



Domeniul Inginerie Mecanică

TEZĂ DE DOCTORAT

**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**

MULȚUMIRI

În primul rând, aș dori să-mi exprim recunoștința pentru oportunitatea pe care am avut-o de a participa la programul de doctorat al Universității Tehnice din Cluj Napoca.

Aș dori să-mi exprim cea mai profundă recunoștință și apreciere pentru conducătorul de doctorat, prof.dr.ing. **Cristian Dudescu**, a cărui îndrumare, sprijin, răbdare și atitudine pozitivă au fost de neprețuit pe parcursul acestui studiu. Sunt recunoscător pentru experiențele și descoperirile pe care le-am făcut împreună cu profesorul Dudescu și pentru faptul că am fost introdus în frumusețea și provocările activității de cercetare.

De asemenea, aș dori să îi mulțumesc fostului meu șef, **Nierhaus Wolfgang**, pentru că m-a lăsat să-mi continui cercetarea doctorală pe lângă muncă și pentru toate cunoștințele pe care mi le-a transmis în ceea ce privește modelarea și preprocesarea elementelor finite.

Pentru utilizarea softurilor și a echipamentelor, mulțumesc societății **ARRK R&D** srl.

Mulțumesc comisiei de îndrumare, Prof.dr.ing. Mihail Hărdău, Prof.dr.ing. Mihaela Suciu, Prof.dr.ing. Cornel Brișan, pentru toate sfaturile constructive pe care mi le-au oferit pe durata stagiului de pregătire doctorală. Mulțumesc tuturor colegilor de la Facultatea de Autovehicule Rutiere, Mecatronică și Mecanică care m-au ajutat la realizarea măsurărilor experimentale și pentru ajutorul acordat în utilizarea instrumentelor de lucru.

O mulțumire specială doresc să adresez soției și familiei mele pentru sprijinul, înțelegerea, încurajarea de care au dat dovadă în decursul acestor ani.

CUPRINS

ABREVIERI.....	9
INTRODUCERE.....	11
Obiective generale.....	11
Obiective specifice tezei:.....	13
1. Introducere în domeniul imprimării 3D.....	14
1.1. Prezentarea tehnologiei de imprimare tridimensională.....	14
1.2. Exemple de fabricație aditivă	16
1.2.1. FDM – Modelare prin extrudare termoplastică	16
1.2.2. SLA – Stereolitografie	18
1.2.3. SLS – Sinterizare selectivă cu laser.....	19
1.2.4. PJP – Printare PolyJet cu Fotopolimeri	20
1.3. Domeniul de aplicare a pieselor imprimate 3D ca și componente funcționale.....	23
1.3.1. Elemente realizate prin imprimare 3D in industria auto	24
2. Stadiul actual al evaluării comportamentului mecanic al materialelor imprimate 3D.....	29
2.1. Parametri de proces care influențează proprietățile materialelor imprimate 3D	29
2.2. Încercări mecanice ale materialelor imprimate 3D	33
2.2.1. Analiza pieselor FDM solicitate mecanic.....	33
2.2.2. Modelul analitic bazat pe teoria materialelor compozite	36
2.2.3. Model analitic simplificat al comportamentului mecanic al modelelor FDM.....	47
2.2.4. Analiza cu elemente finite a materialelor FDM.....	60
3. Influența parametrilor de imprimare asupra comportamentului static al materialelor printate 3D.....	67
3.1. Principalii parametri de proces care influențează comportamentul mecanic al materialelor printate 3d.....	67

3.2. Analiza experimentală a efectului orientării rasterului, a ratei de umplere și a tiparului de umplere asupra proprietăților mecanice ale materialelor imprimate 3D	68
3.3. Model analitic simplificat aplicat al unei epruvete cu model de umplere tip grid.....	76
3.4. Influența ratei de umplere asupra proprietăților mecanice ale materialelor imprimate 3D – investigație numerică.....	80
3.4.1. Analiza mezzo-structurii geometrice a apruvetelor tipărite prin FDM.....	82
3.4.2. Estimarea suprafețelor de contact ale epruvetelor imprimate	85
3.4.3. Analiza ce elemente finite a apruvetei imprimate 3D.....	89
3.4.4. Validarea rezultatelor simulării prin încercări de tracțiune .	95
3.4.5. Concluzii.....	104
3.5. Influența modelului de umplere asupra proprietăților mecanice ale materialelor imprimate 3D.....	106
3.5.1. Rezultate și discuții.....	107
3.5.2. Concluzii.....	113
4. Influența parametrilor de imprimare asupra comportamentului dinamic al materialelor printate 3D	115
4.1. Evaluarea proprietăților de impact ale materialelor iprimate 3D	115
4.1.1. Materiale și metodă	116
4.1.2. Influența ratei de umplere	120
4.1.3. Influența modelului de umplere.....	122
4.1.4. Concluzii.....	124
4.2. Efectul modelului de umplere asupra caracteristicilor de oboseală ale materialelor imprimate 3D.....	125
4.2.1. Încercarea la oboseală.....	128
4.2.2. Rezultate și discuții.....	128
4.2.2. Concluzii.....	139

5. Studii de caz.....	141
5.1. Comportamentul mecanic al grinzilor cu rigiditate variabilă obținute prin imprimare 3D	141
5.1.1. Procedeu de fabricare a epruvetelor cu rată de umplere variabilă	142
5.1.2. Studiu experimental	146
5.1.3. Analiza cu elemente finite	149
5.1.4. Calcul analitic al săgeții unei grinzi cu proprietăți mecanice variabile	151
5.1.5. Concluzii.....	152
5.2. Analiza unei pedale de frână a unui autovehicul realizată prin imprimare 3D.....	154
5.2.1. Realizarea modelului pedalei prin inginerie inversă	154
5.2.2. Analiza comportamentului mecanic al pedalelor imprimate 3D prin tensometrie electrică rezistivă	156
5.2.3. Concluzii.....	161
6. Concluzii finale	163
6.1. Concluzii generale	163
6.2. Originalitatea și contribuțiile inovative ale tezei	174
6.3. Perspective de dezvoltare ulterioara.....	175
REFERINȚE.....	176
LISTA FIGURILOR.....	186
LISTA TABELELOR	191
ANEXE.....	192
LISTĂ DE PUBLICAȚII	194

ABREVIERI

ABS	Acrilonitril Butadien Stiren
PLA	Acidul Polilactic
PEEK	Polieter-eter-cetilenă
PP	Polipropilenă
PA	Poliamidă
AM	Fabricație Aditivă
RP	Prototipare Rapidă
RM	Fabricare Rapidă
DMF	Fabricare Digitală
FDM	Modelare prin Extrudare Termoplastică
SLA	Stereolitografie
DLP	Expunerea digitală a luminii
SLS	Sinterizare Laser Selectivă
SLM	Sinterizare (Topire) Laser a Metalelor
3DP	Printare inkjet tridimensională
LOM	Fabricare Stratificată prin Laminare
PJP	Printare PolyJet cu Fotopolimeri
DDM	Fabricare Digitală Directă
CAD	Proiectare Asistată pe Calculator
3D	Tridimensională
IGS	Specificația de schimb inițială grafică
STL	Stereolitografie
STEP	Standard pentru Schimbul de Date de Produse
UV	Raze Ultraviolete
PC	Policarbonat
DOE	Proiectarea Experimentelor
FEM	Metoda Elementelor Finite
FE	Elemente Finite
ASTM	Societatea Americană Pentru Testarea Materialelor
SEM	Microscopie electronică
ISO	Organizația Internațională de Standardizare

INTRODUCERE

Obiective generale

Obiectivul acestei teze este de a investiga capacitatea de rezistență sub sarcină a pieselor ABS tipărite 3D FDM, pentru a determina aplicabilitatea lor în condiții de utilizare reală. În această lucrare, epruvetele tipărite 3D vor fi analizate prin diverse teste și examinări pentru a înțelege care sunt parametrii care influențează proprietățile mecanice ale pieselor tipărite 3D. Din literatura de specialitate reiese clar că anumiți parametri influențează în mod direct proprietățile mecanice ale pieselor tipărite FDM, cum ar fi: direcția de imprimare (orientarea construcției), înălțimea straturilor tipărite, parametrii secțiunii de înveliș (numărul de straturi de pe contur) a modelelor de construcție și de umplere, viteza și temperatura extruderului de imprimare și, în cele din urmă, materialul în sine. Pentru studiul nostru, vom lua în considerare materialul acrilonitril butadienstiren (ABS), care este un material generic utilizat pe scară largă în industria auto pentru diverse aplicații. Scopul final al acestei cercetări este de a determina factorii și parametrii de imprimare relevanți care contribuie la rezistența mecanică a pieselor tipărite 3D și de a-i optimiza pentru a crea piese care să prezinte un comportament comparabil cu cel al pieselor turnate prin injecție și care să aibă potențialul de a le înlocui în diverse aplicații din domeniul industriei auto. Dacă acest lucru va fi posibil din punct de vedere tehnologic, atunci, în viitorul apropiat, piesele tipărite 3D ar putea înlocui o parte din piesele turnate prin injecție din lanțul de aprovizionare al industriei de fabricare a pieselor de schimb, ceea ce înseamnă că piesele ar putea fi, teoretic, tipărite 3D într-o reprezentanță sau într-un atelier de reparații-întreținere, ceea ce ar putea duce la o serie de beneficii economice și de mediu. Această idee ar putea reduce semnificativ costul de producție al pieselor de schimb, deoarece costul sculelor, al transportului și al depozitării ar putea fi redus la zero. O imprimantă industrială generică ar putea imprima o mare varietate de piese care se încadrează în dimensiunile de imprimare

proprii, fără a fi nevoie de scule sau prelucrări suplimentare. Piese ar putea fi descărcate dintr-o bază de date (cloud) și ar putea fi tipărite la cerere, ceea ce ar putea însemna că nu este necesară depozitarea sau transportul lor. În principiu, acest mod de tipărire a pieselor de schimb ar putea contribui la rezolvarea problemelor în cazul în care ele nu mai sunt disponibile, de exemplu, în cazul mașinilor clasice, sau, în viitor, numărul de piese de schimb produse ar putea fi ajustat ținând cont de posibilitățile oferite de imprimarea 3D.

Pentru a avea încredere în performanțele pieselor imprimate FDM 3D, sunt necesare o serie de teste și examinări. Atât proprietățile de tracțiune, cât și cele de impact ale pieselor tipărite FDM 3D trebuie să fie determinate, alături de caracteristicile de oboseală. Predicția comportamentului mecanic al pieselor imprimate 3D FDM este adesea dificilă și, de cele mai multe ori, implică o examinare distructivă. Elaborarea unei metode de simulare prin metoda elementelor finite (FEM) ar oferi posibilitatea de a analiza piesele înainte de a fi tipărite, ceea ce ar permite economisirea unei cantități semnificative de material și de energie electrică. Scopul acestei cercetări este de a dezvolta și testa o analiză FEM care să ajute la evaluarea corectă a pieselor FDM 3D fără a imprima și distruge probele fizice. Pentru a putea preconiza sau simula comportamentul mecanic al pieselor tipărite 3D, ar trebui să se determine și să se valideze influența tuturor parametrilor de producție menționați anterior. În cazul în care se cunoaște influența tuturor parametrilor de producție, se poate dezvolta o metodă FE pentru a simplifica evaluarea capacităților mecanice de rezistență la sarcini ale probelor. În principiu, cu o analiză FE adecvată, este posibil să se evalueze toate punctele slabe ale unui proiect CAD și să se adapteze înainte de imprimare, astfel încât imprimările necorespunzătoare să nu utilizeze material și energie în mod inutil.

Obiective specifice tezei:

- Prezentarea tehnologiei de imprimare 3D și identificarea parametrilor de proces.
- Utilizarea software-ului specific imprimantei.
- Identificarea capabilităților imprimantei 3D.
- Identificarea structurilor / elementelor din diferite domenii realizate prin tehnologia imprimării 3D.
- Studiul parametrilor de proces asupra caracteristicilor mecanice ale materialului imprimat.
- Realizarea încercărilor mecanice statice de tracțiune și încovoiere și interpretarea rezultatelor.
- Studiul modelelor de material și determinarea coeficienților specifici pe baza datelor experimentale.
- Metode de simulare micro mecanică a materialelor. Utilizarea software - ul Digimat sau ANSA.
- Încercări dinamice ale materialelor:
 - Teste de oboseală pe epruvete solificate axial. Trasarea curbelor de durabilitate.
 - Încercări dinamice prin șoc (Charpy).
- Analiza cu element finit a unei piese imprimate. Stabilirea stărilor de tensiune și deformare.
- Optimizarea structurală și tehnologică a reperului / pieselor.
- Realizarea practică și încercări experimentale.
- Validarea rezultatelor.
- Publicarea rezultatelor parțiale și finale în reviste de specialitate și la conferințe în domeniu.

1. Introducere în domeniul imprimării 3D

1.1. Prezentarea tehnologiei de imprimare tridimensională

Imprimarea tridimensională [1] 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. Printarea 3D este cunoscută și sub alte denumiri similare care țin de tehnologie sau concept precum fabricație aditivă AM (additive manufacturing), fabricare rapidă RM (rapid manufacturing) sau prototipare rapidă RP (rapid prototyping). Alte denumiri mai puțin uzuale sunt fabricare digitală (digital manufacturing, digital fabrication), fabricare în straturi (layered manufacturing) sau fabricare DMF (desktop manufacturing). Considerând numărul mare de termeni tehnici, destul de recent apărute, vom utiliza în continuare atât terminologia specifică din limba engleză cu acronimele aferente, cât și denumirile în limba română, nesimplificate.

Tehnologii de imprimare 3D:

- Fused Deposition Modelling – FDM – Modelare prin Extrudare Termoplastică
- Stereolithography – SLA– Stereolitografie
- Digital Light Processing – DLP– Expunerea digitală a luminii
- Selective Laser Sintering – SLS– Sinterizare Laser Selectivă
- Selective Laser Melting / Direct Metal Laser Sintering – SLM– Sinterizare (Topire) Laser a Metalelor
- Inkjet 3D printing – 3DP - Printare inkjet tridimensională
- Laminated Object Manufacturing – LOM– Fabricare Stratificată prin Laminare
- PolyJet Printing – PJP– Printare PolyJet cu Fotopolimeri

Tehnologia de fabricație aditivă (AM) sau imprimare tridimensională permite proiectarea și producția rapidă de componente complexe folosind modele de proiectare asistată de calculator (CAD).

Disponibilitatea imprimantelor 3D cu sursă deschisă și ieftine a condus la răspândirea semnificativă a acestei tehnologii în ultimii ani. 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. FDM este deosebit de promițător pentru producția de produse de volum redus, cum ar fi piesele de schimb pentru sisteme sofisticate, unde este necesară o geometrie complexă. Capacitatea de a crea rapid un prototip 3D al unei piese funcționale, pornind de la un concept și potențialul de a simplifica procesele de fabricație și de asamblare sunt principalele beneficii a metodei FDM. Pentru a realiza acest lucru, este adesea posibil să se combine subansamble separate într-o singură unitate. Procedând astfel, procesul de montare este simplificat prin reducerea numărului de componente, a timpului de manipulare și a suprafețelor de îmbinare. În plus, procesul AM este foarte adaptabil, deoarece poate fi schimbat cu ușurință și la costuri reduse pentru a se adapta la modificările de proiectare. Din nefericire, acest proces nu produce componente cu rezistență sau rigiditate deosebit de mare și, din cauza anizotropiei semnificative, este dificil de evaluat caracteristicile mecanice ale pieselor FDM.

Expresia fabricație aditivă (AM) se referă la o varietate de procese de fabricație, inclusive prototiparea rapidă (imprimare 3D), fabricarea digitală directă (DDM) și fabricarea în straturi. Prototiparea rapidă, o utilizare timpurie a AM, a fost utilizată în principal pentru a crea modele de vizualizare, de prezentare. În vremuri mai recente, AM a fost utilizată pentru a crea articole de utilizare finală, cum ar fi piese pentru automobile, aeronave, implanturi dentare și chiar îmbrăcăminte sau accesorii de modă. În timp ce metoda aditivă este simplă, există și alte utilizări ale tehnologiei AM cu diferite niveluri de complexitate, diverse cerințe, cum ar fi:

- un instrument de vizualizare a modelelor conceptuale (showcase)
- o modalitate eficientă de a produce articole foarte personalizate
- se aplică la dispozitive industriale
- fabricarea la scară redusă a componentelor utile

Unii consideră că fabricarea aditivă (AM) este o completare a producției substructive fundamentale (îndepărtarea materialului, cum ar fi găurirea materialului) și, într-o mai mică măsură, a formării (cum ar fi forjarea). În orice caz, AM ar putea permite atât profesioniștilor, cât și consumatorilor să proiecteze, să modifice și/sau să repare produse și, în acest proces, să redefinească tehnologiile de producție existente.

1.2. Exemple de fabricație aditivă

1.2.1. FDM – Modelare prin extrudare termoplastică

Modelarea prin extrudare termoplastică (FDM) [2] este o metodă de fabricație aditivă patentată de Scott Crump, inginer mecanic american și fondator al Stratasys, în 1989. La fel ca alte procese de fabricație aditivă, FDM utilizează o abordare de depunere strat cu strat pentru a construi un design conceptual, care este creat pe un software CAD și este salvat sub forma unui fișier IGS sau STL. Un software de tăiere (slicing tool) este utilizat pentru a împărți piesa CAD în straturi orizontale, iar rezultatul este transmis sub formă de cod G. Instrumentul FDM procesează codul G, iar procesul de depunere va fi ghidat de setările și parametrii definiți în codul G. Parametrii de proces definiți sunt: temperatura duzei extruderului, temperatura platformei de construcție, viteza de construcție, înălțimea startului (înălțime mai mică a stratului produce părți mai netede și surprinde mai exact geometriile curbe, în timp ce o înălțime mai mare produce piese mai repede și cu un cost mai mic) , moldeul de umplere, rata de umplere, orinetarea modelului pe platforma de construcție și viteza ventilatorului de răcire. Proces orientat spre utilizarea materialelor termoplastice (polimer care se transformă în lichid la aplicarea căldurii și se solidifică în solid la răcire) injectate pe o platformă prin duze de extrudare. Procesul FDM utilizează o gamă largă de materiale, termoplastici de bază (PLA, PET, ABS, PP, PA etc.) Duzele trasează modelul secțiunii transversale pentru fiecare strat, materialul termoplastic fiind întărit înainte de aplicarea stratului

următor. Procesul se repetă până la finalizarea construcției sau al modelului. Poate fi necesar un material specializat pentru a adăuga suport la unele caracteristici ale modelului. În figura 1.1 este prezentată o schemă de reprezentare a metodei FDM.

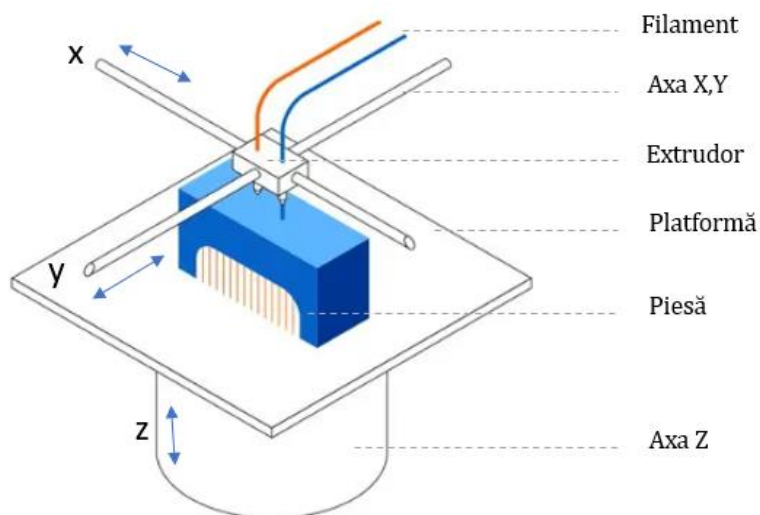


Figura 1.1 [3] Reprezentarea metodei de fabricație FDM

Procesul de imprimare 3D prin extrudare termoplactică urmează următoarele etape principale:

Pasul 1 - După introducerea datelor CAD, filamentul de material de construcție deja încărcat este lichefiat cu ajutorul căldurii în capul de extrudare.

Pasul 2 - Acest plastic lichid topit este introdus pe platforma de construcție din filament sub formă de strat prin intermediul duzei de extrudare care se deplasează în toate direcțiile definite în datele CAD. Acest proces de adăugare a straturilor lichide/semisolide unul peste altul se repetă. În cazul în care proiectul constă în suprastructuri sau structuri care ar putea să se deformeze sau să se îndoie, se folosesc structuri de susținere. Materialul de susținere poate fi același cu materialul de construcție sau orice alt material, în funcție de alegere.

Pasul 3 - În cazul în care au fost folosite structuri de sprijin, acestea sunt îndepărtate ulterior, odată ce construcția este finalizată.

1.2.2. SLA – Stereolitografie

Procesul SLA [4] a apărut pentru prima dată la începutul anilor 1970, când cercetătorul japonez Dr. Hideo Kodama a inventat metoda modernă de fabricație în straturi a stereolitografiei, care constă în utilizarea luminii ultraviolete pentru a solidifica polimerii fotosensibili. Termenul însuși de stereolitografie a fost inventat de Charles (Chuck) W. Hull, care a inventat forma modernă a mașinii, apoi a brevetat tehnologia în 1986 și a co-fondat compania 3D Systems pentru a o comercializa. Hull a descris metoda ca fiind crearea de obiecte 3D prin "imprimarea" succesivă a unor straturi subțiri dintr-un material care se poate polimeriza cu lumină ultravioletă, pornind de la stratul inferior spre stratul superior. Ulterior, definiția a fost extinsă la orice material capabil să se solidifice sau să își modifice starea fizică. În prezent, imprimarea 3D și fabricarea aditivă (AM) descriu numeroase procese individuale, care variază în ceea ce privește metoda de fabricare a straturilor, materialul și tehnologia mașinilor utilizate. Procesul SLA este o tehnologie care utilizează laserul UV pentru a polimeriza strat după strat rășină fotopolimerică (polimer care își modifică proprietățile la expunerea la lumină).

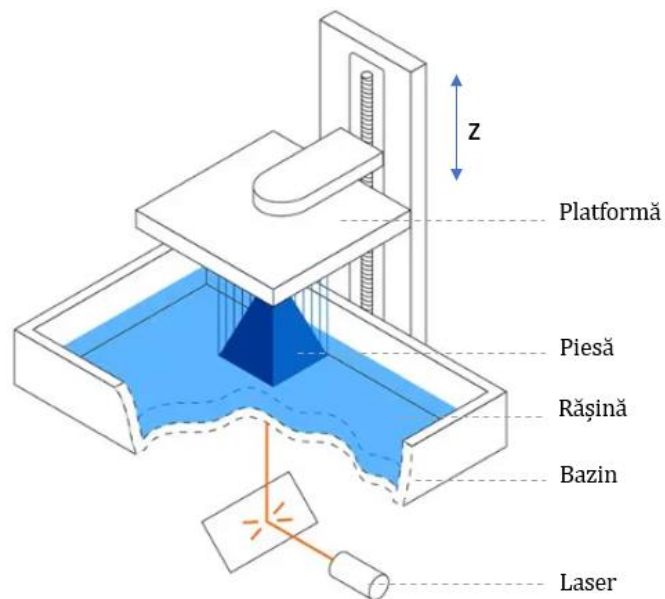


Figura 1.2 [4] Reprezentarea metodei de fabricație SLA

Construcția are loc într-un bazin de rășină. Un fascicul laser, direcționat în bazinul de rășină, trasează modelul secțiunii transversale a modelului pentru stratul respectiv și îl polimerizează, conform schemei din figura 1.2. În timpul ciclului de construcție, platforma pe care se construiește este repositionată, coborând cu o singură grosime de strat. Procesul se repetă până când construcția sau modelul este finalizat. Poate fi necesar un material specializat pentru a adăuga suport la unele caracteristici ale modelului. Modelele pot fi prelucrate și utilizate ca modele pentru turnarea prin injecție, termoformare sau alte procese de turnare.

1.2.3. SLS – Sinterizare selectivă cu laser

Sinterizarea selectivă cu laser (SLS) [5] a fost una dintre primele tehnici de fabricație aditivă, dezvoltată la mijlocul anilor 1980 de Carl Deckard și Joe Beaman de la Universitatea Texas din Austin. De atunci, metoda lor a fost adaptată pentru a lucra cu o gamă largă de materiale, inclusiv materiale plastice, metale, sticlă, ceramică și diverse pulberi de materiale compozite. În prezent, aceste tehnologii sunt clasificate în mod colectiv ca fuziune în pat de pulbere - procese de fabricație aditivă prin care energia termică fuzionează selectiv regiuni dintr-un pat de pulbere.

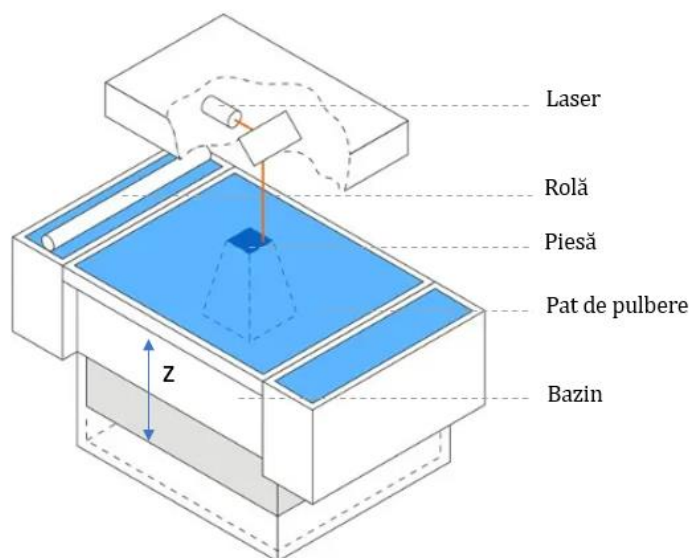


Figura 1.3 [5] Reprezentarea metodei de fabricație SLS

Oarecum asemănătoare tehnologiei SLA, sinterizarea selectivă cu laser (SLS) folosește un laser de mare putere pentru a fuziona particule mici de plastic, metal, ceramică sau sticlă. În timpul ciclului de construcție, platforma pe care se construiește este repositionată, coborând cu grosimea unui singur strat așa cum este prezentat în figura 1.3. Procesul se repetă până la finalizarea construcției sau a modelului. Spre deosebire de tehnologia SLA, nu este nevoie de material de susținere, deoarece construcția este susținută de un material nesinterizat. Fiind procedură de fabricație aditivă care utilizează energia termică pentru a fuziona selectiv regiuni ale unui pat de pulbere, aceste tehnologii sunt acum denumite: fuziune în pat de pulbere. [Sinterizarea selectivă cu laser (SLS), un procedeu similar cu SLA, utilizează un laser puternic pentru a fuziona bucăți mici de plastic, metal, ceramică sau sticlă. Imprimarea 3D stereolitografică, în special, a suferit schimbări semnificative. În mod tradițional, imprimantele 3D SLA au fost monolitice și costisitoare, necesitând tehnicieni calificați și contracte de service costisitoare. Astăzi, imprimantele de birou de format mic produc rezultate de calitate industrială, la prețuri mult mai accesibile și cu o versatilitate de neegalat.

1.2.4. PJP - Printare PolyJet cu Fotopolimeri

Printarea PolyJet cu Fotopolimeri (Material Jetting), [6] patentat de Objet Ltd. în 1999 sub numele de PolyJet (care a fuzionat cu Stratasys în 2012), combină tehnologia jet de cerneală și utilizarea fotopolimerilor. Tehnologia cu jet de cerneală este utilizată de imprimantele 2D convenționale pe hârtie, în timp ce fotopolimerii sunt materiale care se întăresc atunci când sunt expuse la raze ultraviolete. Această tehnologie prezintă numeroase avantaje, printre care o rezoluție excelentă (până la 0,016 mm), suprafețe netede (fără efect de scară, spre deosebire de obiectele imprimate cu ajutorul tehnologiei FDM) și o gamă largă de materiale și culori, la un cost și un timp de imprimare relativ reduse. PolyJet este denumirea pentru orice tehnologie de imprimare 3D care injectează un lichid (materialul de construcție) dintr-un cap de imprimare, care este apoi solidificat de lumina UV. În majoritatea proceselor PolyJet, materialul de construcție este un fotopolimer. Imprimantele 3D PolyJet oferă o imprimare multimaterială de înaltă calitate și, în plus, în format multi-color. În centrul imprimantelor PolyJet se află capul de injectare. Capul de printare depune singur strat de material de construcție (de obicei fotopolimeri). Adâncimea fiecărui strat

de fotopolimer după ce fiecare cap de jet este controlat selectiv de un software. Imprimantele PolyJet funcționează în mai multe moduri, una dintre cele mai răspândite tehnici constă în pulverizarea unui fotopolimer lichid de la un cap de imprimare cu mai multe duze, de tip jet de cerneală. Imediat ce picăturile acestor fotopolimeri lichizi sunt pulverizate, acestea sunt imediat polimerizate și întărite de o lumină UV. Odată cu finalizarea unui strat, platforma de construcție coboară de-a lungul axei Z, iar următorul strat de fotopolimeri este ejectat din capete - așa cum se observă în figura 1.4.

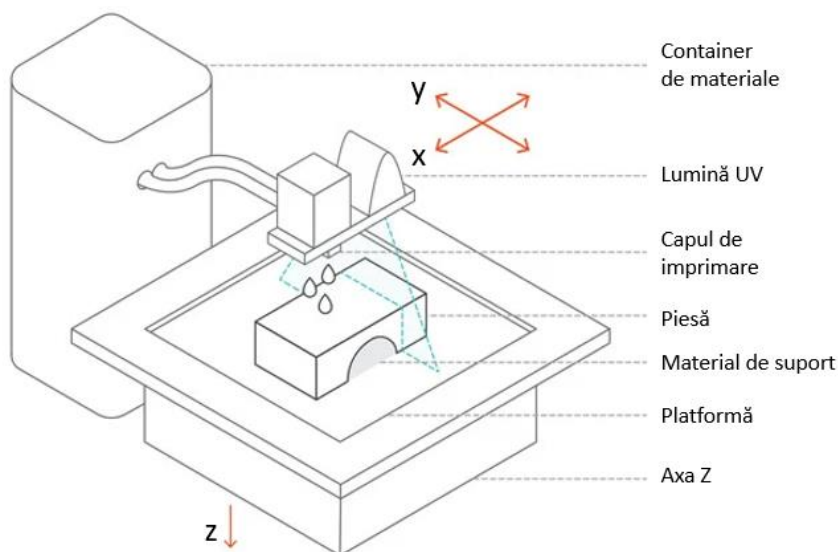


Figura 1.4 [6] Reprezentarea metodei de fabricație PolyJet

Procesul se repetă până când obiectul este complet. Materia primă este stocată în cartușe și este conectată direct la duze. Pot exista mai multe capete de pulverizare care permit pulverizarea simultană a diferitelor materiale de construcție. Astfel, imprimantele 3D PolyJet pot produce un obiect cu diferite niveluri de flexibilitate într-o singură construcție. Prin urmare, imprimantele 3D PolyJet sunt utile pentru a construi obiecte complexe cu un finisaj neted. Deoarece imprimantele 3D PolyJet au mai multe capete de jet, acestea permit utilizarea de fotopolimeri cu culori diferite într-o singură construcție. Deoarece platforma de construcție este de obicei coborâtă după o iterație de strat, există un control mai mare asupra preciziei. Imprimantele 3D PolyJet de înaltă calitate au o precizie de 16 micrometri (0,016 mm). Acest lucru

permite o detaliere excelentă. Odată ce un model este finalizat, acesta este perfect structurat și nu necesită polimerizare sau procesare suplimentară. În cazul în care se utilizează un material de suport, acesta este ușor de îndepărtat. În majoritatea cazurilor, acesta poate fi pur și simplu spălat cu apă. Stratasys, utilizează aplicatoare cu jet de cerneală pentru a aplica rășinile. Apoi, o lumină UV de nivel scăzut polimerizează imediat stratul pulverizat într-o stare solidă. Această tehnică permite imprimantelor PolyJet să amestece un material flexibil și unul rigid pentru a crea modele cu rezistență și flexibilitate variabile [7]. Prin urmare, metoda PolyJet permite imprimarea obiectelor complexe, cum ar fi o proteză. O proteză este o articulație flexibilă intercalată între componentele rigide, din plastic dur, și poate fi imprimată dintr-o singură bucată cu ajutorul tehnologiei PolyJet. Este posibil să se "amestece și să se potrivească" o varietate de materiale de construcție - o parte rigidă și o parte opacă, de exemplu - pentru a crea o replică exactă a obiectelor din viața reală care utilizează astfel de materiale. Mijloacele educaționale, jucăriile pentru copii, proteze corporale și dentare sunt doar câteva exemple în care poate fi utilizată versatilitatea imprimantelor PolyJet. Există o gamă largă de materii prime disponibile pentru imprimare. În afară de fotopolimerii standard, materialul de construcție include acum fotopolimeri transparenți, asemănători cauciucului și biocompatibili, precum și termoplastice rezistente de înaltă performanță.

Câteva dintre materialele populare de imprimare 3D PolyJet sunt menționate mai jos.

- Materiale digitale
- Materiale digitale ABS
- Transparente
- Opac rigid
- Cu proprietăți asemănătoare cauciucului
- Biocompatibil
- Material dentar

Imprimantele 3D PolyJet sunt utilizate în multe sectoare care necesită realizarea de forme complexe, detalii complicate și caracteristici delicate. Sectoarele automobilelor, arhitecturii, industriei și educației sunt cele care utilizează cel mai mult imprimantele PolyJet. Cu toate acestea, o aplicație cheie a imprimantelor PolyJet 3D este în sectorul sănătății. Imprimantele PolyJet permit chirurgilor să producă replici exacte ale organelor care trebuie înlocuite. Membrele protetice și înlocuirea articulațiilor sunt câteva exemple în care imprimarea 3D este utilizată în mod activ. Un alt sector important care valorifică avantajele imprimării 3D este stomatologia. Cu ajutorul imprimantelor 3D, laboratoarele dentare pot produce coroane, punți și o serie de aparate ortodontice precise.

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 s-a transformat treptat într-un proces de fabricație veritabil. Inginerii și întreprinderile au acum capacitatea de a dezvolta și de a produce bunuri finite datorită imprimării 3D, care are multe avantaje față de tehnicile de fabricație convenționale. Printre aceste beneficii se numără capacitatea de a personaliza rapid produsele, o mai mare libertate de proiectare, capacitatea de a reduce asamblarea și potențialul de a produce volume mici de bunuri la un preț rezonabil. Rezistența, viteza de imprimare, rezoluția minimă a caracteristicilor și costul sunt obiectivele de proiectare care sunt cel mai frecvent luate în considerare atunci când se fac compromisuri pentru imprimarea 3D [8]. Pentru a îmbunătăți una sau mai multe dintre aceste caracteristici ale proiectului final, același model 3D poate fi produs utilizând mai multe proceduri și setări ale parametrilor. Înțelegerea conceptelor de proiectare și a potențialului metodei este esențială pentru a lua cele mai bune decizii de imprimare 3D pentru cele mai bune rezultate.

1.3.1. Elemente realizate prin imprimare 3D in industria auto

Fiecare industrie este influențată de modul de fabricație aditivă. În ultimii ani, tehnologia a schimbat radical modul de a proiecta, dezvolta și fabrica lucruri noi. În industria auto [9] aceste tehnologii au făcut minuni în dezvoltarea unor noi forme, permițând obținerea de structuri mai complexe și mai ușoare, toate la cele mai mici costuri posibile. Cu toate că tehnologia de printare 3D este încă în mare parte folosită doar pentru prototipuri rapide în procesul de dezvoltare a unor noi modele auto sau în mașini concept, tehnologia a avansat într-atât încât este folosită și în realizarea anumitor componente finale. Materialele noi, finisajele inovatoare și un timp mai rapid de execuție permit acum ca tehnologia de imprimare 3D să fie integrată mai îndeaproape în procesul de fabricație și în viitor, poate și în cadrul lanțului de aprovizionare pentru piese de schimb.

Tehnologia de imprimare 3D poate aduce o mulțime de avantaje în industria auto, cum ar fi:

- producție în serii mici de componente complexe
- realizarea precisă și rapidă a prototipurilor
- realizarea în timp scurt a unor subansambluri
- transpunerea rapidă a proiectului în realitate

În industria auto, cele mai întâlnite aplicații ale imprimării 3D sunt următoarele:

- a) utilizarea pieselor printate în: Formula 1 și Motorsport
- b) autovehicule printate (Mașini imprimate 3D)
- c) prototipuri printate 3D pentru industria auto
- d) piese de schimb imprimate 3D (pentru producție și pentru vânzare)
- e) studiul designului autovehiculelor

a) Utilizarea pieselor printate în: Formula 1 și Motorsport

Documentația pieselor imprimate 3D pentru supercars crește săptămâna după săptămâna cu fiecare constructor auto publicând noi utilizări inovative ale AM-ului. În ultimul timp Lamborghini și Stratasys [10] s-au unit într-un parteneriat pentru a produce piese imprimate 3D pentru noul Lamborghini Aventador. Principalul lor obiectiv a fost de a reduce trei lucruri: timpul de dezvoltare pentru piese noi, costurile de producere și greutatea mașinilor. Pentru a atinge această performanță inginerii au folosit un sistem de producție Fortus 400mc de la Stratasys cu ideea de a imprima părți 3D din diferite termoplaste cum ar fi ABS, PC-ABS sau Ultem. Principalul avantaj al procesului de imprimare 3D FDM este faptul că permite producția pieselor realizate din diferite materiale termoplastice. În acest fel, Lamborghini a fost capabil să producă componente pentru ramura estetică, precum și pentru performanță. Pe plan financiar, Stratasys susține că dezvoltarea tradițională a componentelor ar fi costat 40.000 \$ și ar fi durat 120 zile, în timp ce imprimarea FDM a adus totul până la 3.090 \$ și 20 zile, rezultând într-o economisire de 92% a costurilor și 80% din timpul de fabricație, detaliat în tabelul 1.1

Tabelul 1.1 [10] Compararea procesului FDM cu procesele tradiționale

Method	Cost	Lead Time
Traditional process	\$40,000	120 days
DM Technology	\$3,090	20 days
Savings	\$36,910 (92%)	12 days (80%)

Recent, un nou brand numit Divergent Microfactories s-a făcut celebru prin introducerea unui nou automobil de performanță cu piese imprimate 3D [11]. Acest supercar: este așezat pe un șasiu imprimat 3D care poate fi asamblat în câteva minute. Șasiul încorporează nodurile imprimate 3D conectate prin tuburi din fibră de carbon [12]. Desigur, ce este valabil pentru supercaruri cu utilizări comerciale este și mai valabil pentru Formula 1. Echipa Red Bull Racing au dezvăluit [13], ca au folosit tehnologii de imprimare 3D pentru realizarea prototipurilor la scara

60%, ceea ce permite evaluarea eficienței pieselor înainte de fabricație. Williams Racing, împreună cu EOS, unul dintre partenerii lor pentru soluții de fabricație, (EOS fiind o companie mare de imprimare 3D, axată pe Direct Metal Laser Sintering) lucrează la realizarea pedalelor de frână imprimate 3D din titanul prezentat în figura 1.5. Provocarea a fost de a produce o piesă din titan, care este mai rigidă decât aluminiul utilizat în mod normal. Rezultatele arată o structură goală, cu economii de greutate de 80g și o reducere semnificativă a tensiunilor.



Figura 1.5 [13] EOS F1 pedală de frână la Formnext 2016

b) Autovehicule printate (Mașini imprimate 3D) - Local Motors

Local Motors [14] a fost o companie americană producătoare de automobile fondată în 2007 de John B. Rogers Jr. și a avut sediul în Phoenix, Arizona. Local Motors era cunoscută pentru proiectele de autovehicule cu sursă deschisă, pentru expertiza de ultimă oră în domeniul imprimării 3D a mașinilor și pentru tehnologia impresionantă a vehiculelor cu autoconducere. Strati a fost prima mașină electrică din lume imprimată în 3D. Aceasta a fost realizată aproape în întregime din piese tipărite 3D, cu excepția bateriei, a motorului electric și a

anvelopelor. A fost nevoie de un total de 44 de ore pentru ca mașina să fie tipărită și a fost prezentată unui public live la International Manufacturing Technology Show din McCormick Place, Chicago, în 2014. (Figura 1.6). Modelul Strati conține foarte multe componente printate 3D din plastic ABS, întărit cu fibre de carbon, printre care, șasiul, caroseria și câteva elemente de interior. Componentele mecanice cum ar fi bateriile, motoarele, sistemul electric și suspensia sunt împrumutate de la modelul Twizy de la Renault (o mașină mică de oraș electrică). Din păcate, Local Motors s-a închis la 14 ianuarie 2022, închiderea fiind anunțată de Chris Stoner, fostul vicepreședinte. Ca dovadă a conceptului, această mașină este încă una foarte importantă, deoarece Local Motors a fost printre primele care au implementat imprimarea 3D la scară largă în industria mobilității



Figura 1.6 [15] Mașina imprimată 3D produsă de Local Motors

c) Prototipuri printate 3D pentru industria auto

Ford a făcut public în octombrie 2015 un anunț în care explica cum a folosit tehnologia de imprimare 3D în dezvoltarea noului Ford GT [9]. Constructorul explică felul cum aceasta tehnologie a schimbat capacitatea de a dezvolta rapid noi componente atât pentru mașini concept dar și pentru modele aflate în producție. Primul pas pentru a

aduce o mașină la viață, este acela de a avea autoturismul schițat de echipa de designeri. Odată îndeplinit acest pas, urmează o muncă îndeplinită atât pe "metoda veche" cât și pe "metodă nouă". Pe de o parte se realizează modele din lut la o anumită scară, mai apoi și la mărimea reală, pentru a evalua proporțiile, în timp ce proiectanții și inginerii CAD dezvoltă un model 3D al autoturismului. În funcție de etapa de testare, se folosește fie modelul din lut, fie părțile printate 3D. Aceste procese sunt repetate de multe ori, pentru a se putea stabili o formă finală, un mecanism adecvat și materialul potrivit.

d) Piese de schimb imprimate 3D (pentru producție și pentru vânzare)

Mulți producători de automobile implementează elemente imprimate 3D în primele lor modele [9] (pentru prototipuri și autoturisme premium) ca niște experimente care stau la baza unei utilizări mai largi a acestor tehnologii în lanțul de aprovizionare. Deși este o realitate faptul că tehnologia de imprimare 3D își face loc din ce în ce mai mult spre producția reală, volumul de piese produse în industria auto rămâne încă problematic pentru productivitatea tehnologiei de fabricație aditivă.

e) Studiul designului autovehiculelor

Imprimarea 3D le-a permis celor de la Ford să încerce sute de modele diferite de design pentru noul Mondeo Vignale [16]. Printre piesele prototip fabricate cu tehnologia imprimării tridimensionale se numără și modelul unic hexagonal folosit în grila față, cu ramă din aluminiu polișat și de culoare negru metalic, grila lucioasă din partea joasă a feței mașinii, cu detalii cromate precum și detalii de pe uși. Proiectanții au folosit tehnologia de imprimare 3D și pentru a dezvolta insignele Vignale și ornamente de exterior.

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

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

Modelarea prin extrudare termoplastică (FDM) este una dintre tehnicile de RP adoptate pe scară largă pentru fabricarea de componente complexe tridimensionale (3D) prin depunerea de material strat cu strat prin intermediul unei duze de lichifiere încălzite care se deplasează în direcția X și Y în planul platformei de construcție. După depunerea unui strat pe platforma de construcție, duza extruderului este deplasată în direcția Z și se adaugă următorul strat Ziemian, et al. [17]. Proprietățile mecanice ale componentelor stratificate trebuie să îndeplinească cerințele de exploatare și de funcționare și trebuie să fie comparabile cu piesele produse prin tehnici de fabricație tradiționale. În comparație cu procesele de fabricație convenționale, proprietățile pieselor de fabricație aditivă pot depinde de parametrii structurali și de proces, mai degrabă decât pur și simplu de proprietățile materialelor. Acesta este, de asemenea, principalul dezavantaj al utilizării pieselor imprimate prin FDM pentru componente funcționale. Din cauza acestui proces pot apărea efecte precum delaminarea straturilor componente sau anizotropia materialelor. În plus, componentele imprimate au de obicei proprietăți elastice mai reduse decât componentele turnate prin injecție din aceleași materiale termoplastice, astfel încât proiectanții nu se pot baza pe valorile din bazele de date statice de materiale, selecția materialelor devenind un proces complex.

