mai sus a fost imprimat și supus testului de tracțiune. În figura 3.1 este prezentată variația deformației specifice la tracțiune la tensiunea maximă (tensile strain), a rezistenței la tracțiune (tensile stress) și a modulului lui Young (tensile modulus), în funcție de rata de umplere, pentru secțiunea transversală aparentă.

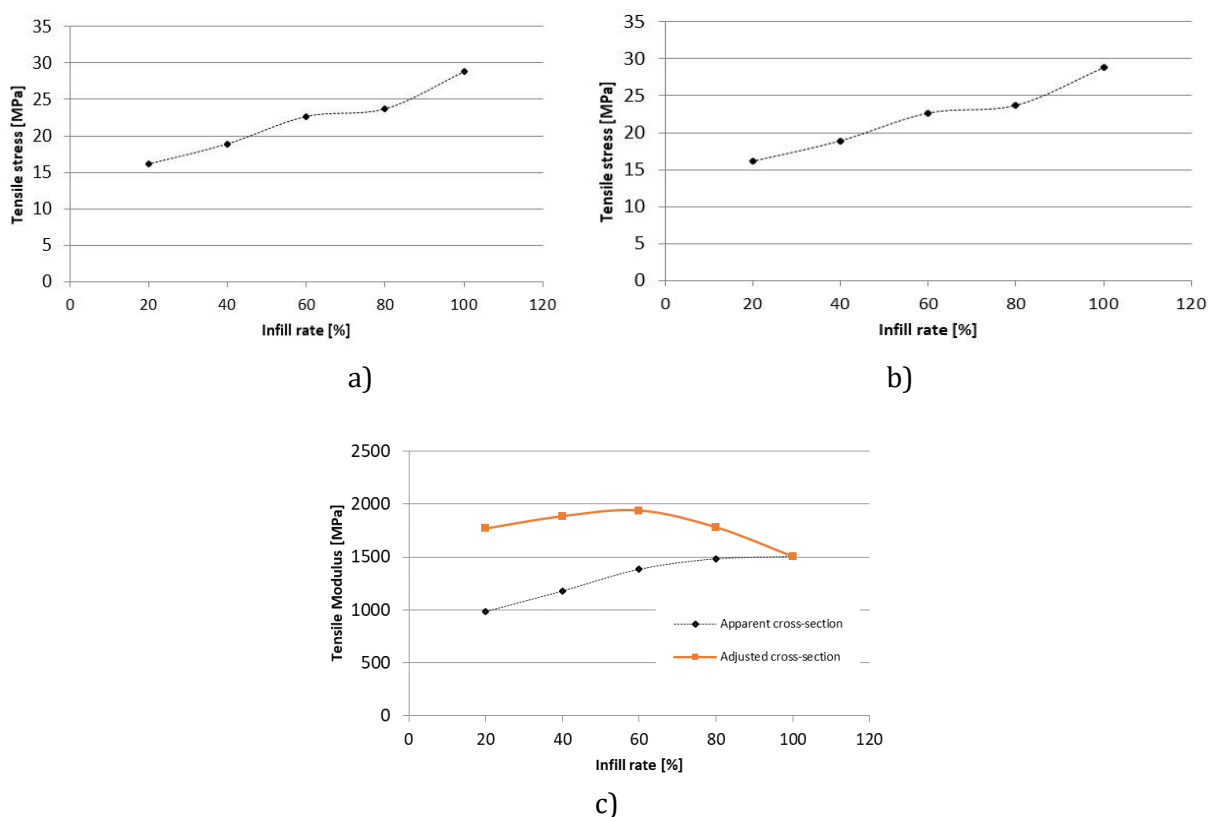
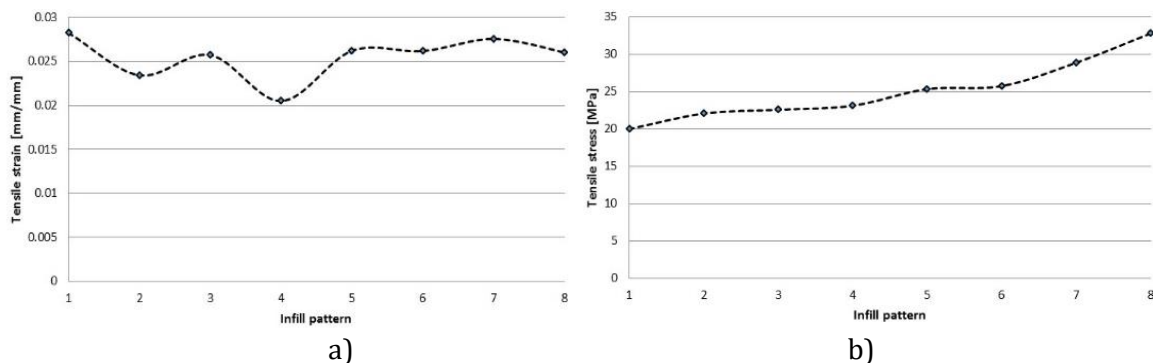
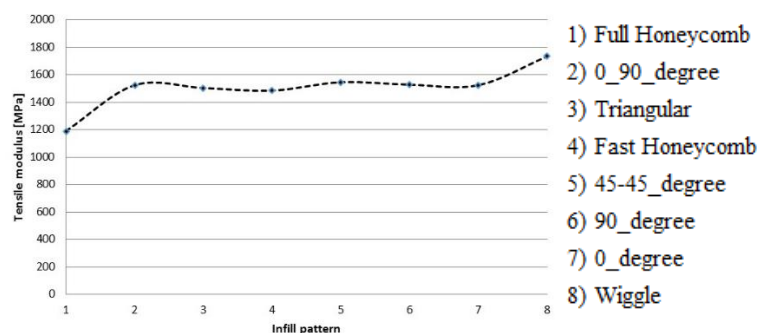


Figura 3.1 Variația cu rata de umplere: a) rezistența la tracțiune, b) deformația specifică la tracțiune pentru tensiunea maximă și c) modulul de elasticitate longitudinal

Influența modelului de umplere a fost studiată pe epruvete imprimate cu 100% rata de umplere și următoarele modele: rectiliniu 0° și 90°, grilă 0°-90° și 45°-45°, fagure rapid (fast honeycomb), fagure complet (full honeycomb), triunghiular (60°) și ondulatorie (wiggly). În figura 3.2 este prezentată variația deformației specifice la tracțiune la tensiunea maximă (tensile strain), a rezistenței la tracțiune (tensile stress) și a modulului lui Young (tensile modulus), în funcție de modelul de umplere, având în vedere secțiunea transversală aparentă.

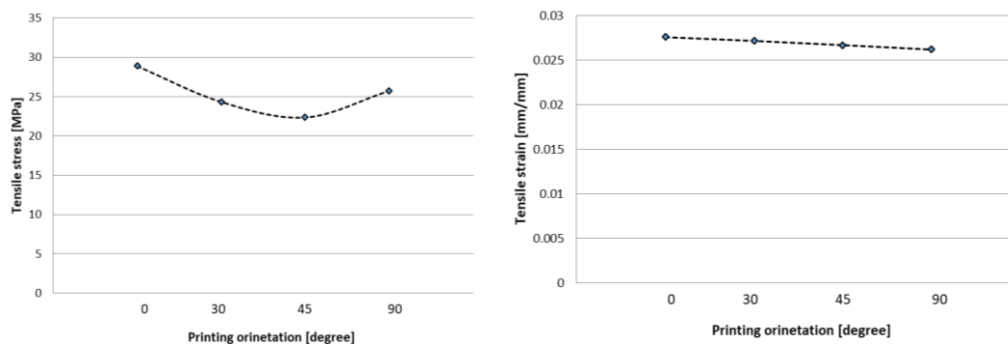




c)

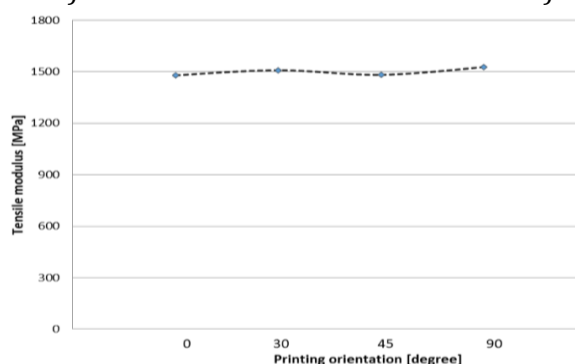
Figura 3.2 Variația în funcție de modelul de umplere pentru: a) rezistența la tracțiune, b) deformația specifică la tracțiune la tensiune maximă c) modulul lui Young

Epruvetele cu o rată de umplere de 100% și orientarea rectilinie a modelului au fost tipărite prin plasarea lor în diferite unghiuri în jurul axei X a platformei de imprimare, inclusiv 0°, 30°, 45° și 90°. În figura 3.3 este prezentată variația rezistența la tracțiune, a deformației specifice la tracțiune la tensiunea maximă și a modulului lui Young în funcție de orientarea rasterului, având în vedere secțiunea transversală aparentă.



a)

b)



c)

Figura 3.3 Variația în funcție de orientarea rasterului pentru: a) rezistența la tracțiune, b) deformația specifică la tracțiune la tensiunea maximă și c) modulul de elasticitate longitudinal

Proprietățile mecanice ale epruvetelor ABS tipărite cu ajutorul tehnologiei FDM sunt influențate în mod semnificativ de rata de imprimare, de tipul de imprimare și de orientarea epruvetelor. Chiar dacă unele epruvete au fost tipărite cu o rată de umplere de 100%, rata reală a aerului ari trebui determinată sau estimată mai precis. Efectul geometriei epruvetelor asupra tensiunilor și a deformațiilor locale va afecta comportamentul mecanic al materialului. Modul de elasticitate aparent crește odată cu procentul ratei de imprimare, în timp ce modul E ajustat ia în considerare densitatea epruvetelor și ar trebui să aibă un comportament mai constant în jurul valorii filamentului ABS. Diferențele pot fi explicate prin calcule

aproximative ale suprafeței reale a secțiunii transversale, care nu ia în considerare numărul de contururi din jurul marginilor epruvetei. Orientarea rasterului de-a lungul direcției de imprimare conduce la cea mai mare rezistență la tracțiune.

3.3. Model analitic simplificat aplicat al unei epruvete cu model de umplere tip grid

Modelul analitic prezentat anterior în paragraful 2.2.3 a fost studiat pe un model al unei epruvete la tracțiune având rata de umplere de 100% și un model de umplere de tip grilă +45°-45° realizată din ABS și utilizată în studiul descris în paragraful 3.2. Implementarea modelului analitic a fost realizată în Microsoft Excel, în cele ce urmează fiind descriși parametri de intrare ai modelului și valorile rezultate. Datele de intrare au fost obținute analizând epruvetele imprimate cât și informațiile din software-ul imprimantei. Comparând rezultatele tensiunii normale maxime cu cele măsurate experimental pentru epruvete având rata de umplere 100% și modelul de umplere de tip grid +45°-45° având o valoare medie de $\sigma_{exp}=25.36$ MPa se constată o convergență bună a acestora cu o valoare a abaterii relative de 4.36% ceea ce validează modelul analitic dezvoltat de Crocolo. Modelul se bazează pe introducerea unor forțe de corecție, care sunt determinate experimental pentru a asigura acuratețea modelului. Factori precum modificarea materialului, parametrii de proces, cum ar fi viteza de imprimare, temperatura de imprimare influențează forțele adezive dintre filamente și rezultatele implicite ale modelului analitic.