Pentru a determina dacă materialele imprimate 3D pot fi utilizate pentru componente funcționale, trebuie determinate proprietățile mecanice Melenka, ș.a. [18] Zou, ș.a. [19] Liljenherte, ș.a. [20] și este, de asemenea, 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 (figura 2.1) care afectează comportamentul mecanic al componentelor fabricate prin FDM care au fost identificați și investigați pot fi rezumați după cum urmează Croccolo, et al. [21]

- Direcția de imprimare (build orientation): se referă la orientarea piesei pe o platformă unei imprimante 3D în raport cu axele X, Y, Z. Axele X și Y sunt considerate paralele cu platforma de fabricație (masa imprimantei), iar axa Z este de-a lungul direcției de fabricație a piesei.
- Lățimea cordonului: Este lățimea filamentului depus de duza FDM (intervale obișnuite de la 0,3 mm la 1 mm Ahn, et al. [22]).
- Grosimea stratului: Grosimea cordonului depus și, prin urmare, a oricărui strat individual. Depinde de tipul de duză utilizată și este, de obicei, jumătate din lățimea cordonului.
- 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 fiecare regiune interioară a piesei.
- Golul de aer (air gap – raster to raster gap): Este spațiul dintre două filamente adiacente de pe același strat. Valoarea implicită este de obicei zero, ceea ce înseamnă că filamentele se ating între ele [22]. Un decalaj pozitiv înseamnă că există un decalaj între filamentele adiacente sau un decalaj negativ, ceea ce înseamnă că filamentele sunt suprapuse. Pentru multe programe de prelucrare care comandă imprimantele 3D poate fi setată doar rata de umplere, reprezentând densitatea modelului imprimat. Prin urmare, chiar dacă unele epruvete au fost tipărite cu o setare de 100% rata de umplere, trebuie determinate sau estimate spațiile de aer pozitive sau negative reale. Acest lucru afectează piesa, deoarece s-a demonstrat că spațiul de aer este un factor important care contribuie la rezistența la tracțiune Rodri' guez, et al. [23] Li, et al. [24].
- Numărul de contururi: filamentul este depus inițial de-a lungul marginii componentei, partea interioară a componentei este după aceea umplută cu rastere înclinate la finalizarea primului strat și se repetă pentru generarea tuturor celorlalte straturi..

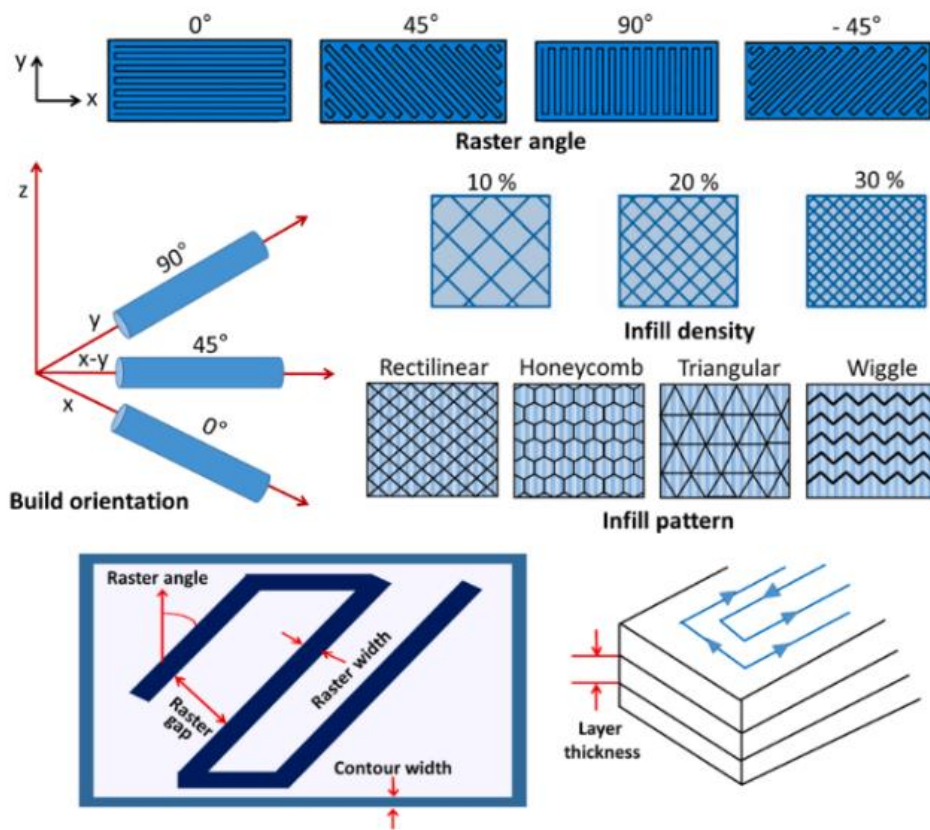


Figura 2.1 [25] Reprezentare schematică a procesului FDM.

Pentru a testa influența parametrilor de fabricație se utilizează încercările mecanice statice, cum ar fi încercarea la tracțiune, compresiune, încovoare și încercări dinamice cum ar fi impactul sau încercarea la oboseală. Influența parametrilor de imprimare asupra proprietăților mecanice sunt prezentate în literatura de specialitate, astfel Dawoud, et al. [26] investighează efectul tehnicii de prelucrare asupra comportamentului mecanic al ABS-ului virgin, specificându-se diferite combinații de unghiuri ale filamentelor și de spațiu de aer în fiecare strat de imprimare a componentelor FDM. Rezultatele arată că o selecție adecvată a parametrilor FDM poate atinge proprietăți mecanice comparabile cu cele ale pieselor injectate, atât în modul de încărcare static, cât și în cel dinamic Ahn, et al. [22] caracterizează proprietățile pieselor imprimate din ABS. Utilizând o abordare DOE (Design of

Experiment), au fost examinați parametrii procesului FDM, cum ar fi orientarea rasterului, spațiul de aer, lățimea cordonului, culoarea și temperatura de imprimare a modelului. Rezistența la tracțiune și rezistența la compresiune a epruvetelor fabricate în diferite direcții au fost măsurate și comparate cu materialul ABS P400 fabricat prin injecare. Cercetătorul prezintă în Ahn, et al. [27] un model analitic pentru a prezice rezistența la tracțiune a pieselor FDM și un model de cedare anizotropică a rezistenței la tracțiune în funcție de unghiul rasterului pe baza criteriului Tsai-Wu. Sood, et al. [28] au stabilit un model de rezistență a pieselor FDM pentru prezicerea proprietăților mecanice și a parametrilor de optimizare a configurației în raport cu diferiți parametri de intrare: direcția de imprimare, grosimea stratului, unghiul de raster, lățimea rasterului și spațiul de aer folosind metodologia suprafeței de răspuns. Efectele generate de parametrii de producție FDM asupra rezistenței la tracțiune și asupra rigidității componentelor generate, prin studii analitice și experimentale, sunt prezentate de Croccolo, et al. [21]. În acest scop, a fost dezvoltat un model analitic care poate prezice proprietățile de rezistență și rigiditate în funcție de numărul de contururi depuse în jurul marginii componente și de setarea parametrilor modelului raster (dimensiuni, număr de contururi, unghiul raster). Rodríguez, et al. [23] introduce o strategie de optimizare a proiectării componentelor FD-ABS pentru rigiditate și rezistență într-un anumit set de condiții de încărcare. Un model matematic al sistemului structural a fost legat de un algoritm de minimizare aproximativă pentru a evalua setările parametrilor de fabricație selectați, care conduc la optimizarea performanței mecanice a componentei imprimate. Tymrak, et al. [29] au determinat rezistența echivalentă la tracțiune a produselor fabricate de imprimanta 3D RepRap și a celor comerciale prin diferite unghiuri de raster și înălțimi de strat. Montero, et al. [30] au caracterizat experimental proprietățile anizotrope ale pieselor produse prin FDM examinând fiecare dintre parametri procesului de imprimare, dintre care orientarea filamentelor și spațiul de aer au avut efecte semnificative asupra rezistenței la tracțiune, în comparație cu lățimea rasterului, culoarea filamentului și temperatura de procesare. Un spațiu de aer negativ ar crește atât rezistența la tracțiune, cât și rigiditatea.

Primul obiectiv al acestui studiu este de a evalua proprietățile la tracțiune ale componentelor tipărite 3D produse cu ajutorul unei imprimante 3D de birou, prin efectuarea de teste de tracțiune convenționale. Al doilea obiectiv este de a evalua influența parametrilor tehnologici asupra proprietăților mecanice ale epruvetelor imprimate, luând în considerare diferite orientări de imprimare, rata de umplere și modele de umplere. Termenul „model de umplere” se referă la structura care este imprimată în interiorul unui obiect. Aceasta este extrudată într-un model prestabilit, setat în software-ul de pre-procesare. Orientarea imprimării este definită ca fiind unghiul dintre axa principală a epruvetei și o axă a platformei de imprimare.

2.2. Încercări mecanice ale materialelor imprimate 3D

2.2.1. Analiza pieselor FDM solicitate mecanic

Modelarea și analiza precisă a proprietăților mecanice ale modelelor FDM reprezintă o mare provocare din cauza procedurii de fabricare strat cu strat, iar materialele imprimate 3D se comportă similar celor cu proprietăți anizotrope. 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 ultimii ani, prototiparea rapidă (RP) a devenit punctul central al producției pentru a se adapta la complexitatea pieselor și pentru a permite fabricarea pieselor în limita timpului și a costurilor. În tehnica FDM, modelul și materialele suport sunt depuse printr-o duză separată montată pe capul de extrudare. Pentru a fabrica componente fără prea multe distorsiuni geometrice, piesele sunt construite cu depunerea simultană a materialelor de suport în locurile dorite. Materialul de suport depus poate fi îndepărtat cu ușurință odată ce fabricarea este finalizată și piesa este scoasă din camera de construcție. Atât materialele pentru model, cât și materialele pentru structura de suport sunt disponibile sub formă de filamente care se topesc la o temperatură preselectată înainte de depunere. Materialul depus se solidifică rapid și aderă la straturile adiacente datorită lipirii prin difuzie generată termic Sood, et al. [31]. 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 Ahn, et al. [22] Garg, et al. [32]. Rezistența, rugozitatea și acuratețea geometrică a pieselor finale fabricate depind de diverși parametri de proces, cum ar fi lățimea conturului, unghiul de raster, lățimea rasterului, grosimea stratului, orientarea piesei, spațiul de aer și setările mașinii Garg, et al. [33] . Selectarea setărilor optime ale parametrilor de proces poate îmbunătăți considerabil rezistența mecanică, rugozitatea suprafeței și precizia geometrică. S-a investigat în literatură influența temperaturii materialului depus, a lățimii rasterului, a spațiului de aer, a unghiului rasterului și a culorilor materialului asupra rezistenței la tracțiune și compresiune a probelor ABS P400 FDM Ahn, et al. [22] . Garg, et al. [32] au investigat efectul unghiurilor de raster sau unghiul filamentelor asupra rezistenței la tracțiune, a rezistenței la încovoiere și a rugozității suprafeței pieselor FDM. Rezultatele au arătat că unghiul de raster de 0° oferă o rezistență mecanică mai mare decât probele având orientarea rasterului de 90° . Influența spațiului de aer, a orientării piesei, a lățimii rasterului, a grosimii stratului și a unghiului rasterului asupra rezistenței la tracțiune, încovoiere și impact a pieselor FDM a fost investigată utilizând o abordare statistică în Sood, et al. [28] . Croccolo, et al. [21] au investigat efectul direcțiilor de construcție a pieselor, al numărului de contururi asupra rezistenței la tracțiune și rigidității pieselor FDM, utilizând atât tehnici experimentale, cât și tehnici de modelare analitică. Aceștia au propus un model analitic pentru a prezice cedarea probelor FDM, considerând piesele FDM ca fiind o grindă subțire și împărțind sarcina între rastele longitudinale și înclinate. Calculul analitic a fost validat cu rezultatele experimentale, eroarea medie fiind de 4%. Domingo-Espin, et al. [34] au investigat efectul orientărilor pieselor asupra rezistenței la tracțiune a pieselor din policarbonat fabricate prin tehnica FDM și au verificat rezultatele cu ajutorul metodei elementelor finite. Autorii au concluzionat că rezistența mecanică a pieselor FDM este de natură anizotropă și depinde de direcția de construcție a pieselor. Pentru a crește rezistența mecanică, piesa ar trebui orientată într-o direcție care să producă cele mai lungi contururi aliniate cu direcțiile de întindere. Cu toate acestea, alți parametri de proces, cum ar fi unghiul de raster, grosimea stratului etc., afectează, de asemenea, în mod semnificativ rezistența mecanică a pieselor FDM și trebuie să fie

modelată pentru un studiu detaliat. Huang și Singamneni [35] au efectuat o modelare analitică luând în considerare o ipoteză conform căreia proprietățile mecanice ale pieselor FDM sunt dependente de structura internă. Aceștia au studiat influența unghiurilor de rastel asupra rezistenței la tracțiune, modulului de forfecare, modulului de elasticitate și coeficientului lui Poisson al pieselor FDM. Rezultatele au arătat că rezistența mecanică scade odată cu creșterea unghiului filamentelor de la 0° la 90° , rezultatele fiind validate cu observațiile experimentale. A fost investigată influența grosimii stratului, a vitezei de scanare și a lățimii filamentului depus, precum și a tensiunilor reziduale ale probelor FDM utilizând un model termomecanic bazat pe elemente finite [36].

Rezultatele au arătat că viteza de scanare are un efect semnificativ asupra distorsiunii piesei, în timp ce tensiunile reziduale cresc odată cu creșterea grosimii stratului. Bellehumeur, et al. [37] au studiat influența temperaturii din interiorul imprimantei (camera de construcție), a temperaturii de extrudare și a lățimii filamentului extrudat asupra calității lipirii filamentelor adiacente în procesul FDM și au constatat că temperatura de extrudare este cel mai important factor care influențează creșterea zonei de contact între filamente și lipirea lor. Ravari, et al. [38] au investigat efectul diametrului suporturilor asupra modulului de elasticitate și a tensiunii de cedare a structurii reticulare celulare fabricate prin procesul FDM, utilizând metoda elementelor finite. Influența orientării rasterului asupra rezistenței la tracțiune, încovoiere și impact a pieselor FDM a fost investigată în Es-Said, et al. [39]. Aceștia au observat că cedarea epruvetelor a avut loc în principal de-a lungul interfeței straturilor. Efectul direcției de construcție și al interiorului modelului asupra contracției volumetrice și a rezistenței la tracțiune a fost investigat pentru piesele FDM utilizând tehnica de optimizare multi-obiectiv în [40]. A fost analizat în [41] și efectul lipirii între straturi, al lipirii în interiorul stratului și între filamentele adiacente asupra rezistenței la tracțiune a pieselor FDM folosind atât modelarea experimentală cât și cea matematică. Aceștia au observat că, într-o probă FDM cu raster de 0° , cedarea unei epruvete se datorează fracturii între straturi, în timp ce în cazul straturilor raster de 45° , epruveta cedează atât sub efectul fracturii între straturi, cât și sub cel al fracturii în interiorul unui strat. Dawoud, et al. [26] au investigat efectul unghiului de raster și al golurilor de aer din raster asupra rezistenței mecanice a

pieselor FDM și au constatat că golul de aer negativă a îmbunătățit semnificativ rezistența mecanică a pieselor FDM. Influența direcției de construcție a piesei și a orientării rasterului asupra rezistenței la tracțiune, a modulului de elasticitate la tracțiune și a alungirilor probelor FDM a fost investigată în Riddick, et al. [42]. Relația dintre rupere și proprietățile mecanice este derivată prin analiza fractografică. Analiza literaturii de specialitate menționată anterior arată că mai mulți autori au încercat să determine setările optime ale parametrilor procesului de imprimare pentru a obține rezistența mecanică dorită a pieselor FDM fie că este vorba de piese funcționale sau de prototipuri, acestea se comportă diferit în condiții de încărcare diferite și depind de grosimea stratului și de alinierea rasterelor în raport cu direcția de solicitare [32]. Grosimile adaptive ale straturilor [43], în funcție de formele și structura pieselor, ar putea optimiza rugozitatea suprafeței, dar ar putea afecta neuniform rezistența pieselor construite. De asemenea, puțini autori au studiat efectul parametrilor procesului asupra performanței probelor FDM prin metoda elementelor finite [34] [36] cu toate acestea, modelele cu elemente finite care iau în considerare modelul de straturi cu orientarea și grosimea acestora pot prezice în mod eficient comportamentul probelor realizate prin FDM.

2.2.2. Modelul analitic bazat pe teoria materialelor compozite

Modelarea și analiza precisă a proprietăților mecanice ale modelelor FDM reprezintă o mare provocare din cauza procedurii de fabricare strat cu strat, iar materialele imprimate 3D se comportă similar celor cu proprietăți anizotrope. În literatura de specialitate pot fi găsite mai multe publicații și studii care prezintă diferite metode și tehnici de modelare a structurilor imprimate 3D FDM. Deosebit de importantă pentru studiul nostru este metoda prezentată de L. Li și Q. Sun [24], care au propus o metodă de reprezentare a structurilor tipărite FDM 3D ca materiale compozite.

Piese din ABS realizate prin procedeele FDM constau, în esență, din filamente ABS parțial lipite. Proprietățile mecanice ale pieselor FDM sunt guvernate de mezo-structurile lor (structura la scara filamentelor

extrudate), care sunt determinate de parametrii de fabricație, inclusiv lățimea filamentelor, grosimea stratului, orientarea depunerii și dimensiunile spațiilor dintre filamente. Prin selectarea parametrilor de fabricație, procesele FDM pot produce elemente cu proprietățile dorite. Pentru a exploata pe deplin acest potențial, ar trebui să se investigheze aspectele privind procesul de fabricație și proprietățile mecanice ale pieselor FDM. Dintre parametrii de fabricație, direcțiile de depunere a straturilor și dimensiunile spațiilor dintre filamente sunt cei mai importanți parametri pentru controlul proprietăților mecanice. Astfel, este esențial să se stabilească modele de material ale pieselor FDM în raport cu acești doi parametri de fabricație. Modelele pot fi apoi utilizate pentru a proiecta piese cu proprietățile mecanice dorite prin intermediul proprietăților controlate local. Conceptul de bază prezentat de L. Li și Q. Sun [24] definește piesele FDM ca fiind compozite ortotrope din filamente ABS și legătura între filamente și goluri. Ca materiale compozite, acestea pot fi privite și analizate la diferite niveluri și la diferite scări, în funcție de caracteristicile și comportamentele particulare avute în vedere. În figura 2.2 este prezentată o diagramă schematică a diferitelor niveluri modelare (micro, meso, macro sau structural) și a tipurilor corespunzătoare de analiză.

Urmărind o abordare generală pentru modelarea comportamentului mecanic al pieselor FDM, cercetarea urmărește acuratețea modelelor de material cu aplicație în proiectarea pieselor având proprietăți mecanice specifice. De asemenea, este important să se determine rigiditatea efectivă, care este o valoare medie a rigidității materialului, luând în considerare proprietățile tuturor componentelor structurale și interacțiunea acestora. Sistemul de coordonate pentru modelarea comportamentelor mecanice ale pieselor FDM a fost stabilit după cum urmează.

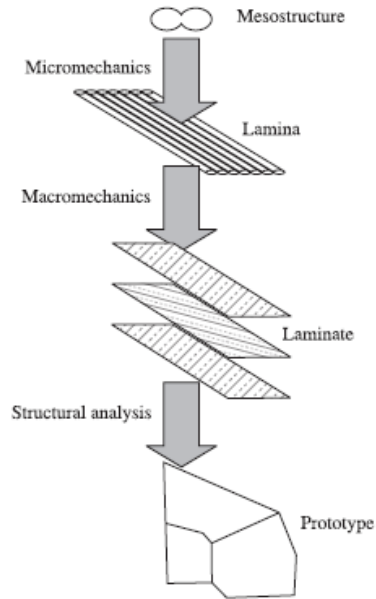


Figura 2.2 [24] Niveluri și tipuri de analiză pentru piese FDM ca material compozit

Se consideră o formă de bloc a unei piese FDM în care se utilizează umplerea cu raster pentru a fabrica piesa strat cu strat, așa cum se arată în figura 2.3. Se definesc două sisteme de coordonate rectangulare, și anume 1-2-z și x-y-z. În sistemul 1-2-z, axa 1, pe direcția axei filamentului, reprezintă direcția longitudinală a stratului. Axa 2 este normală la axa fibrelor și reprezintă direcția transversală a laminei.

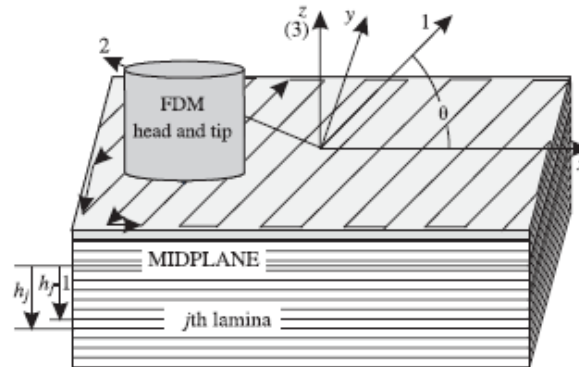


Figura 2.3 [24] Definirea axelor principale ale materialului și a axelor de încărcare pentru o lamină

În sistemul $x-y-z$, axele x și y reprezintă direcțiile de solicitare. Unghiul dintre axa pozitivă x și axa 1 se numește unghiul de orientare a fibrelor, reprezentat prin θ . Un laminat se construiește prin stivuirea unui număr de lamine de-a lungul direcției z . Trebuie subliniat faptul că axele 1 și 2 sunt constante de la o lamină la alta într-un laminat unidirecțional. Dar pentru un laminat ne-unidirecțional, 1 și 2 nu sunt constante: cu alte cuvinte, θ nu este constant pentru toate laminele dintr-un laminat multidirecțional.

Pentru o lamină *ortotropă* ($\theta = 0^\circ$ sau 90°), relațiile constitutive tensiune-deformație specifică în plan sunt exprimate în ecuația (2.1).

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Unde σ_{ij} și ε_{ij} sunt tensiunea și respectiv deformația specifică în plan, iar $[Q]$ este matricea de rigiditate. Patru constante elastice independente, și anume, modulul Young longitudinal, E_{11} , modulul Young transversal, E_{22} , coeficientul lui Poisson ν_{12} și modulul de forfecare, G_{12} , sunt necesare pentru a descrie comportamentul elastic în plan al unei lamine. Toate elementele din matricea $[Q]$ sunt funcții ale acestor constante. Lamina *ortotropă generală* se referă la o lamelă cu o orientare a fibrelor diferită de 0 sau 90° .

Laminatul se construiește prin stivuirea unui număr de lamine în direcția grosimii. Teoria compozitului laminat este utilă pentru a calcula tensiunea și deformația specifică în fiecare lamină a unei structuri laminate subțiri, legate prin matricea de rigiditate. Referitor la coordonatele din figura 2.3, teoria presupune o distribuție liniară a deformației specifice în direcția grosimii:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \varepsilon_{xx}^o + zk_{xx} \\ \varepsilon_{yy} &= \varepsilon_{yy}^o + zk_{yy} \\ \gamma_{xy} &= \gamma_{xy}^o + zk_{xy} \end{aligned} \quad (2.2)$$

unde ε_{xx}^o și ε_{yy}^o sunt deformațiile normale în planul median al laminatului; γ_{xy}^o este deformația de forfecare în plan median în laminat; k_{xx} și k_{yy} sunt curbura de încovoiere în laminat; k_{xy} este curbura de

răsucire în laminat; și z este distanța de la planul median în direcția grosimii.

Forța și momentul rezultante pe unitatea de lățime pentru laminat se exprimă astfel:

$$\begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + [B] \begin{bmatrix} k_{xx} \\ k_{yy} \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

și

$$\begin{bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{bmatrix} = [B] \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + [D] \begin{bmatrix} k_{xx} \\ k_{yy} \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Unde N_{xx} și N_{yy} sunt forțele normale în direcțiile x și y (pe unitate de lățime); N_{xy} este forța de forfecare; M_{xx} și M_{yy} sunt momentele de încovoiere în planurile yz și xz ; M_{xy} este momentul de torsiune; $[A]$ este matricea de rigiditate la întindere pentru laminat (N/m); $[B]$ este matricea de rigiditate la cuplarea întindere-încovoiere pentru laminat (N); și $[D]$ este matricea de rigiditate la încovoiere pentru laminat (N/m). Matricele $[A]$, $[B]$ și $[D]$ sunt funcții ale fiecărei matrice de rigiditate a laminelor $[Q]$ și ale distanțelor de la planul median la lamină.

Forța și momentul normal care acționează asupra unui laminat sunt cunoscute, deformațiile și curburile din planul median pot fi calculate conform ecuațiilor (2.3) și (2.4). Pentru un laminat simetric, orientarea straturilor este simetrică în raport cu linia mediană a laminatului: adică, pentru fiecare strat deasupra planului median, există un strat identic la o distanță egală sub planul median. De remarcat că laminatele simetrice cu straturi transversale conțin un număr impar de straturi. Pentru un laminat simetric, $[B] = [0]$ și nu există cuplaj întindere-încovoiere. Prin urmare:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} = [A^{-1}] \begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Pentru o sarcină de tracțiune uniaxială aplicată în direcția x și grosimea laminatului h , $N_{xx} = h\sigma_{xx}$ (pe unitatea de lățime), $N_{yy} = 0$, și

$N_{xy} = 0$. Astfel, modulul Young în planul median pe direcția x poate fi determinat după cum urmează:

$$E_{xx} = \frac{1}{[A^{-1}]_{11}h} \quad (2.6)$$

Pentru piesa FDM cu laminat simetric, capacitatea sa de a rezista la sarcini în plan este dictată de matricea $[A]$, în timp ce capacitatea sa de a rezista la sarcini de încovoiere, flambaj și torsiune este dictată de matricea $[D]$. Ambele matrici $[A]$ și $[D]$ sunt funcții ale materialului filamentelor, fracția de volum a filamentelor, unghiurile de orientare a filamentelor, grosimea laminelor și numărul de straturi din fiecare orientare. În plus, matricea $[D]$ depinde în mare măsură de secvența de stivuire a laminelor.

În abordarea micromecanică descrisă anterior, matricea de rigiditate a unui laminat este compusă din proprietățile fiecărei lamine, conform teoriei laminatului, în timp ce comportamentul elastic în plan al unei lamine unidirecționale poate fi descris în întregime folosind patru proprietăți elastice ale laminelor, E_{11} , E_{22} , G_{12} și ν_{12} . Este de dorit să se dispună de valori cât mai exacte ale proprietăților laminei în funcție de proprietățile constituenților și de caracteristicile geometrice, cum ar fi raportul volumetric al fibrelor și parametrii de împachetare geometrică.

Un obiectiv al micromecanicii este obținerea unor astfel de relații. Hashin și Rosen [44] au stabilit limita pentru constantele elastice efective ale compozitelor unidirecționale izotrope transversal cu rețele de fibre hexagonale și aleatoare. Aceste expresii pot fi reduse la cazul golurilor (void) în limita în care rigiditatea fibrelor ajunge la zero. Tsai [45] a efectuat o analiză bazată pe principii variaționale în care au fost luate în considerare continuitatea fibrelor și dezalinierea fibrelor. Ecuațiile pentru calculul constantelor elastice pot fi de asemenea reduse la materialul cu goluri. Aceste ecuații clasice sunt considerate adecvate pentru materialele cu cavități. Prin urmare, ecuațiile pot fi utilizate pentru piese FDM atunci când legătura dintre filamente este perfectă. Aceasta înseamnă că comportamentele materialelor lipite sunt identice cu cele ale filamentelor, iar golurile sunt considerate ca fiind cavități. Cu toate acestea, presupunerea unei lipiri perfecte nu este valabilă pentru procesul FDM. Pentru a investiga formarea legăturii dintre filamentele ABS în procesul FDM, cercetările efectuate includ: analiza mezo-imaginii,

analiza transferului de căldură a procesului de extrudare, experimente de sinterizare a polimerului și predicția cantitativă utilizând modelele analitice care descriu rata de coalescență care apare prin curgere vâscoasă newtoniană pentru diverși polimeri [46]. Rezultatele tuturor acestor analize au susținut concluzia că lipirea nu poate atinge starea perfectă în procesul FDM. Pentru exemplificare se consideră un material imprimat din ABS. Prototipurile FDM sunt compuse din filamente de ABS parțial lipite și goluri. Din cauza lipirii imperfecte, metodele existente de calculare a constantelor elastice ale solidului cu goluri nu sunt adecvate. Prin urmare, se propune un nou set de ecuații pentru a calcula constantele elastice, care pot fi utilizate pentru a determina proprietățile constitutive ale pieselor FDM.

Atunci când este încărcată în direcția longitudinală, o piesă FDM unidirecțională este un agregat de filamente ABS. Modulul Young longitudinal poate fi prezis prin regula amestecurilor. Prin urmare, modulul Young longitudinal ar trebui să fie după cum urmează:

$$E_{11} = (1 - \rho_1)E \quad (2.7)$$

unde E este modulul Young al filamentului, iar ρ_1 este densitatea golurilor de suprafață în planul normal la filamente. În cazul unei încărcări normale transversale, legătura dintre filamente este cea care preia sarcina. Se propune următoarea ecuație pentru modulul transversal:

$$E_{22} = \delta(1 - \rho_2)E \quad (2.8)$$

unde $\delta = 0 \sim 1$ este un factor empiric care ia în considerare rezistența de lipire. ρ_2 este o funcție liniară de goluri de-a lungul direcției transversale. Referindu-ne la figura 2.4, definiția lui ρ_2 este:

$$\rho_2 = \frac{b-y}{b} \quad (2.9)$$

Secțiunea transversală prezentată în figura 2.3 este perpendiculară pe axa 1 a unui laminat FDM unidirecțional. Termenul $(1 - \rho_2)$ este raportul dintre lungimea de lipire și dimensiunile totale. În mod similar, predicția modulului de forfecare în plan ia următoarea formă:

$$G_{12} = \delta'(1 - \rho_2)G \quad (2.10)$$

Unde G este modulul de forfecare al filamentului. $\delta' = 0 \sim 1$ este, de asemenea, un factor empiric. Coeficientul lui Poisson în plan, ν_{12} , este același cu cel al filamentelor ABS, ν , după cum urmează:

$$\vartheta_1 = \vartheta \quad (2.11)$$

Comparând ecuațiile propuse mai sus cu metodele existente pentru modelarea solidului cu cavități, diferențele semnificative sunt în calculul lui E_{22} și G_{12} , densitatea golurilor ρ_2 , este introdusă pentru a număra dimensiunile potențiale de încărcare, în timp ce $\delta(1 - \rho_2)$ și $\delta'(1 - \rho_2)$ rezultă în raportul dintre aceste constante elastice și necesită densitatea golurilor în planul perpendicular pe filamente, ρ_1 și raportul dintre lungimea legăturii, ρ_2 . Acestea pot fi calculate cu ajutorul analizei digitale a imaginii golurilor.

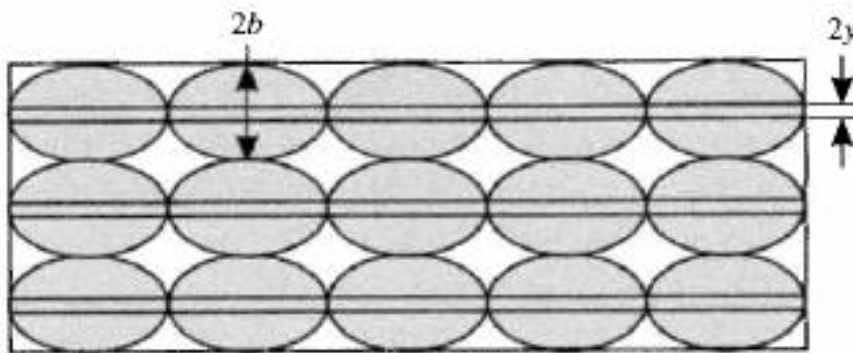


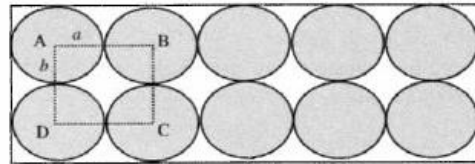
Figura 2.4 [24] Definiția ρ_2

Calculule teoretice privind rezistența, modulul și alte proprietăți ale unui compozit se bazează pe fracțiunile de volum ale conținutului său. Densitatea golurilor este necesară în calculule teoretice. În cazul unui laminat ortotrop ρ_1 este definită ca densitatea de goluri din suprafața situată în planul normal la filamente (transversală) sau la axa 1. Dimensiunea spațiului g dintre filamente determină ρ_1 .

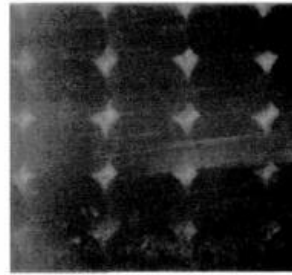
În cele ce urmează sunt prezentate două cazuri:

Cazul 1; atunci când $g = 0$. Atunci când distanțele dintre filamente sunt zero, secțiunea transversală ideală este reprezentată în figura 2.5.a, în care a și b sunt lungimile idealizate ale axelor semi-majoră ale unui filament. Deoarece filamentul extrudat este în stare semi-lichidă, atât

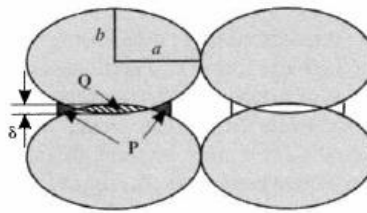
partea superioară, cât și cea inferioară a acestuia se vor aplatiza ușor atunci când este depus pe stratul anterior, după cum se indică în fotografia microscopică din figura 2.5.b.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.5 [24] Densitatea golurilor în împachetarea fibrelor unidirecționale a) model ideal, b) fotografie în secțiune transversală la microscop, c) efect de aplatizare

Prin urmare, modelul de calcul modificat este prezentat în figura 2.5.c. atunci când se ia în considerare efectul de aplatizare cu δ care poate fi măsurat experimental. Presupunând că aria totală a secțiunii transversale rămâne neschimbată, relația dintre aria Q și cele două arii P ar trebui să fie:

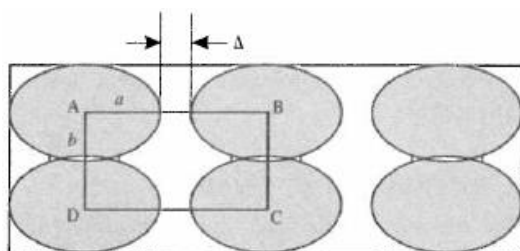
$$Q = 2P \quad (2.12)$$

Astfel, densitatea de goluri poate fi calculată cu ajutorul următoarei ecuații:

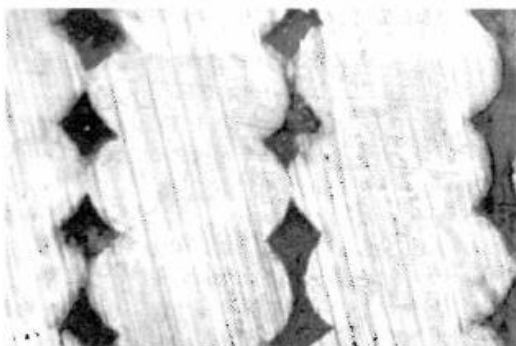
$$\rho_1 = 1 - \frac{\pi ab}{2a(2b-\delta)} \quad (2.13)$$

Cazul 2: $g = \pm\Delta$. Figurile 2.5 și 2.6 prezintă cazurile unui decalaj pozitiv și, respectiv, al unui decalaj negativ. Pentru un decalaj negativ mic, se presupune că suprafața totală a secțiunii transversale a filamentelor rămâne aceeași cu o formă geometrică diferită, așa cum se arată în figurile 2.5a și 2.6b. prin urmare, pentru ambele cazuri, densitatea de goluri ρ_1 poate fi calculată ca:

$$\rho_1 = 1 - \frac{\pi ab}{(2b-\delta)(2a\pm\Delta)} \quad (2.14)$$



(a)



(b)

Figura 2.6 [24] Decalaj pozitiv în depunere unidirecțională
model teoretic, b) imaginea secțiunii transversale la microscop

unde δ poate fi măsurat pe epruvete. În cadrul controlului dimensional s-a constatat că dimensiunile totale ale epruvetelor se modifică în funcție de diferitele dimensiuni ale spațiului, în special în ceea ce privește înălțimea epruvetelor. Cu cât este mai mare decalajul negativ (negative gap), cu atât este mai mare înălțimea. Motivul care stă la baza acestui

fenomen este că partea superioară și una dintre laturile filamentului extrudat este liberă de constrângeri atunci când sunt depuse pe stratul anterior și lângă filamentul așezat anterior. Prin urmare, diferite valori ale δ ar trebui să fie utilizate pentru a compensa efectul în calcul.

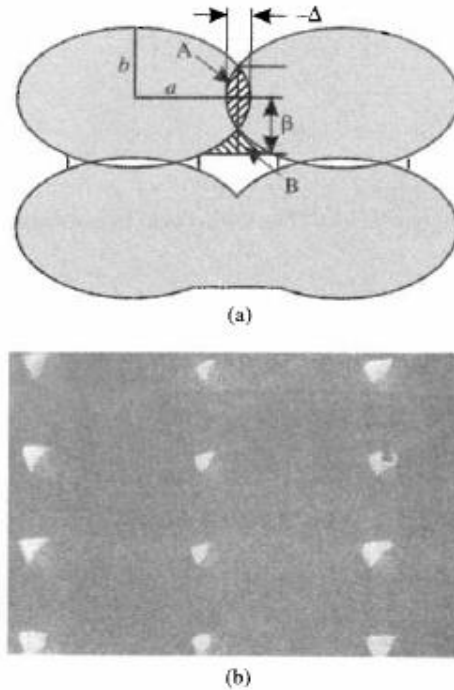


Figura 2.7 [24] Geometria golului negativ
a) model teoretic, b) imagine a secțiunii transversale la microscop

Calculul raportului liniar de goluri ρ_2 , este definit ca raportul lungimii golului de-a lungul proiecției axei 2. Din definiția lui ρ_2 în ecuația (2.17) (cu referire la figura 2.4), se înțelege că atunci când $g > 0$, $\rho_2 = 1$. Deși, teoretic, contactul dintre două cercuri ar trebui să fie un punct, valoarea inițială a $\rho_2 = 1 - y/a$ a fost luată ca o estimare atunci când $g = 0$. Pentru un decalaj negativ mic între filamente, deoarece filamentele nu pot intra fizic unul în celălalt, se presupune că zona de suprapunere A este forțată să umple zona B, având în vedere efectul gravitațional asupra filamentelor, așa cum se arată în figura 2.7. Imaginea microscopică din figura 2.6.b susține această ipoteză. Zona de suprapunere poate fi calculată prin ecuația geometrică:

$$A = 4b \left(\int_{\sigma}^a \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} dx \right) \quad (2.15)$$

$$B = 2 \left[\beta \left(\alpha - a \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{b^2}} \right) \right] - \int_{\alpha - a \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{b^2}}}^a b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} dx \quad (2.16)$$

Unde $\alpha = a - \Delta/2$. Deoarece $A = B$, β poate fi decisă pentru o anumită dimensiune a decalajului negativ Δ în mod teoretic.

Apoi, lungimea legăturii se calculează prin:

$$2y = b \sqrt{1 - \frac{\alpha^2}{a^2}} + \beta \quad (2.17)$$

Iar valoarea teoretică a ρ_2 poate fi obținută prin:

$$\rho_2 = 1 - \frac{2y}{2b - \delta} \quad (2.18)$$

Pentru a valida calculele prezentate mai sus, secțiunile transversale ale epruvetelor FDM au fost studiate la microscop, iar fotografiile au fost apoi digitalizate pentru analiză.

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. [21] Modelul analitic a fost dezvoltat în conformitate cu câteva ipoteze, rezumate în rândurile următoare:

- În conformitate cu standardul ASTM D638-10, epruvetele FDM pot fi considerate grinzi subțiri, a căror lungime este mult mai mare decât lățimea și înălțimea. În consecință, pare a fi rezonabil să se presupună o lungime infinită a gabariturii epruvetei. Pe măsură ce se aplică sarcina exterioară, zona calibrată a epruvetei (specimen gage) se deformează cu o deformație 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, după cum se detaliază mai jos.

- În fiecare dintre aceste elemente, sarcina totală este împărțită între straturile longitudinale și cele înclinate, astfel încât alungirea axială a acestora să fie menținută constantă. Cu alte cuvinte, toate barele cooperează pentru a susține sarcina totală, lucrând în paralel.

Forma de epruvetă propusă (Fig. 2.8) este dezvoltată pentru a se asigura că zona calibrată a epruvetei nu este influențată de concentratorul de tensiuni din zona de curbura a capătului epruvetei. Deoarece piesele prelucrate FDM au de obicei, proprietăți anizotrope, inițial a existat teama că dimensiunea propusă a razei, 76 mm, era prea mică pentru a preveni concentrarea de tensiuni, fiind sporită de anizotropie. Din acest motiv, a fost efectuat un experiment preliminar. S-au fabricat și testat la tracțiune epruvete cu aceeași geometrie, generate în timp ce erau așezate în poziție plană, cu un singur contur și cu raze diferite de racordare. Prin examinarea locurilor de fractură, a fost determinată cea mai potrivită valoare a razei, pentru a reduce concentrația de tensiuni la nivelul racordării la o valoare neglijabilă, evitându-se astfel inițierea fisurilor. O rază de 244 mm a fost în cele din urmă aleasă ca fiind cel mai bun compromis între lungimea totală a epruvetei și necesitatea de a preveni rupturi inacceptabile la nivelul racordării. Locațiile de fractură, luând în considerare o epruvetă complet conformă (rază de 76 mm) și o epruvetă cu rază mărită (244 mm), sunt comparate în Fig. 2.8.

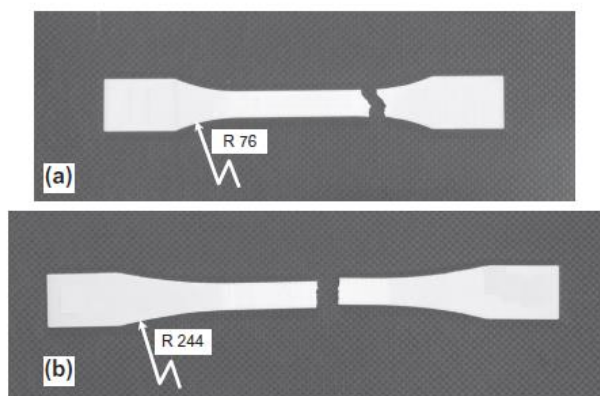


Figura 2.8 [21] (a) Localizarea fracturii în dreptul racordării pentru epruveta cu raza de racordare de 76 mm și (b) localizarea fracturii în dreptul zonei calibrate pentru epruveta adoptată cu raza de racordare de 244 mm

Cinci tipuri diferite de epruvete au fost fabricate prin variația a doi parametri :

- Orientarea construcției, adică epruvete imprimare de-a lungul grosimii (adică așezate pe lățime în timpul procesului de imprimare), prezentate în Fig. 2.9.a, sau de-a lungul uneia dintre cele două dimensiuni principale (adică culcate pe o parte în timpul generării), Fig. 2.9.b.
- Numărul de contururi depuse în jurul marginilor componentelor de pe platforma de construcție.

Combinăția dintre parametrii menționați mai sus este prezentată în detaliu în figura 2.9 c și 2.9. d.

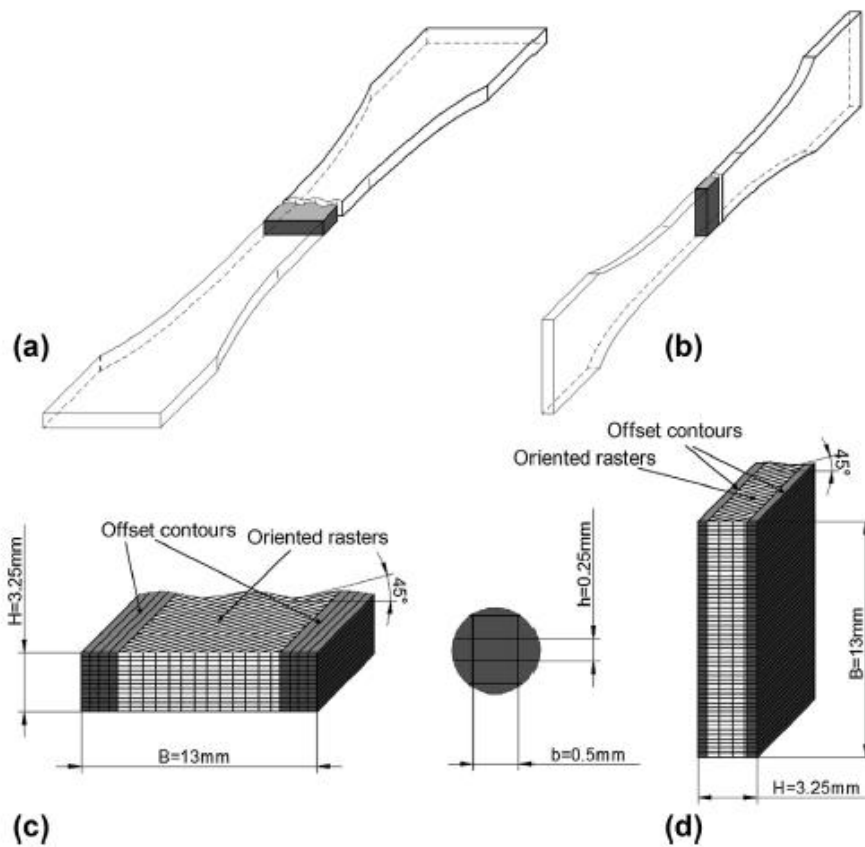


Figura 2.9 [21] Vederi de ansamblu ale epruvetelor de tip 2 (a) și tip 5 (b) și detalii (c și d) privind geometria, orientarea filamentelor și dimensiunile principale ale secțiunii transversal

După așezarea filamentelor de contur, imprimanta FDM a depus straturi alternative prin schimbarea direcției straturilor de la $+45^\circ$ la -45° (filamente orientate, în alb), pentru a umple spațiul după depunerea conturului. Un exemplar cu 4 contururi cu orientare de construcție de-a lungul grosimii este prezentat în figura 2.9 (a), în timp ce un exemplar cu 1 contur cu orientare de construcție de-a lungul uneia dintre dimensiunile principale este reprezentat în figura 2.9 (b). În ambele cazuri, în partea internă a componentelor sunt vizibile rastere de filamente orientate pe direcțiile $+45^\circ / -45^\circ$. Se poate observa că numărul total de straturi depinde de orientarea construcției.

Au fost generate patru tipuri de eșantioane cu orientarea de-a lungul grosimii construcției, ca în exemplul din figura 2.9 (a): acestea au, respectiv, 1 (Tip 1), 4 (Tip 2), 7 (Tip 3) și 10 (Tip 4) contururi. Epruveta de tip 5 a fost generată cu orientarea de construcție de-a lungul uneia dintre dimensiunile principale, urmând configurația din figura 2.9 (b) și cu 1 contur. Ceilalți parametri de imprimare au fost menținuți constanți: lățimea cordonului a fost menținută la valoarea de 0,5 mm, iar unghiul de înclinare a filamentelor a fost setat la $+45^\circ / -45^\circ$. Aceasta este setarea cea mai utilizată, rezultând un model de bare, toate având aceleași înclinații în raport cu axa epruvetei și, de asemenea, cu direcția de încărcare. Spațiul de aer a fost menținut la valoarea de 0 mm, grosimea stratului la 0,25 mm, (jumătate din lățimea filamentului), valori luate în considerare și de Lee, et al. [47] și Sood, et al. [28].

Modelul este capabil să proceseze următoarele intrări (inputs):

- Date geometrice privind dimensiunile totale ale secțiunii (B și H), lățimea și înălțimea barei (b și h) și unghiul de înclinare al filamentelor pentru straturile alternative ($\pm\alpha$).
- Alungirea sub sarcină axială a unei porțiuni dintr-un filament considerată bară înclinată solicitată axial, a cărei lungire v se determină în funcție de poziția acesteia, după cum se arată mai jos..

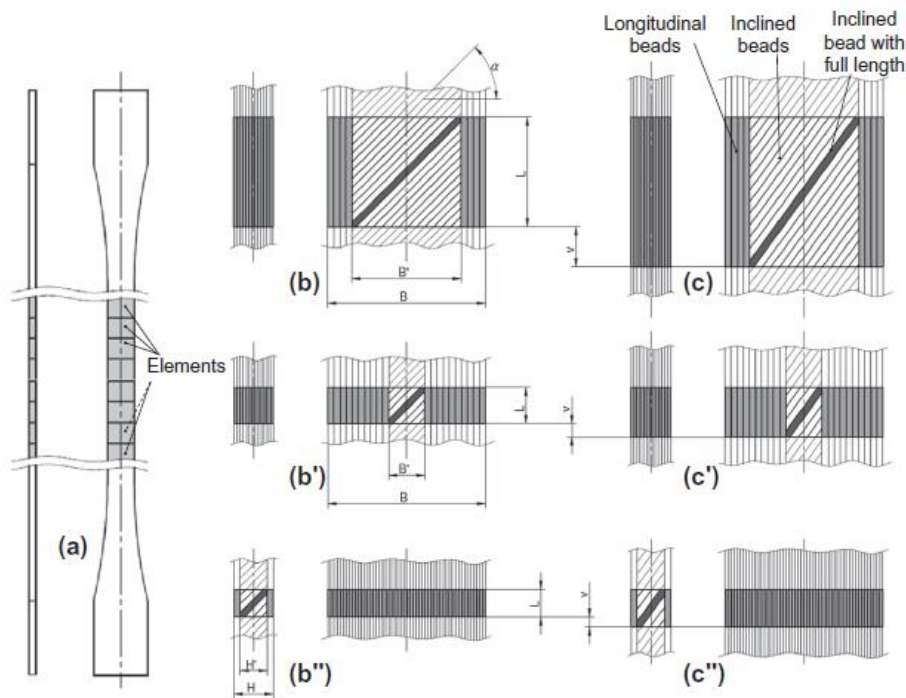


Figura 2.10 [21] Vederi laterale și frontale ale epruvetelor în zona calibrată realizate din mai multe elemente; (a) epruveta întregă, (b), (b'), (b''), (b'') vedere deformată și mărită, (c), (c'), (c''), (c'') vedere deformată și mărită pentru epruveta de tip 2 (b și c), 4 (b', c'), 5 (b'', c'')

Ieșirile sunt constituite din următoarele valori:

- Estimarea forței axiale curente aplicate asupra epruvetei și alungirea acesteia.
- Determinarea rigidității epruvetei, precum și a modulului lui Young.
- Estimarea rezistenței la tracțiune, printr-o modelare adecvată a modelului de rupere, respectiv ruperea filamentelor longitudinale și a celor înclinate.

Comportamentul mecanic similar al epruvetelor de tip 2 și 5 poate fi din nou atribuit numărului total de bare longitudinale (N_c), care poate fi calculat ca produs între numărul de bare longitudinale pe strat ($2 n_c$) și numărul de straturi (n_l). Calculul N_c este raportat în Ecuația (2.18),

unde n_c reprezintă numărul de contururi depuse la generarea fiecărui strat.

$$N_c = 2 \cdot n_c \cdot n_l \quad (2.18)$$

Pe baza definiției tipului de epruvetă din secțiunea 2, $n_c = 4$ pentru tipul 2 și $n_c = 1$ pentru tipul 5. Ecuația (2.18) poate fi scrisă ca în ecuațiile (2.19) și (4), luând în considerare tipurile de epruvete tip 2 și tip 5. Sublinierile au fost adăugate cu referire la cele două tipuri. Simbolul h reprezintă grosimea stratului, în timp ce B și H sunt cele două dimensiuni ale secțiunii transversale dreptunghiulare în zona calibrată a epruvetei (gage length). Se poate observa cu ușurință că $N_{c2} = N_{c5}$.

$$N_{c2} = 2 \cdot 4 \cdot \frac{H}{h} \quad (2.19)$$

$$N_{c5} = 2 \cdot 1 \cdot \frac{B}{h} \quad (2.20)$$

În ipoteza în care rasterele longitudinale determină răspunsul mecanic al epruvetelor, valorile calculate analitic US_{ac} și E_{ac} pot fi obținute prin ecuațiile (2.21) și (2.22) în care US_b și E_b sunt proprietățile unui singur raster.

$$US_{ac} = \frac{US_b \cdot b \cdot h \cdot N_c}{B \cdot H} \quad (2.21)$$

$$E_{ac} = \frac{E_b \cdot b \cdot h \cdot N_c}{B \cdot H} \quad (2.22)$$

În concluzie, se poate spune că răspunsul mecanic al epruvetei este într-adevăr dependent de numărul total de elemente longitudinale N_c și de numărul de contururi, fiind strâns legate între ele. În special, atunci când N_c este același, indiferent de procedura de fabricație, comportamentul mecanic al epruvetelor este și el același. Mai mult, atunci când N_c crește, atât rigiditatea, cât și rezistența cresc. În orice caz, relația menționată între N_c și răspunsul mecanic nu este suficient de precisă pentru a prezice în totalitate comportamentul mecanic al epruvetelor.

Trebuie remarcat faptul că, întrucât elementele sunt conectate în serie, ele transmit aceeași sarcină externă. În consecință, este suficient să se calculeze sarcina transmisă de un element de bară pentru a determina sarcina curentă aplicată axial pe întreaga epruvetă. În figura 2.10 sunt

prezentate câteva exemple de elemente de bară pentru epruvetele de tip 2, 4 și 5. Se poate observa că lungimea lor este ajustată, astfel încât fiecare element, independent de tipul de epruvetă, conține aceleași tipologii ale filamentelor: filamente longitudinale, un filament înclinat de lungime maximă, întins pe dimensiunea B' sau H', filamente mai scurte și înclinate dispuse simetric față de filamentul înclinat cu lungime maximă.

Fiecare element acoperă întreaga secțiune transversală și are o lungime care depinde de numărul de contururi, de tipul de epruvetă și de unghiul de înclinare. Lungimea elementului de bară se calculează cu ajutorul ecuației (2.23) pentru tipurile 1-4 și cu ajutorul ecuației (2.24) pentru tipul 5, unde termenii B' și H' reprezintă lățimea secțiunii care conține filamentele înclinate.

$$L = (B - 2n_c \cdot b) \cdot \operatorname{tg}(\alpha) = B' \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \quad (2.23)$$

$$L = (H - 2n_c \cdot b) \cdot \operatorname{tg}(\alpha) = H' \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \quad (2.24)$$

După cum se arată în schița din figura 2.11, deplasarea unui singur element de bară este dată de parametrul v .

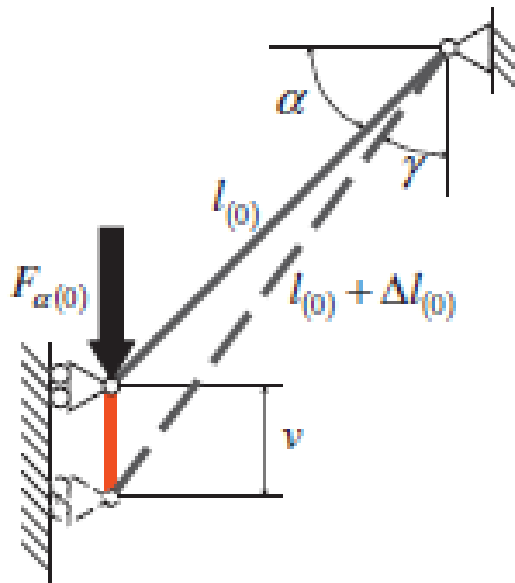


Figura 2.11 [21] Modelul filamentului înclinat similar unei bare solicitat de forța $F_{\alpha(0)}$ și alungit având deplasarea verticală v

Sarcina curentă transmisă de filamente poate fi determinată odată ce se cunosc deplasarea v și proprietățile de rigiditate ale acestora. Rigiditatea fiecărei filament longitudinal (k_l) poate fi estimată cu ușurință, conform ecuației (2.25), fiecare filament fiind modelat ca o bară longitudinală încărcată cu o forță axială. Forța transmisă de fiecare filament se calculează ca produsul dintre rigiditate și deplasarea aplicată v . Deoarece toate straturile funcționează ca un sistem de arcuri paralele, valoarea totală a forței axiale (F_l) transmise de conturul unui singur strat este dată de ecuația (2.26), unde forța transmisă de un singur filament este înmulțită cu numărul de straturi longitudinale.

$$k_1 = \frac{E_b b h}{L} \quad (2.25)$$

$$F_1 = k_1 \cdot \vartheta \cdot 2 \cdot n_c \quad (2.26)$$

Modelul filamentului-ului înclinat este reprezentat în schema din figura 2.11, în care o bară este sollicitată de o forță verticală orientată de-a lungul axei epruvetei. Atunci când se aplică forța, o componentă a acesteia va solicita axial bara, producând deformarea axială a acesteia. Deformarea axială a barei implică o deplasare verticală v a extremității sale inferioare. După cum s-a precizat anterior, valoarea deplasării v este factorul determinant al modelului analitic. Intensitatea forței verticale, $F_{\alpha(0)}$, transmisă de un filament înclinat poate fi determinată în funcție de v , prin intermediul procedurii descrise mai jos.

Fie $l_{(0)}$ și $\Delta l_{(0)}$ lungimea filamentului înclinat și respectiv, alungirea acestuia sub sarcina aplicată. Având în vedere schema prezentată în figura 2.11, se pot scrie ecuațiile (2.27) și (2.28); unghiul γ fiind calculat pe baza unghiului de inclinare al filamentelor.

$$(l_{(0)} + \Delta l_{(0)}) \sin(\gamma) = l_{(0)} \cos(\alpha) \quad (2.27)$$

$$(l_{(0)} + \Delta l_{(0)}) \cos(\gamma) = \vartheta + l_{(0)} \sin(\alpha) \quad (2.28)$$

Valoarea deplasării v poate fi calculată prin rezolvarea ecuației (2.28), în timp ce relația (2.27) poate fi utilizată pentru a determina unghiul γ . Astfel, v poate fi exprimată în funcție de parametrii geometrici conform relației (2.29).

$$\begin{aligned}
\vartheta &= (l_{(0)} + \Delta l_{(0)})\cos(\gamma) - l_{(0)}\sin(\alpha) \\
&= (l_{(0)} + \Delta l_{(0)})\sqrt{1 - \sin^2(\gamma)} - l_{(0)}\sin(\alpha) \\
&= \sqrt{(l_{(0)} + \Delta l_{(0)})^2 - l_{(0)}^2\cos^2(\alpha)} - l_{(0)}\sin(\alpha) = \\
l_{(0)} &\left[\sqrt{\left(1 + \frac{\Delta l_{(0)}}{l_{(0)}}\right)^2 - \cos^2(\alpha)} - \sin(\alpha) \right] \quad (2.29)
\end{aligned}$$

Următoarea etapă constă în determinarea relației dintre $F_{\alpha(0)}$ și v . Considerând din nou schema din figura 2.11, sarcina axială care acționează asupra unui filament poate fi calculată cu ușurință ca $F / \alpha(0) \sin(\alpha)$. Astfel, având în vedere rigiditatea unei bare supuse unei sarcini axiale, alungirea $\Delta l_{(0)}$ este dată de următoarea ecuație:

$$\Delta l_{(0)} = \frac{\frac{F_{\alpha(0)}}{\sin\alpha}}{\frac{E_b \cdot b \cdot h}{l_{(0)}}} = \frac{F_{\alpha(0)} l_{(0)}}{E_b \cdot b \cdot h \cdot \sin(\alpha)} \quad (2.30)$$

Din ecuația (2.30) împreună cu Ecuația (2.29) rezultă Ecuația (2.31) care poate fi considerată ca o ecuație în necunoscuta $F_{\alpha(0)}$. În cele din urmă, $F_{\alpha(0)}$ poate fi ușor determinată prin Ecuația (2.32) în funcție de o deplasare fixă v , de-a lungul axei epruvetei.

$$\vartheta = l_{(0)} \left[\sqrt{\left(1 + \frac{F_{\alpha(0)}}{E_b \cdot b \cdot h \cdot \sin(\alpha)}\right)^2 - \cos^2(\alpha)} - \sin(\alpha) \right] \quad (2.31)$$

$$F_{\alpha(0)} = \left[\sqrt{\left(\frac{\vartheta}{l_{(0)}} + \sin(\alpha)\right)^2 + \cos^2(\alpha)} - 1 \right] \cdot E_b \cdot b \cdot h \cdot \sin(\alpha) \quad (2.32)$$

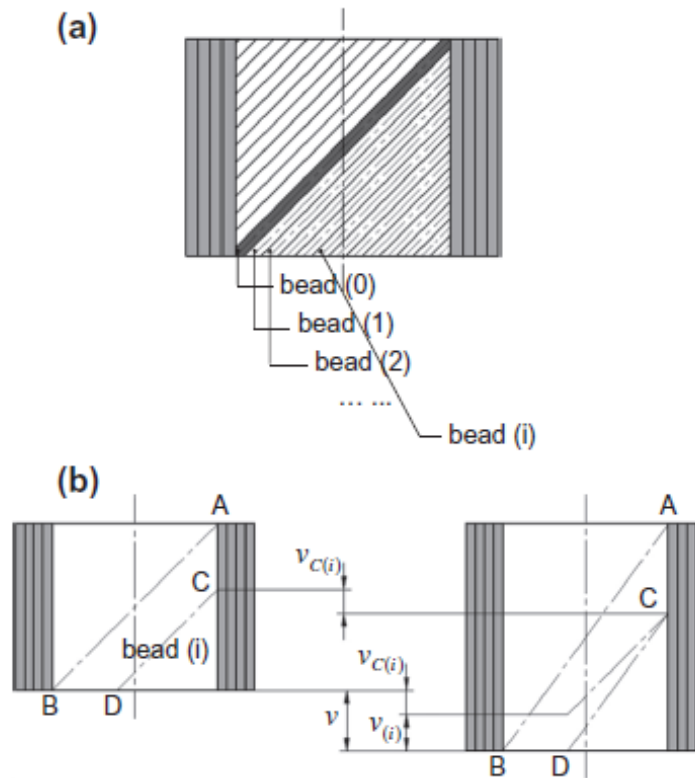


Figura 2.12 [21] Filamente înclinate cu lungime redusă (a) și determinarea deplasării verticale care trebuie luată în considerare în modelul de rigiditate (b)

Fiecare element prezintă un număr de filamente înclinate, cu o lungime descrescătoare, proporțională cu distanța față de filamentul central cu lungime maximă. Figura 2.12.(a) prezintă filamentele înclinate dintr-un element al unei epruvete de tip 2 și comparația cu cel de lungime maximă, indicată ca "filament (0)", în timp ce celelalte sunt simbolizate prin numere crescătoare. Numărul total de filamente înclinate, n_α , este dat de ecuația (2.33), în timp ce lungimea filamentului înclinat "i", $l_{(i)}$, este exprimată prin ecuația (2.34).

$$n_\alpha = \frac{B'}{b} \cdot \sin(\alpha) \quad (2.33)$$

$$l_{(i)} = \frac{B' - ib}{B' \cdot \sin(\alpha)} \cdot l_{(0)} = \left[1 - \frac{(n_\alpha - i) \cdot b}{B' \cdot \sin(\alpha)} \right] \cdot l_{(0)} = \frac{(n_\alpha - i) \cdot b}{B' \cdot \sin(\alpha)} \cdot l_{(0)} \quad (2.34)$$

După cum s-a explicat anterior, forța verticală, cu direcția de-a lungul axei epruvetei, trebuie calculată în funcție de deplasarea v . În acest caz, trebuie să se determine forța preluată de fiecare filament înclinat, $F_{\alpha(i)}$. Să luăm în considerare filamentul "i", care are o lungime $l_{(i)}$. Observând figura 2.12.(b) și în ipoteza în care toate filamentele lucrează în paralel, extremitatea sa inferioară (adică punctul D) se deplasează pe verticală cu deplasarea v . Valoarea deplasării totale v este dată de suprapunerea a două efecte: alungirea filamentelor de contur $v_{C(i)}$, care implică deplasarea pe verticală a extremității superioare a filamentelor înclinate (adică punctul C) și alungirea proprie a filamentului $v_{(i)}$.

Prin urmare, alungirea v , așa cum se observă în figura 2.12.(b), rezultă din suma celor două contribuții menționate anterior ($v = v_{C(i)} + v_{(i)}$). Prin inversarea acestei relații, deplasarea verticală corespunzătoare alungirii filamentului "i" de-a lungul axei sale este $v_{(i)} = v - v_{C(i)}$ care este o valoare mai mică decât deplasarea totală v . Prin urmare, ecuația (2.32) este valabilă pentru calculul forței transmise de filamentul "i", cu condiția înlocuirii deplasării v cu termenul $v_{(i)} = v - v_{C(i)}$.

În ipoteza unui câmp de deformații uniform la nivelul epruvetei, este posibil să se calculeze $v_{C(i)}$, conform ecuației (2.35).

$$\vartheta_{C(i)} = \frac{\vartheta}{B' \operatorname{tg}(\alpha)} \cdot \frac{i \cdot b}{\cos(\alpha)} = \vartheta \cdot \frac{i \cdot b}{B' \sin(\alpha)} \quad (2.35)$$

În consecință, deplasarea $v_{(i)}$ se calculează conform ecuației (2.36)

$$\vartheta_{(i)} = \vartheta - \vartheta_{C(i)} = \vartheta - \vartheta \cdot \frac{i \cdot b}{B' \sin(\alpha)} = \left(1 - \frac{i \cdot b}{B' \sin(\alpha)}\right) \cdot \vartheta = \frac{(n_{\alpha} - i) \cdot b}{B' \sin(\alpha)} \cdot \vartheta \quad (2.36)$$

Se poate observa că ecuația (2.36) satisface condițiile la limită, deoarece termenul $v_{(i)}$ coincide cu v pentru $i = 0$, adică pentru filamentul înclinat cu lungime maximă, și scade până la zero, pentru creșterea valorii lui i . Pentru o valoare mare a lui i , prima valoare $v_{C(i)}$ este mult mai mare decât a doua $v_{(i)}$, lungirea axială a filamentelor înclinate este de fapt foarte mică, datorită lungimii reduse și rigidității axiale ridicate.

Deoarece raportul $v_{(i)} / l_{(i)}$ dat de raportul dintre ecuațiile (2.36) și (2.34) este egal cu raportul $v / l_{(0)}$, ecuația (2.32) este valabilă pentru

toate filamentele înclinate și rezultă următoarea ecuație a forței de solicitare:

$$F_{\alpha(i)} = \left[\sqrt{\left(\frac{v_{(i)}}{l_{(i)}} + \sin(\alpha)\right)^2 + \cos^2(\alpha)} - 1 \right] \cdot E_b \cdot b \cdot h \cdot \sin(\alpha) = F_{\alpha(0)} \quad (2.37)$$

După cum s-a menționat anterior, în procesul FDM, un filament ABS este extrudat printr-o duză și depus pe piesa parțial construită. Ca o consecință a unei valori zero a golului de aer (air gap), toate filamentele sunt plasate unul lângă altul. Astfel, depunerea filamentului într-o stare de semi-solidă implică faptul că materialul abia depus fuzionează cu materialul adiacent. Rezultatul este că nici un filament individual nu este complet liber să se deformeze sub sarcina aplicată, așa cum s-a presupus mai sus. Alungirea sa este parțial constrânsă de forța adezivă care acționează la interfața dintre fiecare pereche de filamente adiacente. Deoarece efectul forței de aderență rezultă din diferența dintre alungirea barelelor continue, se poate aplica modelul reprezentat în următoarea ecuație:

$$F_{ad(i)} = 2 \cdot C_{ad} \cdot |\Delta l_{(i)} - \Delta l_{(i-1)}| \quad (2.38)$$

Forța de aderență la interfața dintre filamentele (i-a) și ((i-1)-a), notată $F_{ad(i)}$ este proporțională cu diferența dintre alungirea $\Delta l_{(i)}$ și $\Delta l_{(i-1)}$, cu o constantă C_{ad} care trebuie calibrată experimental. În plus, se ia în considerare un factor 2 pentru a ține seama de efectul forțelor de aderență dintre filamentele înclinate din partea superioară stângă a elementului din figura 2.12.(a) poziționate simetric față de filamentul înclinat cu lungime maximă. Se poate observa că toate filamentele care formează contururile longitudinale suferă aceeași alungire, în timp ce barele înclinate au în general deformații diferite de-a lungul propriilor axe. În consecință, efectul forței de aderență apare numai atunci când se iau în considerare filamentele înclinate. Acesta este motivul pentru care notațiile din ecuația (2.38) se referă în mod explicit la acest grup de filamente. În plus, cu cât este mai mare numărul de filamente înclinate (de exemplu, pentru epruveta de tip 1, a se vedea figura 2.10), cu atât mai mare este efectul descris.

În paragrafele anterioare s-a arătat cum se poate determina forța transmisă de către filamentele longitudinale și cele înclinate, pe un singur strat al secțiunii epruvetei. Forța totală, obținută prin modelul analitic, F_a , este în final calculată cu Ecuația (2.39), unde componentele calculate pe fiecare filament sunt cumulate iar rezultatul este înmulțit cu numărul de straturi, n_l .

$$F_a = n_l \cdot [F_1 + F_{\alpha(1)} + \dots + F_{\alpha(n\alpha)} + F_{Ad(1)} + \dots + F_{Ad(n\alpha)}] =$$

$$= n_l \cdot [F_1 + (n_\alpha + 1)F_{\alpha(0)} + \sum_{i=1}^{n_\alpha} F_{Ad(i)}] \quad (2.39)$$

Întregul algoritm poate fi implementat cu ajutorul unui software tip foaie de calcul (ex. Excel) și poate fi completat de controale logice pentru simularea fenomenului de cedare al fiecărui filament. Astfel, forța calculată pentru fiecare filament este comparată cu forța maximă de-a lungul axei probei care poate fi susținută de structura filamentelor. Aceasta depinde de rezistența finală a unui singur filament, US_b , de orientarea acestuia (longitudinală sau înclinată) și de unghiul de înclinare. Valorile de prag pentru filamentele longitudinale și înclinate, T_{a_1} și, respectiv, T_{a_α} , sunt date în următoarele ecuații:

$$T_{a_1} = US_b \cdot b \cdot h \quad (2.40)$$

$$T_{a_\alpha} = US_b \cdot b \cdot h \cdot \sin(\alpha) \quad (2.41)$$

Valoarea forței transmise de un singură filament este lăsată neschimbată atunci când este mai mică decât valoarea de prag corespunzătoare și este automat schimbată la zero atunci când este mai mare, modelând astfel fenomenul de rupere locală.

Această metodă, dezvoltată de Croccolo [21], va servi drept bază (punct de plecare) pentru modelul nostru predictiv. Modelul propus de Croccolo este pur teoretic și are o limită în cazul în care se utilizează diferite modele de umplere (infill pattern). De fapt, această metodă este fiabilă numai în cazul în care toate filamentele sunt depuse longitudinal, când forțele de coeziune pot fi neglijate.

În cazul în care filamentele sunt depuse, de exemplu la 45 de grade față de axa principală a imprimantei, forța de coeziune va depinde în mare măsură de calitatea legăturii dintre filamentele depuse (golul de aer, material, temperatura), ceea ce, din nou, limitează aplicabilitatea sa

ca instrument de predicție a comportamentului mecanic al materialelor imprimate 3D.

2.2.4. Analiza cu elemente finite a materialelor FDM

În lucrarea prezentată de Garg, A. și Bhattacharya, A. [48], se realizează modelarea și 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 și 0,330 mm) și trei unghiuri de înclinare a filamentelor diferite (0°, 90° și 0°/90°) utilizând software-ul de modelare CAD Pro/Engineer 5.0. Modelele create sunt exportate în ABAQUS în format de fișier STEP. Dimensiunile totale pentru epruvetele de testare la tracțiune sunt stabilite conform standardului ASTM D638 (standard pentru testarea la tracțiune pentru componente din plastic) [49]. Dimensiunile detaliate ale epruvetelor de tracțiune și aranjamentele unghiurilor de înclinare a filamentelor sunt prezentate schematic în figura 2.13.

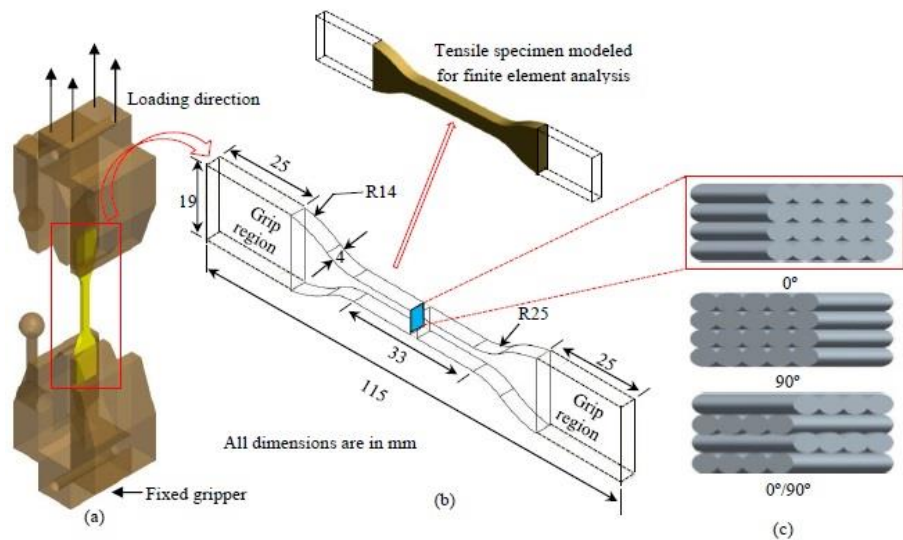


Figura 2.13 [48](a) Schema dispozitivului de prindere, (b) epruveta de tracțiune conform standardului ASTM D638, (c) ilustrare schematică a diferitelor unghiuri ale straturilor de filamente

Modelul geometric al epruvetei de tracțiune este pregătit prin generarea straturilor la diferite unghiuri de înclinare pentru diferite grosimi de strat. Grosimea stratului (h_0) implică diametrul duzei prin care se depune materialul. În loc să se utilizeze secțiunea transversală circulară teoretică a straturilor, straturile după depunere posedă o secțiune transversală eliptică cu un efect de îngustare sau gâtuire intra-strat. Efectul de "gâtuire" este un fenomen de difuzie care depinde de timp și care atinge forma finală după ce modelul este complet solidificat, iar acest lucru a fost validat prin analiză optică la microscop. În plus, există și o anumită regiune de suprapunere între două straturi de filamente adiacente, cunoscută și sub numele de gâtuire inter-straturi, care a apărut din cauza difuziei celor două straturi de filamente la interfață dintre acestea. Din măsurătorile microscopice s-a observat o creștere generală a efectului de gâtuire odată cu grosimea stratului.

Forma modelului filamentelor individuale și regiunea de suprapunere observată la microscop sunt prezentate în figura 2.14. Cu ajutorul microscopului optic, s-a măsurat înălțimea filamentului (h) ca fiind de 0,160 mm, 0,227 mm și 0,296 mm pentru grosimea stratului de 0,178 mm, 0,254 mm și 0,330 mm. Celelalte dimensiuni, și anume lățimea filamentului (w) este măsurată ca fiind de 0,370 mm, 0,525 mm și 0,684 mm, iar gâtul dintre straturi (a) este de 0,07 mm, 0,10 mm și 0,13 mm pentru diferite grosimi de strat (0,178 mm, 0,254 mm și, respectiv, 0,330 mm). Astfel, dimensiunile, secțiunea transversală a modelului filamentelor și regiunea de gâtuire sunt măsurate cu ajutorul microscopului optic și utilizate pentru a genera un model geometric mai realist al pieselor FDM. Pentru a construi întregul model pentru epruveta de încercare la tracțiune, mai întâi se creează secțiunea transversală folosind dimensiunile obținute din măsurătorile microscopice și apoi se generează modele (în funcție de grosimea stratului și de unghiul filamentelor) pentru a pregăti un model dreptunghiular. În cele din urmă, modelul este decupat conform dimensiunilor exacte ale epruvetei de testare (a se vedea figura 2.13(b)). Pentru a reduce numărul de elemente și noduri și pentru a economisi timp de calcul, nu se modelează regiunile din zona de prindere în mașina de testare la tracțiune a epruvetei (reprezentate schematic în figura 2.13).

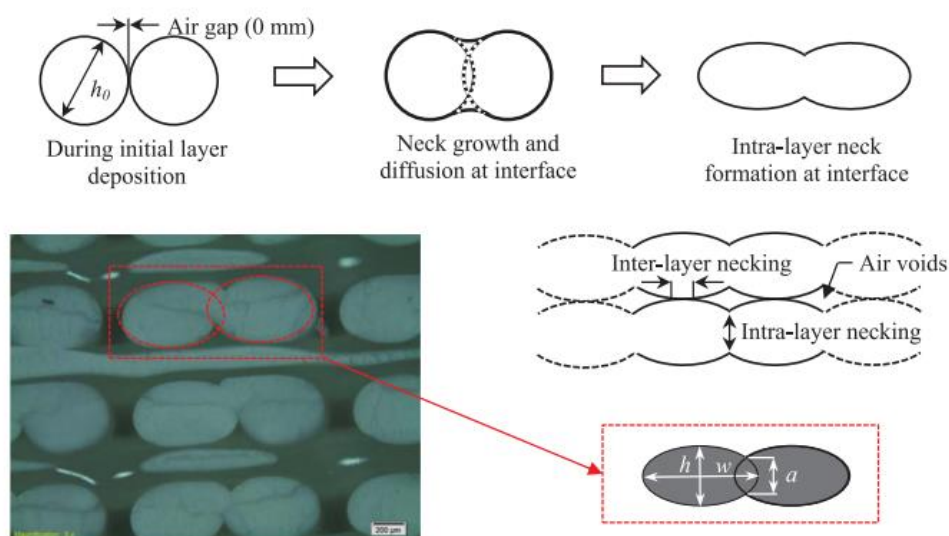


Figura 2.14 [48] Formarea gâtuirii între două straturi raster adiacente, unde a , w și h reprezintă lungimea regiunii de gâtuire, lățimea filamentului și înălțimea filamentului

Epruvetele FDM modelate sunt importate în software-ul ABAQUS pentru simularea cu elemente finite (FE) a deformării elasto-plastice sub sarcină de tracțiune uniaxială. Materialul utilizat pentru modelul FDM se presupune că este omogen și izotrop. Proprietățile materialului (relația tensiune-deformație specifică) a materialului modelului ABS sunt determinate din testul de tracțiune efectuat de Anton, et al. [50] pentru epruvete ABS solide. Comportamentul la tracțiune al probei FDM construite cu grosimi diferite ale stratului și/sau orientarea modelului filamentelor sunt diferite de comportamentul și proprietățile materialului de bază. Cu toate acestea, în timpul modelării prin FE, proprietatea materialului trebuie să fie definită, astfel încât valorile tensiune-deformație specifică ale probei ABS solide sunt luate în considerare din referința [50]. Celelalte proprietăți ale materialului utilizate pentru analiză sunt: densitatea $\rho=1,04 \text{ g/cm}^3$, modulul Young $E=2,2 \text{ GPa}$ și coeficientul lui Poisson $\nu=0,35$. În analiza FE explicită, rezultatele se pot abate de la cele reale dacă numărul incrementărilor nu este suficient și pot avea probleme de stabilitate a calculului, în timp ce analiza implicită oferă adesea rezultate mai bune pentru analiza elasto-plastică, deși necesită un timp și capacitate de calcul mai mare. O

dimensiune mai fină a discretizării îmbunătățește acuratețea dar necesită resurse de calcul mai mari, astfel încât modelul este discretizat cu elemente tetraedrice, menținând dimensiunea discretizării suficient de fină pentru ca fiecare filament să fie discretizat în mod corespunzător pentru diferite grosimi de strat și orientări și să conțină noduri și în direcția grosimii (după cum se arată în imaginea mărită a modelului discretizat din figura 2.15). În figura 2.15 este reprezentată structura discretizată a modelului.

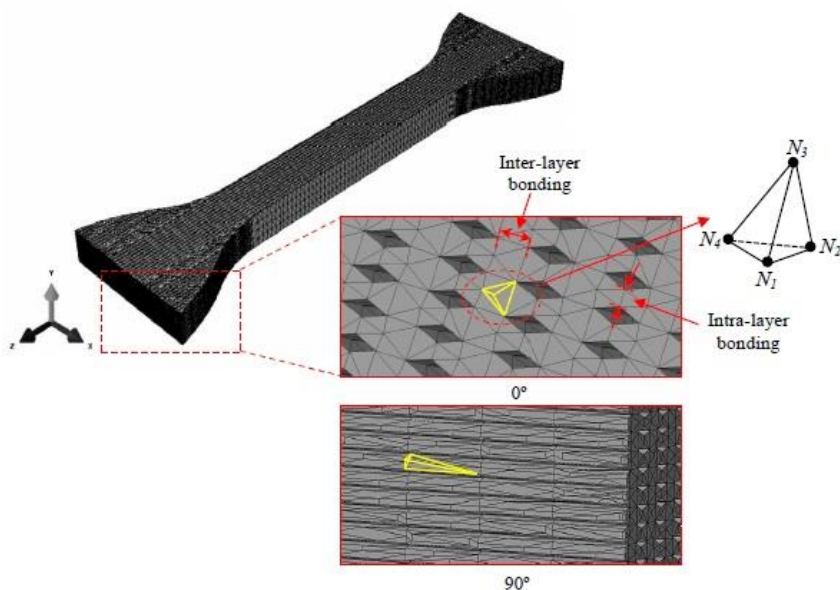


Figura 2.15 [48] Structura discretizată a epruvetei utilizând elemente finite tetraedrale tip C3D4.

Condițiile la limită aplicate modelului FE sunt prezentate în figura 2.16 și corespund celor experimentale din timpul încercărilor de tracțiune sub sarcină uniaxială: un capăt al modelului este menținut fix, iar sarcina și/sau deplasarea impusă se aplică la celălalt capăt (reprezentat schematic în figura 2.13(a)). Figura 2.16 prezintă condițiile la limită în care un capăt al epruvetei este încastrat prin constrângerea tuturor celor șase grade de libertate, $U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$. Deplasarea de-a lungul axei longitudinale (axa z în figura 2.16) este aplicată la celălalt capăt fiind blocate restul deplasărilor/rotirilor $U1 = U2 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$.

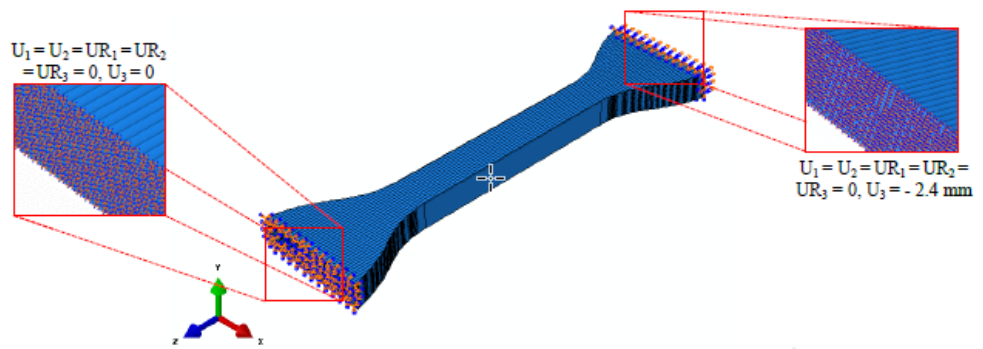
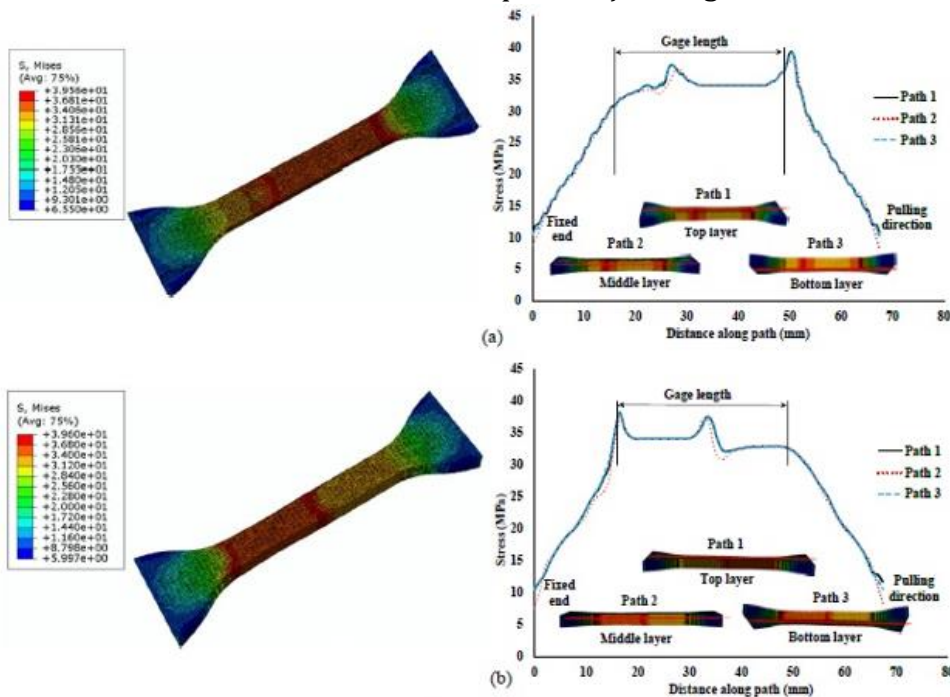


Figura 2.16 [48] Condiții la limită aplicate pentru epruveta de tracțiune FDM

Distribuția tensiunilor pe epruvete cu trei grosimi de strat diferite și unghiuri de imprimare ale filamentelor de 0° este prezentată în figura 2.16. Tensiunile maxime sunt de ordinul a 39 MPa și se poate observa o zonă de gâtuire (necking) în regiunea calibrată a epruvetei. Se observă o tensiune maximă mai mare pentru proba de 0,178 mm (39,2 MPa), care mai întâi scade odată cu creșterea grosimii stratului (38,2 MPa pentru grosimea stratului de 0,254 mm) și apoi crește din nou (38,8 MPa pentru grosimea stratului de 0,330 mm). Cu toate acestea, se observă o tensiune medie de 34 MPa în zona gâtuită și în jurul acestuia. Acest comportament arată că în epruveta cu unghi de înclinare de 0° , straturile sunt aliniate paralel cu direcția de încărcare (de-a lungul lungimii epruvetei). Pentru epruveta cu grosimea stratului de 0,178 mm numărul straturilor în direcția de încărcare este mai mare, iar sarcina este suportată de fiecare strat cu o valoare semnificativă de gâtuire individuale. Pentru grosimea stratului de 0,330 mm numărul straturilor este mai mic, dar fenomenul de gâtuire din interiorul stratului este mare, astfel încât se apropie mai mult de comportamentul unui material solid, rezultând astfel o rezistență mai mare a epruvetei. Efectul de gâtuire este vizibil și în analizele numerice. Variațiile tensiunilor de-a lungul lungimii epruvetei pentru toate probele cu diferite grosimi de strat sunt prezentate în figura 2.17. Variațiile tensiunilor au fost evaluate de-a lungul a trei trasee diferite (traseul 1, 2 și 3) pe suprafața superioară, mijlocie și inferioară a epruvetei. Pentru proba cu grosimea stratului de 0,178 sau 0,254 mm, tensiunea maximă și gâtuirea sunt observate aproape de capătul lungimii de măsurare, în timp ce pentru proba cu grosimea stratului de 0,330 mm

tensiunea maximă este distribuită pe aproape întreaga lungime de măsurare, iar gătuirea este observată pe ambele părți ale lungimii de măsurare.

Se observă o creștere a valorii tensiunii maxime odată cu creșterea grosimii stratului de la 0,254 mm la 0,330 mm. Această creștere a tensiunii la epruvetele cu grosimea stratului de 0,330 mm ar putea fi datorată creșterii regiunii de suprapunere și a rezistenței ulterioare a legăturii dintre straturile adiacente la grosimi mai mari ale stratului. În plus, odată cu creșterea grosimii stratului, numărul de straturi necesare pentru fabricarea epruvetei scade, ceea ce reduce și mai mult numărul de goluri de aer formate în zonele interstițiale, astfel încât capacitatea portantă a epruvetei crește. Aceste goluri de aer sunt sursa principală de inițiere și propagare a fisurilor în epruvetă, prin urmare, este de dorit să existe un număr mai mic de goluri de aer. Modelul de distribuție a tensiunilor pentru grosimea stratului de 0,330 mm arată, de asemenea, că tensiunea este distribuită mai uniform pe întreaga regiune calibrată datorită legăturii puternice dintre filamentele adiacente, în timp ce în cazul probei cu grosimea stratului de 0,178 sau 0,254 mm, tensiunea este mai mare spre sfârșitul regiunii calibrate.



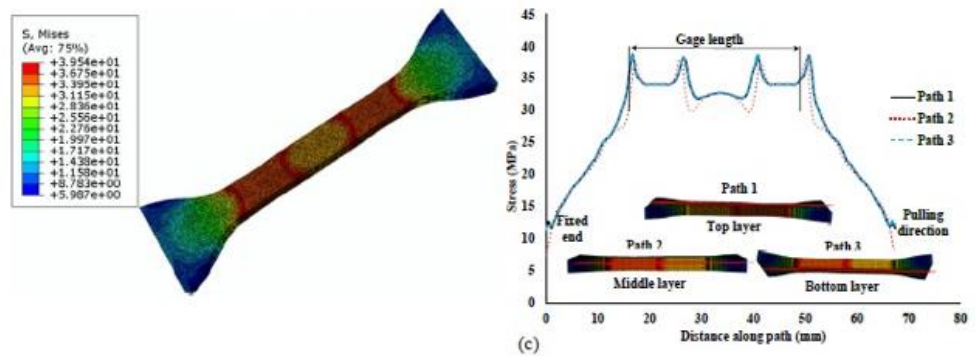


Figura 2.17 [48] Modul de distribuție al tensiunilor pentru epruveta având unghiul de înclinare de 0° cu grosimea stratului (a) 0,178 mm, (b) 0,254 mm, (c) 0,330 mm

Metoda prezentată de de Garg, A. și Bhattacharya, A. [48], conduce la unele concluzii cu privire la relația dintre setările procesului de fabricație (înălțimea filamentului și orientarea rasterului) și proprietățile mecanice ale materialului rezultat. Ambele metode studiate (Croccolo [21] - Garg A. [48]), conțin informații valoroase în ceea ce privește înțelegerea mezo-structurii materialelor imprimate prin FDM. Există câteva neajunsuri ale acestei metode în cazul aplicabilității pentru modele mai detaliate, de exemplu, dacă modelul are o înveliitoare (shell) sau dacă rata de umplere este atât de mică încât filamentele de umplere nici măcar nu se ating între ele. De asemenea, în cazul pieselor cu modele ale filamentelor, aceste metode nu ar putea prezice comportamentul mecanic al materialelor FDM. Din acest punct de vedere, se va propune o nouă metodă de predicție care să țină cont de informațiile valoroase din cercetările menționate mai sus. Acest nou model de predicție ar trebui să gestioneze un nivel mai ridicat de complexitate geometrică și ar trebui să fie capabil să facă față schimbărilor atât în modelul de umplere, cât și în rata de umplere.