3.4. Influența ratei de umplere asupra proprietăților mecanice ale materialelor imprimate 3D – investigație numerică

Acest subcapitol prezintă o metodă nouă de simulare a pieselor imprimate 3D fabricate prin imprimare FDM. Metoda se bazează pe codul G original al imprimantei 3D pentru a genera filamente unice. Pe baza evaluării experimentale a geometriei secțiunii transversale a unei probe de tracțiune tipărite, se determină conexiunea dintre filamente (gâtuire inter și intra strat) și se poate determina, de asemenea, efectul de aplatizare a filamentelor. Pentru a investiga proprietatea mecanică a materialului imprimat 3D s-au efectuat teste de tracțiune uniaxială. Calculul tensiunilor a fost efectuat pe baza dimensiunilor exterioare ale epruvetei de tracțiune, fără a se lua în considerare raportul material/goluri de aer din zona secțiunii transversale. Modulul E rezultat nu va corespunde realității, dar deformația specifică ar putea servi drept referință pentru validarea modelelor geometrice propuse și a simulărilor numerice corespunzătoare. Metodologia a fost aplicată pentru epruvete cu diferite rapoarte de umplere (20%, 40%, 60%, 80% și 100%) și au fost determinate variația modulului de elasticitate E și a rezistenței la tracțiune.

3.4.1. Analiza mezzo-structurii geometrice a epruvetelor tipărite prin FDM

După ce s-a studiat cu atenție metoda dezvoltată de Garg et al., a fost identificat un dezavantaj în ceea ce privește aplicabilitatea sa în viața reală și anume faptul că metoda nu ia în considerare învelișul (coaja) piesei imprimate. În aplicațiile din viața reală, nu este posibilă imprimarea pieselor fără zona de înveliș dacă rata de umplere este foarte mică, de exemplu, 20%. Având în vedere lipsa unui standard de testare specific pentru materialele tipărite 3D, s-a procedat prin alegerea unor epruvete similare materialelor plastice, având în vedere utilizarea și acceptarea lor pe scară largă pentru specișimenele tipărite 3D. În figura 3.4 este prezentată o secțiune transversală a unei epruvete de tracțiune ISO_527 1A imprimată 3D, în care se pot distinge atât zonele de umplutură (infill), cât și cele de înveliș (shell).

Pentru a identifica aria reală a materialului din secțiunea transversală a unei epruvete imprimate, este necesară un model nou și îmbunătățit. În acest studiu, a fost analizată eficacitatea unei metode geometrice și a fost concepută o metodologie pentru a construi un

model geometric foarte realist al pieselor imprimate, în care raportul între material și goluri este clar identificabil într-un model virtual. Acest model geometric ar trebui să fie adecvat pentru a fi supus unui proces rapid de discretizare, în cadrul căruia mezo-structura imprimată va fi transformată în elemente finite, facilitând astfel predicția comportamentului mecanic al pieselor imprimate cu ajutorul analizei FEM.

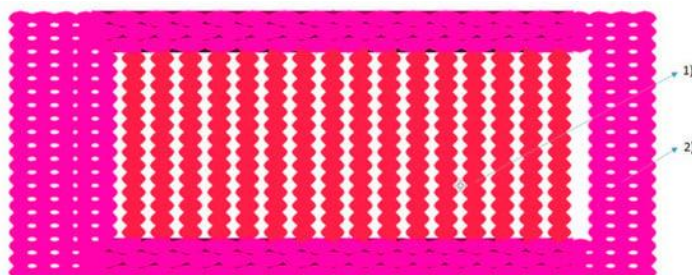


Figura 3.4 Secțiunea de umplere (1) și secțiunea de înveliș (2) a unei epruvete de tracțiune tip ISO_5271A imprimată 3D

Epruveta de tracțiune virtuală (CAD) a fost construită în ANSA în conform cu procedeul descris mai sus. Inițial au fost studiate cinci modele de epruvete de tracțiune conform standardului ISO_527 1A, în care rata de umplere a variat de la 20% la 100%, direcția de imprimare a fost păstrată aceeași, 0 grade în funcție de axele longitudinale ale epruvetelor. Extragerea suprafeței secțiunii transversale pentru epruvetele de tracțiune a fost efectuată în ANSA. Pentru a verifica metoda de determinare a suprafeței cu ajutorul unui model CAD în ANSA, este necesară un studiu microscopic al specimenelor imprimate.

3.4.2. Estimarea suprafețelor de contact ale epruvetelor imprimate

Pentru a determina forma și structura reală a fibrelor secțiunea transversală, mezo-structura și modelul de umplere a epruvetelor imprimate au fost analizate la microscop, cu un factor de mărire de 50×. Rezultatul extragerii secțiunii transversale din modelul geometric a fost comparat cu imaginile microscopice ale epruvetelor imprimate. Deoarece filamentul extrudat este în stare semi-fluidă, atât partea superioară, cât și cea inferioară a acestuia se aplatizează ușor atunci când este depus pe stratul anterior, după cum se indică în fotografia microscopică din figura 3.5a. Corelarea zonei geometrice este necesară, deoarece secțiunea transversală a filamentelor este reprezentată ca un elipsoid perfect în modelul geometric; cu toate acestea, în realitate, secțiunea transversală a fibrelor are o zonă de contact mai mare, datorită faptului că secțiunea transversală a acestora nu are o formă perfect elipsoidală, așa cum se observă în figura 3.5b.

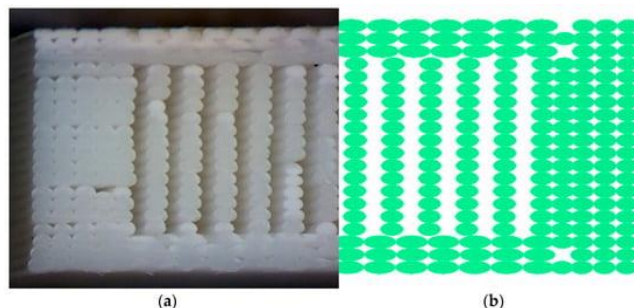


Figura 3.5 Compararea secțiunii transversale a structurii fibrelor între o epruvetă la tracțiune imprimată 3D și modelul geometric în ANSA: (a) epruvetă imprimată (vedere la microscop); (b) model geometric

Efectul aplatizării conduce la formarea unor zone de contact mai mari între filamente, cunoscute sub numele de gâtuire intra și inter-strat. Acest lucru poate fi determinat cu ajutorul măsurătorilor optice sau prin ajustarea grosimii materialului imprimat și a numărului de straturi. În modelul geometric, secțiunea transversală a fibrelor este considerată elipsoidală perfectă și poate fi stabilizată prin determinarea relației dintre parametrii de imprimare și dimensiunile stabilite.

Modelul a fost actualizat pentru a menține reprezentarea elipsoidală perfectă a filamentelor, dar zona de contact a fost ajustată pentru a permite măsurarea gâtuirii intra-strat și inter-strat. Această actualizare a permis o determinare mai precisă a suprafeței secțiunii transversale a fibrelor. Pentru a valida metoda, rezultatele testelor în condiții reale, în special deformația specifică la tracțiune, vor fi comparate cu rezultatul simulării numerice, validând modelul geometric.

3.4.3. Analiza ce elemente finite a epruvetei imprimate 3D

Analiza cu elemente finite a fost efectuată pe modelele geometrice descrise în paragraful 3.4.1. Pentru a valida modelul geometric propus, rezultatul analizei cu elemente finite și datele experimentale trebuie să corespundă. Pentru a verifica secțiunea transversală a epruvetelor, se va efectua o simulare numerică pe modelele geometrice, unde se va compara deformația specifică la tracțiune cu valorile obținute experimental.

Procesul utilizat în acest studiu începe cu modelul geometric inițial, construit cu un instrument de proiectare convențional. Modelul CAD va fi procesat într-un software de "feliere" (slicing tool), în care sunt definiți parametrii de imprimare. Rezultatul acestui proces va fi un cod G, care poate fi citit de imprimantele 3D. Codul G conține toate informațiile de care are nevoie imprimanta 3D, cum ar fi temperatura capului de extrudare, înălțimea și lățimea stratului, viteza de imprimare și, cel mai important, toate coordonatele mișcărilor capetelor de extrudare. Aceste coordonate și setări ale imprimantei pot fi utilizate pentru a crea un model de microstructură foarte realist, cu ajutorul unui plug in script în Ansa, care este potrivit pentru analiza ulterioară cu elemente finite. După determinarea suprafeței secțiunii transversale a epruvetei de tracțiune, s-a efectuat o analiză cu elemente finite pe o porțiune din partea paralelă a epruvetei de tracțiune. Pentru a reduce timpul de simulare, a fost analizat doar un segment al epruvetei de tracțiune. Au fost realizate mai multe simulări pentru a stabili procedura optimă de modelare. Factorii care influențează rezultatul sunt tipul de element, ordinea elementelor, lungimea elementelor și calitatea elementelor. Primele cinci seturi de modele (cu rata de umplere de la 20%, 40%, 60%, 80%, 100%, direcția 0° în funcție de axa longitudinală a eșantionului) au fost construite folosind elemente Tetraeder, de ordinul întâi, cu o lungime generică a elementului de 0,05 mm. Pentru a analiza efectul lungimii elementelor asupra preciziei și timpului de simulare, a fost testată o altă configurație a modelului. Lungimea elementului a fost dublată de la 0,05 (FEA1) la 0,1 (FEA2) mm. După examinarea efectelor parametrilor de construcție a modelului FE, a instrumentelor de simulare și postprocesare, se poate concluziona că cea mai bună practică pentru investigația noastră privind analiza FE este următoarea: modelul de elemente Tetraeder de ordinul 1, cu o lungime globală a elementelor de 0,1 mm.

3.4.4. Validarea rezultatelor simulării prin încercări de tracțiune

Modelele geometrice ale epruvetelor tipărite 3D au fost realizate în conformitate cu ISO 527-2-2012. Testele de tracțiune uniaxială au fost efectuate pentru a investiga proprietățile mecanice ale materialului imprimat 3D. Pentru măsurarea tensiunii de tracțiune s-a utilizat un extensometru uniaxial. Pentru fiecare rată de umplere, a fost testat un număr de cinci epruvete. Materialul utilizat pentru prepararea epruvetelor a fost filamentul de

acrilonitril butadien-stiren ABS. Calculul rezistenței la tracțiune se realizează pe baza dimensiunilor secțiunilor transversale ale unei epruvete (4 mm grosime, 10 mm lățime). Deformația specifică poate servi ca referință pentru validarea modelului geometric cu ajutorul simulărilor numerice. Simularea a fost realizată cu ajutorul software-ului Epilysis și același epruvete au fost testate experimental. Rezultatele pot fi rezumate în tabelul 3.1, în care deformația specifică măsurată experimental este comparată cu rezultatele simulărilor FEM efectuate cu o lungime a elementului mai mică FEA1 (0,05 mm) și mai mare FEA2 (0,01 mm), iar abaterea dintre ele este exprimată în procente. Rezultatele sunt selectate din domeniul elastic al materialului (epruvetei) la o sarcină de 160 N.

Tabelul 3.1 Compararea deplasărilor de la testul experimental de tracțiune (EXP) cu rezultatele simulării cu două lungimi diferite ale elementelor (FEA1 și FEA2)

Rata de umplere [%]	Def. spec. EXP [mm/mm]	Def. spec. FEA1 [mm/mm]	Def. spec. FEA2 [mm/mm]	Abaterea relativă FEA1 -EXP [%]	Abaterea relativă FEA2 -EXP [%]	Abaterea relativă FEA1 -FEA2 [%]
20%	0.004040	0.003917	0.003796	3.14	6.43	3.09
40%	0.003520	0.003300	0.003250	6.65	8.31	1.53
60%	0.003040	0.002907	0.002866	4.57	6.06	1.40
80%	0.002740	0.002584	0.002561	6.04	6.97	0.87
100%	0.002510	0.002323	0.002310	8.06	8.66	0.56

Au fost efectuate zece simulări pentru a determina efectul mărimii elementului asupra preciziei rezultatului. Rezultatele au arătat o diferență de minim 3,13% și maxim 8,05% în cazul modelului FE cu discretizare având lungimea elementului de 0,05 mm (FEA1) în comparație cu rezultatul experimental (EXP). Rezultatele obținute sunt în concordanță cu datele măsurate, care au demonstrat că estimările noastre privind zonele de contact și forma filamentului specimenelor imprimate și modelele cu elemente finite propuse sunt precise și pot fi utilizate cu succes în continuare. În cazul FEA1 și FEA2, aria secțiunii transversale a fost extrasă din modelul geometric din ANSA, așa cum este prezentat în tabelul 3.2, și introdusă în software-ul mașinii de încercat, permițând un calcul mai precis al tensiunilor normale și implicit a rezistenței la tracțiune. Creșterea ariei secțiunii transversale FEA1 și FEA2 este, în medie, de 13%, astfel încât creșterea cu 20% a ratei de umplere nu duce la o creștere similară a secțiunii transversale. O posibilă explicație este că o modificare a ratei de umplere determină nu numai o creștere a cantității de filament depus, ci este constrânsă și de dispunerea (modelul) filamentelor în funcție de geometria piesei.

Tabelul 3.2 Secțiuni transversale estimate în funcție de rata de umplere și de finețea discretizării

Rata de umplere	Aria secțiunii transversale a epruvetei [mm ²]	
	FEA1	FEA2
20%	20.50	20.30
40%	23.85	23.35
60%	27.05	26.52
80%	30.23	29.66
100%	34.72	34.19

Pentru a determina modulul de elasticitate la tracțiune al epruvetei imprimate 3D cu diferite rate de umplere, secțiunea transversală extrasă din modelul geometric a fost reintrodusă în software-ul mașinii de testare, iar rezultatele au fost recalculate în funcție de cele două seturi de valori. În tabelul 3.3, este prezentat rezultatul modulului de elasticitate la tracțiune (E), unde: modulul E-EXP reprezintă modulul de elasticitate la tracțiune al epruvetei

- determinat experimental – considerând secțiunea transversală plină a probei; Modulul E- FEA1 și FEA2 reprezintă modulele de elasticitate la tracțiune recalculat ale epruvetelor utilizând suprafața extrasă din modelul geometric care utilizează discretizare mai fină (0,05 mm) și, respectiv, discretizare mai grosolană (0,1 mm).

Tabelul 3.3 Modulul de elasticitate la al epruvetelor imprimate cu secțiunea transversală determinată geometric

Rata de umplere	Modulul de elasticitate E (MPa)		
	FEA1	FEA2	EXP
20 %	1916.00	1934.90	982.00
40 %	1974.80	2017.10	1,177.50
60 %	2046.70	2087.70	1,384.10
80 %	1983.40	2021.50	1,498.90
100 %	1703.40	1729.80	1,521.80

Influențele lungimii perimetrului asupra ariei secțiunii transversale (care se traduce prin valorile modulului E) sunt prezentate în figura 3.6. Se poate observa că există o corelație inversă între modulul E determinat numeric și cel determinat experimental în raport cu rata de umplere. În cazul unei rate de umplere scăzute de 20%, diferența dintre modulul E EXP și modulul E FEA1 este de 53%, în timp ce pentru o rată de umplere de 100%, diferența dintre modulul E EXP și FEA1 se reduce la o valoare încă semnificativă de 36%. Se poate concluziona că, pentru modulul de elasticitate la tracțiune, utilizarea întregii secțiuni transversale a specimenului imprimat 3D, chiar și pentru o rată de umplere de 100 %, nu va oferi un rezultat care să se încadreze într-un interval de eroare previzibil. . Rezultatele arată în mod clar că o creștere cu 20% a ratei de umplere nu se traduce direct printr-o schimbare de 20% a modulului de elasticitate. În cazul rezultatelor experimentale, diferența de la EXP Infill_20% la EXP Infill_40% reprezintă o treaptă de 19,9%, dar aceasta se reduce la 2,1% atunci când se compară EXP Infill_80% cu EXP Infill_100%. În mod notabil, valorile FEA1 și FEA2 sunt în creștere, până la Infill_60%, apoi în ușoară scădere până la Infill_100%.

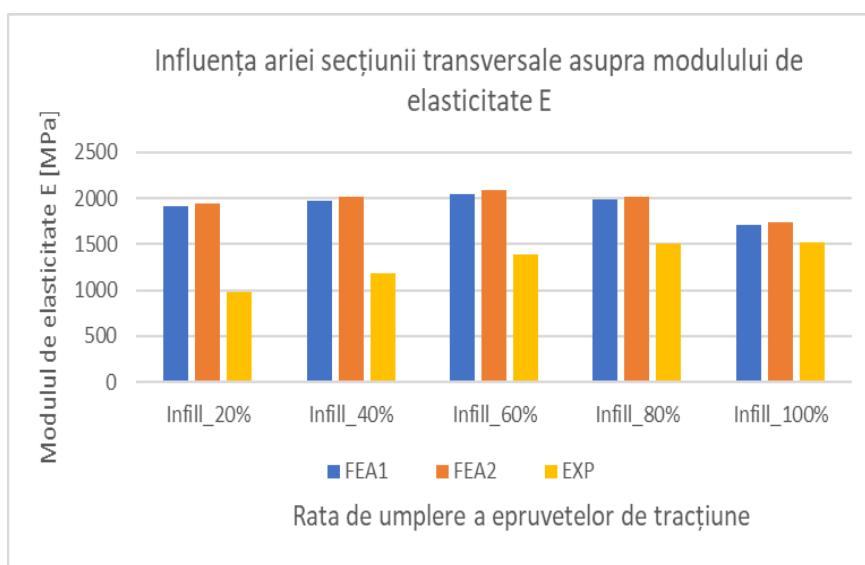


Figura 3.6 Valoarea modulului de elasticitate pentru diferite rate de umplere recalculat pe baza ariilor secțiunii transversale estimate numeric

În acest capitol au fost analizate epruvete de tracțiune tipărite 3D pentru a înțelege efectul diferitelor rate de umplere asupra comportamentului mecanic.

Rezultatele obținute permit formularea următoarelor concluzii generale:

- Abordarea propusă pentru construirea unui model complex cu elemente finite pe baza codului G generat de software-ul de preprocesare al imprimantei este o metodologie fiabilă pentru a prezice comportamentul pieselor imprimate prin FDM, dar sunt necesare ajustări pentru a reprezenta gâtuirea intra și inter-strat pentru obținerea unor rezultate precise.
- Aria secțiunii transversale a unei epruvete de tracțiune extrasă din modelul numeric este prezisă cu o bună acuratețe și permite estimarea curbelor tensiune-deformație specifică și a modulelor de elasticitate mai apropiate de realitate.
- Pentru rate de umplere mai mari, valorile rezistenței la tracțiune și ale modulului de elasticitate ale epruvetelor converg către valorile obținute experimental, dar nu în mod proporțional.
- Rezultatele arată în mod clar că creșterea ratei de umplere nu se traduce în mod direct printr-o modificare corespunzătoare a modulului de elasticitate, dispunerea rândurilor de filamente influențând forțele de legătură dintre acestea și învelișul exterior.

3.5. Influența modelului de umplere asupra proprietăților mecanice ale materialelor imprimate 3D

Pentru a studia efectul modelului de umplere, modelele numerice au fost construite folosind același script care generează un model geometric din codul G (așa cum este descris în capitolul anterior). Mezo-structura secțiunii transversale a epruvetei imprimate a fost analizată la microscop pentru a stabili forma reală și interacțiunea structurală a filamentelor. Structura filamentelor în secțiunea transversală din modelul numeric a fost comparată cu imaginile detaliate ale epruvetelor imprimate. Analiza cu elemente finite (solver Epilysis) care simulează un test de tracțiune este efectuată pe diferite epruvete corespunzătoare celor 6 modele de umplere analizate, și anume: grilă 0°-90° și ±45°, triunghiular 60°, fagure rapid, fagure complet și ondulatorie. Toate modelele corespund unei rate de umplere de 100%, deci teoretic au densitate completă.

Modelului numeric i s-au aplicat aceleași condiții la limită ca și în cazul epruvetelor reale în timpul testului de tracțiune. Pentru a valida metoda, sunt necesare teste de tracțiune în condiții reale, în care deformația specifică de tracțiune determinată experimental va fi comparată cu rezultatul simulării numerice. Rezultatele sunt rezumate în tabelul 3.4, în care deformația specifică măsurată experimental este comparată cu rezultatele simulărilor FE, rezultatele fiind selectate din domeniul elastic al curbei tensiune-deformație.

Tabelul 3.4 Valorile deformațiilor specifice obținute prin simulări numerice vs. cele determinate experimental

Modelul de umplere	Def. spec. EXP (mm/mm)	Def. spec. FEA (mm/mm)	Abaterea relativă. FEA-EXP (%)
Grilă 0-90	0.00259	0.00277	6.95
Grilă +45-45	0.00267	0.00269	0.75
Fagure rapid	0.00279	0.00285	2.15
Fagure complet	0.00333	0.00351	5.40
Triunghiular 60°	0.00274	0.00294	7.2
Ondulatoriu	0.00223	0.00205	8

Aria secțiunii transversale extrasă din modelul geometric a fost reintrodusă în software-ul mașinii de testare, iar rezultatele tensiunilor au fost recalculate în funcție de noua valoare. Pe baza curbelor tensiune-deformație ajustate, valoarea modulului de elasticitate E

pentru fiecare model de umplere a fost recalculată, iar valorile lor comparative cu cele inițiale bazate pe secțiunea transversală completă sunt prezentate în tabelul 3.5.