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

Principalul obiectiv al acestui capitol este de a utiliza testele de tracțiune convenționale pentru a analiza proprietățile de tracțiune ale epruvetelor create cu o imprimantă 3D FDM obișnuită. Al doilea obiectiv este de a evalua efectul parametrilor tehnologici (setările software-ului de imprimare și de preprocesare) asupra proprietăților mecanice ale probelor imprimate. Cei mai importanți parametri care trebuie luați în considerare sunt: diferitele orientări și modele de imprimare, rata de umplere. Termenul de "Infill" se referă la structura internă imprimată a unui obiect. Programul de feliere specifică modelul și procentul de extrudare. Principalii parametri de proces care influențează rezultatul imprimării 3D FDM (pentru același material) sunt:

a) Rata de umplere. Rata de umplere, exprimată de obicei în procente [%], este responsabilă de raportul material-aer, unde un procent ridicat înseamnă că se depune mai mult material - în consecință, înseamnă mai puține goluri de aer în piesă. Practic, este responsabilă pentru densitatea pieselor imprimate.

b) Înălțimea și lățimea stratului. Aceasta se referă la dimensiunile unei singure filament depus. Atât înălțimea cât și lățimea stratului depind de tipul și dimensiunile duzei imprimantei. Dimensiunile unui singur strat de filament depus nu pot fi mai mari decât diametrul duzei.

c) Numărul de învelișuri (contururi). Învelișurile sunt straturile exterioare definite ale pieselor imprimate. Cochilia unei piesei este de obicei formată din două până la patru straturi care întăresc partea exterioară a pieselor și nu este influențată de setările modelului de umplere sau ale ratei de umplere.

d) Orientare de construcție (Build orientation), cunoscută și sub denumirea de orientare raster. Poziția piesei în raport cu axa principală (X) a platformei de imprimare se numește orientare de construcție α .

e) Modelul de umplere (Infill pattern). Atunci când filamentul este depus în interiorul piesei imprimate (între straturile de înveliș), acesta este un model repetitiv, care reprezintă nucleul piesei. Modelul de umplere poate fi variabil și se poate schimba în funcție de procentul de umplere (1-100%). Forma tipărită a modelului nu se va schimba odată cu creșterea procentului de umplere, ci doar densitatea va varia. Software-ul de procesare 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

Pentru a investiga impactul parametrilor menționați mai sus asupra caracteristicilor fizice ale pieselor tipărite FDM 3D, au fost tipărite probe de tracțiune. Un model geometric este creat cu ajutorul unui instrument de modelare CAD și transpus într-un fișier stereolitografic (STL) pentru a începe procesul de imprimare FDM. Pentru crearea fișierelor STL a fost utilizat software-ul CAD Solid Works 2016. Geometria obținută a fost apoi transformată în G-code de către software-ul de procesare Simplify3D (V3.1.0.) Tabelul 3.1 enumeră specificațiile de imprimare utilizate pentru crearea probei de testare. Pentru crearea probelor FDM s-a utilizat o imprimantă de birou Wanhao Duplicator i3. Materialul utilizat pentru prepararea epruvetei a fost filamentul de acrilonitril butadien-stiren ABS (Plasty Mladeč, Republica Cehă), un material utilizat în mod obișnuit pentru piesele fabricate prin FDM. Proprietățile sale mecanice, conform producătorului, sunt: modulul de elasticitate la tracțiune $E_f=2140$ MPa, rezistența la tracțiune $\sigma_f= 43$ MPa și deformația specifică la tracțiune $\epsilon_f= 2,7$ %.

Tabelul 3.1 Parametrii de imprimare

Parametri FDM		Parametrii de imprimare a epruvetei	
Parametru	Valoare	Parametrii de imprimare	
Diametrul duzei	0.75 mm	Înălțimea stratului (mm)	0.2
Înălțimea stratului primar	0.2 mm	Rata de umplere (%)	20-100%
Nr. de contururi	1	Oriniere de umplere (grade)	0-30-45-90
Viteza de imprimare	30 mm/s	Numărul de straturi de umplură	12
Temperatura duzei	250 °C±5	Grosimea carcusei	0.4
Temp. platformei de construcție	100 °C	Numărul de carcuse	3
		Numărul de straturi de baza	4
		Numărul de straturi de închidere	4
		Numărul de straturi solide	8
		Nr. total de straturi	20

Modelul geometric al epruvetelor imprimate 3D este realizat în conformitate cu ISO 527-2-2012 (Materiale plastice. Determinarea proprietăților de tracțiune Partea 2: Condiții de încercare pentru materiale plastice de turnare și extrudare), după cum se prezintă schematic în figura 3.1. Testele de tracțiune uniaxială au fost efectuate pentru a investiga proprietățile mecanice a materialului imprimat 3D. Epruvetele sunt testate într-o mașină universală de încercări de tip INSTRON 3366, cu o capacitate de 10 kN. Viteza de încărcare a acestei mașini este de 1 mm/min, iar testul se oprește odată ce epruvetele s-au rupt. Pentru măsurarea deformației specifice s-a utilizat un extensometru uniaxial. Calculul tensiunilor se face pe baza secțiunii transversale aparente a epruvetei care nu ține cont de golurile de aer existente în interiorul epruvetelor imprimate.

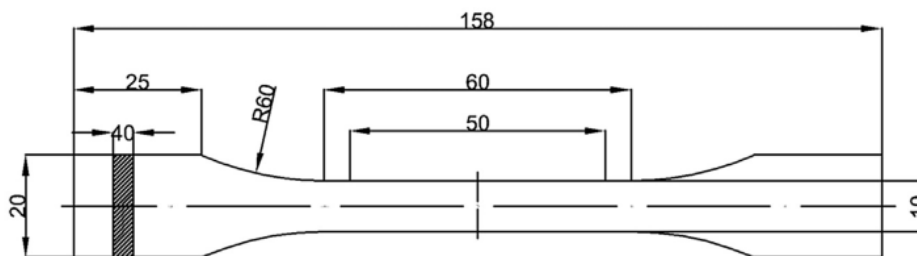


Figura 3.1 Dimensiunile epruvetei de tracțiune

Au fost fabricate trei tipuri diferite de epruvete prin variația următorilor parametri:

a) *Rata de umplere*. Rata de umplere arată cât de mult material există în modelul imprimat și reprezintă densitatea modelului. Pentru

acest studiu au fost luate în considerare valorile de 20%, 40%, 60%, 80% și 100%. Spațiul de aer exact dintre filamente extrudate nu poate fi determinat, piesele pot fi create pline sau goale prin ajustarea procentului de umplere, cu 100% fiind considerate complet pline.

b) *Modelul de umplere*. Atunci când se utilizează orice procent de umplere, se folosește un model pentru a crea o structură puternică și durabilă în interiorul piesei imprimate. Există mai multe opțiuni diferite de modele de umplere, fiecare cu avantaje și compromisuri între timpul de imprimare, utilizarea materialului sau rezistența piesei obținute. De obicei, software-ul de imprimare 3D oferă utilizatorilor posibilitatea de a selecta modele de umplutură. De exemplu, Simplify3D pune la dispoziția utilizatorilor șase opțiuni de modele de umplere: fagure rapid (Fast Honeycomb), fagure complet (Full Honeycomb), ondulatoriu (Wiggle), triunghiular, grilă (Grid) și rectiliniu. Pentru această lucrare au fost tipărite epruvete cu umplutură 100% și următoarele modele (figura 3.2), rectiliniu 0° și 90°, grilă 0°-90° și 45°-45°, fagure rapid (fast honeycomb), fagure complet (full honeycomb), triunghiular (60°) și ondulatoriu (Wiggle).

c) *Orientarea filamentelor*. Unghiul de orientare α se definește ca fiind unghiul dintre axa principală a specimenului și axa X a platformei de imprimare. Epruvetele sunt tipărite prin plasarea în diferite unghiuri (α), inclusiv 0°, 30°, 45° și 90° (figura 3.3).

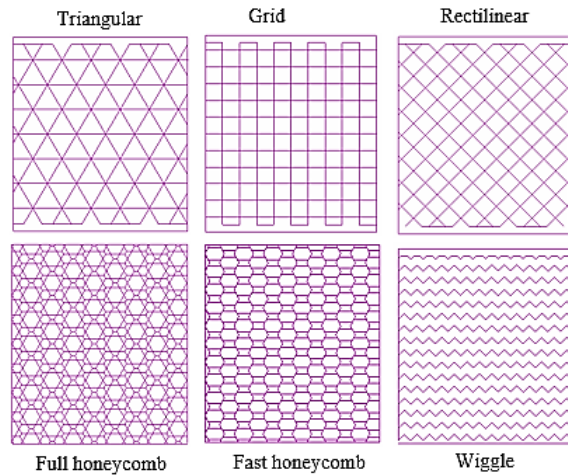


Figura 3.2 Modelul de umplere: triunghiular, grilă,rectiliniu, fagure complet, fagure rapid și ondulatoriu

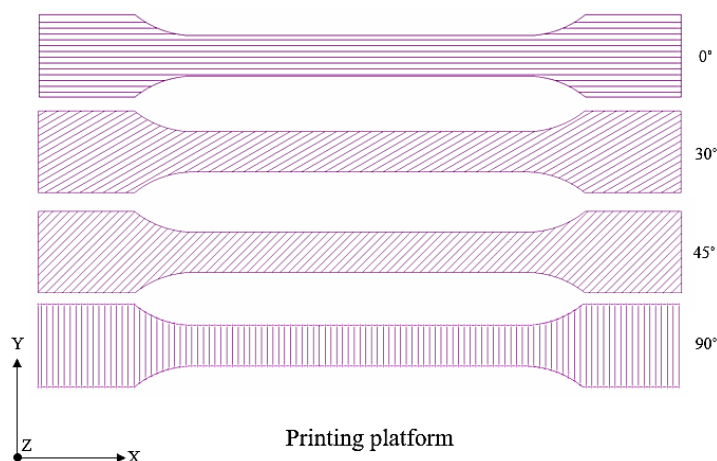
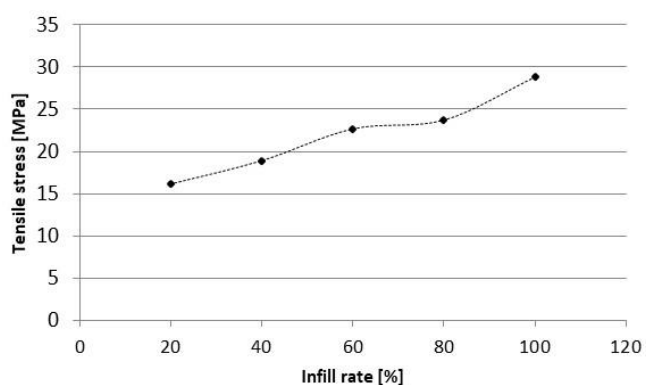
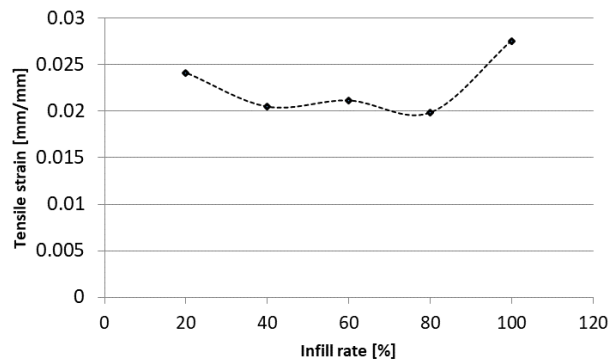


Figura 3.3 Orientarea filamentelor pentru o epruveta imprimată 3D

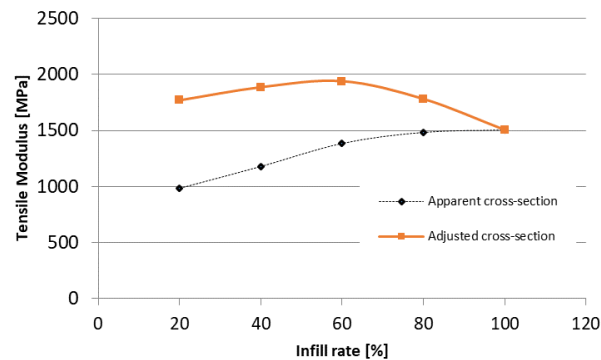
Pentru a determina proprietățile mecanice ale epruvetelor tipărite 3D și variabilitatea acestor proprietăți atunci când sunt utilizați diferiți parametri de imprimare, acest studiu a analizat relația dintre rata de umplere, modelul de umplere și orientarea filamentelor (rasterului) cu rezistența la tracțiune, deformarea specifică corespunzătoare rezistenței la tracțiune și modulul lui Young. Un set complet de 5 epruvete din fiecare dintre combinațiile variabilelor de mai sus a fost imprimat și supus testului de tracțiune. Influența ratei de umplere a fost studiată pe epruvete umplute cu o orientare rectilinie de 0° a modelului față de direcția de tracțiune. În figura 3.4 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



a)



b)



c)

Figura 3.4 Variația cu rata de umplere: a) rezistența la tracțiune, b) deformația specifică la tracțiune pentru tensiunea maximă și c) modulul de elasticitate longitudinal

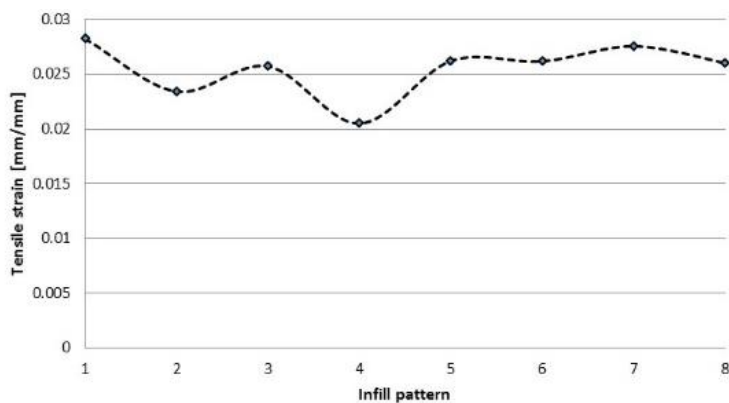
Așa cum era de așteptat, rezistența epruvetelor crește odată cu rata de umplere, de la 16,1 MPa la 20% la 28,9 MPa la 100%, evoluția nefiind una liniară. Un rezultat interesant al investigațiilor experimentale a fost obținut pentru alungirea la solicitarea maximă care este în jur de 2,2%, cu excepția valorii pentru 100% umplere care este în jur de 2,7%, valoarea de alungire a filamentului ABS. Modulul lui Young E aparent a crescut, de asemenea, odată cu procentajul de umplere, de la 982 MPa la 20% la 1503 MPa la 100%, creșterea pe punct procentual de umplere se modifică, de asemenea, neliniar, cu cât procentajul de umplere este mai mare, cu atât creșterea este mai mică (figura 3.4 c). Comportamentul modulului lui Young se datorează formulei aproximative de calcul al ariei reale a secțiunii transversale.

Deoarece epruveta, cu excepția ratei de umplere de 100%, este

poroasă, modulul E poate fi calculat luând în considerare secțiunea transversală aparentă (ignorând golul din interiorul piesei) sau calculul poate fi ajustat prin înmulțirea ariei secțiunii transversale cu rata de umplere. În acest caz, modulul E ajustat poate fi obținut în mod similar cu regula amestecurilor, prin înmulțirea modulului aparent cu (1-Rata_umplere).

$$E_{ajustat} = (1 - Rata_umplere)E_{aparent} \quad (3.1)$$

Modulul $E_{ajustat}$ ar trebui să aibă un comportament relativ constant în jurul valorii obținute pentru filamentul din ABS. Chiar dacă unele epruvete au fost tipărite cu o configurație de 100% rata de umplere (infill), golurile de aer pozitive sau negative reale ar trebui să fie determinate sau estimate mai precis. Ratele de umplere din specificațiile imprimantei se referă doar la partea interioară a specimenului și nu iau în considerare numărul de contururi depuse în jurul marginii componente. Numărul de contururi și modelul acestora nu se modifică în funcție de rata de umplere, pentru rate de umplere mai mici, conturul exterior are o contribuție semnificativă la suprafață, care se reflectă în valorile modulului E. 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 (wiggle). În figura 3.5 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 și cea calculată. Se poate observa o creștere a rezistenței la tracțiune pentru modelele 0°, 90° și wiggle.



a)

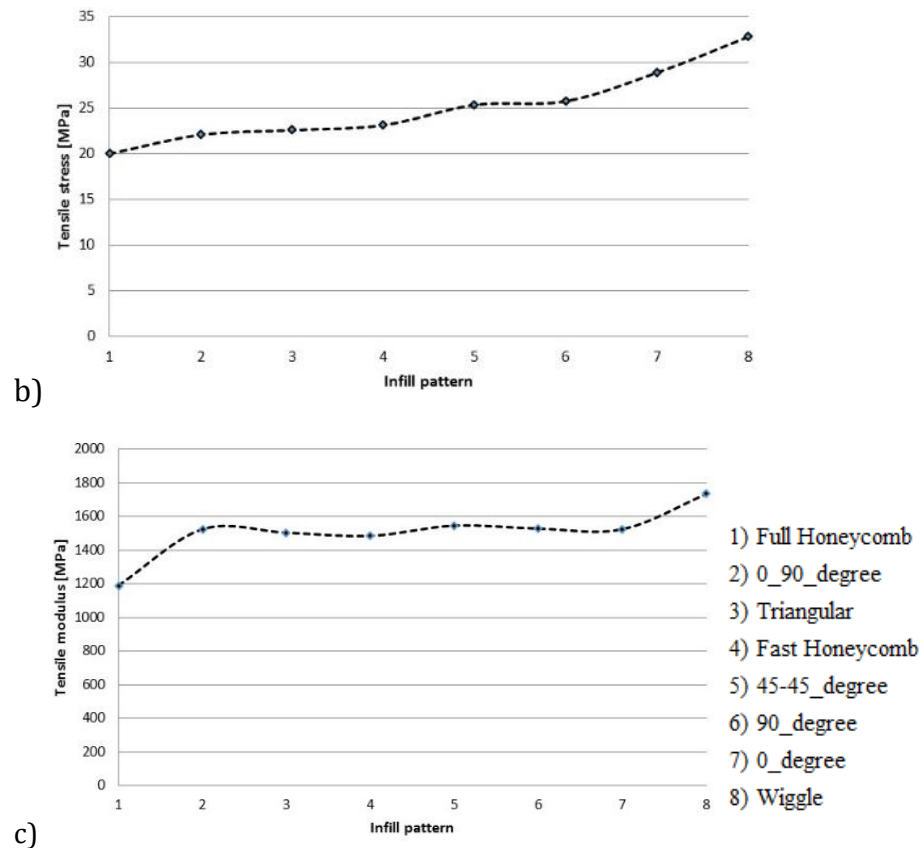


Figura 3.5 Variația în funcție de modelul de umplere pentru: a) rezistența la tracțiune, b) deformația specifică la tracțiune la tensiune maximă c) modulul lui Young

Triunghiular, hexagonal, grila 0°-90° și 45°-45° sunt toate comparabile din punct de vedere al rezistenței și al modulului de elasticitate. Alungirea la rupere este cuprinsă între 2% și 2,8%, cu cea mai mică valoare pentru modelul de fagure rapid.

Specimenele cu o rată de umplere de 100%, orientarea rectilinie a modelului au fost tipărite prin plasarea lor în diferite unghiuri în jurul axei X a platformei de imprimare (figura 3.3), inclusiv 0°, 30°, 45° și 90°. În figura 3.6 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. Modulul de elasticitate la tracțiune aparent are o valoare mai constantă în jurul valorii de 1500 MPa.

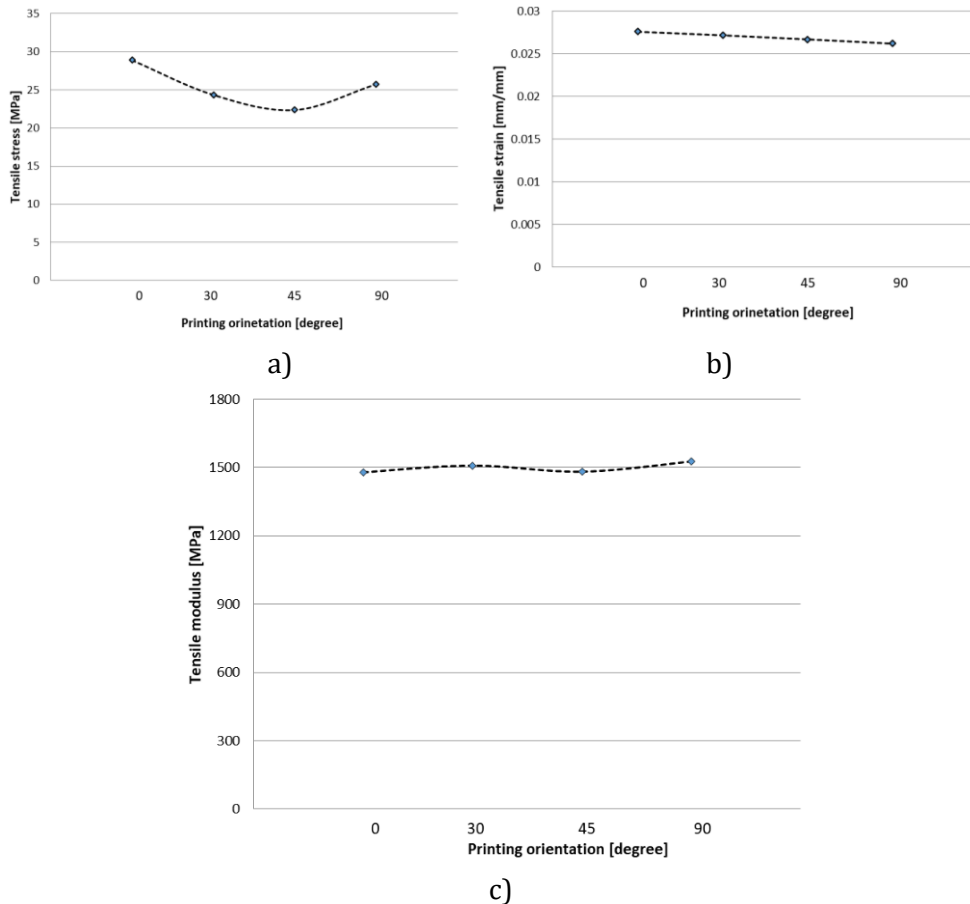


Figura 3.6 Variația în funcție de orientarea rasterului pentru: a) rezistența la tracțiune, b) deformația specifică la tracțiune la tensiunea maximă și c) modulul de elasticitate longitudinal

Proprietățile mecanice ale epruvetelor din ABS fabricate prin tehnologia FDM sunt influențate în mod semnificativ nu numai de ratele de umplere, așa cum era de așteptat, ci și de tiparul imprimat al diferitelor straturi și de orientarea acestora. Chiar dacă unele epruvete au fost imprimate cu o setare de 100% a ratei de umplere (infill rate), spațiile de aer pozitive sau negative reale ar trebui să fie determinate sau estimate mai precis. Efectul geometriei golurilor asupra tensiunilor și deformațiilor locale va afecta comportamentul mecanic la macrosală al materialului. Modulul E aparent are o creștere odată cu procentul de umplere, creșterea pe punct procentual de umplere se modifică neliniar, cu cât ratele de umplere sunt mai mari, cu atât creșterea este mai mică. Modulul E ajustat care ia în considerare densitatea golurilor poate fi

obținut în mod similar cu regula amestecurilor și ar trebui să aibă un comportament mai constant în jurul valorii filamentului ABS. Diferența poate fi explicată datorită formulei aproximative de calcul a ariei reale a secțiunii transversale, care nu ia în considerare numărul de contururi depuse în jurul marginii componentei. Încercările de tracțiune indică faptul că rezistențele finale sunt cele mai mari pentru modelele de tip "wiggles", 90° și 0° în ordine descrescătoare. Orientarea rasterului de-a lungul direcției de imprimare conduce la cea mai mare rezistență la tracțiune.

Rezultatele sunt utile pentru a alege viitoarele modele analitice sau computaționale ale rezistenței sau rigidității pieselor FDM în funcție de modelele de imprimare, de densitatea golurilor și de orientarea rasterului. Diferite densități de goluri, modele, orientări și combinații ale acestora pot fi utilizate pentru a produce piese care îndeplinesc o anumită cerință privind rigiditatea sau o rezistență necesară. O variație locală a acestor parametri poate duce la o structură optimizată care nu presupune modificări geometrice, ci doar ajustări ale parametrilor de imprimare.

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.

Parametri de intrare ai modelului analitic utilizați în modelare au fost:

1. Parametri geometrici

- Lățimea stratului, $b = 0,5 \text{ mm}$
- Grosimea stratului, $h = 0,25 \text{ mm}$
- Dimensiunile secțiunii transversale a epruvetei: lățimea, $B = 13 \text{ mm}$; grosimea $H = 3,25 \text{ mm}$
- Aria secțiunii transversale a epruvetei: $42,25 \text{ mm}^2$

- Numărul de contururi: $n_c=1$
- Numărul de straturi: $n_l=13$
- Numarul filamentelor longitudinale: $N_c=26$
- Lățimea secțiunii care conține filamente înclinate: $B'=12$

2. Caracteristicile de material considerând doar filamentele longitudinale (similare celor din conturul (învelișului) epruvetelor).

- Rezistența la tracțiune a conturului (învelișului): $US_{ac}=2,538$ MPa
- Rezistența la tracțiune a epruvetei: $US_b=33$ MPa
- Modulul de elasticitate a conturului (învelișului): $E_{ac}=184.61$ MPa
- Modulul de elasticitate al epruvetei: $E_b=2400$ MPa (considerat identic cu al materialului ABS)

3. Modelul analitic al filamentelor înclinate (Figura 2.11)

- Lungimea $L=11,999$ mm (Ecuția 2.19)
- Unghiul $\alpha=0,78539$ rad
- Lungimea $l(0)=16,97$ mm

Valori ale forței și deplasărilor calculate pentru filamentele longitudinale:

- Rigiditatea $k_l=25$ Nmm (Ecuția 2.21)
Forța preluată de un strat: $F_l=8,28$ N (Ecuția 2.22)
- Valoarea determinată experimental a deformației specifice:
 $\varepsilon=0,0138$ mm/mm
- Deplasarea aplicată calculată: $v=0,1656$ mm

Valori ale forței și deplasărilor calculate pentru filamentele înclinate cu lungime maximă:

- Forța aplicată unui filament înclinat: $F_{\alpha(0)}=1,468$ N (Ecuția 2.28)

Valori pentru filamentele înclinate cu lungime redusă :

- Numărul de filamente înclinate: $n_\alpha=16,97$ (Ecuția 2.29)
- Lungimea filamentelor înclinate este diferită pentru fiecare din cele 16 filamente, fiind prezentată în Tabelul 3.2.
- Forța preluată de un filament înclinat: $F_{\alpha(i)}=24,92$ N

Tabelul 3.2 Lungimea filamentelor înclinate

Numărul filamentului înclinat i	Lungimea filamentului înclinat $l(i)$
1	15,97
2	14,97
3	13,97
4	12,97
5	11,97
6	10,97
7	9,97
8	8,97
9	7,97
10	6,97
11	5,97
12	4,97
13	3,97
14	2,97
15	1,97
16	0,97

Calculul forței de adeziune între filamente :

- Constanta de adeziune: $C_{ad}=200$ N/mm
- Alungirea axială a filamentului cu lungime maximă: $\Delta l(0)=0,1175$ mm
- Alungirea axială a filamentului cu lungime redusă: $\Delta l(i)$
- Forța de adeziune între filamentele înclinate: $F_{ad(i)}=2,769$ N
- Forța totală de adeziune între filamentele înclinate $F_{ad}=44,31$ N

Tabelul 3.3 Alungirea filamentelor înclinate

Numărul filamentului înclinat i	Alungirea axială $\Delta l(i)$ (mm)
1	0,110574
2	0,103651
3	0,096727
4	0,089804
5	0,08288
6	0,075956
7	0,069033
8	0,062109
9	0,055185
10	0,048262
11	0,041338
12	0,034414
13	0,027491
14	0,020567
15	0,013643
16	0,006720

Rezultate :

- Forța verticală totală, $F_a=1026,80$ N
- Tensiunea normală calculată analitic: $\sigma_{calc}=24,303$ MPa

Comparând rezultatele tensiunii normale maxime cu cele măsurate experimental pentru epruvete având rata de umplere 100% și modelul de umplere de tip grid $+45^\circ-45^\circ$ 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 [21]. Modelul analitic însă este greu de aplicat altor modele de umplere iar rezultatele obținute considerând unghiul de înclinare diferit conduc la abateri de calcul care nu sunt de neglijat. De asemenea întregul model se bazează pe introducerea unor coeficienți de corecție a

forței de adeziune, determinarea experimentală a acesteia fiind necesară pentru acuratețea modelului. Modificarea materialului, influența parametrilor de proces cum ar fi viteza de imprimare, temperatura duzei de imprimare, condițiile de răcire a modelului imprimat sunt factori care influențează forțele de adeziune între filamente și implicit rezultatele modelului analitic.

Modelele analitice bazate pe calcul analitic al materialelor compozite au un caracter mai general, determinarea proprietăților unor lamine cu diferite modele de umplere conducând la necesitatea evaluării forțelor de adeziune dintre filamente. Luând în considerare toate aceste impedimente legate de complexitatea modelului de umplere, existența învelișului având structură diferită și influență semnificativă asupra comportamentului mecanic al elementului imprimat, necesitatea introducerii unor coeficienți de corecție în calculul forțelor de adeziune, lucrarea a căutat rezolvarea problemei prin metode numerice sau hibride (numerice și experimentale), metode ce vor fi expuse în paragrafele viitoare.

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

În ciuda numeroaselor avantaje, piesele create prin tehnica FDM prezintă proprietăți mecanice inferioare, din cauza porozității și anizotropiei suplimentare cauzate de natura procesului de fabricație. În acest sens, atât porozitatea, cât și anizotropia mecanică depind în mare măsură de parametrii de imprimare [51-58]. Prin urmare, influența parametrilor de imprimare poate fi utilizată pentru a personaliza proprietățile mecanice ale componentelor imprimate. Tehnica FDM are potențialul de a produce piese cu proprietăți controlate local [24, 59-61] prin modificarea densității de depunere (raportul de umplere) și a orientării (modelul de umplere).

Rezistența, duritatea și precizia geometrică a pieselor fabricate depind de diverși parametri de proces, cum ar fi raportul de umplere, modelul de umplere, grosimea stratului, înălțimea stratului și setările mașinii [48, 62-65]. Utilizarea setărilor optime ale parametrilor de proces poate îmbunătăți considerabil rezistența mecanică, calitatea

suprafeței și precizia geometrică [28, 59, 62, 66-68]. Modelarea pieselor FDM implică, de asemenea, modelare analitică; unele tehnici care sunt utilizate în modelele de simulare sunt prezentate în literatura de specialitate [21, 41].

Un factor important pentru a obține un model fiabil și o evaluare precisă a rezistenței pieselor fabricate prin modelare prin extrudare termoplastică este estimarea corectă a legăturilor dintre filamentele din cadrul unui strat (legături intra-strat) și a legăturilor formate între filamentele celor două straturi succesive (denumite "legături între straturi"). Calitatea legăturii dintre filamente în piesele FDM este un aspect important în determinarea proprietăților mecanice ale pieselor [41, 69].

Analiza mezo-structurii și a densității de goluri este necesară pentru calculul teoretic al rezistenței și al modulului E al structurilor imprimate. De asemenea, analiza cu elemente finite poate fi utilizată pentru a anticipa comportamentul mecanic al prototipurilor FDM [34, 48, 70, 71]. Metoda de analiză propusă de Garg et al. [48] utilizează o metodă FE în care procesul de modelare reproduce cu acuratețe gătuirea reală a filamentelor între straturi și în intra-straturi în timpul difuzării straturilor de raster pe parcursul procesului de imprimare.

Această 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 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 rezistența la tracțiune 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 rezistența la tracțiune.

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

După ce s-a studiat cu atenție metoda dezvoltată de Garg et al. [48], 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%. Metoda de analiză propusă în [48] nu ar fi fezabilă pentru a determina adevărata arie a secțiunii transversale a pieselor imprimate, deoarece este un model simplificat, aplicabil numai dacă procentul de umplere este ridicat, de exemplu, aproape de 100% și nu ia în considerare efectul învelișului asupra comportamentului mecanic al pieselor imprimate. 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 specișenele tipărite 3D. În figura 3.7 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). Fiecare strat al epruvetei este construit în planul x-y printr-o serie de linii paralele cu axa x prin mișcarea duzei. Secțiunea transversală este situată în planul y-z, unde axele x, y și z sunt definite de ISO/ASTM 52900: 2015.

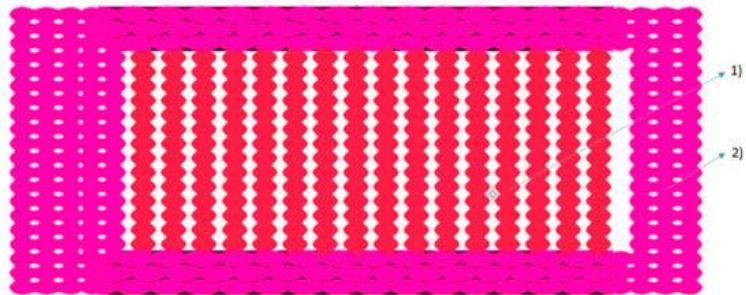


Figura 3.7 Secțiunea de umplere (1) și secțiunea de înveliș (2) a unei epruvete de tracțiune tip ISO_5271A imprimată 3D

Pentru a identifica aria reală a materialului din secțiunea transversală a unei epruvete imprimate, este necesar un model nou și îmbunătățit. În acest studiu, a fost analizată eficacitatea unei metode geometrice și a fost concepută o metodologie pentru a putea construi un model geometric foarte realist al pieselor imprimate, în care raportul

intre material și goluri este clar identificabil într-un model virtual. Acest model geometric ar trebui, de asemenea, 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. Această metodă ne permite să examinăm îndeaproape secțiunea de înveliș (shell) și secțiunea de umplere (infill) a pieselor imprimate. Secțiunea transversală a epruvetei de tracțiune tipărite este prezentată în figura 3.7.

În scopul de a determina aria reală a secțiunii transversale a epruvetelor cu diferite rate de umplere, a fost utilizată o metodă geometrică. Pentru a crea un model 3D realist al epruvetelor, au fost utilizate codurile G ale epruvetelor imprimate pentru a construi modelul geometric. Pe baza codului G, care a fost utilizat pentru imprimarea epruvetelor, a fost construit un model geometric în ANSA 17.1.2 (BetaCae, Kato Scholari, Grecia). A fost creat un script plug-in în limbajul Beta Scripting, care citește informațiile din codul G și transformă mișcarea extruderului în linii geometrice. Dimensiunile liniilor geometrice - care reprezintă fibrele imprimate - sunt identice cu înălțimea stratului primar de 0,2 mm; lățimea este considerată lățimea extruderului la 0,35 mm, așa cum este prezentat în figura 3.8, iar aceste dimensiuni sunt utilizate pentru a determina aria reală a secțiunii transversale a epruvetelor, utilizând planuri de tăiere transversale la direcția longitudinală a fibrei imprimate, prezentate în figura 3.9.

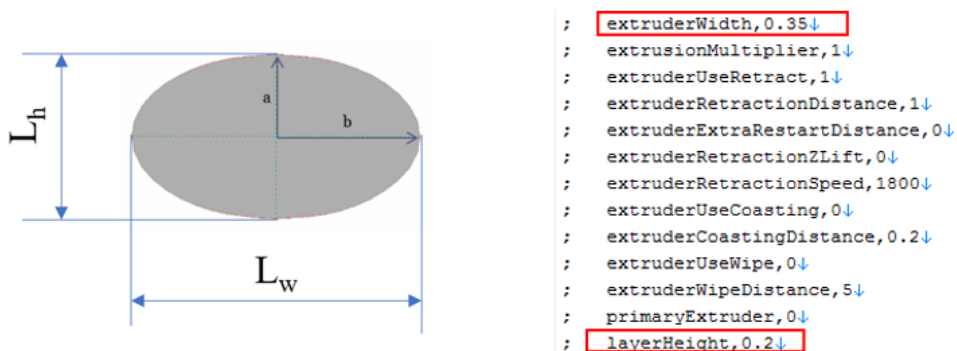


Figura 3.8 Geometria filamentelor tipărite: (a) Segment din codul G al imprimantei; (b) Dimensiunile teoretice ale unei fibre (L_w și L_h corespund lățimii extruderului și înălțimii stratului)

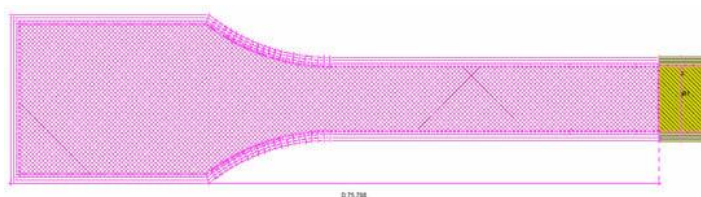


Figura 3.9 Poziția secțiunii transversale analizate în raport cu marginea epruvetei

În conformitate cu codul G înălțimea filamentului este considerată înălțimea stratului primar ($L_h = 2a$); lățimea este considerată egală cu lățimea extruderului ($L_w = 2b$). Suprafața teoretică a unui singur filament poate fi calculată acum folosind formula $A = \pi ab$ (a și b din figura 3.8). Pentru extragerea ariei secțiunii transversale a unei epruvete imprimare se va utiliza o metodă geometrică descrisă în continuare.

Epruveta de tracțiune virtuală (CAD) este construită în ANSA în conformitate cu procedeul descris mai sus. Inițial au fost studiate cinci cazuri de epruvete de tracțiune realizate conform standardului ISO_527 1A, în care rata de umplere a variat de la 20% la 100%, direcția de imprimare a fost menținută aceeași, 0 grade în funcție de axele longitudinale ale epruvetelor. În toate cele cinci cazuri, extragerea secțiunii transversale a fost efectuată în același loc, adică la distanța de 75,708 mm de la marginea epruvetei, așa cum se arată în figura 3.9. Extragerea suprafeței secțiunii transversale pentru epruvetele de tracțiune a fost efectuată în ANSA, geometria epruvetei de tracțiune fiind prezentată în figura 3.10a. Reprezentarea geometrică a filamentelor este prezentată în figura 3.10b. Primul pas a fost definirea unei proprietăți diferite pentru fața care a fost utilizată pentru a intersecta proba; aceasta a fost denumită Cutting Plane (Plan de tăiere). Funcția File-Intersect a fost utilizată în ANSA pentru a intersecta epruveta cu planul de tăiere, iar secțiunii transversale rezultate i s-a atribuit o proprietate diferită denumită C_P_CrossSection, așa cum este reprezentată în figura 3.10c. Suprafața proprietății C_P_CrossSection poate fi măsurată cu ajutorul funcției D.Util; rezultatul este prezentat în figura 3.10d. Reprezentarea filamentului ca o eclipsă perfectă este o ipoteză teoretică. În realitate, materialul topit este ușor compactat (aplatizat), iar secțiunile transversale ale filamentelor sunt neregulate. Pentru a verifica metoda de determinare a suprafeței cu ajutorul unui model CAD în ANSA, este necesar un studiu microscopic al specimenelor imprimate. Cinci seturi

de epruvete de tracțiune au fost tipărite folosind aceleași coduri G ca în construcția modelului CAD în ANSA, iar pentru a determina forma și dimensiunea reală a filamentelor secțiunea transversală rezultată a fost analizată la microscop.

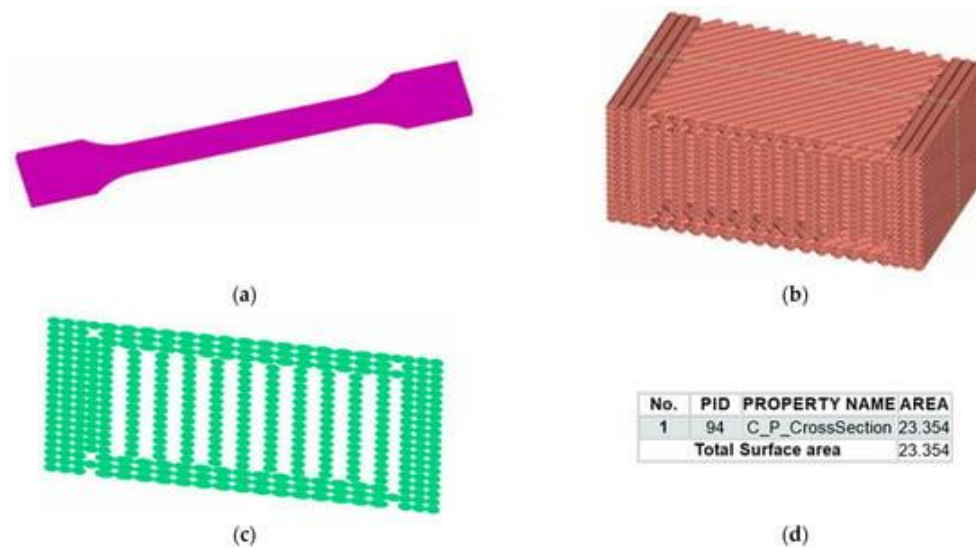


Figura 3.10 Modelarea geometrică și extragerea secțiunii transversale în programul ANSA: (a) geometria epruvetei de tracțiune; (b) reprezentarea geometrică a filamentelor; (c) secțiunea transversală a modelului geometric; (d) rezultatul calculului ariei pentru secțiunea transversală

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 3.11a. 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 3.11 b și subliniat în [21, 24].

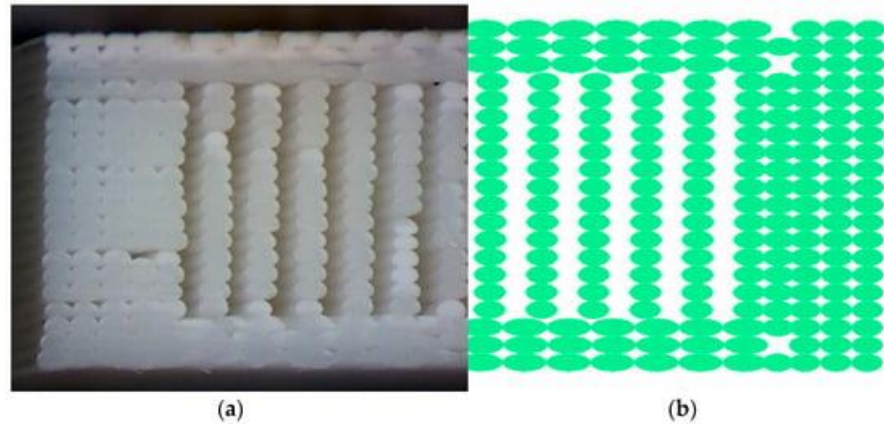


Figura 3.11 Compararea secțiunii transversale a structurii fibrelor între o epruvetă la tracțiune imprimată 3D și modelul geometric în ANSA: (a) epruvetă imprimată (vedere la microscop); (b) model geometric

Prin urmare, este necesară o metodă de calcul modificată atunci când se ia în considerare efectul de aplatizare care poate fi măsurat experimental. Acest efect de aplatizare duce la formarea unei suprafețe de contact mai mari între filamente, cunoscută sub numele de gâtuire intra și inter-straturi, așa cum este prezentat în figura 3.12.

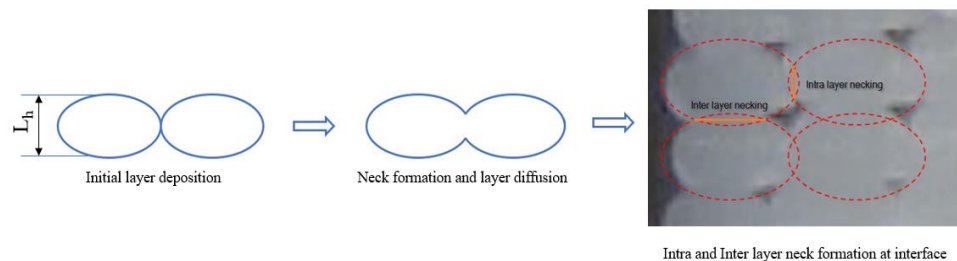


Figura 3.12. Formarea gâtuirii între filamente adiacente

În cazul în care se utilizează doar direcția de imprimare sau modelul de umplere pentru a construi o piesă sau un eșantion, determinarea suprafeței reale a secțiunii transversale este destul de ușoară, având în vedere că zonele de inter-straturi și intra straturi în interiorul acestora pot fi determinate experimental prin măsurători

Ținând cont de valorile gâtuirii între straturi, de suprapunerile orizontale și verticale (gâtuirea intra-strat) determinate experimental, a fost creat un model geometric actualizat în care filamentele sunt în continuare reprezentate ca un elipsoid perfect, dar suprafața de contact dintre straturi a fost modificată pentru a se potrivi cu gâtuire intra-strat și inter-strat măsurate, așa cum se arată în figura 3.14.