Tabelul 3.5. Valorile modului E pentru diferite modele de umplere

Modelul de umplere	Modulul de elasticitate E (MPa)		Abatere relativă (%)
	Calculat (numeric)	Secțiune plină	
Grilă 0°-90°	2049.00	1523.7	25,4
Grilă +45-45°	1631.00	1545.2	5,3
Fagure rapid	1892.04	1484.0	21,6
Fagure complet	1272.20	1188.6	6,6
Triunghiular 60°	2055.26	1502.8	26,8
Ondulatoriu	1877.49	1733.5	7,7

În figura 3.7 sunt prezentate rezultatele comparative sub forma unui grafic de bare ale modulelor de elasticitate la tracțiune pentru diferite modele de umplere. Valoarea modului de elasticitate E (notată E_Fcs) reprezintă modulul de elasticitate măsurat al epruvetei care utilizează aria transversală plină (Fcs), iar cealaltă valoare este modulul (notat E_Calc) bazat pe aria corectată a secțiunii transversale. Se poate concluziona că utilizarea secțiunii transversale complete a epruvetelor imprimate 3D, chiar și pentru o rată de umplere de 100%, nu va oferi pentru modulul E și rezistența la tracțiune finală un rezultat în cadrul unui interval de eroare rezonabil, în special pentru modele precum grilă 0-90°, fagurele rapid și triunghiular 60°.

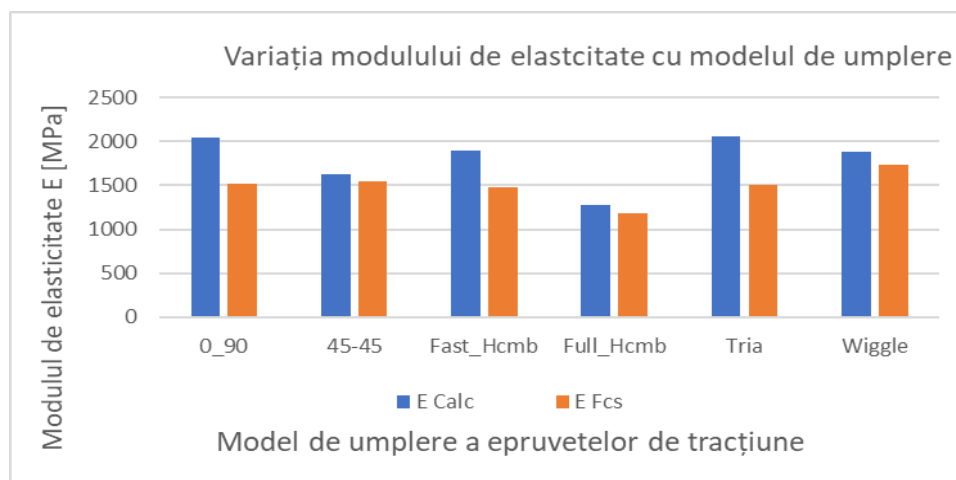


Figura 3.7 Rezultate comparative ale modulelor de elasticitate longitudinale cu și fără ajustarea ariei secțiunii transversale pentru diferite modele de umplere

Rezultatele prezentate în paragraful 3.5. permit formularea următoarelor concluzii generale:

- Metodologia propusă privind construirea unui model cu elemente finite pornind de la codul G generat de imprimantă este o metodă fiabilă de evaluare a influenței structurii interioare date de modelul de umplere asupra comportamentului mecanic al pieselor imprimate prin FDM.
- Pentru obținerea unor rezultate precise sunt necesare ajustări pentru a reprezenta gâtuirea intra și inter-strat și trebuie efectuate pe epruvete imprimate reale.
- Aria secțiunii transversale a unei epruvete de tracțiune extrasă din modelul numeric este prezisă cu o bună acuratețe și permite estimarea curbelor tensiune-deformație specifică și a modulelor de elasticitate E mai aproape de realitate.

- Modele precum grilă $\pm 45^\circ$, fagure complet și ondulatorie au un raport mai mare între material și goluri de aer și au dat rezultate rezonabile în ceea ce privește rezistența la tracțiune și modulul E comparativ cu epruvete considerate secțiunea transversală completă, astfel încât ar fi recomandat să fie utilizate pentru piesele imprimate supuse la solicitări mecanice.
- Modele precum grilă 0-90°, fagure rapid și triunghiular 60° prezintă diferențe mai mari cu 20% în ceea ce privește rezistența la rupere și modulul E atunci când secțiunea transversală este considerată plină, ceea ce nu poate fi neglijat în cazul pieselor imprimate supuse la solicitări mecanice.

4. Influența parametrilor de imprimare asupra comportamentului dinamic al materialelor printate 3D

4.1. Evaluarea proprietăților de impact ale materialelor imprimate 3D

Pentru a determina dacă materialele tipărite 3D pot fi utilizate pentru componente funcționale, trebuie determinate proprietățile mecanice [18-20] și este, de asemenea, important să se prevadă nu numai rezistența, rigiditatea, ci și rezistența la impact și modul în care acestea sunt legate de parametri de proces [29]. Studiile arată că epruvetele produse prin FDM au o rezistență la impact semnificativ mai mică decât cele produse prin tehnologia de turnare prin injecție. Discontinuitățile materialului, care sunt un efect al depunerii materialului în straturi și al metodei de umplere a straturilor, au o influență semnificativă asupra rezistenței generale a produsului. În cazul în care este posibil, ar trebui ca procesul de prelucrare prin metoda FDM să fie realizat în așa fel încât minimizeze discontinuitățile și cavitățile din interiorul produsului, care sunt cele mai vulnerabile la cedare. O altă problemă este deteriorarea componentelor imprimate 3D din cauza impactului asupra integrității structurale. Datele obținute demonstrează că rezistența la impact prezentată de compozitele imprimate 3D este semnificativ mai mare decât termoplasticele tipărite 3D obișnuite și, în unele cazuri, chiar mai bună decât cea a preimpregnatelor obișnuite.

Au fost fabricate folosind filament din ABS (Plasty Mladeč, Republica Cehă) 55 de epruvete. Geometria epruvetelor a fost construită în SolidWorks 2016, utilizând dimensiuni standard în conformitate cu standardul EN ISO 179-1: 2000, (pentru materiale termoplastice), tip C, utilizând o creștătură în formă de V la un unghi de $45^\circ \pm 1^\circ$. Dimensiunile epruvetelor sunt: $l=80\text{mm}$, $b=10\text{mm}$, $a=4\text{mm}$.

Fiecare set a fost format din cinci epruvete pentru un anumit parametru de proces. Deoarece proprietățile mecanice ale mai multor materiale termoplastice pot varia în funcție de temperaturile ambientale, testele au fost efectuate în conformitate cu standardelor la temperatura camerei. Testele de încovoiere prin șoc (Charpy) au fost efectuate pentru a studia absorbția de energie a diferitelor configurații ale epruvetelor.

4.1.1. Influența ratei de umplere

Influența ratei de umplere asupra rezilienței probelor a fost studiată pe epruvete imprimate cu o direcție rectilinie de 0° (față de axa longitudinală a imprimantei). După testarea fiecărei probe, au fost măsurate și înregistrate următoarele proprietăți: reziliența, valoarea energiei de rupere, variația unghiului, viteza de impact și valorile statistice aferente. Factorii cei mai importanți pentru analiza noastră sunt media valorilor, abaterea standard și natura ruperii, în cazul în care epruveta este ruptă complet sau doar parțial. Rezultatele sunt prezentate în tabelul 4.1. unde valorile rezilienței medii (kJ/m^2) a epruvetelor imprimate sunt prezentate pentru diferite rate de umplere. Așa cum era de așteptat, corelația directă între reziliență și rata de umplere a fost confirmată. Rezultatul a arătat că reziliența pieselor

imprimare 3D, (și capacitatea de absorbi mai multă energie) crește împreună cu creșterea procentului de umplere a probelor testate.

Tabel 4.1 Valorile medii ale rezilienței pentru epruvetele tipărite având același model de umplere și rate de umplere diferite

Tip epruvetă	CH-0-20%	CH-0-40%	CH-0-60%	CH-0-80%	CH-0-100%
Reziliența [kJ/m²]	74,185	9,71	13,015	15,347	16,708

4.1.2. Influența modelului de umplere

Influența modelului de umplere a fost studiată pe al doilea set de probe. Epruvetele au fost tipărite folosind același material și aceleași setări ale imprimantei, doar că modelul de umplere a fost schimbat. Au fost utilizate șase modele diferite de umplere: grilă 0°-90°, grilă - 45°+45°, fagure rapid, fagure complet, ondulatoriu și triunghiular 60°. Rezultatele testelor de impact au fost valorile rezilienței medii a probelor tipărite cu aceeași rată de umplere, dar cu un model de umplere diferit, prezentate în tabelul 4.2.

Tabelul 4.2 Valorile medii ale rezilienței pentru epruvetele tipărite cu aceeași rată de umplere, dar cu diferite modele de umplere

Model de umplere	Grid 0-90	Grid 45±45	Tria	Fast HC	Full HC	WIG
Reziliența [kJ/m²]	5,687	6,919	6,936	8,22	9,76	12,36

Pentru a avea o imagine de ansamblu mai bună a performanței la impact a epruvetelor încercate, rezultatele încercării de impact sunt aranjate în ordine crescătoare în tabelul 4.3.

Tabel 4.3. Valorile medii ale rezilienței probelor în ordine crescătoare

Nr.	Proba	Reziliența medie [kJ/m ²]
1	CH_0-100%	16,71
2	CH_0-80%	15,35
3	CH_0-60%	13,02
4	CH_WIGGLE_100%	12,36
5	CH_FULLHC_100%	9,76
6	CH_0-40%	9,71
7	CH_FASTHC_100%	8,22
8	CH_0-20%	7,42
9	CH_TRIA_100%	6,94
10	CH_45+45-100%	6,92
11	CH_0-90-100%	5,69

În acest capitol s-a analizat influența ratei de umplere și a modelul de umplere asupra rezilienței epruvetelor imprimate 3D. Două seturi de probe au fost analizate. Primul set format din epruvete imprimate cu același model de umplere dar cu o rată de umplere variind între 20% și 100%. Al doilea set de epruvete au fost fabricate cu aceeași rată de umplere, toate cu 100%, dar modelul de umplere a fost diferit pentru fiecare dintre ele. Comportamentul mecanic al materialelor imprimate 3D solicitate dinamic a fost investigate

prin teste de încovoiere la impact (Charpy) pe probe standard pentru a determina reziliența a materialului. Se observă o îmbunătățire notabilă a rezilienței atunci când intervalul de umplere trece de la 40% la 60% (3,3 kJ/m²), mult mai mare decât în cazul trecerii de la 20% la 40% (2,3 kJ/m²). În general, cel mai bune caracteristici în ceea ce privește reziliența în cadrul testului nostru a avut proba imprimată cu o rată de umplere de 100% și un model de umplere ondulatorie (wiggle). Cu aceeași rată de umplere de 100%, proba imprimată cu modelul grilă 0°-90° prezintă o rezistență la impact de 2,9 ori mai mică. Se constată că reziliența se schimbă relativ puțin de la un eșantion la altul din aceeași categorie. Testele de impact indică faptul că, pe lângă rata de umplere, rezultatul este influențat semnificativ de modelul de umplere. Cel mai bun rezultat poate fi estimat, pe baza experienței noastre cu modelele de umplere având structura filamentelor pe direcția transversală în raport cu sarcina dinamică.