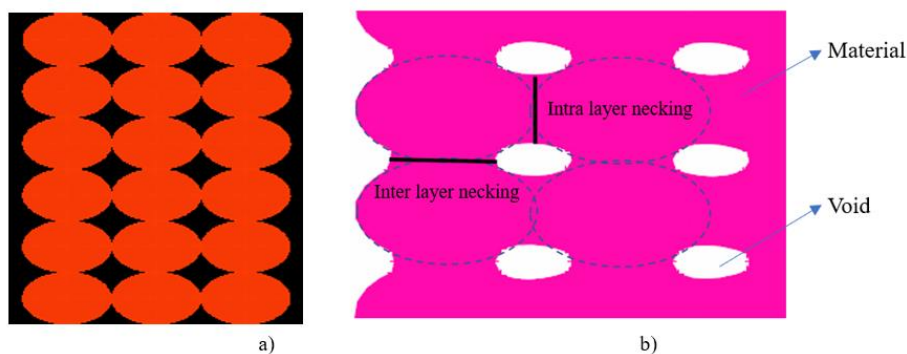


Figura 3.14 Reprezentarea filamentului: (a) geometria inițială; (b) ajustată pentru a reprezenta gâtuirea intra și inter-strat

Se poate observa că gâtuirea între straturi este aproape de lățimea extruderului (extruder de 0,35 mm, gâtuire între straturi $\sim 0,36$ mm), iar gâtuirea în interiorul stratului este de aproximativ jumătate din înălțimea stratului primar (înălțimea stratului 0,2 mm, gâtuire în interiorul stratului $\sim 0,11$ mm). Ținând cont de aceste observații, modelul geometric a fost actualizat pentru a apropia mai bine modelul geometric de realitate, facilitând astfel o determinare mai realistă a ariei secțiunii transversale. În plus, dacă suprafața secțiunii transversale a filamentului este determinată cu precizie pentru diferiți parametri de imprimare, raportul dintre material și golurile de aer poate fi găsit pentru a determina densitatea epruvetelor imprimate.

Pentru a valida metoda, sunt necesare teste de tracțiune în condiții reale, în cadrul cărora rezultatele testului de tracțiune, în special deformația specifică la tracțiune, vor fi comparate cu rezultatul simulării numerice, validând astfel modelul geometric. Un alt fapt important trebuie luat în considerare, și anume, atunci când se determină aria secțiunii transversale prin metoda geometrică în ANSA, aria secțiunii transversale depinde de setările din ANSA, în special de "Lungimea perimetrului" și "Toleranța de rezoluție". Lungimea perimetrului

definește densitatea nodurilor de pe margini. O densitate mare a nodurilor (o distanță mai mică între noduri) permite o generare mai fină a structurii discretizate, cu o aproximare mai bună, minimizând astfel pierderea de material (suprafața secțiunii transversale în cazul nostru). Toleranța rezoluției afișează detaliile geometrice la rezoluție înaltă sau joasă. O toleranță fină afișează toate caracteristicile în detaliu ridicat și permite, de asemenea, o lungime de perimetru redusă, dar utilizează o mulțime de resurse de calcul și grafice, ceea ce poate face ca modelul să fie dificil de manipulat.

3.4.3. Analiza ce elemente finite a apruvetei imprimare 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 modulul de elasticitate la tracțiune cu valorile obținute experimental. Dacă acestea sunt comparabile, aria secțiunii transversale este corectă, iar modulele de elasticitate FEA1 și FEA2 sunt considerate corecte. După ce modulele de elasticitate sunt determinate pentru diferite rate de umplere, acestea pot fi utilizate pentru simulări viitoare prin FE.

Pentru a obține rezultate precise în simulările cu elemente finite, partea de creare a modelului este deosebit de importantă. Modelul trebuie construit cât mai precis posibil, iar toate condițiile la limită trebuie să fie reprezentate și aplicate cât mai realist posibil. Alegerea reprezentării corecte a modelului, a tipului de element, a lungimii elementului și a fișierului de calitate este, de asemenea, crucială. Tehnicile convenționale de modelare cu elemente finite nu sunt adecvate pentru analiza pieselor imprimate 3D, din cauza golurilor de aer din interiorul acestora nu pot fi considerate nici piese simple de tip placă subțire, nici piese de volum. Metoda de modelare utilizată în acest studiu utilizează experiența lui Garg et al. [48], unde autorii au folosit o modelare a microstructurii, în care fiecare linie de filament este modelată cu elemente Tetra și sunt conectate în funcție de gâtuirile intra-strat și inter-strat stabilite anterior. După cum s-a subliniat anterior, această abordare prezintă unele limitări în ceea ce privește aplicabilitatea în cazul pieselor funcționale, în care piesele imprimate

sunt mai complexe și sunt construite cu un înveliș în jurul zonei de umplere. Pentru a elimina această problemă, secțiunea de înveliș ar trebui, de asemenea, să fie modelată cu precizie, iar timpul de modelare ar trebui să fie redus și, dacă este posibil, procesul de creare a modelului să fie automatizat. Metoda propusă în teză dorește să îndeplinească această cerință, în care modelarea poate fi cel puțin parțial automatizată pentru a reduce timpul de modelare și poate fi capabilă să construiască modele complexe cu secțiuni de tip placă subțire (shell).

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, care este potrivit pentru analiza ulterioară cu elemente finite.

Procesul poate fi descris după cum urmează: modelele geometrice au fost create în ANSA 19.1.2 cu ajutorul unui script care traduce mișcarea capului extruderului pe baza codului G imprimat și transformă mișcările extruderului imprimantei 3D în linii geometrice. Liniile geometrice sunt apoi utilizate pentru a extruda o secțiune elipsoidală a filamentului de-a lungul liniilor stabilite în etapa anterioară. Forma straturilor individuale este determinată de setarea primară a parametrilor de imprimare, de exemplu, înălțimea stratului primar, diametrul extruderului etc., pe care scriptul o citește din codul G și creează elipsoidul primar în consecință. Secțiunea elipsoidală este ajustată cu zonele de gătuire, (inter-și intra-straturi) pentru a ajusta modelul geometric perfect la un model mai realist, în care straturile imprimate nu au o formă elipsoidală regulată, ci mai degrabă o formă deformată, asemănătoare unui cvadruplu. Pentru a extrage suprafața secțiunii transversale a epruvetelor de tracțiune, geometria creată trebuie să fie discretizată. În software-ul ANSA, există posibilitatea de a obține informații despre suprafețe, dar reprezentarea suprafeței în termeni de precizie este legată de "lungimea perimetrului". Lungimea perimetrului definește, în final, lungimea elementelor finite create pe suprafețe. Pentru a extrage aria reală a secțiunii transversale cât mai

precis posibil, a fost utilizată o lungime a perimetrului foarte mică: 0,02 (mm), după cum se observă în figura 3.15.

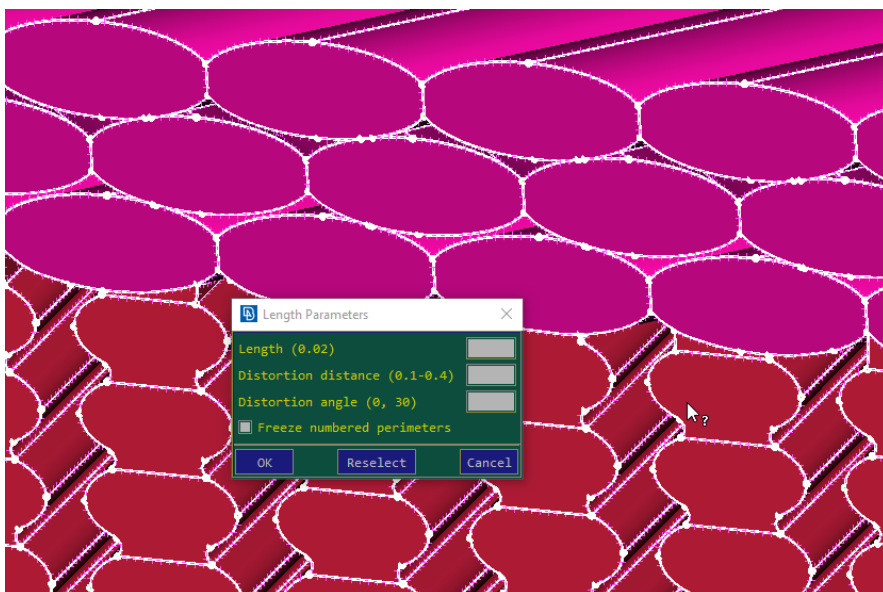


Figura 3.15 Setarea lungimii perimetrului la o valoare care să permită o reprezentare precisă a straturilor

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 și pentru a se adapta la puterea de procesare a unor stații de lucru, a fost analizat doar un segment al epruvetei de tracțiune. Lungimea segmentului este de 5,43 mm, aleasă în mod aleatoriu, luându-se în considerare necesitatea de a avea cel puțin patru elemente repetitive în cazul modelelor complexe de umplere, cum ar fi Honeycomb sau Triangle, așa cum se observă în figura 3.16.

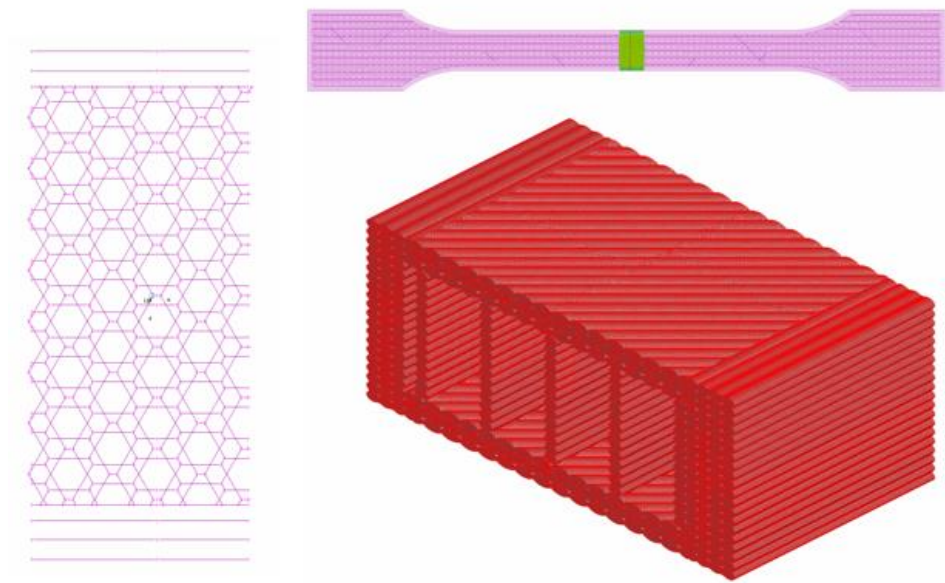


Figura 3.16 Reprezentarea FEM a filamentelor. (Segment dintr-o epruvetă standard de încercare la tracțiune)

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 Tetra, de ordinul întâi, cu o lungime generică a elementului de 0,05 mm. Modelele au fost încărcate cu 160 N la un capăt, iar la celălalt au fost fixate cu un element RBE2 de tip corp rigid conectat la centrul de greutate la un punct de constrângere unic (SPC), care interzice toate translațiile și rotațiile.

Simulările statice liniare, presupunând un material izotrop, au fost efectuate în Epilysis, care este un solver furnizat de BETA CAE și este integrat în instrumentul de preprocesare ANSA. Epilysis utilizează un cod sursă Nastran, iar rezultatele sunt comparabile cu cele obținute în Nastran. De fapt, primul model a fost simulat și în Nastran și în Epilysis, iar rezultatele au fost comparate, rezultând o diferență de deplasare de 4,3% (de la 0,0203476 la 0,02127), așa cum este prezentat în figura 3.17

0xUntitled.op2 : Scalar: X Direction of Displacements, Translational : SUBCASE 1

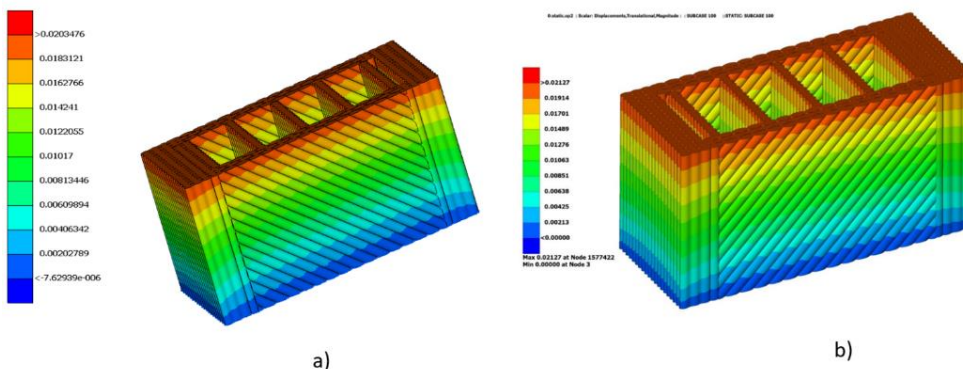


Figura 3.17 Rezultatul simulării în a) Epilysis și în b) Nastran

Deși Nastran oferă un rezultat mai precis decât Epilysis, simulările ulterioare au fost efectuate în Epilysis din cauza disponibilității licențelor și pentru că rezultatul mediu al simulărilor efectuate cu Epilysis este de 5,2% (în comparație cu rezultatele experimentale), ceea ce poate fi considerat acceptabil. Post-procesarea datelor a fost efectuată în Animator_v2.0.8 pentru rezultatul Nastran și în Metapost 19.1.2 pentru rezultatele simulărilor efectuate în Epilysis. De asemenea, au fost comparate cele două softuri de postprocesare și nu s-a constatat nicio diferență semnificativă în citirea deformațiilor și tensiunilor din fișierele .op2 rezultate.

A fost construit și simulat un model cu elemente Tetra de ordinul 2, folosind exact aceleași condiții la limită ca și modelul de ordinul 1. În cazul modelului Tetra de ordinul al doilea, numărul total de elemente este același, dar numărul de noduri a crescut de la 373.777 la 2.738.200 (în cazul unei rate de umplere de 100%) datorită introducerii nodurilor centrale pe fiecare muchie a elementului. Rezultatele arată o deformare mai mare în cazul elementelor de ordinul 2, de exemplu, în cazul unei rate de umplere de 40%, unde deplasarea măsurată experimental a fost de 0,00352 mm, rezultatul simulării a fost de 0,00369105 mm, ceea ce reprezintă o creștere de 4,63% a deplasării. După analizarea rezultatelor, putem observa că modelul de simulare construit cu ajutorul elementelor Tetra de ordinul 1 prezintă întotdeauna o deformare mai mică decât valorile obținute experimental, ceea ce este de așteptat datorită faptului că elementele Tetra de ordinul 1 sunt mai rigide decât elementele Tetra de ordinul 2. Așa cum era de așteptat, timpul de simulare a crescut treptat odată cu complexitatea și dimensiunea modelelor, variind de la 12 minute pentru modelul cu cea mai mică rată de umplere de 20%, până

la 45 de minute pentru cea mai mare rată de umplere de 100%. Odată cu creșterea ratei de umplere de la 20%- la 100%, modelele au crescut de la (lungimea elementului 0,05) 3.740.121 de elemente Tetra la 11.940.382 de elemente, ceea ce poate fi exprimat ca o creștere de 219,25%. În acest caz, un computer personal obișnuit nu poate procesa cantitatea de informații, prin urmare, se recomandă utilizarea unor servere profesionale de calcul/simulare. 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 la 0,1 mm.

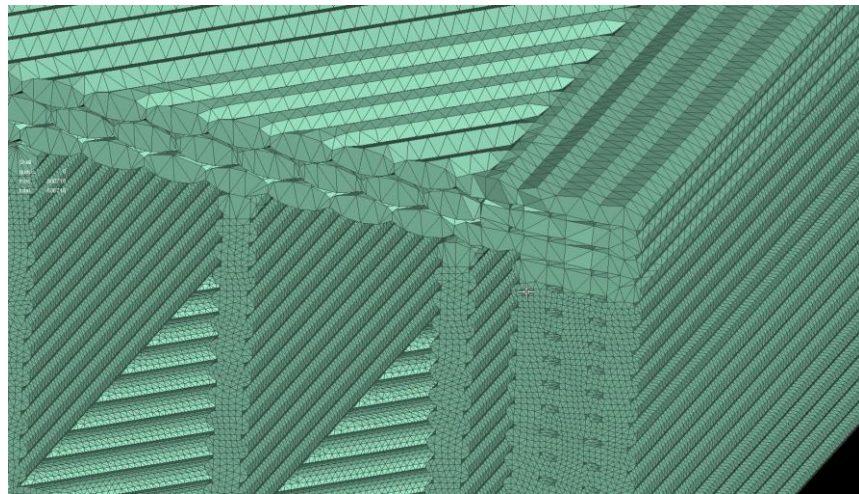


Figura 3.18 Influența lungimii mai mari a laturilor elementelor finite asupra reprezentării filamentelor individuale

Timpul de simulare a modelelor cu lungimea elementului de 0,1 mm a variat între minimum 1 minut pentru o rată de umplere de 20 % și 8 minute pentru modelul mai complex cu o rată de umplere de 100 %. Comparând cele două modele din punct de vedere al timpului de calcul: utilizarea unei lungimi mai mari a elementelor (0,1 mm) a redus timpul cu un factor de 5,6, oferind în același timp o precizie medie a rezultatelor cu o eroare de 7,5 % în comparație cu rezultatele experimentale și de 2,3 % în comparație cu o modelul discretizat cu elemente mai mici (0,05). Diferențele sunt cauzate de pierderea detaliilor în geometrie din cauza reprezentării straturilor într-un mod simplificat, după cum se arată în figura 3.18.

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 Tetra de ordinul 1, cu o lungime globală a elementelor de 0,1 mm. Preprocesorul va rămâne Ansa, solver: Epilysis și instrumentul de post-procesare: Metapost. Această abordare a modelării pare a fi o soluție bine echilibrată între acuratețea rezultatelor, timpul de calcul și nevoia de putere de procesare. O altă concluzie poate fi trasă din analiza rezultatului simulărilor, și anume, că utilizarea unei lungimi mai mari a elementelor reduce considerabil timpul de calcul, oferind în același timp rezultate cu o precizie acceptabilă.

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 (Materiale plastice. Determinarea proprietăților de tracțiune Partea a 2-a: Condiții de testare pentru materiale plastice de turnare și extrudare). Testele de tracțiune uniaxială au fost efectuate pentru a investiga proprietățile mecanice ale materialului imprimat 3D. Epruvetele au fost testate cu o mașină universală de încercări de tip INSTRON 3366, cu o capacitate de 10 kN. Viteza de încărcare a acestei mașini este de 1 mm/min, iar testul se oprește odată ce epruvetele sunt rupte. 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 butadienstiren ABS (Plasty Mladeč, Republica Cehă). Proprietățile sale mecanice, conform producătorului, sunt următoarele: modulul de elasticitate la tracțiune $E_f = 2140$ MPa, rezistența la tracțiune $\sigma_f = 43$ MPa și deformația specifică la tracțiune $\varepsilon_f = 2,7$ %.

Calculul tensiunilor se efectuează pentru toate ratele de umplere pe baza dimensiunilor secțiunii transversale a epruvetei de tracțiune (4 mm grosime, 10 mm lățime; fără a lua în considerare raportul material/aer, rezultă o suprafață a secțiunii transversale de 40 mm²). Rezistența la tracțiune rezultată nu va corespunde realității, dar deformația specifică va putea servi drept referință pentru validarea modelului geometric cu ajutorul simulărilor numerice. În cazul în care

deformația specifică experimentală este comparabilă cu cea obținută prin simularea FE, suprafața secțiunii transversale este validată. O simulare a testului de tracțiune a fost efectuată pe modelul FE utilizând software ul Epilysis. În prealabil, aceeași epruvetă de tracțiune a fost testată experimental. În timpul testului de tracțiune, modelului FE i s-au aplicat aceleași condiții la limită ca și în cazul epruvetei reale de tracțiune. Obiectivul simulării a fost de a afla dacă alungirea modelului FE corespunde cu rezultatele experimentale. Rezultatele pot fi rezumate în tabelul 3.4, în care alungirea măsurată experimental este comparată cu rezultatele simulărilor FEM efectuate cu o lungime a elementului mai mică (0,05 mm) și mai mare (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 3.4 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 lungimii laturilor elementului asupra preciziei rezultatului. Baza de comparație este reprezentată de deplasarea obținută prin experiment real (test de tracțiune) în raport cu rezultatele FE utilizând două lungimi/mărimi diferite ale elementelor, o discretizare mai fină de 0,05 și o discretizare de 0,1 mm. 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). Modelul FE discretizat cu o lungime a elementului de 0,1 mm (FEA2) oferă rezultate cu o eroare ușor mai mare, unde intervalul este de minim 6,43% și maxim 8,66%. Comparând cele două modele FE, intervalul se situează între 0,56% și 3,09% diferență, ceea ce este considerat un rezultat bun, ținând cont de economiile în ceea ce

privește puterea de procesare și timpul de simulare, după cum s-a menționat în paragraful anterior. Se observă o convergență crescută a rezultatelor odată cu creșterea ratei de umplere atunci când se compară cele două modele FE (Tabelul 3.2 - Devabaterea relativă FEA1- FEA2).

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 figura 3.19 este prezentată secțiunea transversală a epruvetelor de tracțiune (așa cum sunt ele extrase din modelul geometric din ANSA) de la o rată de umplere de 20% până la 100%.

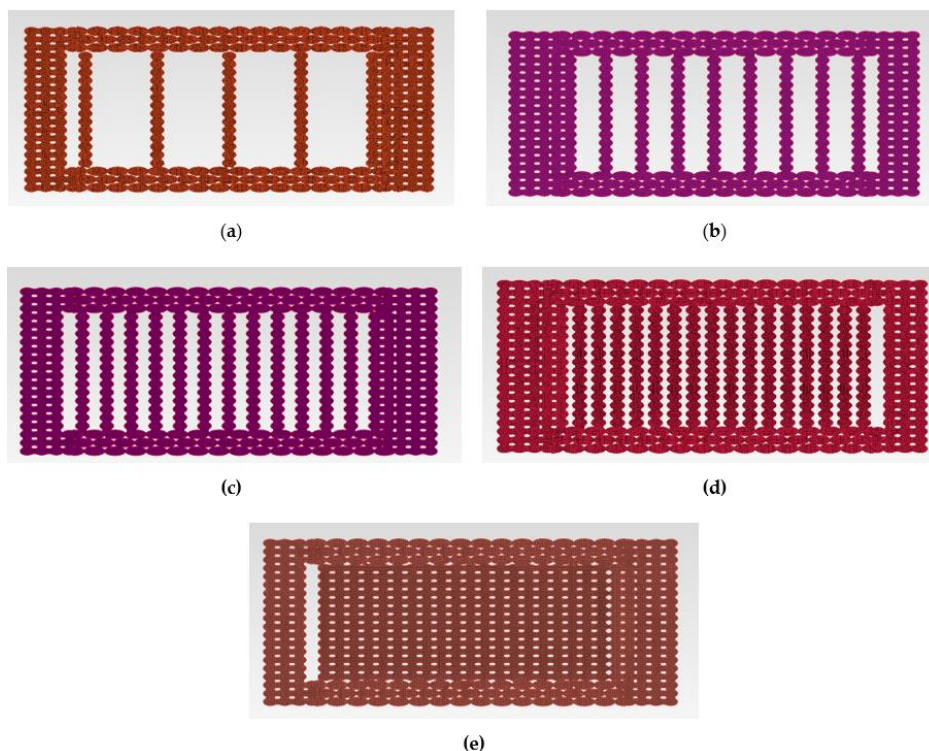


Figura 3.19 Modele de secțiuni transversale în funcție de rata de umplere: (a) 20%; (b) 40%; (c) 60%; (d) 80%; (e) 100%.

Primul set de valori ale secțiunii transversale reprezintă suprafețele epruvetelor imprimate cu diferite rate de umplere, determinate cu o lungime a perimetrului (PL) de 0,05 mm. Valoarea 0,05 mm este lungimea laturii elementelor utilizată pentru simularea FE (Lungimea perimetrului = Lungimea elementelor) pentru a valida modelul geometric pe baza comparației deplasărilor specifice. După cum

s-a prezentat anterior, au fost utilizate două lungimi de discretizare diferite pentru simularea epruvetelor, o discretizare mai fină cu 0,05 mm (FEA1) și o discretizare mai grosieră cu 0,1 mm (FEA2).

În cazul FEA1 și FEA2, aria secțiunii transversale a fost extrasă din modelul geometric din ANSA, așa cum este prezentat în tabelul 3.5, și introdusă în software-ul mașinii de încercat, permițând un calcul mai precis al tensiunilor normale și implicit a rezistenței la tracțiune.

Tabelul 3.5 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

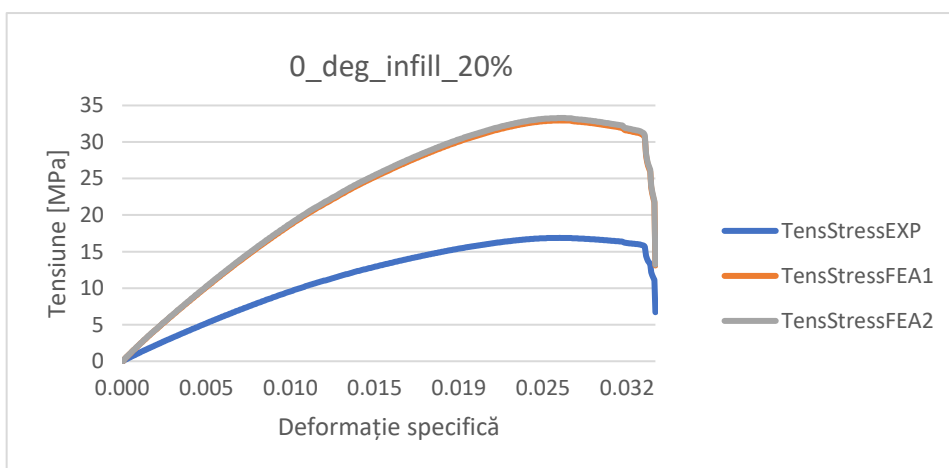
Creșterea ariei secțiunii transversale FEA1 și FEA2 este, în medie, de 13%, astfel încât creșterea cu 20% a ratei de umplere nu duce la o creștere similară a secțiunii transversale. Examinând cantitatea de materie primă (lungimea filamentului și greutatea materialului) adăugată la epruvetele cu diferite rate de umplere (tabelul 3.6), valori furnizate de software-ul imprimantei 3D, se poate observa o scădere de la 20% la 13%.

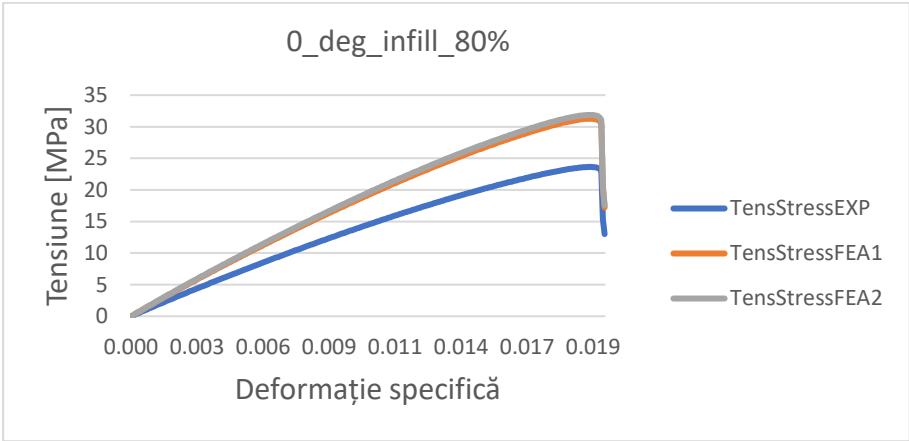
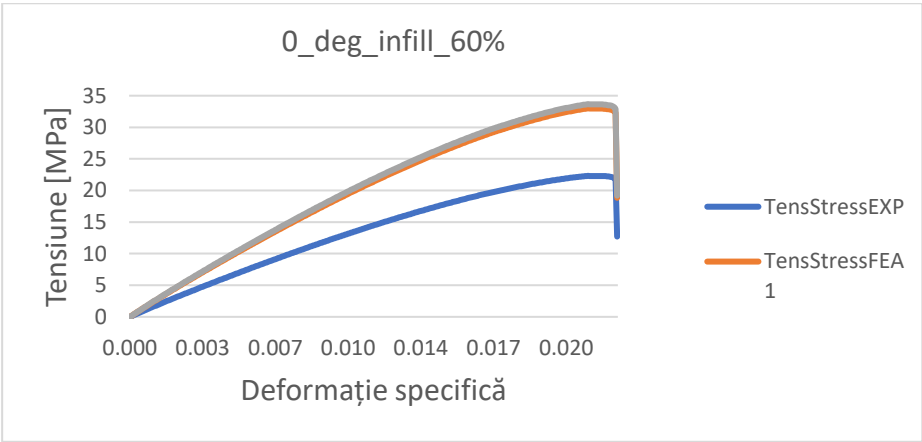
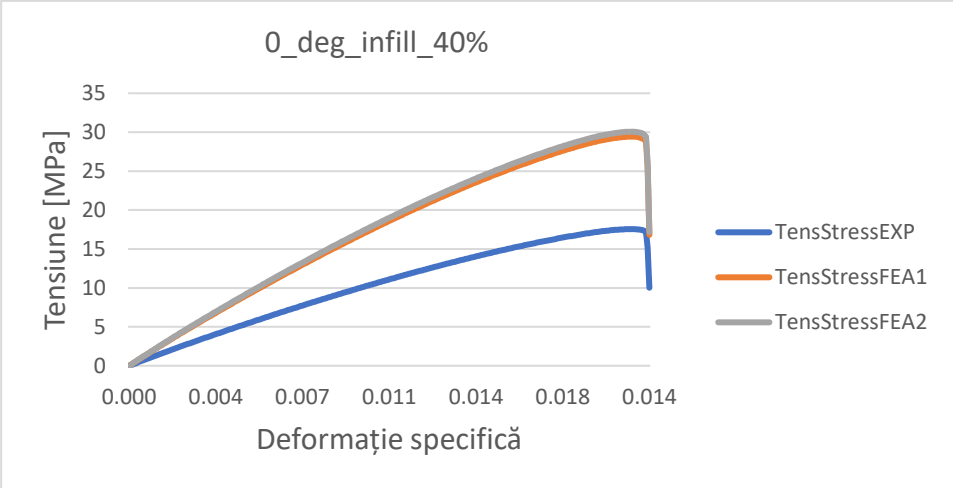
Tabelul 3.6 Variația lungimii filamentului și a greutății epruvetei în funcție de rata de umplere

Modificarea ratei de umplere	Modificarea lungimii filamentului	Modificarea greutății materialului depus
	(%)	(%)
20-40%	19.07	18.99
40-60%	16.04	15.96
60-80%	13.83	13.88
80-100%	13.57	13.57

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. În figura 3.20 sunt prezentate curbele tensiune-deformație specifică comparative pentru toate ratele de umplere analizate. Curba experimentală inițială (EXP) se bazează pe o suprafață constantă a secțiunii transversale de 40 mm² dată de dimensiunile exterioare ale epruvetelor.

Celelalte două curbe (FEA1 și FEA2) prezentate în figura 3.20 sunt curbe experimentale tensiune-deformație specifică recalculată, luând în considerare suprafețele secțiunii transversale estimate numeric. Se poate observa că utilizarea întregii secțiuni transversale a epruvetei imprimate 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.





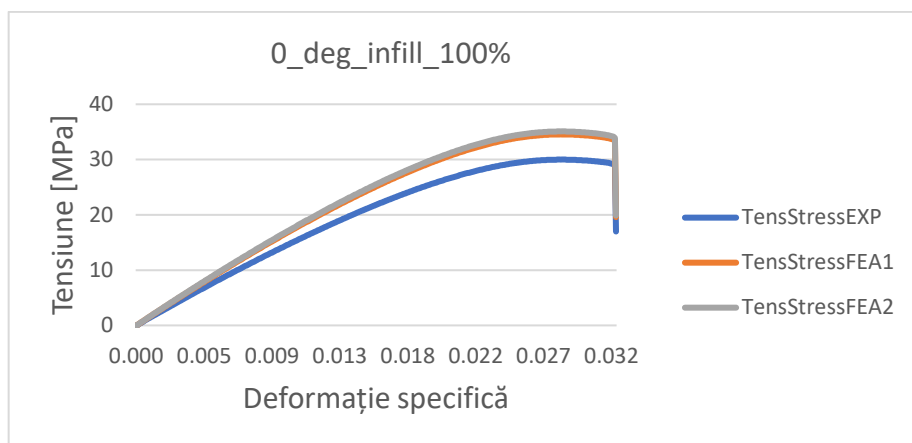


Figura 3.20 Curbe de tensiune-deformație specifică recalulate pe baza suprafețelor secțiunilor transversale estimate numeric ale epruvetelor cu ratele de umplere: (a) 20%; (b) 40%; (c) 60%; (d) 80%; (e) 100%

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 recalulate în funcție de cele două seturi de valori. În tabelul 3.7, 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 recalulate 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 3.7 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 3.21. 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.

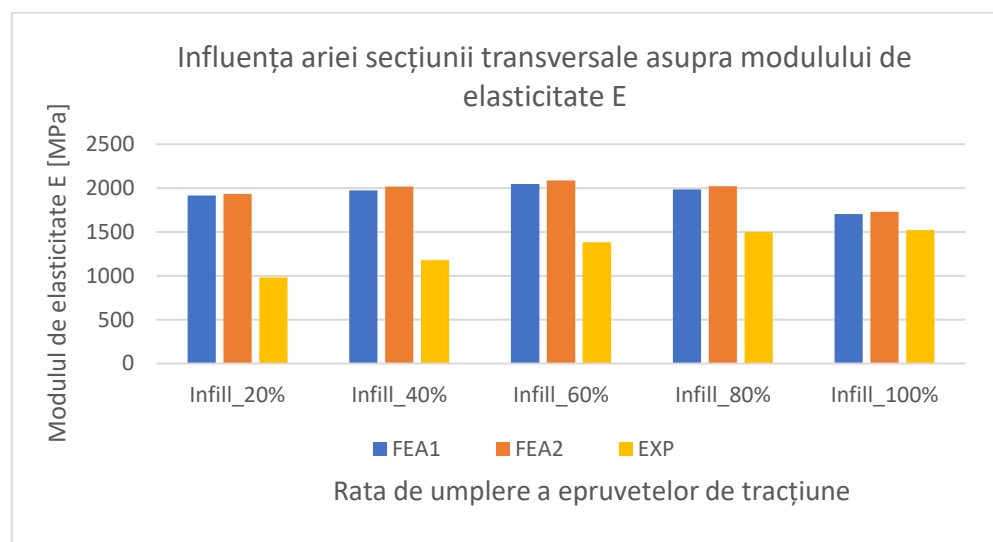


Figura 3.21 Valoarea modulului de elasticitate pentru diferite rate de umplere recalculat pe baza ariilor secțiunii transversale estimate numeric

Comparând diferența dintre modulul E-FEA1 și FEA2, putem observa o abatere medie de 1,72%, care provine din diferența de dimensiune a structurii discretizate utilizate. Așa cum era de așteptat, pentru rate de umplere mai mari, valorile FEA1 și FEA2 converg către valorile obținute experimental (EXP), dar, contrar așteptărilor noastre inițiale, nu într-o manieră proporțională. 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%.

Variația modului de elasticitate în funcție de rata de umplere (infill rate) este reprezentată în Figura 3.22. O aproximare cu o funcție polinomială de ordinul 4 (quadratic polynomial fit) oferă cele mai bune rezultate.

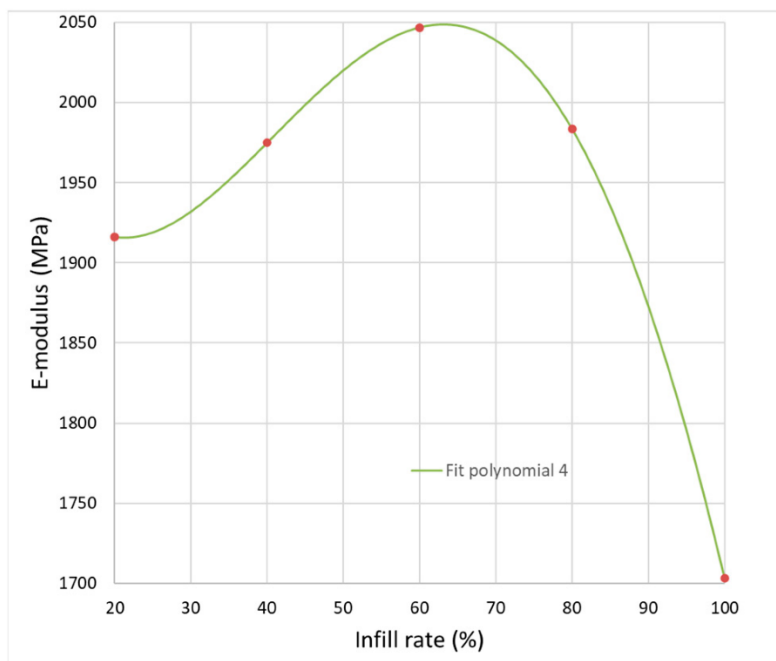


Figura 3.22 Aproximarea cu o funcție polinomială a ratei de umplere în funcție de modulul de elasticitate al epruvetelor

Analizând ecuațiile obținute pentru curbei de aproximare:

$$\text{Modulul } E = 2085 - 18,6 \text{ Rata umplere} + 0,6307 \text{ Rata umplere}^2 - 0,006569 \text{ Rata umplere}^3 + 1,74e-05 \text{ Rata umplere}^4 \quad (1)$$

se poate observa că termenul inițial (2085) este foarte apropiat de valoarea modului de elasticitate măsurat al filamentului ($E_f = 2140$ MPa) și are o ușoară creștere până la o rată de umplere de 60% și apoi o descreștere.

Pentru a înțelege și explica pe deplin acest comportament, este necesară o analiză mai atentă a secțiunilor transversale (Figura 3.20, Tabelul 3.3 și Tabelul 3.4). Inconsecvențele pot fi observate în orientarea modelului de umplere în secțiunea de înveliș a piesei imprimată, în cazul în care secțiunea de înveliș are un perete care constă din trei rânduri de filament pe o parte și cinci rânduri de filament pe cealaltă parte, așa cum s-a prezentat în figura 3.1. Acest efect poate fi deosebit de important la o rată de umplere ridicată (80% sau 100%) și poate influența modul în care este conectat învelișul de modelul de umplere al epruvetei, ceea ce poate avea ca rezultat forțe de legătură diferite între filamente cât și între filamentele interioare și învelișul exterior. Se poate produce, de asemenea, o diferență de rigiditate între partea stângă și partea dreaptă. Rezultatele noastre indică faptul că modulul de elasticitate al epruvetei FDM nu depinde doar de ratele de umplere, ci o contribuție importantă este adusă de lipirea intra-strat, de lipirea între straturi și de creșterea găturii dintre filamente. Atâta timp cât imprimanta nu respectă o dispunere simetrică a rândurilor de filamente și o construcție a învelișului exterior corelată cu rata de umplere, un astfel de comportament poate apărea și poate fi estimat doar prin aplicarea unei metodologii precum cele prezentate în această lucrare.

3.4.5. Concluzii

În acest capitol au fost analizate epruvete de tracțiune tipărite 3D pentru a înțelege efectul diferitelor rate de umplere asupra comportamentului mecanic. A fost prezentată o abordare nouă pentru analiza modelelor FDM tipărite 3D, care utilizează un model geometric, construit pe baza codului G generat de imprimantă, care facilitează analiza cu elemente finite. A fost abordată problema determinării secțiunii transversale și a fost dezvoltat un model geometric pentru a investiga problema raportului dintre golurile de aer și material. A fost realizat un studiu de caz pe modele cu elemente finite pentru a stabili cea mai bună metodă de modelare pentru un echilibru optim între precizie și timpul de execuție a simulării. Valoarea deformației specifice la tracțiune rezultată din cele două cazuri de simulări (FEA1 și FEA2) au fost comparabilă cu rezultatul obținut experimental, ceea ce a confirmat faptul că aria secțiunii transversale extrasă din modelul geometric este precisă cu o bună acuratețe.

Pentru a determina modulele de elasticitate ale diferitelor rate de umplere, secțiunile transversale extrase din modelul geometric au fost

reintroduse în mașina de testare la tracțiune. După efectuarea a douăsprezece simulări, putem stabili că metoda de simulare propusă în acest studiu este o opțiune viabilă pentru a prezice comportamentul pieselor tipărite 3D chiar înainte ca acestea să fie tipărite, doar prin efectuarea unei analize asupra codului G generat de programul de preprocesare a imprimantei. Modulele de elasticitate obținute pentru diferite rate de umplere pot fi utilizate pentru simularea FE ne mai fiind necesară modelarea microstructurii; o simplă discretizare în volume (simple volume mesh) ar trebui să fie suficientă, deoarece modulul de elasticitate conține, de asemenea, raportul corect dintre spațiul de aer și material.

Rezultatele prezentate în această lucrare 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 precisă 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.

Scopul principal al acestei metode de modelare este de a putea modela piese complexe imprimate 3D cu rată de umplere variabilă și rigiditate ajustabilă. Dacă se stabilește metoda corectă de conectare a filamentelor individuale pentru o imprimantă anume (ținând cont de viteza de imprimare, rezoluția, diametrul duzei, temperatura, comportamentul materialului în timpul depunerii etc.) și se testează pentru a oferi un rezultat fiabil, proprietățile mecanice ale specimenelor 3D pot fi prezise fără un test fizic de tracțiune, ceea ce va permite proiectanților să tipărească piesele cu rată de umplere variabilă numai

după ce rezultatele FE sunt adecvate nevoilor lor, economisind astfel o cantitate considerabilă de materiale și timp. În cazul în care puterea de calcul o permite, considerăm că metodologia poate fi extinsă la piese complexe. Existența unor informații despre comportamentul mecanic al pieselor înainte de tipărirea efectivă ar putea fi importantă în strategia de proiectare a pieselor funcționale imprimate 3D sau în aplicații cu un număr redus de filamente, cum ar fi casele tipărite 3D.

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

Influența modelelor de umplere asupra comportamentului mecanic este, de asemenea, foarte important de studiat. În capitolul anterior a fost descrisă metodologia de lucru pentru cazul ratei de umplere. 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. Se poate observa că filamentul extrudat se află într-o stare semi-fluidă și se aplatizează ușor atunci când este depus pe stratul anterior, așa cum s-a prezentat în figura 3.13. Acest efect de aplatizare duce la formarea unei suprafețe de contact mai mari între filamente, cunoscută sub numele de gătuire intra și inter-strat, așa cum s-a ilustrat în figura 3.13. Pentru a determina dimensiunea reală a zonei de contact dintre straturi, marcată cu linii mai deschise în figura 3.14 imaginile microscopice au fost analizate cu ajutorul software-ului Digimizer (MedCalc Software Ltd, Belgia), unde s-a măsurat lungimea zonelor de contact și a găturii inter și intra strat.

În modelul CAD, având în vedere efectul de aplatizare, forma filamentelor (secțiune elipsoidală) este ajustată cu zonele de gătuire suprapuse, pentru a ajusta modelul geometric perfect la un model mai realist. Pentru a extrage aria secțiunii transversale a epruvetelor de tracțiune, geometria creată a fost discretizată cu elemente finite tip Tetra de ordinul doi. 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 $\pm 45^{\circ}$,

triunghiulară 60°, fagure rapid, fagure complet și ondulatorie (figura 3.2). 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.

3.5.1. Rezultate și discuții

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. Dacă acestea sunt comparabile, suprafața secțiunii transversale este stabilită corect și poate fi utilizată pentru calcule ulterioare. Încercările de tracțiune uniaxială pe epruvete cu diferite modele de umplere au fost efectuate pe o mașină universală de încercări de tip IN-STRON 3366, cu o capacitate de 10 kN, la o viteză de încărcare de 1 mm/min, un extensometru uniaxial fiind utilizat pentru măsurarea deformației specifice. Rezultatele sunt rezumate în tabelul 3.8, în care deformația specifică măsurată experimental este comparată cu rezultatele simulărilor FE, rezultatele fiind selectate din domeniul elastic al curbei tensiune-deformație.

Tabelul 3.8 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

Rezultatele au arătat o diferență de minim 0,75% și maxim 8%, fapt care validează metodologia propusă pentru simularea epruvetelor imprimate 3D. În figura 3.23

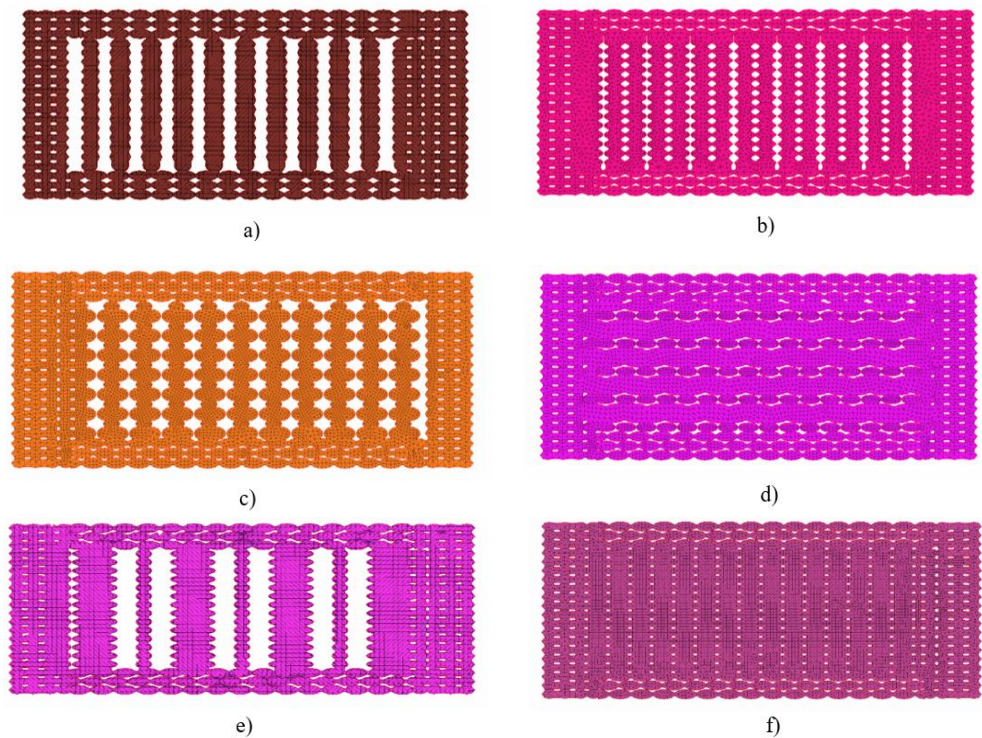


Fig. 3.23 Secțiune transversală a epruvetelor de tracțiune pentru diferite modele de umplere: a) grilă 0°-90° b) grilă ±45°, c) fagure rapid, d) fagure complet, e) triunghiulară 60° și f) ondulatorie

Se poate observa că prezența golurilor în secțiunea transversală este redusă în cazul modelelor cu grid ±45°, full honeycomb și wiggles în comparație cu grid 0-90°, fast honeycomb și triunghiular 60°, fapt care va influența acuratețea curbelor de tensiune-deformație ale epruvetelor. Învelișul pieselor este același, indiferent de modelul de umplere selectat. Aria secțiunii transversale calculată numeric este prezentată în tabelul 3.9, cu mențiunea că o secțiune transversală completă are 40 mm². În toate cele șase modele de umplere analizate, poziția de extragere a secțiunii transversale s-a făcut în același loc pentru toate epruvetele.