4.2. Efectul modelului de umplere asupra caracteristicilor de oboseală ale materialelor imprimate 3D

Cunoașterea comportamentului la oboseală și a mecanismelor sale de deteriorare sunt esențiale pentru evaluarea materialelor polimerice fabricate prin FDM în diverse aplicații pentru a determina durabilitatea și fiabilitatea lor pe termen lung. Pe lângă parametrii de proces sunt de interes factorii mecanici caracteristici testului de oboseală, cum ar fi amplitudinea tensiunii, deformația, tensiunea medie, coeficientul de asimetrie a ciclului, raportul tensiune-deformație specifică, frecvența ciclului de tensiune, autoîncălzirea, concentratorii de tensiune etc.

În acest sub-capitol a fost investigat efectul modelului de umplere asupra duratei de viață la solicitarea de oboseală a epruvetelor standard tipărite 3D din ABS. Epruvete standard cu opt tipuri de modele de umplere au fost supuse unor teste statice și ciclice. După finalizarea testelor de tracțiune pentru a obține tensiunea de rupere la tracțiune (UTS), s-au efectuat teste de oboseală axială, cu ciclu pulsant cu un coeficient de asimetrie $R = 0,1$ și o formă de undă sinusoidală pentru a evalua influența modelelor de umplere asupra numărului de cicluri până la rupere pentru cinci niveluri diferite de tensiune. Pe baza curbelor S-N este prezentat un model matematic al curbelor de oboseală. Rezultatele comparative ale curbelor S-N pentru diferite modele de umplere, numărul de cicluri pentru un anumit raport de tensiune (%UTS) și examinarea zonei de rupere permit formularea concluziilor și a principalelor rezultate ale studiului. Deoarece nu există standarde de material pentru materialele fabricate prin AM au fost tipărite epruvete standard conform standardului ASTM D638 cu o rată de umplere de 100% și următoarele modele: rectiliniu 0° și 90°, grilă 0°-90° și +45°-45°, fagure rapid, fagure complet, triunghiular (60°) și de tip ondulatoriu. Testul inițial de tracțiune și testele de oboseală au fost efectuate pe o mașină de încercat servo-hidraulică tip Instron 8810, la temperatura camerei.

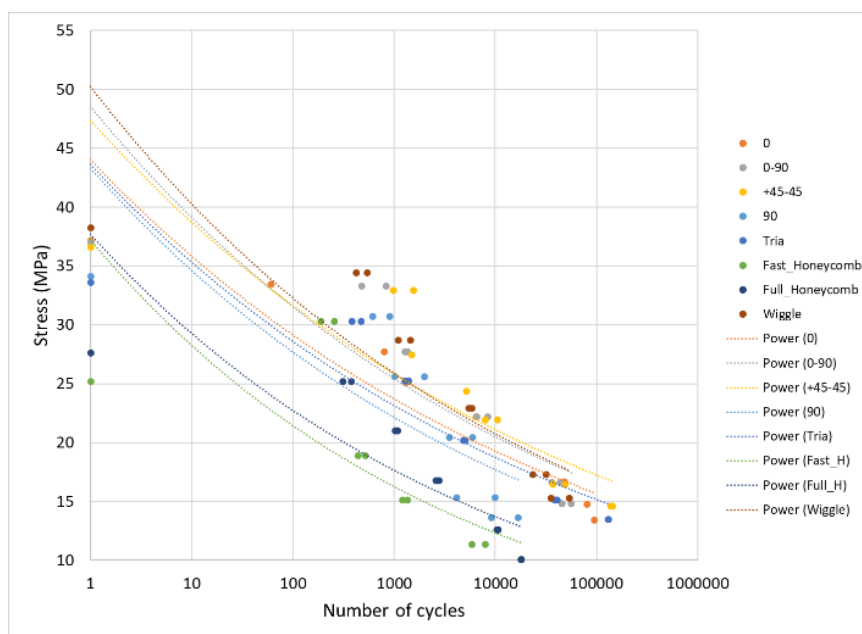
4.2.1. Încercarea la oboseală

Au fost efectuate teste de oboseală axială în conformitate cu ASTM D7791 pe zece epruvete pentru fiecare model de umplutură. S-a efectuat un studiu de frecvență (15 Hz, 10 Hz și 5 Hz) pe modelul de umplere de 0° pentru a determina cea mai bună frecvență pentru a efectua testele de oboseală. Pe de o parte, o frecvență mai mare reduce timpul de testare, dar, pe de altă parte, epruveta va începe să se încălzească. Temperatura medie a epruvetei pe lungimea calibrată a fost monitorizată cu o cameră termică doar pentru nivelul de încărcare ridicat, corespunzător unui nivel de solicitare de 90% din rezistența la tracțiune (UTS). Pentru efectuarea încărcărilor ciclice s-a ales o frecvență de încercare de 10 Hz. Pentru procedura

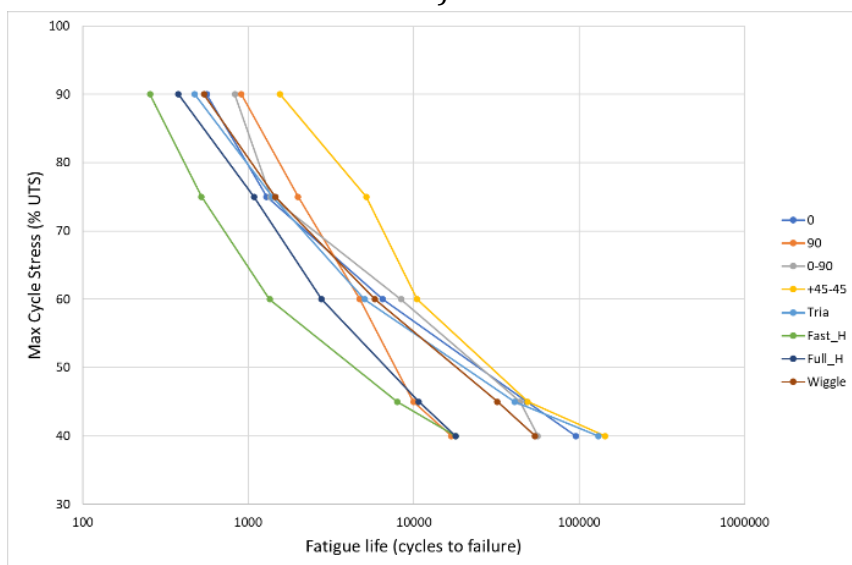
experimentală fost selectat un ciclu de oboseală pulsatoriu cu formă de undă sinusoidală și un coeficient de asimetrie al ciclului $R=0,1$.

Durata de viață la oboseală pentru valori ale tensiunii maxime de 90% UTS, 75% UTS, 60% UTS, 45% UTS și 40% UTS au fost măsurate pentru fiecare tip de epruvete cu diferite modele de umplere, un număr de două epruvete fiind testate pentru fiecare nivel. Scopul nu a fost acela de a determina rezistența la oboseală, ci mai degrabă de a observa influența structurii interne a epruvetelor asupra duratei de viață la oboseală.

Rezultatele curbelor S-N trasate luând în considerare tensiunea maximă a ciclului ca procent din rezistența la tracțiune sunt prezentate în figura 4.1 pentru diferite modele de umplere cu curbe ajustate.



a)



b)

Figura 4.1 a) Curbe tensiune-număr de cicluri S-N pentru diferite modele de umplere; (b) Curbe tensiune-număr de cicluri S-N cu tensiune normalizată.

Pe baza curbelor tensiune-număr de cicluri (S-N) s-a dezvoltat un model matematic simplu pentru determinarea proprietăților la oboseală:

$$S = 10^A * N^B \quad (4.1)$$

unde A și B sunt coeficienți determinați prin metoda celor mai mici pătrate și prezentați în tabelul 4.6.

Table 4.6 Coeficienții modelului liniar și acuratețea aproximării

Model de umplere	Rectiliniu 0°	Rectiliniu 90°	Grilă 0°-90°	Grilă ±45°	Triunghiular 60°	Ondulant (Wiggle)	Fagure rapid	Fagure complet
A	1.627	1.636	1.686	1.675	1.639	1.701	1.571	1.576
B	-0.08	-0.09	-0.09	-0.08	-0.09	-0.09	-0.11	-0.10
	219	706	356	781	172	598	99	98
R-pătrat	0.904	0.572	0.759	0.747	0.829	0.767	0.642	0.697
RMSE (MPa)	0.1290	0.2360	0.1771	0.1791	0.1488	0.1738	0.2628	0.2141

Se constată că pentru o anumită valoarea tensiunii durată de viață (numărul de cicluri la o tensiune de 15 Mpa) a diferitelor modele de umplere este diferită (Tabelul 4.7)

Tabel 4.7 Durata de viață a diferitelor modele de umplere

Model de umplere	Rectiliniu 0°	Rectiliniu 90°	Grilă 0°-90°	Grilă ±45°	Triunghiular 60°	Ondulant (Wiggle)	Fagure rapid	Fagure complet
NR. de cicluri	80739	4154	56161	143204	1344	5120	40550	35500

Rezultatele indică faptul că modelele cu filamente înclinate în raport cu direcția de tracțiune (grilă ±45°, rectiliniu 0° și triunghiular 60°) au o durată de viață la oboseală mai mare în comparație cu cele cu majoritatea filamentelor perpendiculare pe direcția de tracțiune (fagure rapid, fagure complet și rectiliniu 90°). Modele precum grilă 0°-90° și ondulatoriu sunt foarte apropiate de primul grup, având filamente înclinate (ondulate) sau de-a lungul și perpendicular pe direcția de tracțiune (grilă 0°-90°).

Analiza fractografică cu ajutorul microscopiei electronice (SEM) a evidențiat fenomenele microstructurale care au produs ruperea epruvetei și a oferit informații suplimentare despre interacțiunea microstructurală dintre filamente și ruperea acestora în cazul încărcărilor prin cicluri. Examinând imaginile SEM ale epruvetelor cu altă orientare a filamentelor decât 0° (direcția de încărcare), se poate concluziona că comportamentul la oboseală depinde mai mult de alți parametri, cum ar fi rezistența legăturii intra și interstrat și densitatea de goluri, decât de rezistența monofilamentului ABS. Pentru unele modele, cum ar fi cel fagure rapid și cel de fagure plin, golul de aer este semnificativ, legăturile interlaminare sunt reduse, ceea ce explică cele mai slabe rezultate în ceea ce privește durata de viață la oboseală.

Rezultatele prezentate în acest capitol permit să se tragă următoarele concluzii generale:

- Modelele cu filamente înclinate în jurul axei de tracțiune (grilă ±45°, rectiliniu 0° și triunghiular (60°)) au durată de viață ridicată la oboseală în comparație cu cele cu majoritatea filamentelor perpendiculare pe direcția de tracțiune. (fagure rapid, fagure complet și rectiliniu 90°).

- Materialele tipărite 3D cu diferite modele de umplere prezintă proprietăți statice și dinamice diferite, materialele cu rezistență la tracțiune mai mare pot avea un număr mai mic de cicluri până la ruperea la oboseală.
- Poziția filamentelor în interiorul unui strat și dispunerea stratului în raport cu straturile adiacente și cu direcția de încărcare sunt definitorii pentru durata de viață la oboseală.
- Legăturile intra și interstrat și densitatea materialului (rata material/goluri de aer) joacă un rol esențial în comportamentul dinamic al materialelor FDM

5. Studii de caz

5.1. Comportamentul mecanic al grinzilor cu rigiditate variabilă obținute prin imprimare 3D

Proprietățile mecanice ale pieselor fabricate prin modelare prin extrudare termoplastică sunt influențate în mod semnificativ de parametrii de imprimare. Crearea de modele cu o rată de umplere și un model de umplere variabile ar prezenta o serie de avantaje în comparație cu modelele tipărite 3D în mod convențional. În primul rând, ar putea fi obținut un raport greutate - rezistență mai bun prin optimizarea structurii interne pentru a se potrivi cerințelor de utilizare. În zonele mai puțin solicitate, rata de umplere poate fi redusă, iar în zonele cu solicitări mari, rata de umplere poate fi crescută pentru a rezista mai bine la sarcini. În acest fel, se poate economisi o cantitate semnificativă de material și timp de imprimare. Comportamentul mecanic al pieselor imprimate 3D este influențat și de modelul de umplere în combinație cu rata de umplere.

5.1.1. Procedeu de fabricare a epruvetelor cu rată de umplere variabilă

Pentru a crea modele cu o rată de umplere sau un model de umplere variabilă, a trebuit să găsim o metodă care să permită stabilirea unei configurații de imprimare diferite în cadrul unei singure piese. Soluția testată a fost de a împărți un volum geometric în sub-volumele sale. Sub-volumele sunt necesare pentru a defini în mod clar delimitările în cadrul unei piese, unde se poate aplica configurația diferită a imprimantei. Pentru studiul nostru, ne-am propus să analizăm efectul ratei de umplere asupra piesei imprimate 3D tipărite cu direcția 0° (conform axei longitudinale a probei) și rata de umplere variabilă. Variația ratei de umplere va fi simetrică față de centrul epruvetei, respectiv de 20%-40%-60%-80%-100%-80%-60%-40%-20%. Rezultatele măsurătorilor vor fi apoi comparate cu rezultatul unui alt set de epruvete tipărite cu o rată de umplere uniformă de 100%, cu o direcție de imprimare de 0° - în funcție de axa longitudinală a epruvetei.

5.1.2. Studiu experimental

Trei seturi de epruvete au fost tipărite (prin metoda FDM folosind material ABS) și testate. Un set a fost imprimat cu setări uniforme regulate, folosind un raport de umplere de 100% și un model de grilă, cu direcția 0° în conformitate cu axele longitudinale ale epruvetelor de încovoiere. Al doilea set de epruvete a fost imprimat cu un raport de umplere variabil, (20%-40%-60%-80%-100%-80%-60%-40%-20%), așa cum a fost descris anterior, unde între scenariile diferitelor rate de umplere s-a păstrat peretele subțire de separare. Al treilea set de epruvete a fost imprimat conform aceleiași distribuții a procentajului de umplere, dar fără pereții subțiri care separă diferitele scenarii de umplere. Fiecare set de epruvete testate conținea cinci eșantioane imprimate 3D. Eșantioanele au fost testate la

încovoiere în 3 puncte sub o sarcină statică. Rezultatele testelor sunt prezentate sintetic în tabelul 5.1.

Tabelul 5.1 Rezultatele încercărilor la încovoiere în trei puncte ale epruvetelor imprimate

Epruvetă	Modulul de elasticitate la încovoiere (MPa)	Tensiunea la forța maximă (MPa)	Forța de solicitare (N)	Săgeata la forța maximă (mm)
Uniform 0-grade, 100%	1,984.00	53.67	95.42	7.414
Variabil_Versiunea1	2,078.20	45.26	80.46	3.942
Variabil_Versiunea2	2,004.40	48.76	86.69	4.917

5.1.3. Analiza cu elemente finite

Analiza cu elemente finite a fost efectuată pe epruvete tipărite pentru a determina acuratețea predicției comportamentului mecanic al pieselor tipărite 3D folosind metode FEM standard. Este foarte dificil de prezis comportamentul mecanic al pieselor imprimate 3D fără a le testa prin metode experimentale. A fost utilizată o abordare bazată pe două modele pentru a determina cea mai potrivită metodă de analiză a probelor imprimate 3D. Prima abordare de modelare a folosit o discretizare cu elemente solide tip Tetraida de ordinul 2, cu dimensiuni ale elementelor cuprinse între 0,5-1,5 mm. Modelul a fost încărcat cu o forță de 60 N, aplicată în mijlocul epruvetei de încovoiere. Calitatea elementelor a fost verificată în funcție de cerințele standard NASTRAN. Modelul a fost supus unei simulări standard liniar-statice cu ajutorul solverului Epyllisis. În figura 5.1 este prezentat rezultatul simulării FEM a modelului Tetraida, unde a) reprezintă săgeata grinzii în funcție de direcția sarcinii (maxim 2,770 mm), b) distribuția tensiunilor normale.

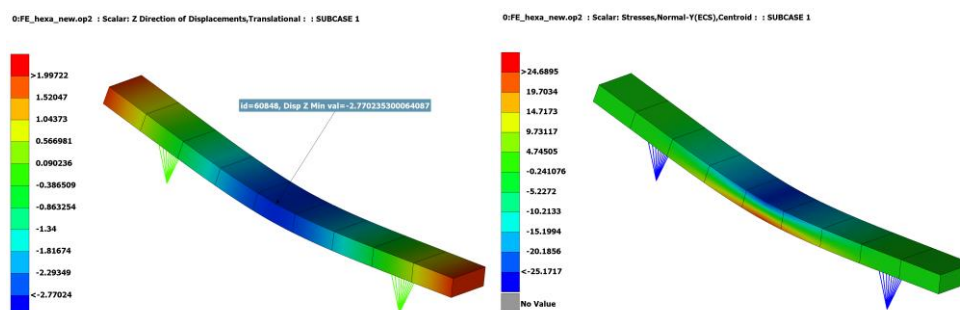


Figura 5.1 Rezultatele analizei FEM a modelului Hexaeder; a) săgeata grinzii, b) distribuția tensiunilor normale

Se poate observa că rezultatele sunt aproape identice, având doar ~0,4 % diferență între ele. Timpul de execuție pentru modelul mai complex de ordinul doi Tetraeder a fost de 10,8 secunde, în timp ce modelul Hexaeder a fost compilat în 1,5 secunde.

5.1.4. Calcul analitic al săgeții unei grinzii cu proprietăți mecanice variabile

Calculul deformației grinzii analitice s-a făcut prin metode energetice, respectiv utilizând teorema a doua a lui Castigliano. Schema de încărcare este prezentată în figura 5.2 și constă într-o grindă simplu rezemată solicitată cu o forță concentrată plasată la jumătatea deschiderii grinzii. Diferitele regiuni ale grinzii care au modulele de elasticitate diferite E_2 - E_5 sunt marcate prin deschiderea lor. Sunt alese dimensiunile identice cu cele pentru analiza experimentală: $a=5$ mm, semilungimea $l=30$ mm, $F=60$ N. Modulele de elasticitate corespund unor rate de umplere diferite, $E_1 = 1901$ MPa - rata de umplere 20%; $E_2 = 1974$ MPa - rata de umplere 40%; $E_3 = 2052$ MPa - rata de umplere 60%; $E_4 = 1983$ MPa - rata de umplere 80%;

$E_5 = 1703 \text{ MPa}$ - rata de umplere 100%. Dimensiunile secțiunii transversale sunt lățimea de 10 mm și grosimea de 4mm.

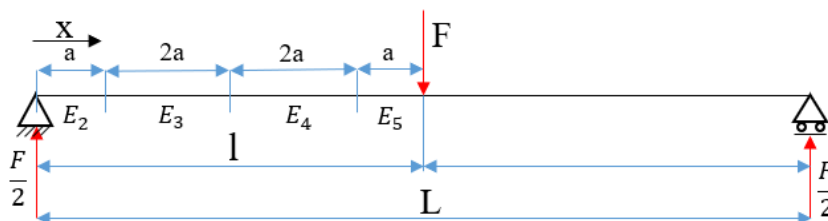


Figura 5.2 Reprezentarea schematică a modelului analitic

Înlocuind dimensiunile și constantele de material de mai sus, obținem o valoare a săgeții de 2,72 mm.

Studiul a investigat efectul ratelor de imprimare variabile asupra comportamentului mecanic al pieselor ABS imprimate 3D. Software-ul Simplify 3D a fost utilizat pentru a stabili parametrii de imprimare. Trei seturi de cinci epruvete au fost supuse unui test de încovoiere în trei puncte. Modelul revizuit a îmbunătățit rezistența la încovoiere cu 7,5%, de la 80,46N la 86N, iar deformarea maximă a crescut cu 25%. Epruveta imprimată cu o rată de imprimare uniformă a avut cea mai bună performanță în ceea ce privește rezistența și deformarea. Costul materialului a fost de aproximativ 13%, iar diferența de deformare maximă a fost de 51%. Modelul Tetraeder a fost utilizat pentru a determina cea mai bună metodă de predicție a comportamentului mecanic cu ajutorul analizei FEM. Rezultatele au arătat o diferență de 4-10% între rezultatele experimentale și rezultatele analizei FE. Pieseile FDM îmbunătățite ar putea fi o metodă economică și eficientă pentru crearea unor piese bine optimizate din punct de vedere al rezistenței la greutate, minimizând în același timp utilizarea materialelor.

5.2. Analiza unei pedale de frână a unui autovehicul realizată prin imprimare 3D

5.2.1. Realizarea modelului pedalei prin inginerie inversă

Pe baza metodologiei și a rezultatelor prezentate în capitolele anterioare s-a demonstrat că există posibilitatea realizării în anumite condiții a unor piese imprimate 3D având rol funcțional. Avantajul major al metodei este acela de a putea realiza piese unicat sau de serie mică într-un timp scurt și cu costuri reduse pornind de la un model CAD sau utilizând avantajele ingineriei inverse (reverse engineering).

Pentru demonstrarea acestor concepte se prezintă în acest capitol studiul unei pedale de frână de la un automobil Dacia Duster realizat prin tehnologii aditive respectiv FDM. Astfel a fost achiziționată din rețeaua Dacia o pedală din material plastic (ABS) realizată prin injecție în matriță. Pe baza acesteia s-a realizat un procedeu de inginerie inversă [95] și anume aceasta a fost scanată optic cu ajutorul unui sistem de scanare bazat pe proiecția de franje model Atos Core produs de firma GOM din Germania. Sistem de scanare prezentat în Figura 5.3. și are o precizie maximă de 2 microni.