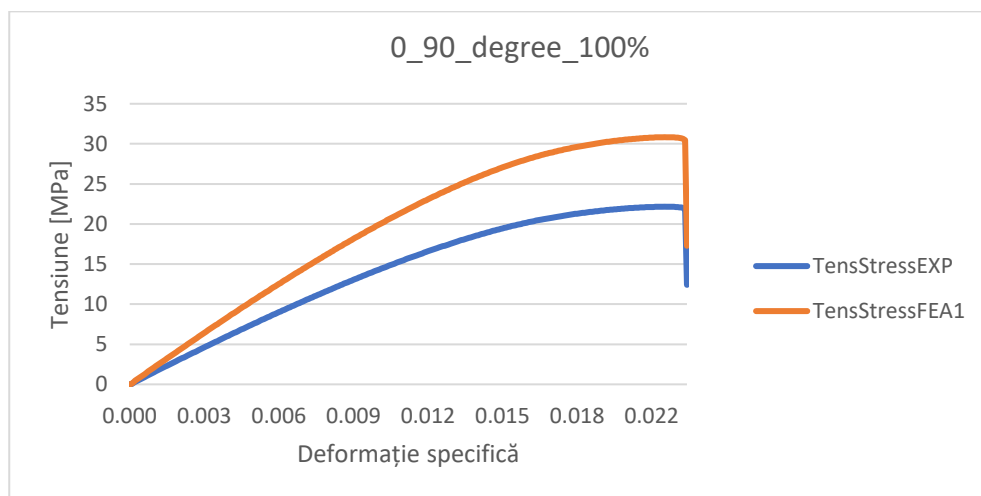
Aria secțiunii transversale extrasă din modelul geometric a fost reintrodusă în software-ul mașinii de testare, iar rezultatele tensiunilor au fost recalulate în funcție de noua valoare. În figura 3.24 sunt reprezentate curbele de tensiune-deformație comparative pentru toate modelele de umplere analizate. Curbele experimentale (notate EXP) se bazează pe o arie constantă a secțiunii transversale de 40 mm² dată de dimensiunile exterioare ale epruvetelor, iar cele notate FEA iau în

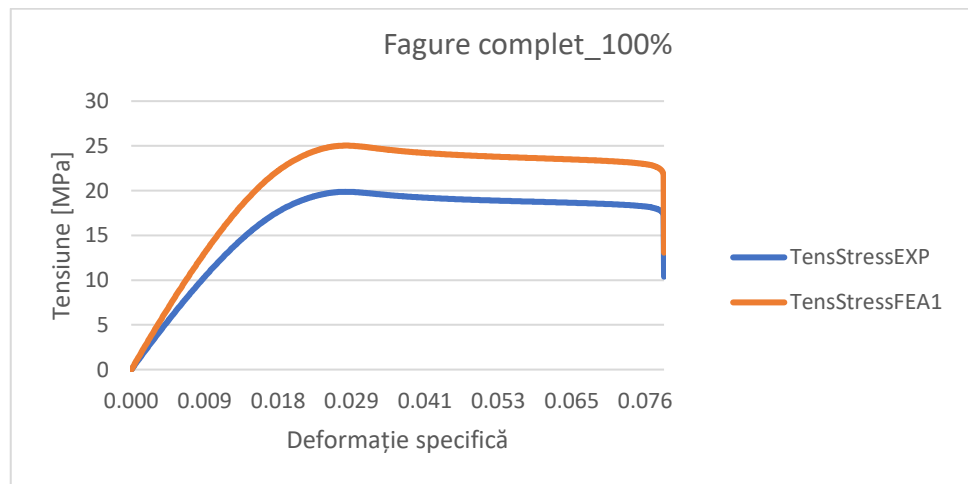
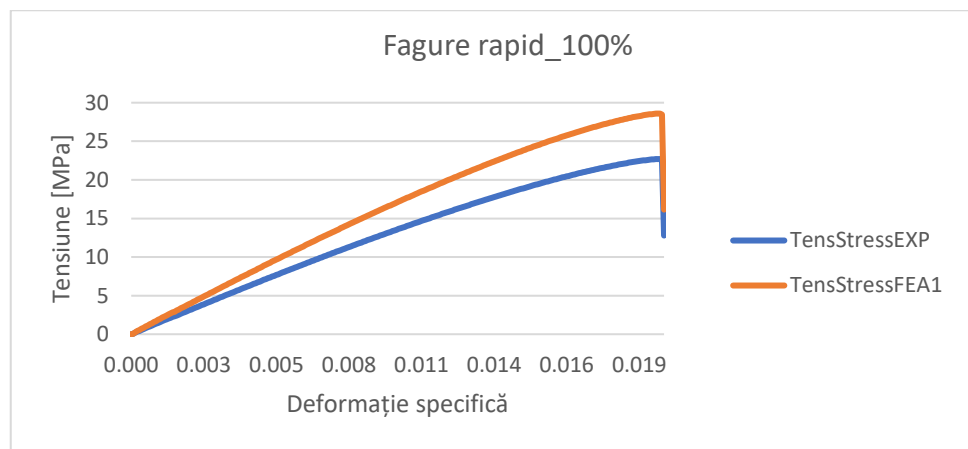
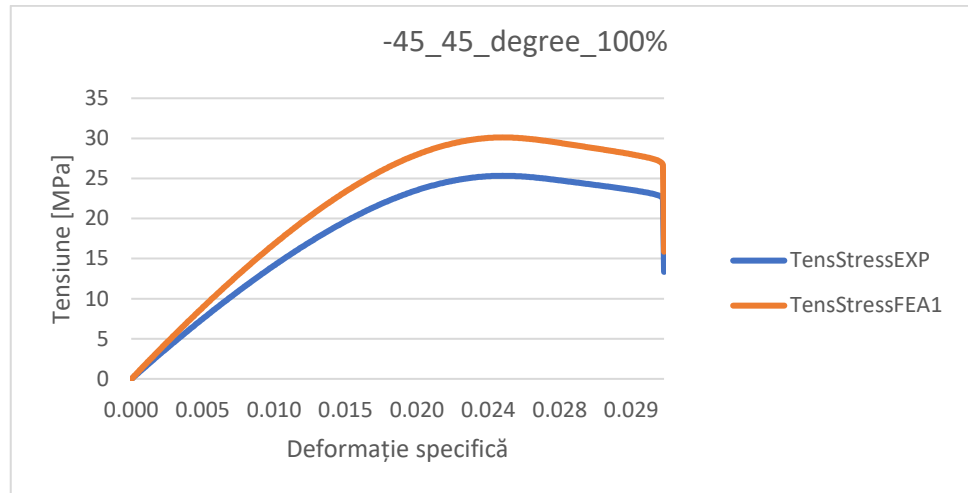
considerare suprafața reală a secțiunii transversale prezentată în tabelul 3.9 pentru fiecare model de umplere.

Tabelul 3.9 Aria secțiunii transversale a epruvetelor de tracțiune calculată numeric

Modelul de umplere al epruvetei	Aria calculată a secțiunii transversale (mm ²)
Grilă 0°-90°	28.75
Grilă +45°-45°	33.65
Fagure rapid	31.75
Fagure complet	36.45
Triunghiular 60°	29.43
Ondulatoriu	37.15

Se poate observa că, chiar și pentru o rată de umplere de 100%, există diferențe semnificative între modelele de umplere, calculul bazat pe secțiunea transversală completă nu va furniza un rezultat în limitele unui interval de eroare previzibil pentru unele modele, cum ar fi grilă 0-90°, fagure rapid și triunghiulară 60°, diferențele în ceea ce privește rezistența la rupere la tracțiune fiind de 28,1%, 20,6% și, respectiv, 26,4%.





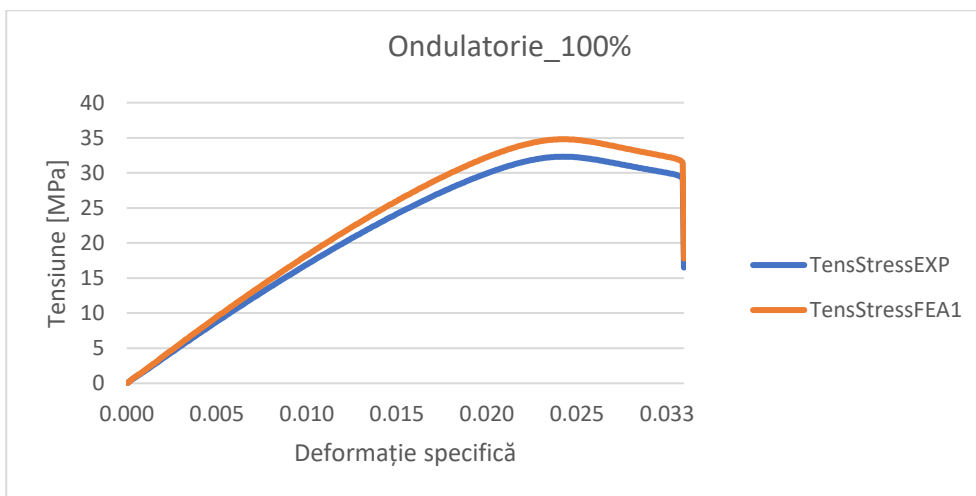
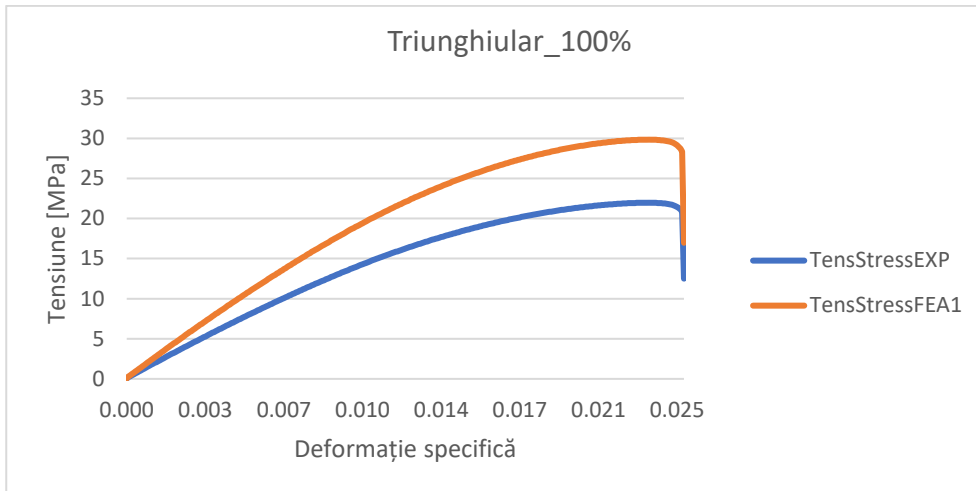


Figura 3.24 Curbe tensiune - deformație specifică comparative pentru toate modelele de umplură analizate.

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 3.10.

Așa cum era de așteptat, modele precum grid 0-90°, fast honeycomb și triunghiular 60° au o diferență de aproximativ 25% în ceea ce privește modulul E atunci când se utilizează secțiunea transversală completă.

Tabelul 3.10.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 3.25 sunt prezentate rezultatele comparative sub forma unui grafic de bare ale modulelor de elasticitate la tracțiune pentru diferite modele de umplere. Valoarea modului 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°.

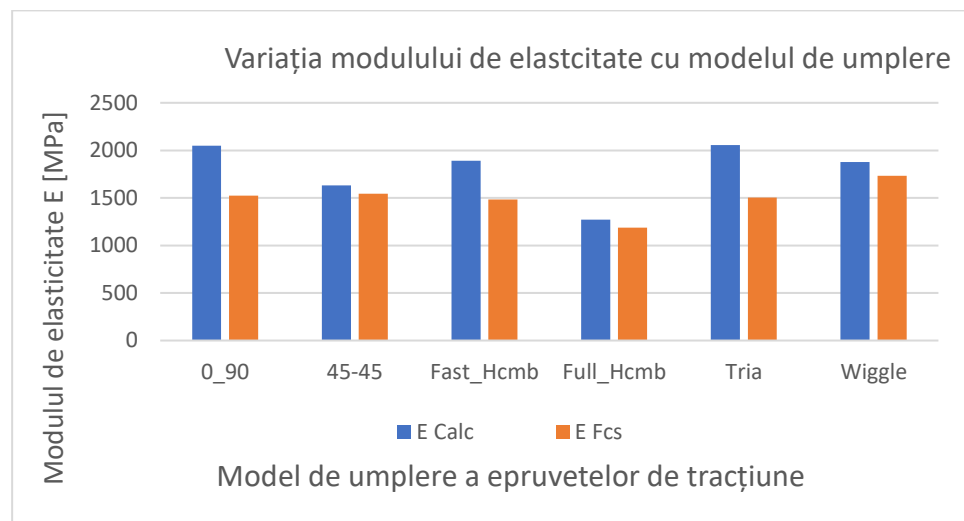


Figura 3.25 Rezultate comparative ale modulelor de elasticitate longitudinale cu și fără ajustarea ariei secțiunii transversale pentru diferite modele de umplere

3.5.2. Concluzii

În capitol au fost analizate epruvete de tracțiune imprimare 3D cu diferite modele de umplere pentru a înțelege efectul structurii interne asupra comportamentului mecanic. A fost prezentată o abordare originală, bazată pe codul G generat de software-ul imprimantei, pentru a crea modele numerice ale pieselor, care ajută la analiza cu elemente finite și la evaluarea problemei raportului dintre goluri de aer și material. Deformația specifică la tracțiune rezultată din simulare a fost comparată cu rezultatul experimental, care a confirmat că aria secțiunii transversale extrasă din modelul geometric este precisă cu o precizie acceptabilă. Stabilirea modulelor de elasticitate ale diferitelor modele de umplere a presupus ajustarea curbelor tensiune - deformație specifică determinate experimental cu secțiunea transversală a epruvetelor calculată numeric. Modulele E obținute pentru diferite modele de umplere pot fi utilizate pentru simulări numerice, pentru care microstructura nu mai trebuie modelată, deoarece modulul E conține, de asemenea, raportul corect dintre spațiul de aer și material.

Rezultatele prezentate în această lucrare 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 gătuirea intra și inter-strat și trebuie efectuate pe epruvete imprimate reale.
- Aria secțiunii transversale a unei epruvete de tracțiune extrasă din modelul numeric este precisă cu o bună acuratețe și permite estimarea curbelor tensiune-deformație specifică și a modulelor de elasticitate E mai aproape de realitate.
- Modele precum grid $\pm 45^\circ$, full honeycomb și wiggle 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 grid 0-90°, fast honeycomb și triangular 60° prezintă diferențe mai mare 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 parametrii procesului [29]. În literatura de specialitate putem găsi exemple de comparare între probele fabricate prin metoda FDM comparativ cu piese obținute din același material, dar produse prin tehnologia de turnare prin injecție. Górski [72] analizează influența diferitelor orientări de imprimare asupra rezistenței la impact a materialului ABS produs cu tehnologia FDM. Rezultatele au dovedit că rezistența la impact a probelor FDM este mult mai mică decât rezistența probelor fabricate prin injecție. În cazul orientării de imprimare de 0 grade (de-a lungul axei longitudinale a probei) este de numai 47% din rezistența la impact a probei monolitice produse prin turnare prin injecție. O diferență semnificativă de comportament a fost observată în cazul rezultatelor la testele de impact în comparație cu rezistența la tracțiune. Limita superioară a rezistenței probelor FDM în raport cu materialului de bază ABS, în cazul rezistenței la impact este de aproximativ două ori mai mică decât în cazul rezistenței la tracțiune, (80%- față de 47%). 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 cavitațiile din interiorul produsului, care sunt cele mai vulnerabile la cedare. Pentru a îmbunătăți comportamentul mecanic al pieselor imprimate prin FDM o soluție ar putea fi utilizarea materiale termoplastice ranforsate cu fibre. Un subiect major privind capacitatea de utilizare a pieselor 3D compozite imprimate 3D este efectul deteriorării prin impact asupra integrității structurale. Caminero [73] a investigat efectul orientării construcției, grosimea stratului și conținutul

de fibre asupra performanței la impact a carbonului continuu imprimat 3D, sticlă și nailon armat cu fibre de Kevlar® și Kevlar®, fabricate prin tehnica FDM. Rezultatele arată că rezistența la impact crește pe măsură ce crește conținutul de fibre în volum în majoritatea cazurilor. Probele armate cu fibre de sticlă prezintă cea mai mare rezistență la impact, iar fibra de carbon cea mai mică și similară cu cea a probelor armate cu fibre de carbon. 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.

4.1.1. Materiale și metodă

Scopul acestui capitol este de a analiza influența ratei de umplere și a modelului de umplere asupra rezistenței la impact a pieselor imprimate 3D cu ajutorul unei imprimante WANHAO Duplicator i3. Parametrii imprimantei utilizați pentru fabricarea epruvetelor de încercare la impact sunt prezentați în tabelul 4.1.

Tabel 4.1 Parametrii de imprimare

Parametrul	Valoarea
Înălțimea stratului (mm)	0,2
Rata de umplere (%)	20-100
Orientarea umpluturii (°)	0
Nr. de carcuse	12
Grosimea carcusei (mm)	0,4
Nr. de straturi de bază	4
Nr. de straturi de închidere	4
Viteza de imprimare (mm/s)	30
Temperatura extruderului (oC)	230±5
Temp. platformei de lucru (oC)	100±2
Diametrul extruderului (mm)	0,75

Au fost fabricate folosind filament din ABS (Plasty Mladeč, Republica Cehă) 55 de epruvete. Proprietățile mecanice conform producătorului sunt: modul de elasticitate $E_f=2140$ MPa, rezistența la tracțiune $\sigma_f=43$ MPa și deformația specifică la tracțiune $\epsilon_f=2,7$ %.

Geometria epruvetelor (Figura 4.1) 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: $l=80\text{mm}$, $b=10\text{mm}$, $a=4\text{mm}$.

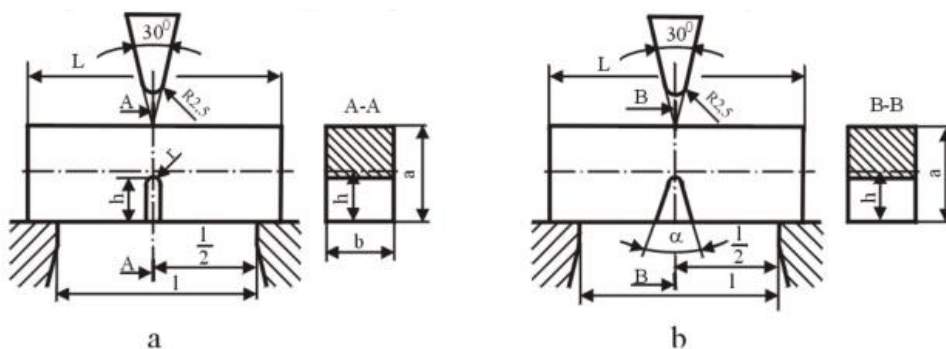


Figura 4.1 Tipuri de epruvete pentru incercarea la impact:
a) cu creștătură U; b) cu creștătură V.

Datele CAD au fost prelucrate cu Simplify3D 3.1.0. pentru a genera codul G pentru imprimantă. Primul set de epruvete a fost tipărit (Figura 4.2) cu același model de umplere, 0° în funcție de axa longitudinală a probei cu următoarele rate de umplere: 20%, 40%, 60%, 80% și 100%. Al doilea set de epruvete a fost fabricat cu un procent de umplere de 100%, dar utilizând diferite modele de umplere disponibile în software-ul Simplify3D. Aceste modele (grilă, triunghiular 60° , grilă +45-45, fagure complet, fagure rapid și ondulatoriu) au fost utilizate și în paragrafele anterioare.

Epruvetele imprimate au fost analizate prin intermediul unui microscop și imaginea a fost importată în software-ul de analiză a imaginii Digimizer (MedCalc Software Ltd, Belgia) pentru a se asigura că creștătura probelor respectă cerințele dimensionale ale standardului. Rezultatele au arătat un unghi de creștătură este de $45,688^\circ$ și o rază de $0,156\text{ mm}$ după cum se observă în figura 4.3.



Figura 4.2 Epruvete imprimate 3D având creștătură în V cu diferite rate de umplere

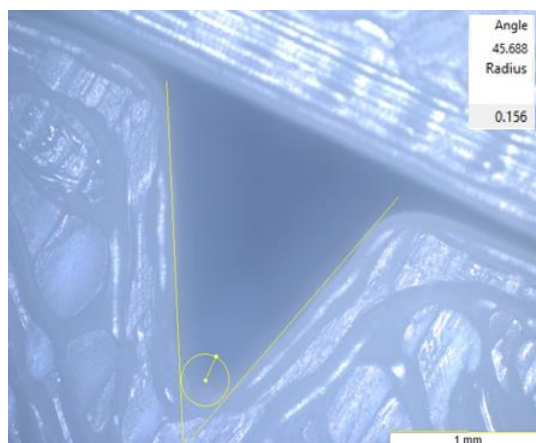


Figura 4.3 Imagine microscopică a creștăturii epruvetelor analizată cu software-ul Digimizer.

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.

Testul Charpy este cea mai utilizată metodă pentru a evalua rezistența la impact sau a rezilienței a materialelor. Acesta poate fi utilizat pe diferite tipuri de materiale, cum ar fi: polimeri, materiale ceramice și compozite. Testele de impact sunt concepute pentru a măsura rezistența la rupere a unui materialului la o forță aplicată brusc. Prin încercarea la încovoiere prin șoc caracteristica mecanică determinată este energia de rupere (J). Aceasta se notează KV, dacă s-a

încercarea s-a realizat pe o epruvetă cu creștătura în formă de V sau KU, dacă epruveta încercată a avut creștătura în formă de U.

Există situații în care caracteristica mecanică prin care se exprimă rezultatul încercării la încovoiere prin șoc o reprezintă reziliența (J/cm^2), notată KCV sau KCU (funcție de forma creștăturii epruvetei încercate), obținută raportând energia de rupere la aria secțiunii transversale în dreptul creștăturii. Valorile energiei de rupere (sau rezilienței) determinate prin încercarea la încovoiere prin șoc a unor epruvete dintr-un anumit material definesc comportarea la rupere a materialului. În cadrul acestei teze, s-a folosit un ciocan tip pendul Charpy tip Instron CEAST 9050 cu o energie maximă de 7,5 J pentru determinarea rezistenței la rupere prin impact a epruvetelor imprimate 3D. Instalația experimentală constă din nicovale pe care sunt poziționate epruvetele. Un pendul cu o masă definită atașată la un braț rotativ fixat la cadrul mașinii (Figura 4.4).

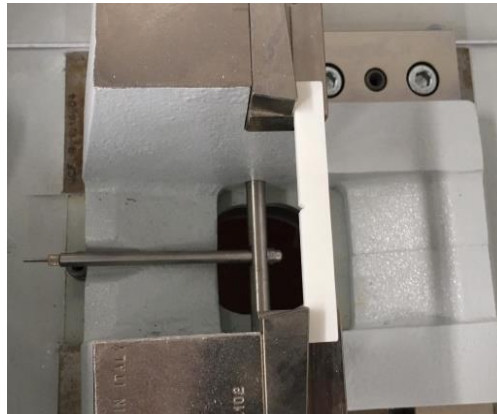


Figura 4.4 Standul experimental pentru încercarea de încovoiere prin șoc: a) ciocanul Charpy, b) fixarea epruvetei cu creștătură

Pendulul este ridicat la o înălțime definită și eliberat. Pendulul eliberat cade, urmând o traiectorie circulară și lovește epruveta la mijloc, transferându-i astfel energie cinetică și ridicându-se la o înălțime măsurată. Diferența dintre înălțimea inițială și cea finală a pendulului este direct proporțională cu cantitatea de energie pierdută din cauza fracturării specimenului. Cantitatea de energie [73] utilizată pentru ruperea epruvetei este determinată de:

$$E_T = mg(h_0 - h_f) \pm 0.2J \quad (4.1)$$

unde E_T este energia totală, m este masa, g este accelerația gravitațională, h_0 este înălțimea inițială și h_f este înălțimea finală. Energia absorbită pe unitatea de suprafață a secțiunii transversale (kJ/m^2) sau reziliența E_C se definește după cum urmează:

$$E_C = \frac{E_T}{wt} \quad (4.2)$$

unde w și t sunt lățimea și grosimea epruvetei. Pierderile de energie datorate frecării rulmenților și rezistența aerului au fost neglijate din cauza contribuției lor mici la bilanțul energetic. De obicei, aparatul de testare afișează direct energia consumată sau absorbită. Trebuie subliniat faptul că testele Charpy sunt calitative, iar rezultatele pot fi doar comparate între ele sau cu o cerință dintr-o specificație tehnică - ele nu pot fi utilizate pentru a calcula rezistența la rupere a unei suduri sau a metalului de bază.

4.1.2. Influența ratei de umplere

Influența ratei de umplere asupra rezilienței probelor a fost studiată pe epruvete imprimare 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 4.2. unde valorile rezilienței medii (kJ/m^2) a epruvetelor imprimate sunt prezentate pentru diferite rate de umplere.

Tabel 4.2 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/m^2]	7,4185	9,71	13,015	15,347	16,708

Modul de rupere al probelor este prezentat în figura 4.5.

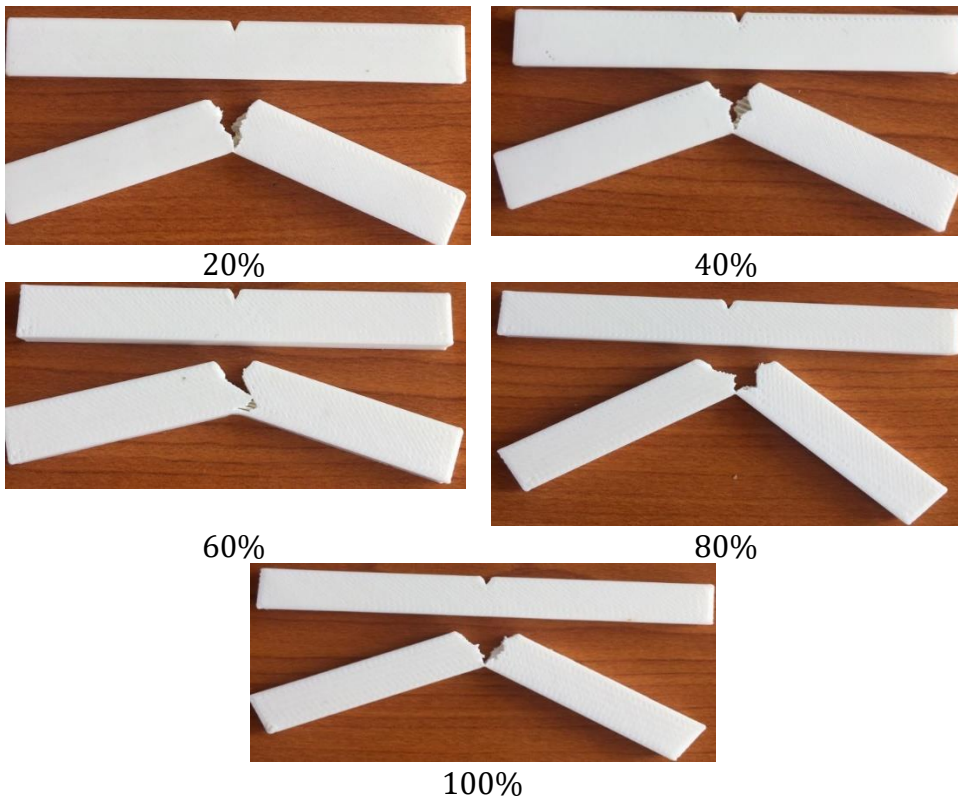


Figura 4.5 Epruvete cu diferite grade de umplere după ruperea la încovoiere prin impact

Așa cum era de așteptat, corelația directă între reziliență și rata de umplere a fost confirmată. Rezultatul a arătat că reziliența pieselor imprimate 3D, (și capacitatea de absorbi mai multă energie) crește împreună cu creșterea procentului de umplere a probelor testate. Epruveta cu cel mai mic procent de umplere CH-0-20%. ($7,4185 \text{ kJ/m}^2$) are cea mai mică reziliență și proba cu cel mai mare raport de umplutură prezintă cea mai mare reziliență CH-0-100% ($16,708 \text{ kJ/m}^2$). Rezultatul demonstrează în mod clar că rata de umplere influențează în mod clar reziliența probei imprimate 3D, diferența fiind de 116,2% între cea mai slabă și cea mai performantă epruvetă.

4.1.3. 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,: Grid 0° - 90° , Grid -45° + 45° , Fast Honeycomb, Full Honeycomb, Wiggle și Triangular 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 4.3, modul de cedare fiind cel aratat în Figura 4.6.

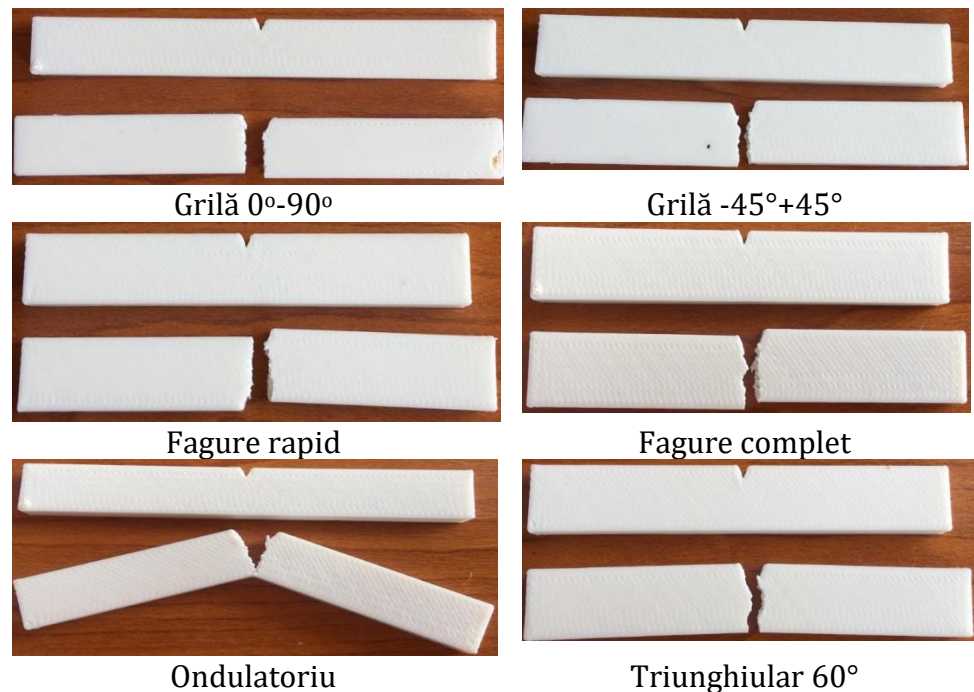


Figura 4.6 Epruvete cu diferite modele de umplere după ruperea la încovoiere prin impact

După examinarea datelor obținute prin testul de impact Charpy efectuat pe eșantioanele tipărite în 3D, se arată clar că modelul de umplere influențează semnificativ comportamentul mecanic al epruvetelor. Cea mai mică reziliență a fost prezentată de epruvetele imprimate cu o umplutură de tip grid (în care straturile de filament sunt construite conform unei grile cu direcția 0° - 90°) reprezentând 5,687

kJ/m². Modelul de umplere care s-a dovedit a fi cel mai rezistent este cel imprimat cu modelul Wiggle avînd reziliența de 12,36 kJ/m². Comparînd rezultatele epruvetelor cu cea mai mică și cea mai mare performanță, rezultatul poate fi exprimat ca o diferență de 119,6%.

Tabelul 4.3 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 4.4.

Tabel 4.4 Valorile medii ale rezilienței probelor în ordine crescătoare

Nr.	Proba	Reziliența medie [kJ/m²]
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_FULLLHC_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

4.1.4. Concluzii

În această capitole s-a analizat influența ratei de umplere și a modelului de umplere asupra rezilienței epruvetelor imprimare 3D. Două seturi de probe au fost analizate. Primul set format din epruvete imprimare 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 imprimare 3D solicitate dinamic a fost investigate prin teste de încovoiere la impact (Charpy) pe probe standard pentru a determina reziliența a materialului. În cazul epruvetelor imprimare cu același model de umplere dar cu rată de umplere diferită, se remarcă legătura dintre rata de umplere și rezistența la impact. Se poate concluziona că reziliența, în cazul probelor imprimare 3D, crește odată cu rata de umplere. Acest comportament era de așteptat, deoarece, în general, o cantitate mai mare de material generează o reziliență mai mare. Problema investigată în această lucrare este aceea de a vedea dacă există un interval al ratei de umplere care are cel mai semnificativ efect asupra rezilienței. Se observă o îmbunătățire notabilă a rezilienței atunci când intervalul de umplere trece de la 40% la 60% ($3,3 \text{ kJ/m}^2$), mult mai mare decât în cazul trecerii de la 20% la 40% ($2,3 \text{ kJ/m}^2$). 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 (wiggly). Cu aceeași rată de umplere de 100%, proba imprimată cu modelul grilă $0^\circ\text{-}90^\circ$ 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. A fost important să se stabilească efectul ratei de umplere pentru a determina consumul optim de material în vederea fabricării de piese și componente funcționale fără a compromite capacitatea de rezistență la solicitări dinamică prin șoc. Combinația corectă între rata optimă de umplere și modelul de umplere ar trebui să aibă ca rezultat o piesă imprimată rezistentă și rezilientă, utilizând cea mai mică cantitate de material necesară. Rezultatele sunt utile pentru a alege viitoarele modele analitice sau computaționale ale rezistenței, rigidității sau rezilienței, în funcție

de modelele de imprimare, de densitatea golurilor de aer și de orientarea rasterului. Diferite rate de umplere, modele, orientări și combinații ale acestora pot fi utilizate pentru a produce piese care îndeplinesc o anumită cerință structurală. O variație locală a acestor parametri poate duce la o structură optimizată care nu presupune modificări geometrice, ci doar ajustări ale parametrilor de imprimare.

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

Tehnologiile de fabricație aditivă (AM) au deja o influență semnificativă asupra modelării și prototipării componentelor ingineresti [74-76]. În unele domenii, cum ar fi industria mecanică [74], biomedicală, construcțiile [75], industria aerospațială [76] și industria alimentară, precum și în cercetarea academică, s-a trecut deja în domeniul fabricării de componente și ansambluri reale supuse unor cerințe nominale și condiții de mediu. Modelarea prin extrudare termoplastică - Fused Filament Fabrication (FFF), cunoscută și sub denumirea de Fused Deposition Modelling (FDM), este cea mai utilizată tehnică, principalele limitări în utilizarea acestei tehnologii în fabricarea structurilor mecanice fiind date de materialele, în general polimerice care pot fi utilizate. Materiale precum acrilonitril butadien-stirenul (ABS), acidul polilactic (PLA), polieter-eter-cetilenă (PEEK), polipropilena (PP) și poliamidele (PA) sunt unele dintre cele mai utilizate materiale polimerice filamentare folosite în tehnologia de depunere aditivă [77]. În ultima perioadă, compozitele din fibre pe bază de polimeri au fost dezvoltate prin tehnologia FDM [78]. Adăugarea de fibre în matricea termoplastică a oferit un modul de elasticitate crescut, o rezistență mai bună la tracțiune și la încovoiere decât materialul termoplastic simplu [78]. Acest lucru va crește posibilitățile de utilizare a materialelor imprimate prin FDM în aplicații reale. Cu toate acestea, incertitudinile din procesul de fabricație al FDM, cum ar fi formarea de goluri, defecte și lipirea ineficientă a straturilor, cresc probabilitățile de deteriorare a structurilor polimerice. Implementarea tehnologiei FDM este limitată de această problemă, proprietățile mecanice ale piesei fiind unul dintre principalele dezavantaje ale acestei tehnologii. Așa cum a fost prezentat în capitolele anterioare, dintre factorii care influențează caracteristicile mecanice statice ale materialelor polimerice imprimate, cei mai relevanți

pot fi grupați în parametri de fabricație (rata de umplere, modelul de umplere, orientarea rasterului, înălțimea stratului, numărul de învelișuri, viteza în timpul extrudării), poziția obiectului în raport cu platforma, proprietățile filamentului (culoare, densitate, amestec de polimeri) și caracteristicile imprimantei 3D (temperatura extruderului, temperatura platformei de construcție, temperatura învelișului, diametrul duzei extruderului). Majoritatea studiilor prezente în literatura de specialitate [52, 53, 63-65, 79] au investigat influența parametrilor de imprimare, cum ar fi raportul de umplere, modelul de umplere, grosimea stratului, înălțimea stratului și alte setări ale imprimantei asupra comportamentului mecanic al pieselor realizate prin tehnologia FDM.

Majoritatea cercetărilor își concentrează atenția în principal asupra comportamentului mecanic atunci când piesele tipărite sunt supuse la sarcini statice, dar, deoarece materialul ar putea ceda din cauza încărcărilor ciclice, este important să se înțeleagă influența parametrilor menționați [25, 80-88] [12-22] mai sus asupra duratei de viață a elementelor realizate din polimeri printați 3D. Oboseala poate apărea în componentele structurale din cauza solicitărilor ciclice, ceea ce duce la deteriorări catastrofale la un nivel mai mic de solicitări mecanice decât o sarcină statică normală. 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 [88]. Pe lângă parametri 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 curbilor S-N este prezentat un model matematic al curbilor de oboseală. Rezultatele comparative ale curbilor 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.

Modelul geometric care este imprimat în interiorul unei piese este denumit în literatura de specialitate model de umplere. Există diferite opțiuni de modele de umplere, fiecare dintre acestea având avantaje și compromisuri în ceea ce privește consumul de material, timpul de imprimare sau rezistența mecanică a piesei fabricate. Software-ul de imprimare 3D oferă de obicei utilizatorilor posibilitatea de a selecta modele de umplură. Deoarece nu există standarde de material pentru materialele fabricate prin AM (Aditive manufacturing) 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. Toate epruvetele de oboseală au fost fabricate orientate orizontal pe platforma de construcție a imprimantei 3D. Fiecare strat al epruvetei este construit în planul x-y, unde axele x, y și z sunt definite de ISO/ASTM 52900:2015. Direcțiile 0° și 90° sunt considerate de-a lungul și perpendicular pe axa de simetrie longitudinală a epruvetei. Fiecare strat a fost fabricat prin construirea mai întâi a unui perete parametric, denumit înveliș, care este utilizat de imprimantă pentru a atinge precizia dimensională necesară și pentru a umple materialul intern.

Epruvetele de încercare au fost fabricate folosind imprimanta Wanhao Duplicator I3 controlată de software-ul Simplify 3D. Materialul de filament utilizat pentru imprimarea epruvetelor a fost acrilonitril butadien-stiren ABS (Plasty Mladeč, Republica Cehă). Testul inițial de tracțiune și testele de oboseală au fost efectuate pe o mașină de încercat servo-hidraulică tip Instron 8810, la temperatura camerei. Încercările de tracțiune statică pentru epruvete având toate cele opt variante de modele de umplere au fost efectuate cu înregistrarea curbelor sarcină-deplasare la o viteză a traversei de 1 mm/min. Suprafața secțiunii transversale pentru calculul tensiunilor tuturor epruvetelor fabricate conform procedurii descrise mai sus s-a bazat pe dimensiunile exterioare ale epruvetelor egale cu 4 mm grosime și 10 mm lățime (fără a lua în considerare raportul material - gol de aer) rezultând o suprafață a secțiunii transversale de 40 mm². Valoarea deformației specifice a fost obținută pe baza deplasării transversale și a lungimii inițiale a regiunii calibrate a epruvetei. Efectul golurilor de aer asupra valorilor locale ale tensiunii și deformației nu poate fi neglijat chiar dacă rata de umplere este setată la 100%, așa cum s-a arătat în capitolele anterioare, aceasta

va afecta comportamentul mecanic și implicit constantele de material ale materialului imprimat 3D. Construirea diagramelor Wohler cu valori normalizate ale tensiunilor va permite eliminarea problemei estimării exacte a ariei secțiunii transversale și a tensiunilor estimate.

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 economisi timp și pentru a conserva materialul) 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 trațiune (UTS). Pentru efectuarea încărcărilor ciclice s-a ales o frecvență de încercare de 10 Hz. Pentru procedura experimentală, așa cum a fost utilizată în alte studii [12], a 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.

4.2.2. Rezultate și discuții

Curbele tensiune-deformație specifică ale epruvetelor cu diferite modele de umplere sunt reprezentate în figura 4.7, iar rezistența la trațiune (UTS) este rezumată în tabelul 4.5. Se poate observa că modelele în formă de fagure (Honeycomb) au cea mai mică rezistență la trațiune, cele rectilinii de 90° și triunghiulare (60°) au o rezistență similară, iar celelalte modele au o valoare în jur de 37 MPa. Explicația se referă la cantitatea de filamente extrudate aliniate cu forța de trațiune

și interacțiunea lor, cum ar fi suprafața de lipire și rezistența lipiturii [63, 79, 89]. Unele epruvete s-au tensionat doar puțin înainte de rupere și au suferit ruperea foarte aproape după atingerea nivelului de curgere, comportamentul depinde foarte mult de rezistența legăturii dintre straturi create în timpul depunerii filamentelor [89]. Observația va fi mai relevantă atunci când se va investiga comportamentul la oboseală, unde se așteaptă ca aceste elemente să facă diferența pentru epruvete cu valori alte rezistenței la tracțiune determinată static similară, dar cu structură internă diferită.

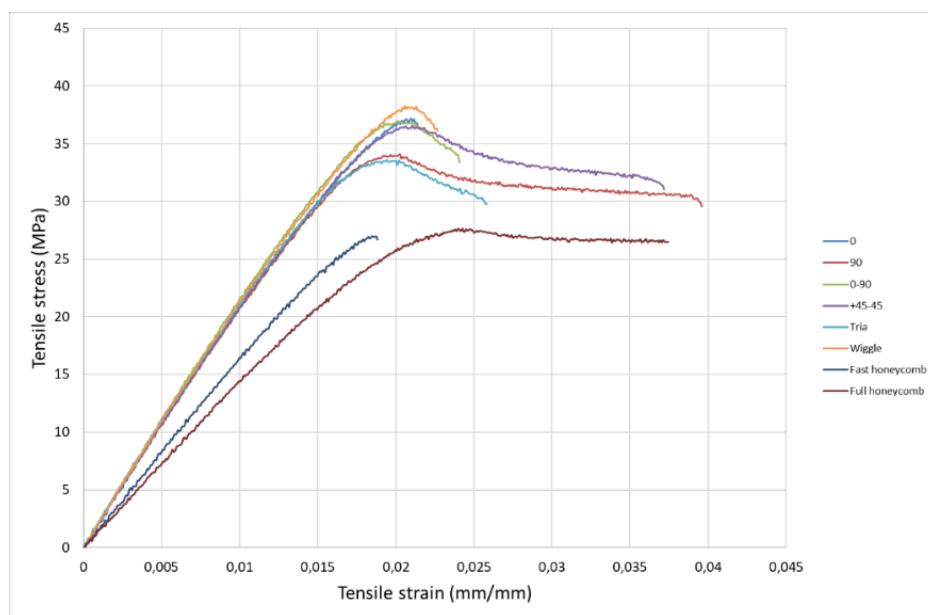


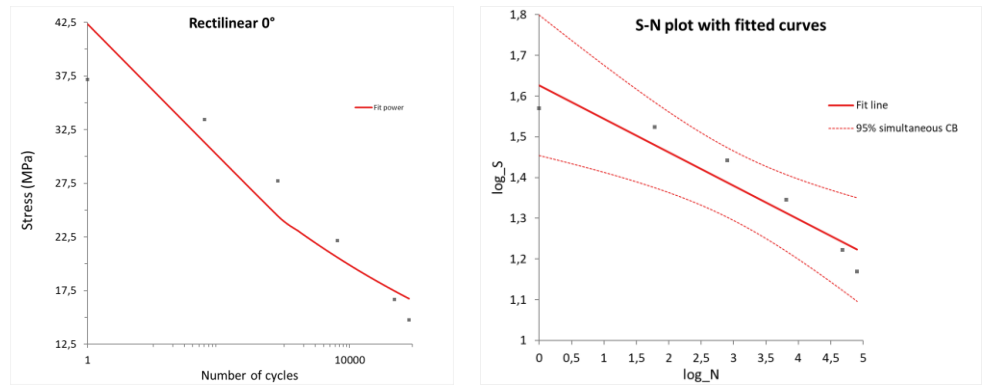
Figura 4.7 Curbele tensiune - deformație specifică ale epruvetelor cu diferite modele de umplură

Tabelul 4.5 Rezistența la tracțiune măsurată pentru epruvete cu diferite modele de umplură

Model de umplere	0	90	0-90	±45	Tria	Wiggle	Fast honeycomb	Full honeycomb
UTS (MPa)	37.16	34.11	36.98	36.58	33.62	38.24	25.18	27.63

Datele primare ale încercării de oboseală (forța și numărul de cicluri) au fost utilizate pentru a trasa curbe S-N (Wöhler) pentru epruvete cu diferite modele de umplere. Evaluarea statistică a datelor

prin identificarea funcției care se potrivește punctelor ce definesc curba de oboseală a utilizat o scară $\log_S - \log_N$. Pentru exemplificarea rezultatelor obținute, graficul $S-N$ pentru modelul de umplere rectiliniu de 0° este prezentat în figura 4.8a, iar limitele de precizie de 95% sunt prezentate în figura 4.8b.