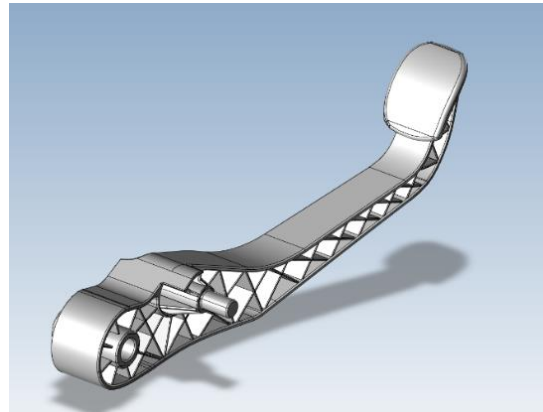


Figura 5.9 Realizarea modelului CAD al pedalei: a) sistemul de scanare optică 3D Atos Core, b) modelul CAD rezultat în urma generării

Pe baza modelelor CAD au fost realizate prin imprimare 3D pe o imprimantă industrială model STRATASYS Fortus 450mc două modele ale pedalei avînd grad de umplere 100% și modelul de umplere recomandat de imprimantă pentru rezistență maximă respectiv Grid +45°-45°.

5.2.2. Analiza comportamentului mecanic al pedalelor imprimate 3D prin tensometrie electrică rezistivă

Pentru analiza comportamentului mecanic al pedalelor imprimate 3D în raport cu modelul injectat utilizat pe autovehiculul Dacia Duster s-a realizat un stand de încercare care să permită condiții de rezemare și solicitare a pedalelor similare celor existente în realitate. Au fost lipite traductoare tensometrice de tip HBM 1-LY1x-6/120 cu baza de 6mm și rezistența de 120 Ohm. Pentru determinarea deformațiilor specifice a fost utilizată puntea de măsură HBM Spider 8 și software-ul de analiză și evaluare CatMan Easy v.3.2. Montajul traductorilor a fost în jumătate de punte, un traductor fiind activ iar celălalt a fost utilizat pentru compensarea termică. În figura 5.13 sunt prezentate pedalele analizate precum și modul de montare și poziționare al traductorilor tensometrici rezistivi.

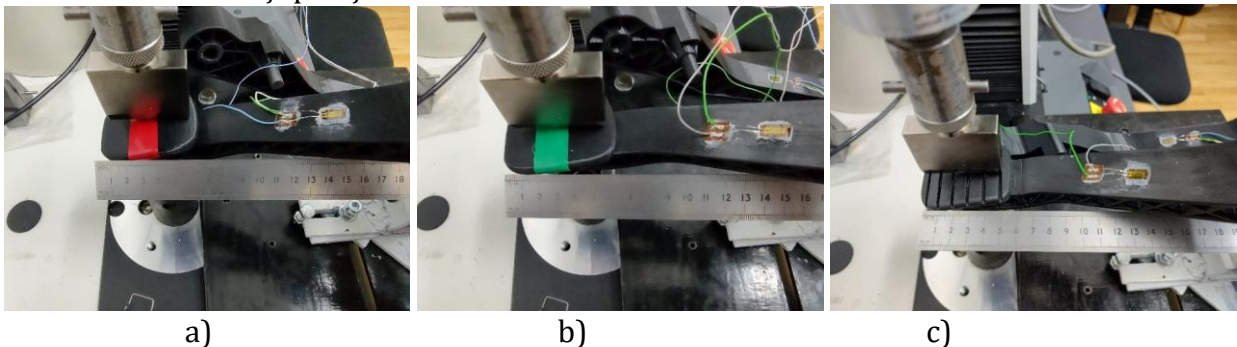


Figura 5.13 Măsurarea deformațiilor specifice ale pedalei prin tensometrie electrică rezistivă: a) pedala imprimată avînd filamentele orientate după axa longitudinală, b) pedala imprimată avînd filamentele orientate transversal, c) pedala injectată comercială

În urma măsurărilor pentru aceeași valoare a forței aplicate, respectiv poziții similare ale traductorilor în raport cu poziția forței aplicate au rezultat valorile prezentate sintetic în Tabelul 5.2.

Tabelul 5.2. Valorile deformațiilor specifice măsurate pe diferite tipuri de pedale.

Tip pedală	Forța aplicată (N)	Deformația specifică ($\mu\text{m/m}$)
Imprimare cu filamente longitudinale	19.2	428
Imprimare cu filamente transversale	19.2	453
Comercială - injecție	19.2	99,8

Pentru a realiza un studiu comparativ al rezultatelor obținute experimental au fost analizate numeric prin metoda elementelor finite pedale având caracteristicile mecanice similare (Tabelul 5.3) cu cele analizate numeric, respectiv pentru pedalele imprimate 3D fiind folosit un singur set de caracteristici mecanice, fără a lua în considerare modificarea acestora în raport cu orientarea pedalei (build orientation) în spațiul de lucru al imprimantei 3D.

Tabelul 5.3 Caracteristici mecanice utilizate în modele numerice

Material	Modul de elasticitate (MPa)	Coeficientul lui Poisson	Densitate (g/cm^3)
Pedala injectat	7375	0.35	1.57
Printat	1452	0.39	1.05

Se observă că există o mică diferență (5,5%) în ceea ce privește deformația specifică pentru pedalele imprimate 3D, modelul în care filamentele sunt orientate longitudinal fiind puțin mai rigid în comparație cu cel având filamentele transversale. Varianta comercială a pedalei realizată prin injecție de masă plastică este mult mai rigidă (peste 4 ori), având un modul de elasticitate superior.

Rezultatele numerice oferă o bună convergență în raport cu cele obținute experimental abaterile relative fiind de 13% pentru pedala având imprimare cu filamente longitudinale, 7,3% pentru pedala având imprimare cu filamente transversale și respectiv 2,2% pentru pedala realizată din material omogen.

Rezultatele obținute pentru acest studiu de caz demonstrează pe de o parte necesitatea efectuării unor încercări sau simulări a materialelor imprimate 3D pentru a determina cât mai aproape de realitate caracteristicile lor mecanice, ideea izotropiei și distribuției uniforme a materialului în interiorul elementelor imprimate 3D iar pe de altă parte demonstrează posibilitatea înlocuirii în viitor a unor repere complexe realizată astăzi prin tehnologii convenționale cu elemente printate având caracteristici mecanice care să le permită să îndeplinească un rol funcțional.

6. Concluzii finale

6.1. Concluzii generale

Acest studiu a analizat proprietățile mecanice ale pieselor ABS imprimate 3D, utilizând un setări de parametri de fabricație care joacă un rol crucial în proprietățile mecanice ale pieselor imprimate 3D. Studiul s-a axat pe influența parametrilor de imprimare asupra comportamentului static și dinamic al materialelor imprimate 3D. A fost creată o nouă metodă de modelare pentru a estima proprietățile mecanice ale pieselor imprimate 3D. Rezultatele studiului experimental și rezultatele simulării prin metoda elementelor finite au fost comparate pentru a valida metoda de modelare testată în acest studiu.

Studiul literaturii de specialitate a relevat faptul că există mai multe abordări pentru a crea un model predictiv care vizează estimarea caracteristicilor mecanice ale specimenelor imprimate 3D. Cele mai importante metode pentru studiul nostru au fost găsite

În cercetarea prezentată de L. Li și Q. Sun, Croccolo, et al. și de Garg, A. și Bhattacharya, A. L. Li și Q. Sun au propus o metodă pentru calcularea constantelor elastice într-un grup de filamente imprimate ca laminat, în care proprietățile mecanice pot fi controlate de proprietarii locali. Ei au folosit ecuații pentru a determina modelele constitutive ale pieselor FDM, variind densitățile de depunere, orientările și combinațiile pentru a produce proprietățile de rigiditate necesare. Studiul oferă o perspectivă asupra relațiilor dintre filamente și determinarea golurilor de aer. Cu toate acestea, este limitat în aplicabilitatea sa din cauza lipsei secțiunilor de înveliș (shell) și nu este capabil de a procesa modele complexe de umplere. Cercetarea lui Croccolo et al. s-a axat pe efectul conturului asupra rezistenței și rigidității statice a pieselor imprimate cu ajutorul FDM. Aceștia au dezvoltat un model predictiv în formă închisă, care a fost testat pentru rezistența finală și modulul Young. Modelul final a arătat o bună concordanță, confirmată de erori mici în predicția rezistenței, modulul de elasticitate și rigiditate verificabilă.

În capitolul intitulat: **Model analitic simplificat aplicat al unei epruvete cu model de umplere tip grid** s-a analizat în detaliu metoda și s-a ajuns la următoarele concluzii: metoda nu este capabilă să se relaționeze cu o rată de umplere scăzută, în cazul în care filamentele individuale nu se ating între ele, deoarece întregul model se bazează pe introducerea unor coeficienți de corecție a forței de adeziune, determinarea experimentală a acestora fiind necesară pentru acuratețea modelului. În lucrarea prentată de Garg, A. și Bhattacharya, A. [48], se realizează modelarea și simularea FEM și elaborarea unor modele realiste care iau în considerare straturi de diferite grosimi și filamente la diferite unghiuri, menținând regiunea lipită între straturi și între acestea.

Influența parametrilor de imprimare asupra comportamentului static al materialelor printate 3D prezintă în detaliu principalii parametri de proces care influențează comportamentul mecanic al materialelor imprimate 3D prin metoda FDM. Principalii parametri de proces care influențează rezultatul imprimării 3D FDM (pentru același material) sunt: Rata de umplere, Înălțimea și lățimea stratului, Numărul de învelișuri (contururi), Orientarea construcției (build orientation), Modelul de umplere (Infill pattern).

Analiza experimentală a efectului orientării rasterului, a ratei de umplere și a tiparului de umplere asupra proprietăților mecanice ale materialelor imprimate 3D investighează impactul parametrilor menționați mai sus asupra caracteristicilor fizice ale piesei imprimate 3D FDM. Pentru a determina proprietățile mecanice ale epruvetelor tipărite 3D și variabilitatea acestor proprietăți atunci când sunt utilizați diferiți parametri de imprimare, acest studiu a analizat relația dintre rata de umplere, modelul de umplere și orientarea filamentelor (rasterului) cu rezistența la tracțiune, deformarea specifică corespunzătoare rezistenței la tracțiune și modulul de elasticitate.

Studiul a continuat cu investigarea **influenței ratei de umplere asupra proprietăților mecanice ale materialelor imprimate 3D (investigație numerică)**. Comportamentul mecanic al epruvetelor de tracțiune imprimate 3D a fost studiat pentru a înțelege mai bine efectul variației ratelor de umplere. A fost prezentată o abordare nouă pentru analiza modelelor FDM imprimate 3D, care utilizează un model geometric construit pe baza codului G de ieșire al imprimantei pentru a facilita analiza cu elemente finite.