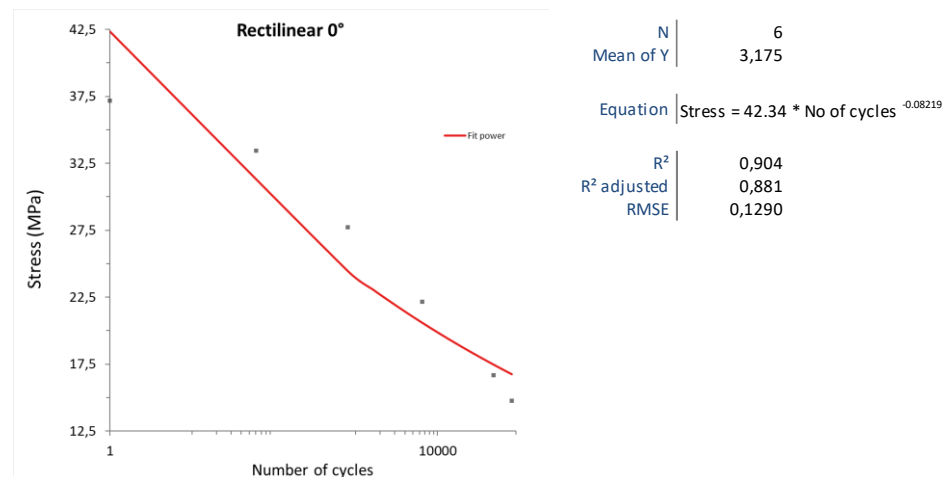


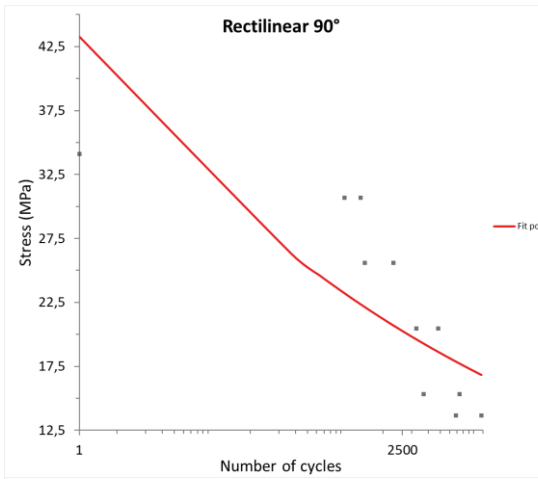
a)

b)

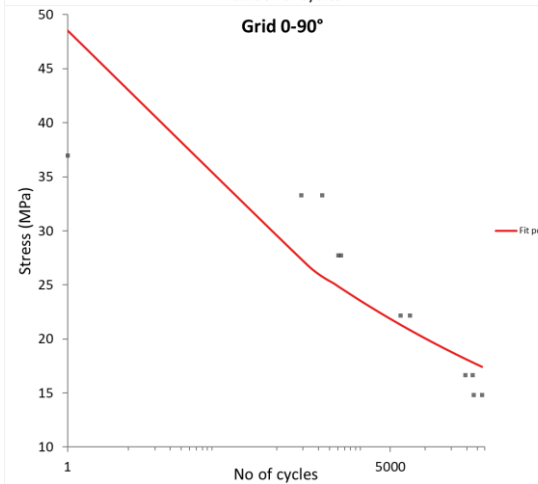
Figura 4.8 Curba Wöhler a epruvetelor cu modelul de umplere grid 0° : a) coordonate S-N, b) coordonate \log_S - \log_N

Figura 4.9 prezintă curbele tensiune-număr de cicluri pentru restul modelelor de umplere.

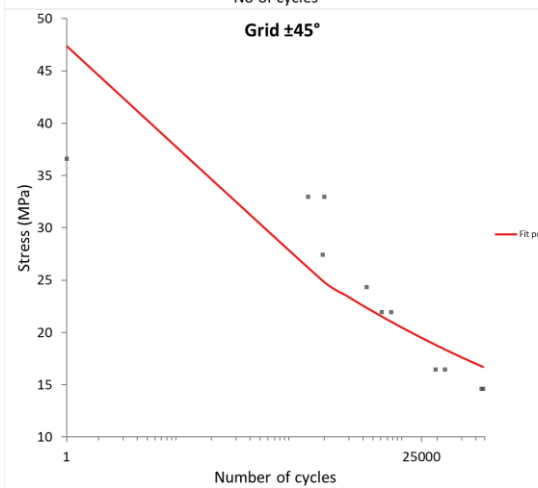




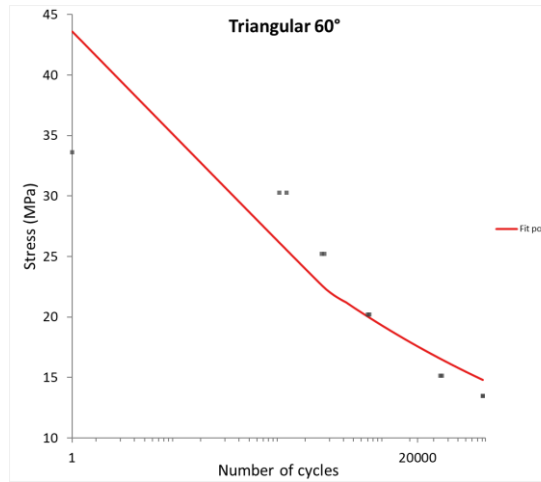
N	11
Mean of Y	3,053
Equation	90: Stress = 43,28 * 90: No of cycles ^{-0,09706}
R ²	0,572
R ² adjusted	0,524
RMSE	0,2360



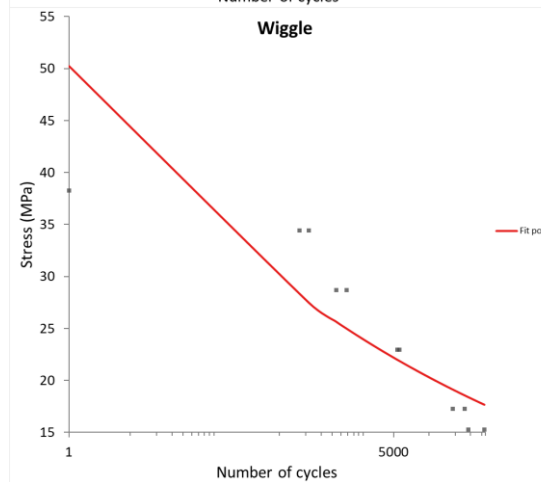
N	11
Mean of Y	3,134
Equation	0-90: Stress = 48,52 * 0-90: No of cycles ^{-0,09356}
R ²	0,759
R ² adjusted	0,732
RMSE	0,1771



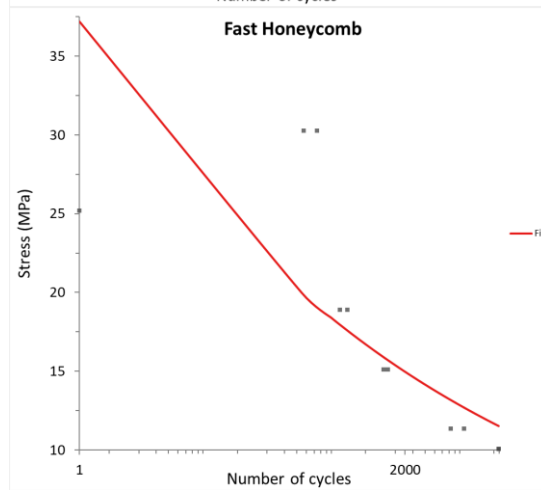
N	11
Mean of Y	3,113
Equation	45: Stress = 47,37 * 45: No of cycles ^{-0,08781}
R ²	0,746
R ² adjusted	0,718
RMSE	0,1791



N	11
Mean of Y	3,040
Equation	Tria: Stress = 43,61 * Tria: No of cycles ^{-0,091}
R ²	0,829
R ² adjusted	0,811
RMSE	0,1488



N	11
Mean of Y	3,168
Equation	Wiggle: Stress = 50,22 * Wiggle: No of cycles ^{-0,09598}
R ²	0,767
R ² adjusted	0,741
RMSE	0,1738



N	11
Mean of Y	2,803
Equation	Fast_H: Stress = 37,22 * Fast_H: No of cycles ^{-0,1199}
R ²	0,642
R ² adjusted	0,602
Maximum attainable R ²	1,000
RMSE	0,2628

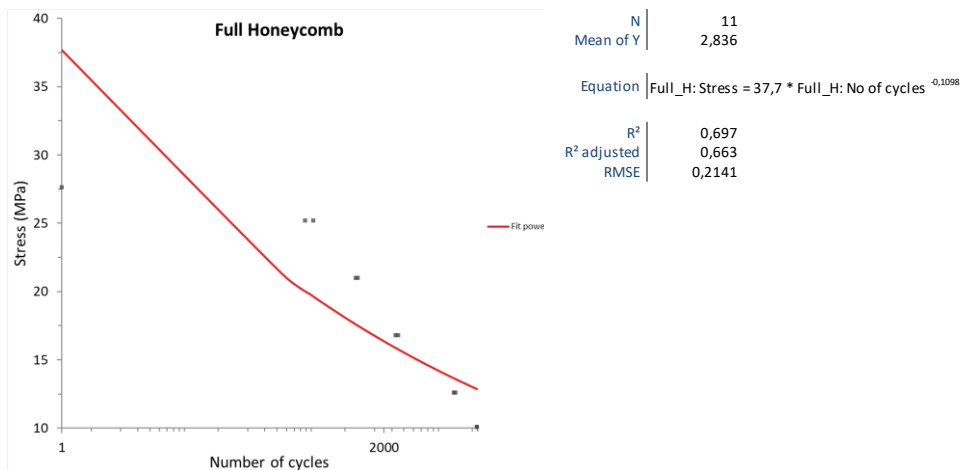


Figura 4.9 Diagramele Wöhler pentru diferite modele de umplere și parametri curbei de aproximare

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

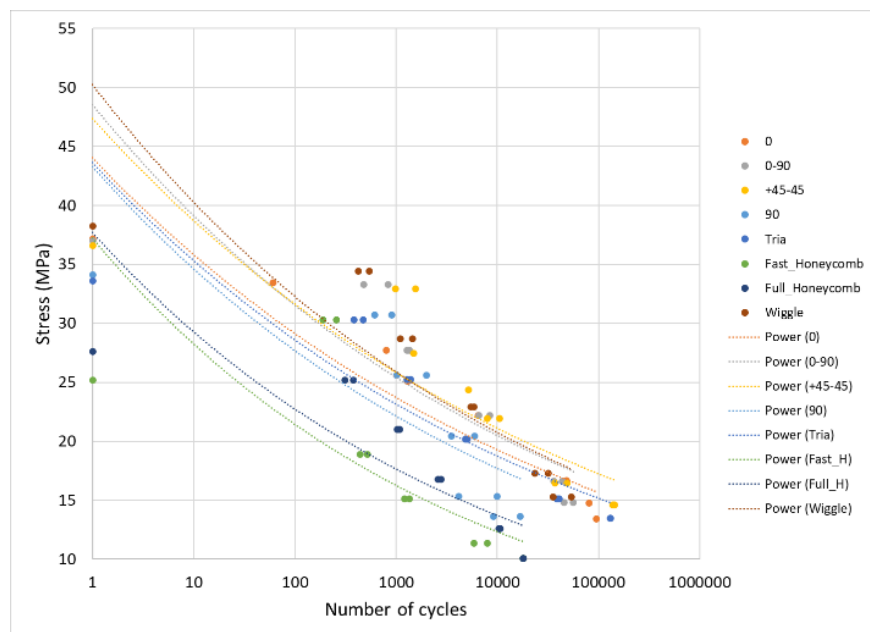
$$S = 10^A * N^B \quad (4.1)$$

unde A și B sunt coeficienți determinați prin metoda celor mai mici pătrate și prezentați în tabelul 4.6. S-au calculat precizia de aproximare a funcțiilor analitice pentru epruvetele aparținând fiecărui model de umplere, coeficientul de determinare R-pătrat reflectă variația răspunsului exprimată de modelul definit. Valoarea 1 indică un model care prognozează perfect valorile din câmpul țintă. O valoare mai mică sau egală cu 0 indică un model care nu are valoare predictivă. Eroarea medie pătratică (RMSE) reflectă eroarea medie a valorii prezise de model în raport cu datele măsurate.

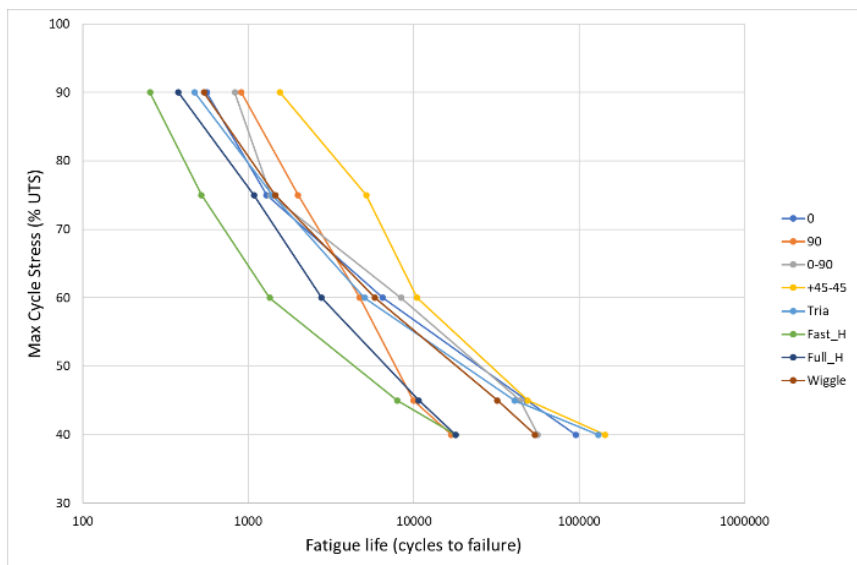
Table 4.6 Coeficienții modelului liniar și acuratețea aproximării

Model de umplere	Rectiliniar 0°	Rectiliniar 90°	Grilă 0°-90°	Grilă ±45°	Triunghiular 60°	Ondulant (Wiggle)	Fast honeycomb	Full honeycomb
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

Analizând valorile statistice obținute, se poate concluziona că modelul propus asigură o predicție rezonabil de precisă a duratei de viață la oboseală, puncte de măsurare suplimentare vor duce la îmbunătățirea modelului matematic. Pentru a aprecia rolul jucat de modelul de umplere asupra duratei de viață la oboseală a epruvetelor tipărite, o analiză comparativă a punctelor S-N obținute și a curbei de aproximare corespunzătoare este prezentată în figura 4.10a. Prezența golurilor în materialul imprimat va afecta nu numai calculul corect al UTS prin estimarea inexactă a suprafeței secțiunii transversale [90], ci este responsabilă de reducerea rezistenței la tracțiune comparativ cu materialul turnat prin injecție. Prezența golurilor determină o secțiune transversală efectivă mai mică și o densitate mai mică a epruvetei. Pentru a depăși această problemă atunci când se compară datele de oboseală se utilizează tensiunea maximă normalizată în raport cu rezistența la tracțiune (UTS). Rezultatele curbelor S-N trasate luând în considerare tensiunea maximă a ciclului ca procent din rezistența la tracțiune sunt prezentate în figura 4.10b pentru diferite modele de umplere cu curbe ajustate.



a)



b)

Figura 4.10 a) Curbe tensiune-număr de cicluri S-N pentru diferite modele de umplere; (b) Curbe tensiune-număr de cicluri S-N cu tensiune normalizată.

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)

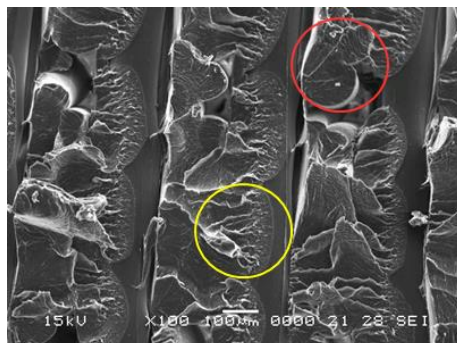
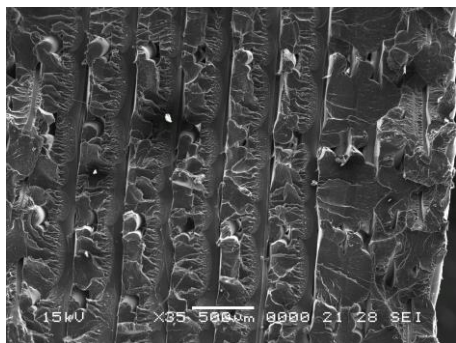
Tabel 4.7 Durată de viață a diferitelor modele de umplere

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

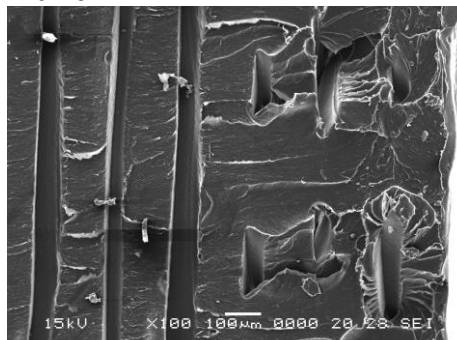
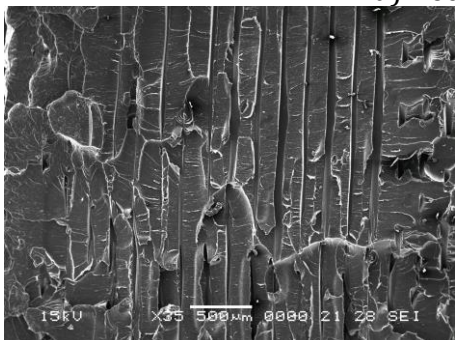
Rezultatele indică faptul că modelele cu filamente înclinate în raport cu direcția de tracțiune (grilă ±45°, rectiliniu 0° și triunghiular 60°) au o durată de viață la oboseală mai mare în comparație cu cele cu majoritatea filamentelor perpendiculare pe direcția de tracțiune (fagure rapid, fagure complet 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°). O explicație a faptului că modelul tip grilă ±45° are cea mai mare durată de viață la oboseală este aceea că tensiunea

maximă de forfecare apare în timpul încărcării uniaxiale la un unghi de $+45^\circ$, dar în timpul încărcării este neutralizată de modelul de -45° . Această dispunere a filamentelor ar putea încetini sau împiedica o fisură să se propage complet prin material. O altă interpretare este legată de rotația modelului în timpul încărcării ciclice, modelul de $\pm 45^\circ$ tinde să se transforme într-o orientare de $0-90^\circ$, care este mai bine aliniată cu direcția de încărcare, astfel încât rezistența filamentelor devine mai ridicată [89]. Orientarea și golul de aer dintre regiunea neconectată (nelipite) diferă între modele, scăderea golurilor în timpul încărcării ciclice ar crește rezistența reală a epruvetei, mica reorientare a filamentelor ar produce o aliniere cu direcția de încărcare, rezistența filamentelor devenind mai relevantă. Examinând graficul S-N tensiune-număr de cicluri pentru diferite orientări ale rasterului normalizate în raport cu rezistența la tracțiune se poate observa că pentru câteva modele (rectiliniu 90° și ondulatoriu) tendința curbei de aproximare se schimbă odată cu nivelul de solicitare, la un nivel de solicitare mai mic numărul de cicluri până la rupere se reduce semnificativ. Nu există o explicație clară privind acest comportament, o posibilă explicație ar fi tranziția de la ruperea ductilă la ruperea fragilă, așa cum ar fi de așteptat la oboseala cu număr ridicat de cicluri (High Cycle Fatigue).

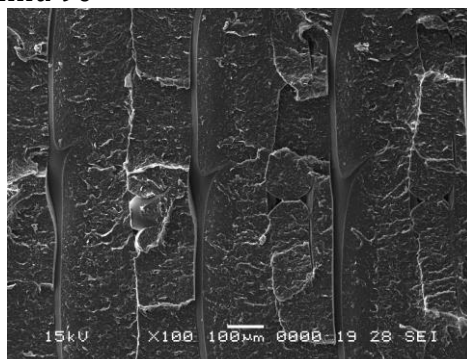
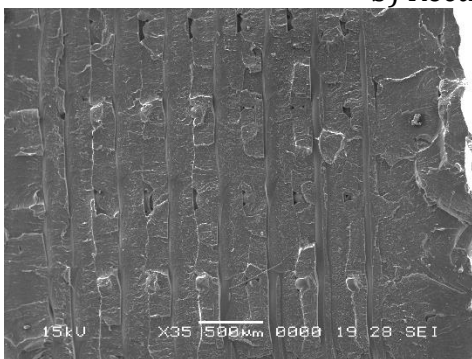
Analiza fractografică cu ajutorul microscopiei electronice (SEM) a evidențiat fenomenele microstructurale care au produs ruperea epruvetei și a oferit informații suplimentare despre interacțiunea microstructurală dintre filamente și ruperea acestora în cazul încărcărilor prin cicluri. Figura 4.11 prezintă imaginile SEM la diferite mărimi optice ale epruvetelor investigate cu diferite modele de umplură. În toate imaginile este vizibil fenomenul caracteristic materialele polimerice de modificare a culorii (albirea) sub solicitare. În mod obișnuit, ABS dezvoltă numeroase crăpături în timpul solicitării plastice. Benzile de crăpare se formează perpendicular pe axa de încărcare, iar cedarea are loc în cadrul secțiunilor de filament. Pentru unele modele (Rectilinear 0° , Grid $\pm 45^\circ$, Triangular 60°) s-au observat, de asemenea, dovezi de delaminare localizată a fibrelor. Cedarea la oboseală a acestor epruvete s-a produs mai ales în zonele mai puțin lipite prin fuziune dintre fibrele stratificate. Dezlipirea fibrelor în timpul testului de oboseală este, de asemenea, clar vizibilă (modele: Rectilinear, Grid $\pm 45^\circ$, Triangular 60°).



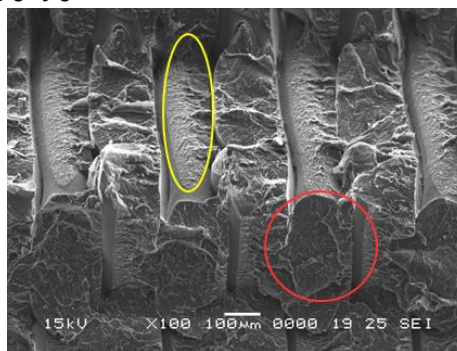
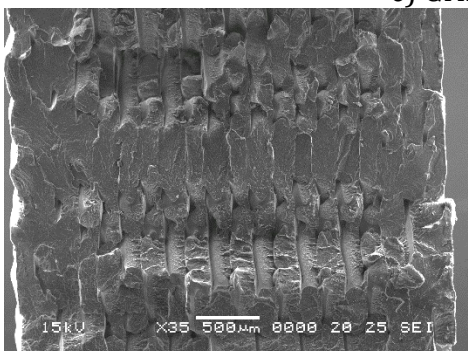
a) Rectiliniar 0°



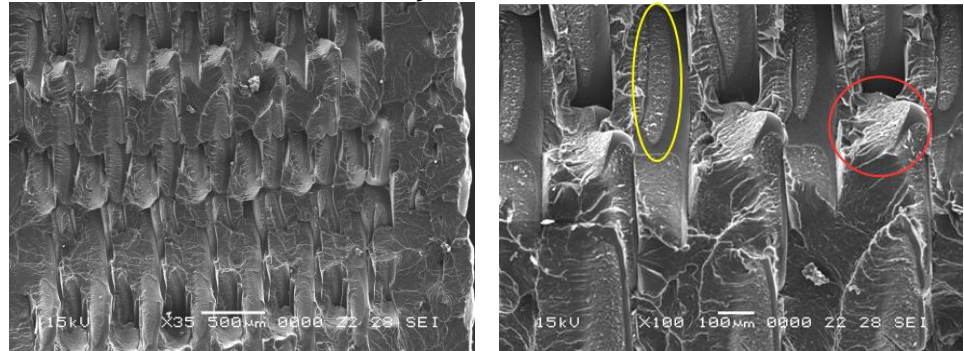
b) Rectiliniu 90°



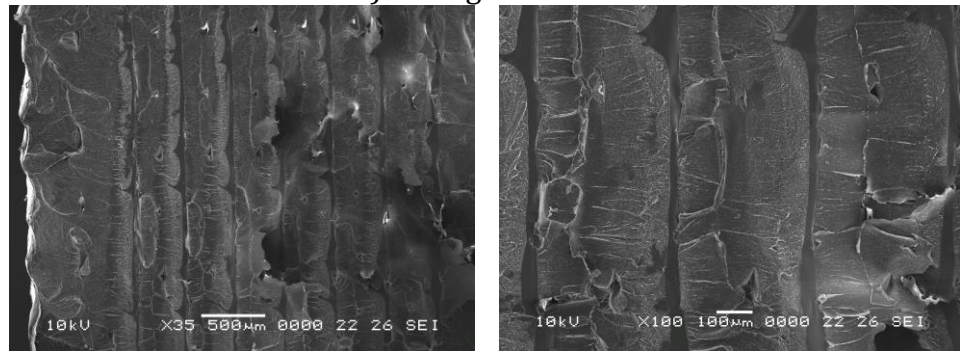
c) Grilă 0-90°



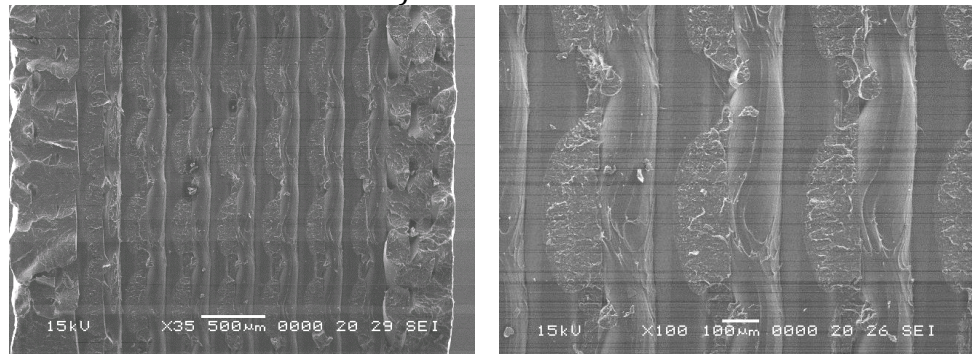
d) Grilă $\pm 45^\circ$



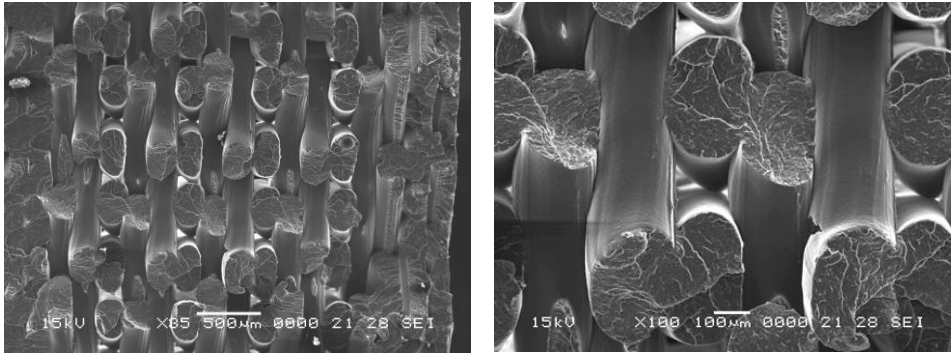
e) Triunghiular 60°



f) Ondulatoriu



g) Fagure rapid



h) Fagure complet

Figura 4.11 Imagini SEM ale suprafețelor de fractură ale epruvetelor de oboseală cu următoarele modele de umplere (a) Rectiliniu 0° ; (b) Rectiliniu 90° ; (c) Grilă $0-90^\circ$; (d) Grilă $\pm 45^\circ$; (e) Triunghiular 60° ; (f) Ondulatoriu; (g) Fagure reapid; (f) Fagure complet

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 fagure plin, golul de aer este semnificativ, legăturile interlaminare sunt reduse (Figura 4.11h), ceea ce explică cele mai slabe rezultate în ceea ce privește durata de viață la oboseală.

4.2.2. Concluzii

În această lucrare, epruvete de tracțiune imprimare în 3D cu opt tipuri de modele de umplere 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. Au fost testate epruvete standard cu o rată de umplere de 100% și cu modele de umplere rectiliniu 0° și 90° , grilă $0^\circ-90^\circ$ și $+45^\circ-45^\circ$, fagure rapid, fagure complet, triunghiular (60°) și ondulatorie (wigggle). După finalizarea testelor de tracțiune pentru a determina rezistența la tracțiune a epruvetelor, s-au efectuat teste de oboseală axială pentru fiecare combinație de modele de umplere pentru a măsura durata de viață la oboseală pentru UTS de 90%, 75%, 60%, 45% și 40%. Pe baza curbelor S-N a fost dezvoltat un model simplu al proprietăților de oboseală. Examinarea zonelor de fractură cu ajutorul microscopului

electronic a indicat interacțiunea microstructurală dintre filamente care stă la baza principalelor mecanisme de rupere.

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

- modelele cu filamente înclinate în jurul axei de tracțiune (grilă $\pm 45^\circ$, rectiliniu 0° și triangular (60°)) au durata de viață ridicată la oboseală 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 (wiggles) sau de-a lungul și perpendicular pe direcția de tracțiune (grilă 0° - 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 definatorii 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.
- durata de viață la oboseală a materialelor tipărite 3D ar trebui evaluată prin teste experimentale, atâta timp cât nu există încă o simulare numerică precisă a legăturii între-straturi și a întra-straturilor materialelor tipărite 3D.

5. Studii de caz

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

Fabricarea aditivă și, în special, imprimarea 3D au câștigat o popularitate largă în ultimii ani datorită capacității metodelor de a fabrica componente cu o complexitate geometrică ridicată. Cel mai rentabil proces de fabricare a pieselor din plastic cu ajutorul imprimării 3D este metoda de modelare prin depunere topită (FDM). Pe lângă geometriile complexe care pot fi realizate, un aspect important sunt proprietățile mecanice ale pieselor imprimate. Proprietățile mecanice ale pieselor fabricate prin modelare prin extrudare termoplastică sunt influențate în mod semnificativ de parametrii de imprimare. Mai multe studii [51, 52, 91, 92] au demonstrat, prin metode experimentale sau numerice, influența ratelor de umplere, dar și a modelului imprimat al diferitelor straturi și a orientării acestora asupra comportamentului mecanic al pieselor imprimate. O abordare valoroasă pentru optimizarea proprietăților mecanice ale modelării prin depunere topită cu acid polilactic prin intermediul designului de experimente este descrisă în [93]. Metodologia a presupus o matrice de testare Taguchi cu două niveluri de factori definită pentru a asigura testarea mecanică a mai multor setări de fabricație diferite utilizând o matrice redusă de experimente. Investigarea efectului golurilor de aer, a lățimii rasterului, unghiului rasterului, numărului de contururi și lățimii conturului, cu un design complet al experimentului asupra proprietăților la încovoiere ale pieselor produse prin FDM sunt prezentate în [60]. Rezultatele obținute au arătat că unghiul de raster și lățimea rasterului au cel mai mare efect asupra proprietăților la încovoiere ale materialului, lucrarea prezentând, de asemenea, nivelurile optime ale parametrilor de proces. O altă cercetare [94] prezintă o investigație experimentală și o optimizare a variabilelor procesului FDM folosind o abordare statistică hibridă pentru a atinge rezistența la încovoiere dorită. Abordarea hibridă combină metodologia suprafeței de răspuns și algoritmul genetic pentru a prezice rezistența la încovoiere a probelor fabricate prin FDM.

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. Pentru a exploata întregul potențial de creare a unor structuri interne personalizate în piesele imprimate 3D în funcție de distribuția sarcinilor, ar trebui stabilită o metodă de modelare adecvată. Cu ajutorul acestei proceduri ar fi teoretic posibil să se creeze piese cu dimensiuni optime din punct de vedere al formei geometrice și cu o structură internă optimizată.

Din păcate, în prezent nu există niciun instrument de imprimare 3D adecvat care să faciliteze crearea unei rate de umplere variabile și a unui model de umplere. Cel mai avansat, din acest punct de vedere, este software-ul Simplify 3D, care permite lucrul cu mai multe piese și mai multe setări într-o singură sesiune de imprimare. De asemenea, acesta are posibilitatea de a configura setările în așa fel încât să se obțină o piesă imprimată 3D cu rată de umplere variabilă. Funcția care face posibil acest lucru este crearea de configurații de imprimare diferite pentru diferite înălțimi, prin definirea poziției în care imprimanta va începe sau se va opri să imprime, în funcție de o anumită configurație. Pentru studiul nostru, ne-am propus să creăm o epruvetă de încovoiere cu grad de umplere variabil, pentru a studia influența acesteia asupra comportamentului mecanic al piesei imprimate 3D.

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

După cum s-a menționat anterior, nu există o funcție standard în software-ul de imprimare 3D pentru a determina zonele cu diferite rate de umplere sau modele de umplere. 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. În software-ul Simplify 3D, există posibilitatea de a defini parametri de imprimare individuali pentru un sub-volum creat anterior, definit ca "model nou". 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%. Motivul pentru care se alege această distribuție a ratei de umplere: epruveta va fi solicitată la încovoiere în trei puncte cu sarcină simetrică într-o mașină de încercat universală (Instron 3366, SUA), iar sarcina și săgeata vor fi măsurate așa cum este prezentat în figura 5.1. 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. În primul rând, modelul geometric al epruvetei a fost creat în SolidWorks și exportat în programul de preprocesare al imprimantei. Epruveta creată (cu următoarele dimensiuni: 90 mm lungime, 4 mm înălțime, 10 mm grosime) a trebuit să fie împărțită în nouă secțiuni, așa cum se prezintă în figura 5.2. Secțiunile au fost definite ca "modele noi", astfel încât software-ul le-a tratat individual, permițând astfel stabilirea unor configurații de imprimare diferite pentru fiecare "model nou". Pe măsură ce "modelele noi" sunt definite, software-ul permite utilizatorului să definească o rată de umplere diferită sau un model de umplere diferit pentru fiecare model, după cum se vede în figura 5.2 a). Prin dublu clic pe lista de definiții a modelului, utilizatorul are la dispoziție întreaga gamă de setări din care poate alege. Dezavantajul acestei abordări de modelare este că software-ul va încerca să efectueze un proces de imprimare obișnuit pentru fiecare submodel definit individual, în condițiile în care, în modul standard, se construiește și secțiunea de înveliș a piesei. Această caracteristică facilitează aplicarea diferiților parametri de imprimare în cazul pieselor orientate vertical pe platforma de imprimare, unde diferiții parametri pot fi modificați în funcție de înălțimea duzei de imprimare.



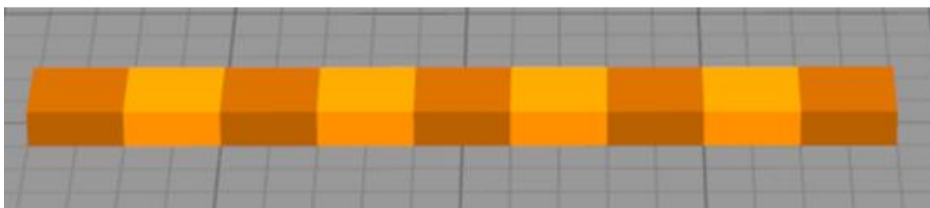
Figura 5.1 Încercarea la încovoiere în trei puncte pentru proba imprimată 3D cu rată de umplere variabilă.

Soluția utilizată în acest studiu a fost de a defini încă două procese și de a adăuga încă o geometrie, care a fost utilizată pentru a crea baza - partea superioară și secțiunea de înveliș a modelului, așa cum este prezentat în figura 5.2 b). Geometria suplimentară adăugată a fost utilizată pentru a imprima partea inferioară și partea superioară a epruvetei - unde erau necesare straturi continue - apoi imprimanta a început să imprime secțiunile individuale cu o rată de umplere variabilă și a terminat din nou cu o imprimare continuă a straturilor superioare, utilizând aceeași geometrie ca și pentru bază. Lista de procese și lista de modele sunt sincronizate, iar punctul de început și de sfârșit al diferitelor procese ar putea fi configurate în acest mod. Înainte de a începe imprimarea, utilizatorul are opțiunea de a continua cu imprimarea "strat cu strat" sau "obiect cu obiect". Imprimarea strat cu strat înseamnă că imprimanta va construi piesele strat cu strat, indiferent de setarea și numărul de piese. Imprimarea va începe cu procesul definit ca "Base" (bază) și va continua să parcurgă toate modelele și procesele atribuite, fără a construi modelele individuale cu un proces specific în mod individual. Setările pentru fiecare obiect în parte vor comanda imprimantei să tipărească fiecare "model nou" în parte și numai după finalizare va trece la efectuarea aceleiași operații pentru următorul "model nou" sau, așa cum este denumit în acest caz: obiect.

	Name	Type
<input checked="" type="checkbox"/>	GrindaEgalaRez10	FFF
<input checked="" type="checkbox"/>	GrindaEgalaRez10(2)	FFF
<input checked="" type="checkbox"/>	GrindaEgalaRez10(3)	FFF
<input checked="" type="checkbox"/>	GrindaEgalaRez10(4)	FFF
<input checked="" type="checkbox"/>	GrindaEgalaRez10(5)	FFF
<input checked="" type="checkbox"/>	GrindaEgalaRez10(7)	FFF
<input checked="" type="checkbox"/>	GrindaEgalaRez10(8)	FFF
<input checked="" type="checkbox"/>	GrindaEgalaRez10(9)	FFF
<input checked="" type="checkbox"/>	GrindaEgalaRez10(6)	FFF
<input checked="" type="checkbox"/>	GrindaEgalaRez90	FFF
	20	FFF
	40	FFF
	60	FFF
	80	FFF
	100	FFF
	80R	FFF
	60R	FFF
	40R	FFF
	20R	FFF
	Base	FFF
	Top	FFF

a)

b)



c)

Figura 5.2 Setări ale epruvetei de încovoiere a) setări ale sub-modelului, b) setări ale procesului, c) definirea geometrică a sub-modelelor.

O problemă nu este încă eliminată complet: liniile sunt întrerupte de carcasa interne, ceea ce nu permite obținerea unor linii continue pe toată lungimea epruvetei, așa cum se prezintă în figura 5.3. Zonele despărțitoare, care reprezintă practic zona de înveliș (shell) a modelelor individuale, sunt marcate cu roșu pe imagine. Faptul că nu avem o linie continuă în întregime va reduce probabil săgeata epruvetei. Dezactivarea completă a creării învelișului ar duce la creșterea golurilor de aer în piesă, ceea ce ar influența semnificativ comportamentul mecanic al probei, astfel încât nu a fost o opțiune. Deși această problemă este prevăzută, investigația a fost continuată pentru a vedea efectul acestei configurații asupra comportamentului epruvetei. Următorul efort a fost făcut în direcția eliminării complete a zonelor de separare între diferitele setări ale imprimantei, pentru a crea un model cu linii continue pe toată lungimea piesei.

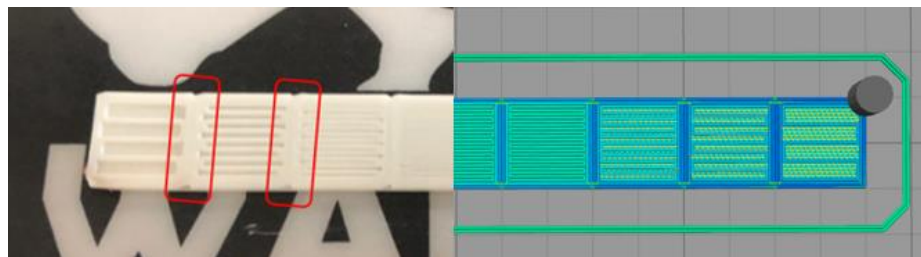


Figura 5.3 Epruvetă în timpul procesului de imprimare cu pereți subțiri interni evidențiați între diferite setări. (Partea stângă: specimenul imprimat, partea dreaptă: setările imprimantei)

Pentru a crea un astfel de model, lungimea sub-modelelor geometrice a fost modificată, prelungită cu o jumătate din zona de separare a peretelui subțire intern. În acest fel, software-ul de imprimare a fost capabil să tipărească continuu de la o zonă cu o setare diferită la alta fără a construi un perete subțire intern, așa cum se observă în figura 5.4.



Figura 5.4 Epruvetă îmbunătățită în timpul procesului de imprimare fără a genera pereți subțiri între diferite setări. (Partea stângă: specimenul imprimat, partea dreaptă: setările imprimantei)

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

	Modulul de elasticitate la încovoiere	Tensiunea la forța maximă	Forța de solicitare	Săgeata la forța maximă
	(MPa)	(MPa)	(N)	(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

O reprezentare grafică a forței aplicate versus săgeata la mijlocul deschiderii grinzii este prezentată în figura 5.5 unde - Uniform 100% - reprezintă rezultatele epruvetelor imprimate uniform, Variabil_Versiunea1 - prezintă rezultatul epruvetelor cu pereți subțiri și rată de umplere variabilă, Variabil_Versiunea2 - reprezintă rezultatul epruvetelor imprimate cu umplutură variabilă, fără pereți subțiri.

Comparând rezultatele testelor, putem concluziona că efectul ratei variabile de umplere are un efect semnificativ asupra rigidității epruvetelor. Există o deformare ușor mai mică și o curbă ușor mai abruptă prezentată în figura 5.5 pentru probele cu umplutură variabilă (Variabil_Versiunea1) până la ~65N, dar brusc cedează la o sarcină de ~80N (min. 77,33N; max 83,1N - interval pentru cele 5 probe). Cel de-al doilea set de probe de testare (Variabil_Versiunea2), tipărite cu rata de umplere variabilă, dar fără pereți subțiri între diferitele setări, s-au comportat mai bine decât versiunea cu pereți subțiri, capacitatea lor de rezistență la sarcină a crescut cu 7,75%, cedând în cele din urmă la 86,69N (min. 84,63N; max 92,32N - interval pentru cele 5 probe).

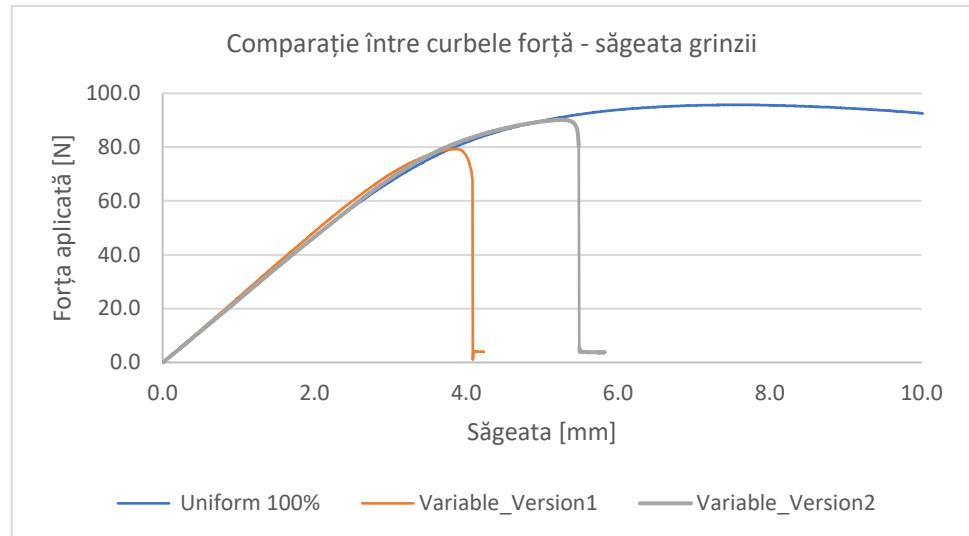


Figura 5.5 Comparație între curbele forță aplicată – săgeata grinzii pentru epruvetele solicitate la încovoiere imprimată uniform și cu rată de umplere variabilă

Epruveta imprimată cu setări uniforme (Uniform 100%) a avut cea mai bună performanță, rezistând la o sarcină de până la ~ 95N (min. 94,12; max. 96,55N - intervalul pentru cele 5 epruvete), ceea ce reprezintă o diferență de 18% față de Variabil_Versiunea1 și de 9,5% față de Variabil_Versiunea 2. Modulul elasticitate la încovoiere măsurat al epruvetei cu umplutură variabilă cu perete subțire (Variabil_Versiunea1) este cel mai mare 2078 MPa, fiind ușor mai mare decât în cazul epruvetelor imprimată cu umplutură variabilă și fără perete subțire (Variabil_Versiunea2), cu o valoare medie de 2004 MPa, față de 1984 MPa pentru prima epruvetă imprimată cu rată de umplere uniformă, reprezentând o diferență de 4,75% între Uniform 0-grade, 100% și Variabil_Versiunea1, și 1% între Uniform 0-grade, 100% și Variabil_Versiunea2). Diferența valorii săgeții între cele două eșantioane tipărite variabil este foarte mare. Variabil_Versiunea2 se deformează cu 25% mai mult decât Variabila_Versiunea1. Proba imprimată cu rată de umplere uniformă de 100% se deformează cu 51% mai mult decât cea imprimată cu rată de umplere variabilă fără perete subțire Variabil_Versiunea2. Acest lucru se datorează probabil faptului că straturile de filament tipărite nu merg continuu, ele fiind întrerupte de zonele de separare dintre secțiunile cu umplutură variabilă. Ceea ce este,

de asemenea, un factor important: între probele din același set de epruvete, inconsecvența rezultatelor individuale este întotdeauna mai mare în cazul epruvetelor imprimate cu rată de umplere variabilă.