Constatările prezentate în această lucrare permit să se tragă următoarele concluzii generale:

- Abordarea propusă pentru construirea unui model complex cu elemente finite pe baza codului G generat de software-ul de preprocesare al imprimantei este o metodologie fiabilă pentru a prezice comportamentul pieselor imprimate prin FDM.
- Aria secțiunii transversale a unei epruvete de tracțiune extrasă din modelul numeric este precisă cu o bună acuratețe.

- Pentru rate de umplere mai mari, valorile rezistenței la tracțiune și ale modulului de elasticitate ale epruvetelor converg către valorile obținute experimental, dar nu în mod proporțional.
- Rezultatele arată în mod clar că creșterea ratei de umplere nu se traduce în mod direct printr-o modificare corespunzătoare a modulului de elasticitate.

Influența modelului de umplere asupra proprietăților mecanice ale materialelor imprimate 3D este de asemenea foarte important de studiat pentru a înțelege efectul structurii interne asupra comportamentului mecanic. A fost descrisă o metodă inovatoare de creare a modelelor numerice ale pieselor pe baza codului G generat de imprimantă, care ajută la analiza cu elemente finite și la evaluarea problemei raportului dintre spațiul (goluri) de aer și material.

Pe baza datelor raportate în această lucrare, se pot trage următoarele concluzii generale:

- Metodologia propusă pentru construirea unui model cu elemente finite pornind de la codul G generat de imprimantă este o metodă validă pentru evaluarea influenței structurii interioare furnizate de modelul de umplere asupra performanțelor mecanice ale articolelor produse prin FDM.
- Pentru obținerea unor rezultate corecte, trebuie efectuate ajustări pentru a reproduce găturile intra și interstrat pe specimene tipărite în mod real.
- Suprafața secțiunii transversale a unei epruvete de tracțiune preluată din modelul numeric are o precizie ridicată, ceea ce permite calcularea mai exactă a curbelor tensiune-deformație și a modulelor E.

Pentru a determina dacă materialele tipărite 3D pot fi utilizate pentru componente funcționale, trebuie determinată **Influența parametrilor de imprimare asupra comportamentului dinamic al materialelor printate 3D**. Comportamentul mecanic al materialelor imprimate 3D solicate dinamic a fost investigat prin teste de încovoiere la impact (Charpy) pe probe standard pentru a determina reziliența a materialului. Testele de impact indică faptul că pe lângă rata de umplere, rezultatul este influențat și de modelul de umplere. Cel mai bun rezultat poate fi estimat, pe baza experienței noastre cu modelele de umplere având structura filamentelor pe direcția transversală în raport cu sarcina dinamică.

Efectul modelului de umplere asupra caracteristicilor de oboseală ale materialelor imprimate 3D a fost studiat pe epruvete de tracțiune imprimate 3D (cu opt tipuri de modele de umplere) care au fost supuse la încercări de oboseală statică și axială pentru a evalua influența modelelor de umplere asupra numărului de cicluri până la rupere pentru cinci niveluri diferite de tensiune.

Rezultatele prezentate în această lucrare permite să se tragă următoarele concluzii generale privind efectul modelului de umplere asupra caracteristicilor de oboseală ale materialelor imprimate 3D:

- Modelele grilă $\pm 45^\circ$, rectiliniu 0° și triughiular (60°) au durata de viață ridicată la oboseală în comparație cu fagure rapid, fagure complet și rectiliniu 90° .
- Modele precum grilă 0° - 90° și ondulatoriu sunt foarte apropiate de primul grup, având filamente înclinate (Wiggle).
- Materialele tipărite 3D cu diferite modele de umplere prezintă proprietăți statice și dinamice diferite.
- Poziția filamentelor în interiorul unui strat și dispunerea stratului în raport cu straturile adiacente și cu direcția de încărcare sunt definitorii pentru durata de viață la oboseală.

- Legăturile intra și interstrat și densitatea materialului (rata material/goluri de aer) joacă un rol esențial în comportamentul dinamic al materialelor FDM.

Comportamentul mecanic al grinzilor cu rigiditate variabilă obținute prin imprimare 3D - este un subiect important de analizat pentru determinarea efectului ratei variabile de umplere asupra comportamentului mecanic al pieselor ABS imprimate 3D. Comparând rezultatele testelor, putem concluziona că efectul ratei variabile de umplere are un efect semnificativ asupra comportamentului mecanic al epruvetelor. Metoda de modelare revizuită a îmbunătățit capacitățile de rezistență la încovoiere ale epruvetelor imprimate variabil cu 7,5%, de la 80,46N la 86N. De asemenea, săgeata a crescut cu 25% de la 3,9 mm la 4,9 mm. Epruveta imprimată cu o rată de umplere uniformă de 100% a avut cea mai bună performanță, atât din punct de vedere al rezistenței, cât și al deformației.

Pentru a testa posibilitatea de a folosi piesele imprimate 3d ca piese funcționale am ales să continuăm cu **analiza unei pedale de frână a unui autovehicul realizată prin imprimare 3D**. În acest capitol, o pedală de ambreiaj turnată prin injecție a fost analizată și comparată cu două variante imprimate 3D.

Se observă că există o mică diferență (5,5%) în ceea ce privește deformația specifică pentru pedalele imprimate 3D, modelul în care filamentele sunt orientate longitudinal fiind puțin mai rigid în comparație cu cel având filamentele transversale. Varianta comercială a pedalei realizată prin injectare de masă plastică este mult mai rigidă (peste 4 ori), având un modul de elasticitate superior. Rezultatele numerice oferă o bună convergență în raport cu cele obținute experimental, abaterile relative fiind de 13% pentru pedala având imprimare cu filamente longitudinale, 7,3% pentru pedala având imprimare cu filamente transversale și respectiv 2,2% pentru pedala realizată din material injectat omogen.

6.2. Originalitatea și contribuțiile inovative ale tezei

Această teză de doctorat a investigat comportamentul mecanic al materialelor obținute prin imprimare tridimensională cu aplicații în industria auto. Scopul acestei teze a fost de a dezvolta o metodă nedistructivă de predicție a comportamentului mecanic al pieselor imprimate 3D destinate utilizării în aplicații în care acestea trebuie să reziste la diferite solicitări, utilizând simularea cu elemente finite.

Stadiul actual al cunoșterii în domeniul studiat a evidențiat câteva contribuții personale:

- Cei mai importanți parametri ai procesului de imprimare 3D au fost identificați și ierarhizați în funcție de influența lor;
- Au fost analizate diferite tipuri de metode de predicție și au fost identificate dezavantajele acestora;
- Au fost efectuate experimente pe o imprimantă 3D pentru a înțelege funcționarea acesteia și pentru a determina posibilitățile oferite de setările hardware și software.

În urma efectuării acestei cercetări, s-a ajuns la concluzia că, deși acest subiect este cercetat foarte intens, el oferă încă un mare potențial care nu a fost încă exploatat pe deplin.

Studiu **influenței ratei de umplere asupra proprietăților mecanice ale materialelor imprimate 3D**, prezintă următoarele inovații:

- Crearea unui script pentru instrumentul de pre-procesare ANSA capabil să citească coordonatele geometrice dintr-un cod G și să le transforme într-o replică virtuală a filamentelor imprimate individual;
- Metodă de modelare care utilizează codul G al imprimantei 3D pentru a construi modele virtuale de tip CAD;
- Metoda de modelare este capabilă să construiască atât secțiunea de înveliș, cât și secțiunea de umplere a pieselor imprimate 3D;

- S-a prezentat o abordare unică pentru determinarea suprafeței reale a secțiunii transversale pentru piesele FDM tipărite 3D folosind o metodă de modelare virtuală;
- Determinarea modulelor elastice pentru diferite rate de umplere și modele de umplere folosind simularea cu elemente finite și încercări experimentale;
- Crearea unei fișe de material echivalent pentru analiza cu elemente finite pentru fiecare combinație studiată de model de umplutură și rată de umplere (Card de material simplificat);
- Optimizarea metodei de modelare cu elemente finite din punct de vedere al calității și al necesarului de resurse/timp de execuție.

Analiza **comportamentul mecanic al grinzilor cu rigiditate variabilă obținute prin imprimare 3D**, aduce următoarele contribuții originale:

- Metoda de pregătire a modelului CAD al epruvetelor de testare în instrumentul Simplify pentru a putea imprima piese cu mai multe setări de imprimare;
- Configurarea modelului pentru a elimina bariera de separare între diferitele setări ale imprimantei

6.3. Perspective de dezvoltare ulterioară

Cercetările pot fi continuate pe următoarele direcții:

- Stabilirea influenței altor parametri de proces ai procesului de imprimare (orientarea piesei. Temperatura de extrudare, temperatura incintei, viteza de depunere a filamentelor, etc)
- Modelarea numerică a unor piese complexe pe baza codului G cu introducerea tuturor factorilor legați de interacțiunea inter și intra straturi.
- Aplicare metodologiei prezentate pe elemente realizate din mai multe materiale
- Optimizarea structurii interne a pieselor printate prin modificarea locală a parametrilor de imprimare.

LISTĂ DE PUBLICAȚII

Rezultatele acestei teze de doctorat au fost publicate sub formă de articole publicate în reviste indexate sau în lucrările unor conferințe internaționale.

Lucrări publicate și indexate

- P1. **Racz, L.** & Dudescu, M. C. (2020). Evaluation of Impact Properties of 3D Printed Materials. *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS-Series: APPLIED MATHEMATICS, MECHANICS, and ENGINEERING*, 63(4). ISSN 1221-5872, WOS:[000606612500014](#) (IF 2022: 0.3, Q4)
- P2. **Racz, L.**, & Dudescu, M. C. (2022). Numerical Investigation of the Infill Rate upon Mechanical Properties of 3D-Printed Materials. *Polymers*, 14(10), 2022. eISSN: 2073-4360; DOI: [10.3390/polym14102022](#), WOS:[000803270500001](#) (IF 2022: 5, **Q1**)
- P3. Dudescu C., **Racz, L.**, Popa, F. (2022) Effect of Infill Pattern on Fatigue Characteristics of 3D Printed Polymers, *Material Today: Proceedings 2022*, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.283> (SCOPUS)
- P4. Dudescu, C., & **Racz, L.** (2017). Effects of raster orientation, infill rate and infill pattern on the mechanical properties of 3D printed materials. *ACTA Univ. Cibiniensis*, 69(1), 23-30. DOI: [10.1515/aucts-2017-0004](#) (SCIENDO)
- P5. **Racz, L.**, & Dudescu, M. C. (2021). Mechanical behavior of beams with variable stiffness obtained by 3D printing. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 343, p. 08014). EDP Sciences. DOI: [10.1051/mateconf/202134308014](#) (ProQuest, DOAJ, Google Scholar)

Lucrări în curs de publicare

- P6. **Racz, L.**, & Dudescu, M. C. (2023) Numerical evaluation of the infill pattern upon mechanical properties of 3D printed materials, International Conference Structural Integrity and Reliability of Advanced Materials obtained through Additive Manufacturing – SIRAMM23, Timisoara, Romania, 8th –11th March 2023 – se va publica in [Procedia Structural Integrity](#) (ELSEVIER/SCOPUS)