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. Testarea experimentală necesită mult timp de imprimare și de utilizare a materialelor. Predicția proprietăților mecanice ale unei piese FDM funcționale înainte de a o imprima efectiv ar putea aduce o serie de avantaje: risipa de material ar putea fi redusă la minimum, timpul de imprimare ar putea fi optimizat, influența parametrilor de imprimare asupra proprietăților mecanice ale piesei ar putea fi evaluată și optimizată înainte de imprimarea fizică a piesei. Pentru a realiza o predicție fiabilă a comportamentului mecanic al speciimenelor imprimate, a fost efectuată o analiză FEM, iar rezultatele au fost comparate cu cele experimentale. Mai întâi, modelul FEM al epruvetelor de testare a fost creat în ANSA. 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 împărțit în 9 secțiuni, fiind aplicate diferite setări de materiale pentru rata de umplere variabilă. Utilizând rezultatul unui studiu experimental anterior (paragraful 3.4.4), în care modulul de tracțiune pentru diferite rate de umplere a fost determinat experimental și ajustat numeric la secțiunea transversală corectă, rata de umplere variabilă a modelelor FEM a fost reprezentată ca o diferență de material cu un modul corespunzător unei rate de umplere specifice. 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 Epylisis. Post-procesarea datelor a fost realizată în Metapost. Rezultatele sunt prezentate în figura 5.6. unde a) reprezintă săgeata grinzii pe

direcția de solicitare 2,787 mm și b) este o reprezentare a distribuției tensiunilor normale la încovoiere.

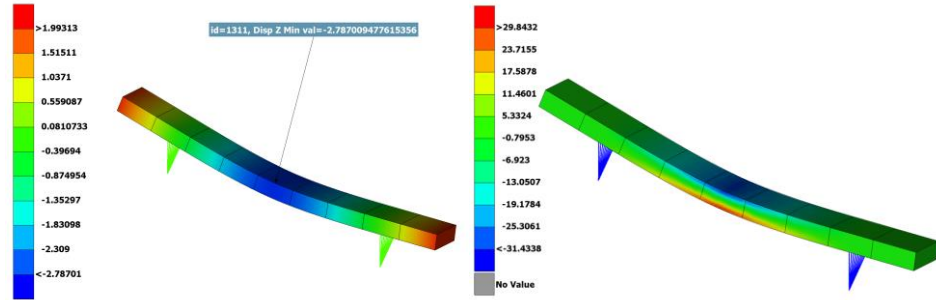


Figura 5.6 Rezultatele analizei FEM a modelului Tetraida; a) săgeata grinzii, b) distribuției tensiunii normale

Cea de-a doua abordare de modelare a fost aceea de a construi epruvetele folosind elemente Hexaida. Utilizând aceleași cerințe de calitate și dimensiuni ale elementelor ca pentru modelul Tetraida, aceleași setări de încărcare și de material, modelul a fost simulat și comparat cu modelul Tetraida. În figura 5.7 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.

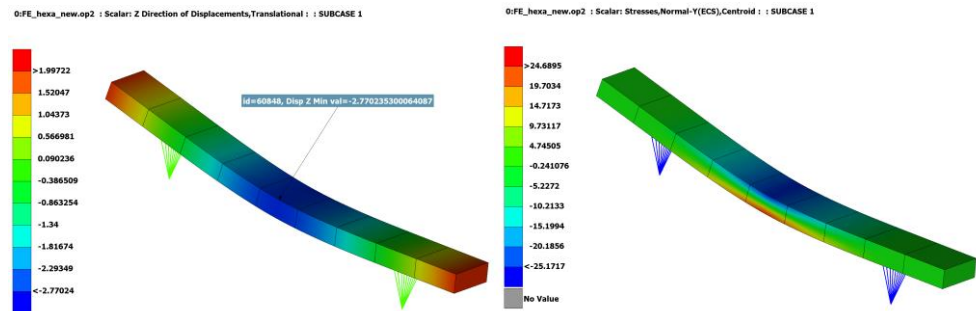


Figura 5.7 Rezultatele analizei FEM a modelului Hexaida; a) săgeata grinzii, b) distribuția tensiunilor normale

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 Tetraida a fost de 10,8 secunde, în timp ce modelul Hexaida a fost compilat în 1,5 secunde. Ambele metode au oferit rezultate acceptabile, deși în cazul analizei unei piese cu o formă

geometrică complexă, se poate aștepta o divergență mai mare a rezultatelor, datorită faptului că solverul poate aproxima mai bine rezultatele folosind un model Tetraida de ordinul doi, utilizând un număr mai mare de noduri.

5.1.4. Calcul analitic al săgeții unei grinzi 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 5.8 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%; $E_5 = 1703$ MPa - rata de umplere 100%. Dimensiunile secțiunii transversale sunt lățimea de 10 mm și grosimea de 4 mm.

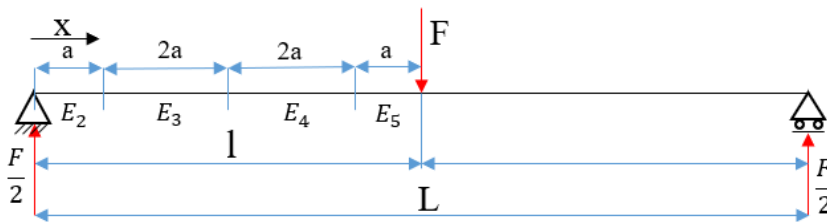


Figura 5.8 Reprezentarea schematică a modelului analitic

În conformitate cu a doua teoremă a lui Castigliano, deplasarea în punctul de aplicație a sarcinii poate fi exprimată luând în considerare derivata momentului încovoietor în raport cu sarcina:

$$\delta = \int \frac{M}{E_I} \cdot \frac{\partial M}{\partial F} \cdot dx \quad (5.1)$$

În cazul nostru, considerând patru intervale diferite cu module de elasticitate diferite și același moment de inerție (I), obținem:

$$\delta = 2 \left(\int_0^a \frac{F}{E_2 I} \cdot \frac{x}{2} \cdot dx + \int_a^{3a} \frac{F}{E_3 I} \cdot \frac{x}{2} \cdot dx + \int_{3a}^{5a} \frac{F}{E_4 I} \cdot \frac{x}{2} \cdot dx + \int_{5a}^{6a} \frac{F}{E_5 I} \cdot \frac{x}{2} \cdot dx \right) \quad (5.2)$$

$$\delta = \frac{2F}{4I} \left(\frac{x^3}{E_2 3} \Big|_0^a + \frac{x^3}{E_3 3} \Big|_a^{3a} + \frac{x^3}{E_4 3} \Big|_{3a}^{5a} + \frac{x^3}{E_5 3} \Big|_{5a}^{6a} \right) \quad (5.3)$$

$$\delta = \frac{F}{2I} \left(\frac{a^3}{3E_2} + \frac{8a^3}{3E_3} + \frac{116a^3}{3E_4} + \frac{91a^3}{3E_5} \right) \quad (5.4)$$

În cazul unui modul de elasticitate constant, formula de mai sus devine formula cunoscută pentru săgeata maximă a unei grinzi simplu rezemate și solicitate de o forță concentrată la mijlocul deschiderii.

$$\delta = \frac{Fl^3}{6EI} \quad (5.5)$$

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

5.1.5. Concluzii

A fost studiat efectul ratei variabile de umplere asupra comportamentului mecanic al pieselor imprimate 3D din ABS. Pentru a crea piese imprimate 3D cu umplutură variabilă, a trebuit să se stabilească o metodă de creare a modelului. Pentru stabilirea parametrilor de imprimare a fost utilizat software-ul Simplify 3D, care permite utilizatorului să atribuie diferiți parametri de imprimare unor volume definite anterior. Au fost tipărite trei seturi de cinci epruvete și testate în cadrul unui test de încovoiere în trei puncte. Un set de epruvete a fost imprimat cu o rată de umplere uniformă de 100 %, direcția de imprimare 0 grade, în funcție de axa longitudinală a epruvetei. Al doilea și al treilea set de epruvete de testare a fost imprimat cu o rată de umplere variabilă (20%-40%-60%-80%-100%-80%-60%-40%-20%). Diferența dintre cele două epruvete tipărite în variantă variabilă (denumită Variabilă_Versiunea 1) constă într-o zonă de tranziție îmbunătățită între zonele cu modificări ale ratei de umplere (Variabilă_Versiunea 2). 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. Având în vedere utilizarea materialului între probele imprimate uniform și cele imprimate în mod variabil, economia de material este de ~13% (1210 mm în loc de 1350 mm lungime de filament). Diferența în ceea ce privește sarcina maximă de încovoiere este de ~10 % (de la 86N- la 95N), în timp ce diferența de deformație la încovoiere este semnificativă, de 51 % (de la 4,9 mm la 7,4 mm). Modelele au fost, de asemenea, analizate cu metoda elementelor finite. A fost utilizată o abordare bazată pe două modele pentru a determina cea mai potrivită metodă pentru a prezice cu precizie comportamentul mecanic al epruvetelor de testare cu ajutorul analizei FEM. Diferența dintre cele două modele a fost nesemnificativă, dar rezultatul modelelor Tetraida a fost mai apropiat de rezultatul experimental, prezicând o deplasare de 2,787 mm. Deformația la încovoiere determinată experimental a fost cuprinsă între 2,51-2,64 mm pentru cele cinci epruvete testate. Rezultatele arată o abatere de 4-10% între valorile experimentale și rezultatele obținute cu analiza FE. Deformația epruvetei îmbunătățite, cu imprimare variabilă, a fost calculată, de asemenea, analitic. Săgeata maximă calculată a fost de 2,72 mm, ceea ce reprezintă o abatere de 2,6 - 8,3% față de intervalul rezultatului experimental. De asemenea, se poate observa o creștere a inconsistenței rezultatului experimental în cazul epruvetelor imprimate în mod variabil, ceea ce duce la o imprevizibilitate mai mare a rezultatelor, în comparație cu epruvetele imprimate uniform. Piesele FDM tipărite în mod variabil ar putea deveni o modalitate ieftină și eficientă de a crea piese foarte bine optimizate în ceea ce privește raportul greutate - rezistență, menținând la minimum utilizarea materialelor. Pentru a explora întregul potențial al pieselor imprimate în mod variabil, sunt necesare investigații suplimentare pentru a crește eficiența metodei și pentru a elimina abaterea mare a rezultatelor în cadrul pieselor imprimate cu aceleași setări variabile.

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 5.1. și are o precizie maximă de 2 microni. Datorită culorii negre a pedalei a fost necesar să fie acoperită cu pulbere anti-reflexie de culoare albă pentru a fi vizibilă pentru senzorul optic. În urma scanării, s-au obținut un nor de puncte 3D care a fost supus unui proces de triangulare pentru a obține o rețea de poligoane în format STL, conținând toate datele de suprafață și dimensionale ale pedalei. Pachetul software utilizat pentru scanare este GOM Inspect Suite, versiunea 2020. Rețeaua este un model poligonal care reprezintă un obiect fizic și constă din mai multe triunghiuri conectate care pot fi generate dintr-un nor de puncte sau date CAD. O piesă scanată constă, de obicei, din mai multe scanări din direcții diferite, ceea ce necesită alinierea scanărilor suprapuse și alinierea zonelor comune din software. Odată aliniate, mai multe rețele de puncte pot fi convertite într-o singură rețea prin fuzionare. Când sunt îmbinate mai multe scanări, suprafețele suprapuse vor fi eliminate. Procesul presupune ulterior umplerea golurilor rămase în urma scanării pentru a crea un model 3D. Această procedură a fost efectuată cu ajutorul software-ului de scanare

3D, imediat după poligonizare, ulterior pentru generarea piesei 3D software-ul Catia V16. Rezultatul a fost un model CAD al pedalei (Figura 5.1b) care poate fi utilizat atât în simulările numerice cât și printat 3D.

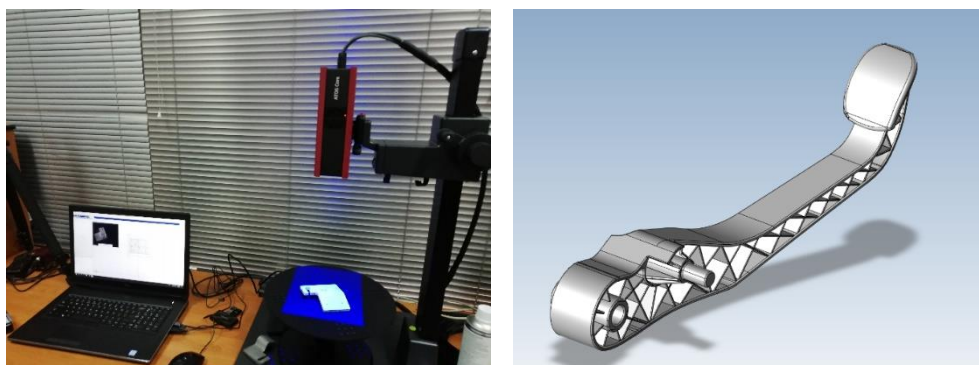


Figura 5.9 Realizarea modelului CAD al pedalei: a) sistemul de scanare optică 3D Atos Core, b) modelul CAD rezultat în urma generării

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°. Acest model de umplere investigat și în această lucrare s-a dovedit a asigura proprietăți statice bune dar mai ales cea mai mare rezistență la oboseală. Diferența între cele două modele constă în orientarea piesei imprimate în spațiul de lucru al imprimantei, obținându-se un model cu filamentele orientate transversal în raport cu axa longitudinală a pedalei (Figura 5.10.a) respectiv un model cu filamentele orientate după axa longitudinală a pedalei (Figura 5.10.b). În cele două imagini se poate observa și modul în care imprimanta construiește modelul (suportii respectiv elemente de sprijin), durata de imprimare și complexitatea structurii anexe fiind mult mai mare în cazul pedalei construite cu filamentele orientate transversal. Suportii creați sunt dintr-un material care poate fi dizolvat chimic, rezultînd piese de foarte bună calitate de fabricație. Materialul folosit a fost ABS-M30 produs de firma Stratasys.



Figura 5.10 Modele imprimate ale pedalei de frână. a) cu filamentele orientate transversal în raport cu axa longitudinală a pedalei, b) model cu filamentele orientate după axa longitudinală a pedalei

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. Standul experimental realizat, prezentat în Figura 5.11, a fost de asemenea gândit pentru a putea fi montat în mașina de încercat universală, aplicarea forței și controlul deplasării punctului de aplicație al acesteia fiind astfel riguros controlate și reproductibile. Rigiditatea standului se consideră a fi superioară pedalei dar nu poate fi ignorată, motiv pentru care deplasarea traversei mașinii de încercat nu poate fi considerată ca fiind egală cu deformarea pedalei în punctul respectiv, motiv pentru care pentru măsurarea rigidității pedalei s-au folosit traductoare tensometrice rezistive plasate la aceeași distanță față de punctul de aplicație al forței.



Figura 5.11 Standul experimental pentru studiul comportamentului mecanic al pedalei de frână imprimată 3D

Astfel 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. Interfața de măsurare realizată este prezentată în Figura 5.12

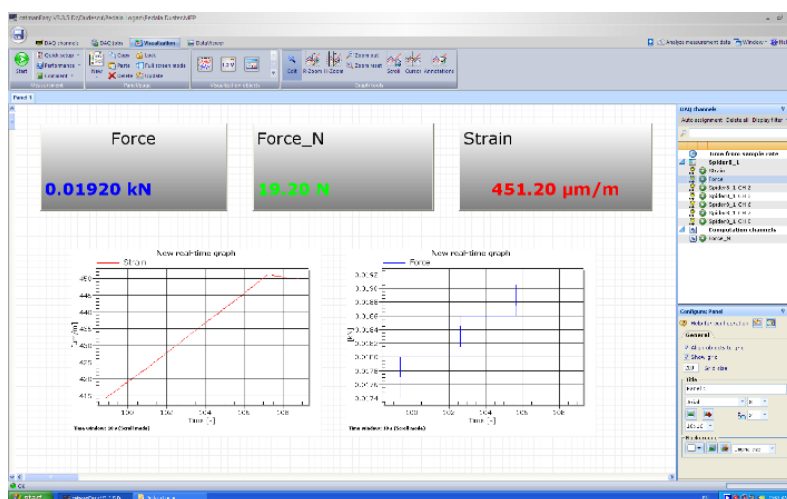
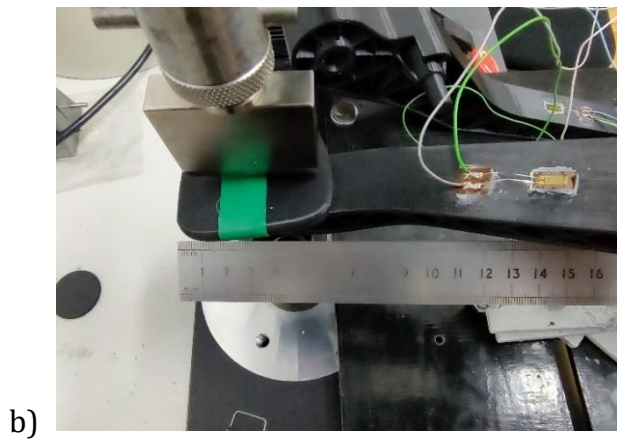
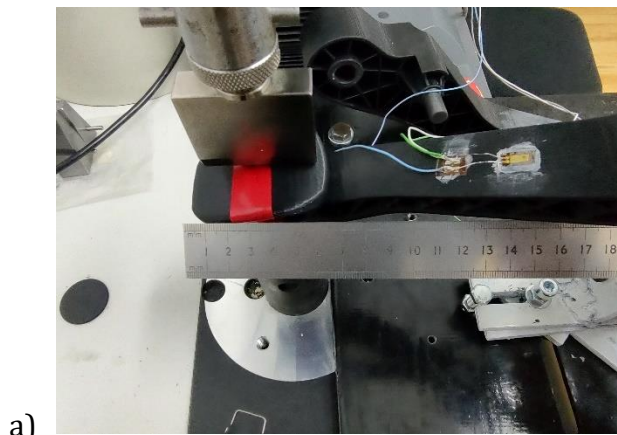
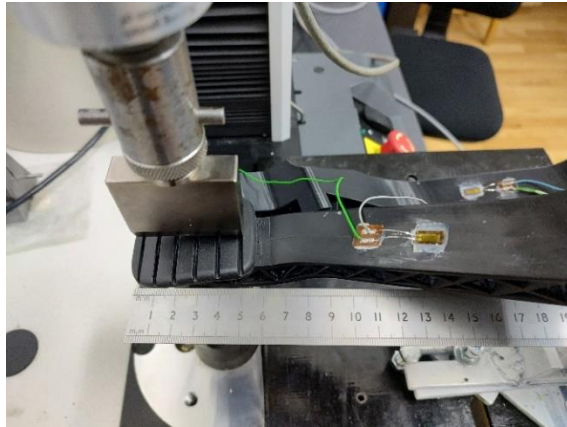


Figura 5.12 Interfața de măsurare a forțelor și deformațiilor specifice

Montajul traductorilor a fost în jumătate de punte, un traductor fiind activ iar celălalt a fost utilizat pentru compensarea termică. Pentru o corelare simplă a datelor măsurate respectiv a forței aplicate versus deformațiile specifice a fost montat în mașina de încercat cu ajutorul unui dispozitiv special un traductor de forță suplimentar tip HBM U2B cu sarcina maximă de 10kN. În felul acesta se pot obține rezultate precise și reproductibile.

În figura 5.13 sunt prezentate pedalele analizate precum și modul de montare și poziționare al traductorilor tensometrici rezistivi.





c)

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

În urma măsurătorilor 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 ($\mu\text{m}/\text{m}$)
Imprimare cu filamente longitudinale	19.2	428
Imprimare cu filamente transversale	19.2	453
Comercială - injecție	19.2	99,8

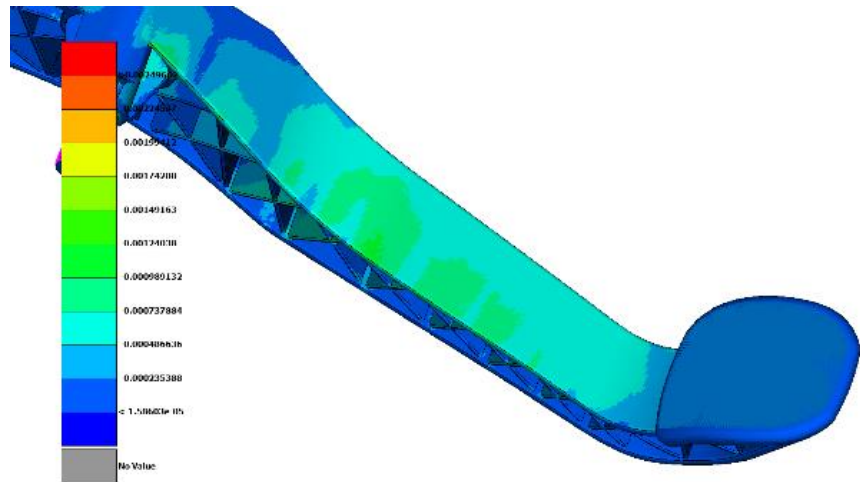
Pentru a realiza un studiu comparativ al rezultatelor obținute experimental au fost analizate numeric prin metoda elementelor finite pedale având caracteristicile mecanice similare (Tabelul 5.3) cu cele analizate numeric, respectiv pentru pedalele imprimate 3D fiind folosit un singur set de caracteristici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

modificarea acestora în raport cu orientarea pedalei (build orientation) în spațiul de lucru al imprimantei 3D.

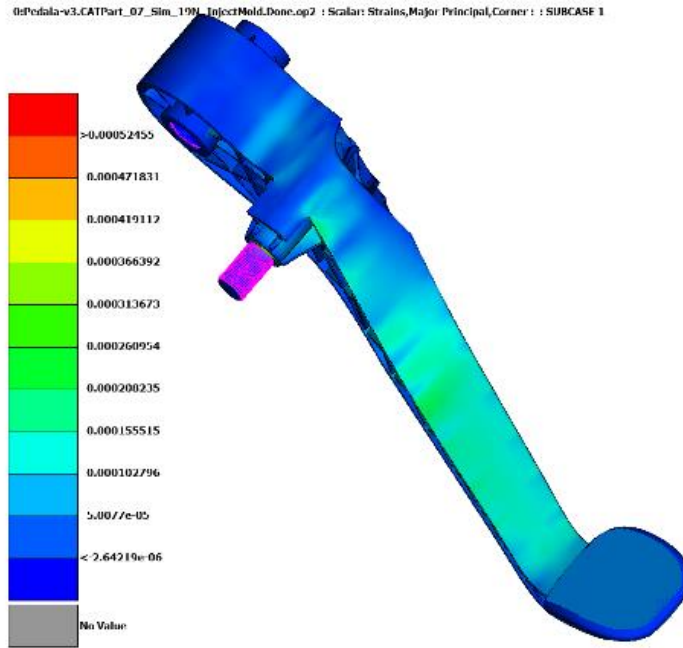
Tabelul 5.3 Caracteristici mecanice utilizate în modele numerice

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

Rezultatele obținute reprezentând deformațiile specifice pe direcția longitudinală (identică cu direcția de montaj a traductorilor tensometrici rezistivi) sunt prezentate în figura 5.14 pentru pedale imprimata 3D și respectiv pedala originală realizată prin injectare de masă plastică. Valorile obținute fiind de 486 $\mu\text{m/m}$ pentru pedala imprimată și respectiv 103 $\mu\text{m/m}$ pentru pedala injectată.



a)



b)

Figura 5.14 Analiza numerică a deformațiilor specifice a pedalelor analizate: a) pedala imprimata 3D, b) pedala originală realizată prin injecție de masă plastică

5.2.3. Concluzii

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 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

În acest studiu au fost analizate proprietățile mecanice ale pieselor ABS imprimate 3D. Studiul literaturii de specialitate disponibile a evidențiat un set de parametri de fabricație care joacă un rol important în proprietățile mecanice ale epruvetelor imprimate. În cadrul acestui studiu, efectul orientării umpluturii, al ratei de umplere și al direcției de imprimare a fost studiat prin metode experimentale și analitice. Pentru a acoperi toate aspectele importante ale problemei de față privind proprietățile mecanice ale epruvetelor imprimate 3D, acest studiu a avut următoarea abordare: determinarea influenței parametrilor de imprimare asupra comportamentului static și dinamic al materialelor printate 3D și analiza efectului modelului de umplere asupra duratei de viață la solicitarea de oboseală. Pentru a putea determina proprietățile mecanice ale epruvetelor, într-un mod nedistructiv, a fost creată o metodă de analiză cu elemente finite care este capabilă să estimeze proprietățile mecanice ale epruvetelor imprimate 3D utilizând o metodă nouă de modelare. Rezultatele studiului experimental și rezultatele simulării prin metoda elementelor finite au fost comparate pentru a valida metoda de modelare testată în acest studiu. Această metodă a fost utilizată în întreaga lucrare pentru a determina influența diferitelor configurații ale procesului de imprimare asupra proprietăților mecanice utilizând încercări mecanice și metoda elementelor finite. La finalul acestei teze, metoda inovatoare de modelare a fost testată pe un studiu de caz și pe o pedală de ambreiaj comercială pentru a-i evalua utilitatea și precizia. Investigațiile detaliate și rezultatele sunt prezentate mai jos.

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 [24], Croccolo, et al. [21] și de Garg, A. și Bhattacharya, A. [48].

L. Li și Q. Sun [24] a propus o metodă care tratează un grup de filamente imprimate ca laminate, în care proprietățile mecanice ale specimenelor imprimate pot fi influențate prin controlul proprietăților locale ale pieselor. Pe baza analizelor teoretice și experimentale, a fost

propus și evaluat un set de ecuații pentru calcularea constantelor elastice. Constantele au fost utilizate pentru a determina modelele constitutive ale pieselor FDM. Diferite densități de depunere, orientări și combinații ale acestora pot fi utilizate pentru a produce proprietățile de rigiditate necesare ale pieselor fabricate. Luând în considerare diferite combinații de unghiuri de raster în straturi succesive, este evident că se poate crea o mare varietate de laminate. Descoperirile lui L. Li și Q. Sun [24] oferă o perspectivă asupra legăturii filamentelor la nivelul mezostructurii și asupra determinării golurilor de aer din model. Acest model nu răspunde la întrebarea privind determinarea suprafeței reale a secțiunii transversale, în special dacă se utilizează un model complex de umplere. În realitate, această metodă are o aplicabilitate limitată din cauza faptului că nu se ocupă de existența secțiunilor Shell și a incapacității de a procesa modele complexe de umplură.

Lucrarea prezentată de Croccolo, et al. [21] s-a ocupat de efectul conturului asupra rezistența și rigiditatea statică a pieselor imprimate prin FDM. Problema a fost abordată atât experimental, cât și analitic, cu dezvoltarea unui model predictiv prezentat într-o formă închisă. Rezistența scăzută poate fi compensată prin proprietăți bune de complianță. Studiul s-a axat pe ABS-M30, un material utilizat pe scară largă pentru piesele imprimate prin FDM. Au fost fabricate specimene de cinci tipuri diferite, luând în considerare doi factori: direcția de construcție și numărul de contururi. Au fost efectuate teste experimentale de tracțiune în conformitate cu standardul ASTM D638-10. Rezultatele au fost prelucrate pentru determinarea rezistenței finale și a modulului Young. Deoarece un model preliminar și simplificat, care relaționează numărul de contururi (filamente) cu caracteristicile mecanice ale epruvetelor, a produs erori inacceptabile dacă este comparat cu rezultatele experimentale, s-a decis să se dezvolte unul nou, care ia în considerare toate barele care împart sarcina aplicată. Modelul actual a fost diferențiat pentru contururile plasate longitudinal față de direcția sarcinii și cele înclinate având un unghi de raster fix. Algoritmul final, prezentat aici și dezvoltat în formă închisă, este capabil să modeleze evenimentul de rupere a fiecărei bare și, în consecință, să prezică ruperea întregii piese. Rezultatele numerice au fost calibrate și validate prin compararea lor cu rezultatele experimentale. A fost evidențiată o concordanță foarte bună, confirmată de erori foarte mici în predicția rezistenței, a modulului de lasticitate și a rigidității epruvetelor testate. Această metodă evidențiază, de asemenea, câteva relații importante între

direcțiile de imprimare și comportamentul mecanic, dar este limitat din punct de vedere al aplicabilității.

În capitolul cu denumirea de: **Model analitic simplificat aplicat al unei epruvete cu model de umplere tip grid** s-a analizat în detaliu metoda și s-a ajuns la următoarea 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. Acest model predictiv nu este capabil să calculeze în funcție de modificările procesului de imprimare, cum ar fi viteza de imprimare diferită, condițiile de răcire a epruvetelor, factori care sunt strâns legați de lipirea filamentelor și care influențează, de asemenea, forțele de coeziune dintre filamentele individuale. Este o metoda analitică bazată pe calcul analitic al materialelor composite cu caracter mai general, care nu a fost dezvoltată pentru a lua în considerare diferite modele de umplere sau rate de umplere, ceea ce limitează în mod semnificativ aplicabilitatea să prezice comportamentul mecanic al pieselor destinate care pot fi utilizate în aplicații de viață reală.

În lucrarea prețată 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 acestora. Studiile experimentale, analiza fractografică sunt efectuate, de asemenea, pentru a valida rezultatele. Din rezultatele se trag următoarele concluzii. Analiza FE indică faptul că gătuirea este prezent în rastele de 0° , iar tensiunea la rupere și alungirea cresc odată cu creșterea grosimii stratului, în timp ce tensiunea de tracțiune scade mai întâi odată cu creșterea grosimii stratului, apoi crește. Un număr mai mare de straturi în direcția de încărcare, în special atunci când grosimea stratului este mică, contribuie la suportarea sarcinii și la generarea de tensiuni mai mari, în timp ce grosimea mai mare a stratului asigură o cantitate mai mare de regiune lipită în interiorul modelului, oferind astfel o rezistență la tracțiune mai mare. Ruperea are loc mai întâi prin separarea intra-straturilor în rastele de 90° față de direcția de încărcare, urmată de ruperea rasterelor de 0° împreună cu separarea legăturii (delaminare) între straturi (între rastele de 0° - 90°). Analiza fractografică indică faptul că straturile de raster 0° cedează prin rupere fragilă curuperea și ruperea straturilor individuale. În cazul straturilor

de raster de 90°, ruperea epruvetei s-a produs din cauza delaminării sau separării straturilor de legăturile adiacente.

Influența parametrilor de imprimare asupra comportamentului static al materialelor printate 3D prezintă în detaliu principalii parametri de proces care influențează comportamentul mecanic al materialelor imprimare 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. Lucrarea prezintă valorile măsurate ale proprietăților de tracțiune ale epruvetelor imprimate 3D produse folosind un imprimantă 3D de birou. S-a analizat influența parametrilor tehnologici asupra proprietăților mecanice ale specișene tipărite, luând în considerare diferite rate de umplere, modele de umplere și orientări de imprimare. Pentru acest studiu au fost luate în considerare rate de umplere de 20%, 40%, 60%, 80% și 100%.

Exact spațiul exact de aer dintre rasterul de filament extrudat nu poate fi specificat, piesele pot fi create solide sau goale prin ajustarea procentului de umplere, 100% fiind teoretic complet solide. Influența modelului de umplere a fost studiată pentru piesele tipărite cu umplutură de 100% cu model de umplere rectiliniu 0° și 90°, grilă 0°-90° și 45°-45°, fagure rapid, fagure complet, triunghiular (60°) și ondulatoriu. Pentru a studia efectul orientării, epruvetele cu rată de

umplere de 100 %, cu orientarea rectilinie au fost printate prin plasarea acestora în diferite unghiuri în jurul axei X a platformei de imprimare (0°, 30°, 45° și 90°). Proprietățile mecanice ale epruvetelor ABS fabricate FDM sunt influențate semnificativ nu numai de ratele de umplere, așa cum era de așteptat, ci și de modelul imprimat și de orientarea acestora. Chiar dacă unele epruvete au fost imprimate cu o setare de 100% de umplere, golurile de aer pozitive sau negative reale ar trebui determinate sau estimate mai precis. Efectul geometriei golurilor asupra tensiunilor și deformațiilor locale va afecta comportamentul mecanic la macrosală al materialului. Modulul de elasticitate aparent E_{aparent} crește odată cu procentul de umplere, creșterea pe punct procentual de umplere se modifică neliniar, cu cât procentul de umplere este mai mare, cu atât creșterea este mai mică.

Modulul de elasticitate ajustat E_{ajustat} care ia în considerare densitatea golurilor poate fi obținut în mod similar cu regula amestecurilor și ar trebui să aibă un comportament mai constant în jurul valorii filamentului ABS. Diferența poate fi explicată datorită formulei aproximative de calcul al suprafeței reale a secțiunii transversale, care nu ia în considerare numărul de contururi depuse în jurul marginii componente. Testele de tracțiune indică faptul că rezistența la rupere finale sunt cele mai mari pentru modelele wiggle, 90° și 0° în ordine descrescătoare. Orientarea rasterului de-a lungul direcției de imprimare conduce la cea mai mare rezistență la tracțiune. Rezultatele sunt utile pentru a alege viitoarele modele analitice sau computaționale ale rezistenței sau rigidității FDM în funcție de modelele de imprimare, de densitatea golurilor și de orientarea rasterului. Diferite densități de goluri, modele, orientări și combinații ale acestora pot fi utilizate pentru a produce piese care îndeplinesc o rigiditate sau o rezistență necesară. O variație locală a acestor parametri poate duce la o structură optimizată care nu presupune modificări geometrice, ci doar ajustări ale parametrilor de imprimare.

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. A fost abordată dificultatea de a

determina secțiunile transversale și a fost creat un model geometric pentru a studia problema "raportului dintre spațiul de aer și material". A fost realizat un studiu de caz privind modelele cu elemente finite pentru a determina cea mai bună strategie de modelare pentru a obține cel mai bun echilibru între precizie și durata de execuție a simulării. Atunci când cele două exemple de simulare (FEA1 și FEA2) au fost comparate cu rezultatele experimentale, (deformație specifică la tracțiune) rezultatele confirmă că aria secțiunii transversale preluată din modelul geometric este precisă cu o bună acuratețe.

Secțiunile transversale obținute din modelul geometric au fost reintroduse în mașina de testare la tracțiune pentru a estima modulele E la diferite rate de umplere. Putem concluziona din cele douăsprezece simulări că metoda de simulare prezentată în această lucrare este o opțiune viabilă pentru a prezice comportamentul pieselor tipărite 3D chiar înainte ca acestea să fie tipărite, doar prin simpla analiză a codului G generat de instrumentul "slicer". Modulele E rezultate pentru diferite rate de umplere pot fi utilizate pentru simularea FE fără a fi necesară reprezentarea microstructurii; un mesh volumic de bază ar trebui să fie suficient, deoarece modulul E conține, de asemenea, raportul corect dintre spațiul de aer și material.

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, 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 precisă 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.

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. Deformația la tracțiune determinată prin simulare a fost comparată cu rezultatul experimental, ceea ce a indicat că aria secțiunii transversale determinată de modelul geometric este exactă. Modulele de elasticitate ale diferitelor modele de umplutură au fost obținute prin ajustarea curbelor tensiune - deformație specifică determinate experimental cu secțiunea transversală estimată numeric a epruvetelor. Modulele de elasticitate rezultate pentru diferite modele de umplutură pot fi utilizate pentru simularea FEM fără a fi necesară simularea microstructurii, deoarece modulul E include raportul corect dintre spațiul 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.
- În comparație cu epruvete considerate cu secțiunea transversală completă, modelele precum grila de 45°, fagure complet și ondulatoriu au un raport mai mare între material și spațiul de aer și au demonstrat rezultate rezonabile în ceea ce privește rezistența la tracțiune și modulul E. Prin urmare, ar fi recomandată utilizarea

acestor modele de umplere pentru piesele supuse la sarcini mecanice.

- Modele precum grid 0-90°, fast honeycomb și triunghiular 60° prezintă diferențe mai mare 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.

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**. Au fost examinate două seturi diferite de epruvete. Setul inițial a inclus epruvete tipărite cu același model de umplere (0°- în conformitate cu axa longitudinală a eșantionului) și cu o rată de umplere care a variat între 20%, 40%, 60%, 80% și 100%. Modelul de umplere a variat pentru fiecare din cel de-al doilea set de epruvete, care au fost create cu o rată de umplere identică de 100%. Programul Simplify 3D a oferit următoarele modele de umplere care au fost utilizate: fagure complet (full honeycomb), fagure rapid (fast honeycomb), triunghiular (triangular), ondulatoriu (wiggly), grilă (grid) cu orientări 0°-90° și 45°-45°. Comportamentul mecanic al materialelor imprimate 3D solicitate dinamic a fost investigat prin teste de încovoiere la impact (Charpy) pe probe standard pentru a determina reziliența a materialului. În cazul eșantioanelor imprimate cu același model de umplere, dar cu o rată de umplere diferită, se remarcă legătura dintre rata de umplere și rezistența la impact. Se poate concluziona că reziliența, în cazul probelor imprimate 3D, crește odată cu rata de umplere. 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 ondulatoriu (wiggly). Cu aceeași rată de umplere de 100%, proba imprimată cu modelul grilă (grid) 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 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 imprimare 3D a fost studiat pe epruvete de tracțiune imprimare 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. Au fost testate epruvete standard cu o rată de umplere de 100% și cu modele de umplere rectilinear 0° și 90° , grilă 0° - 90° și $+45^\circ$ - 45° , fagure rapid, fagure complet triunghiular (60°) și ondulatorie. După finalizarea testelor de tracțiune pentru a determina rezistența la tracțiune a epruvetelor, s-au efectuat teste de oboseală axială pentru fiecare combinație de modele de umplere pentru a măsura durata de viață la oboseală pentru UTS de 90%, 75%, 60%, 45% și 40%. Pe baza curbelor S-N a fost dezvoltat un model simplu al proprietăților de oboseală. Examinarea zonelor de fractură cu ajutorul microscopului electronic a indicat interacțiunea microstructurală dintre filamente care stă la baza principalelor mecanisme de rupere.

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

- Modelele cu filamente înclinate în jurul axei de tracțiune (grilă $\pm 45^\circ$, rectiliniu 0° și triunghiular (60°)) au durata de viață ridicată la oboseală în comparație cu cele cu majoritatea filamentelor perpendiculare pe direcția de tracțiune (fagure rapid, fagure complet și rectiliniu 90°)
- Modele precum Grid 0° - 90° și ondulatoriu sunt foarte apropiate de primul grup, având filamente înclinate (Wiggle) sau de-a lungul și perpendicular pe direcția de tracțiune (grilă 0° - 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 definatorii 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.
- Durata de viață la oboseală a materialelor tipărite 3D ar trebui evaluată prin teste experimentale, atâta timp cât nu există încă o simulare numerică precisă a legăturii între-straturi și a întra-straturilor materialelor tipărite 3D.

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. Au fost tipărite trei seturi de cinci epruvete și testate în cadrul unui test de încovoiere în trei puncte. Un set de epruvete a fost imprimat cu o rată de umplere uniformă de 100 %, direcția de imprimare 0 grade, în funcție de axa longitudinală a epruvetei. Al doilea și al treilea set de epruvete de testare a fost imprimat cu o rată de umplere variabilă (20%-40%-60%-80%-100%-80%-60%-40%-20%). Diferența dintre cele două epruvete tipărite în variantă variabilă (denumită Variabilă_Versiunea 1) constă într-o zonă de tranziție îmbunătățită între zonele cu modificări ale ratei de umplere (Variabilă_Versiunea 2). 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. Având în vedere utilizarea materialului între probele imprimate uniform și cele imprimate în mod variabil, economia de material este de ~13% (1210 mm în loc de 1350 mm lungime de filament). Diferența în ceea ce privește sarcina maximă de încovoiere este de ~10 % (de la 86N- la 95N), în timp ce diferența de deformație la încovoiere este semnificativă, de 51 % (de la 4,9 mm la 7,4 mm). Modelele au fost, de asemenea, analizate cu metoda elementelor finite două abordări diferite au fost testate. Un model a fost construit cu elemente de tip Tetra, iar al doilea cu elemente de tip Hexa. Diferența dintre cele două modele a fost nesemnificativă, dar rezultatul modelelor Tetraida a fost mai apropiat de rezultatul experimental, prezicând o deplasare de 2,787 mm. Deformația la încovoiere determinată

experimental a fost cuprinsă între 2,51-2,64 mm pentru cele cinci epruvete testate. Rezultatele arată o abatere de 4-10% între valorile experimentale și rezultatele obținute cu analiza FE. Deformația epruvetei îmbunătățite, cu imprimare variabilă, a fost calculată, de asemenea, analitic. Săgeata maximă calculată a fost de 2,72 mm, ceea ce reprezintă o abatere de 2,6 - 8,3% față de intervalul rezultatului experimental. De asemenea, se poate observa o creștere a inconsistenței rezultatului experimental în cazul epruvetelor imprimate în mod variabil, ceea ce duce la o imprevizibilitate mai mare a rezultatelor, în comparație cu epruvetele imprimate uniform.

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. O pedală de ambreiaj de la Dacia duster a fost scanată și a fost reconstruit un model 3d care a constituit geometria de bază pentru imprimarea celor două variante FDM. Diferența între cele două modele constă în orientarea piesei imprimate în spațiul de lucru al imprimantei, obținându-se un model cu filamentele orientate transversal în raport cu axa longitudinală a pedalei respectiv un model cu filamentele orientate după axa longitudinală a pedalei. Ambreiajul turnat prin injecție a fost încercat experimental, unde au fost măsurate deformațiile specifice ale pedalei prin tensometrie electrică rezistivă. Pentru a realiza un studiu comparativ al rezultatelor obținute experimental au fost analizate numeric prin metoda elementelor finite pedale având caracteristicile mecanice similare cu cele analizate numeric. Rezultatele obținute reprezentând deformațiile specifice pe direcția longitudinală (identică cu direcția de montaj a traductorilor tensometrici rezistivi). 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 încălzi, 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 intrastraturi.
- Aplicare metodologiei prezentate pe elemente realizate din mai multe materiale
- Optimizarea structurii interne a pieselor printate prin modificarea locală a parametrilor de printare.

REFERINȚE

References

- [1] M. Z. S. Media. "Tehnologii de printare 3D." <https://www.zspotmedia.ro/blog/printare-3d/> (accessed 01.08.2023).
- [2] D. Systems. "What is Fused Deposition Modeling FDM 3D printing, and how does it work?" <https://www.3ds.com/make/service/3d-printing-service/fdm-fused-deposition-modeling> (accessed 01.08.2023).
- [3] Formlabs. "[https://formlabs.com/eu/blog/fdm-vs-sla-vs-sls-how-to-choose-the-right-3d-printing-technology/.](https://formlabs.com/eu/blog/fdm-vs-sla-vs-sls-how-to-choose-the-right-3d-printing-technology/)" <https://formlabs.com/eu/blog/what-is-selective-laser-sintering/> (accessed 01.08.2023).
- [4] Formlabs. "Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing." <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/> (accessed 02.08.2023, 2023).
- [5] Formlabs. "Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing." <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/> (accessed 02.08.2023).
- [6] A. P. f. D. Natives. "The Complete Guide to Material Jetting (PolyJet) in 3D Printing." <https://www.3dnatives.com/en/polyjet100420174/#!> (accessed 02.08.2023).
- [7] DesingTech. "Working of PolyJet 3D Printers." <https://www.designtechproducts.com/index.php?/articles/poly-jet-printers-working> (accessed 02.08.2023).
- [8] M. Murphy. "3D Printing Tradeoffs and Optimization " <https://www.skmurphy.com/blog/2015/08/08/3d-printing-tradeoffs-and-optimization/> (accessed 02.08.2023).
- [9] A. Cassaignau. "3D Printing transforms the Automotive Industry." <https://www.sculpteo.com/blog/2016/01/20/3d-printing-transforms-the-automotive-industry/> (accessed 02.08.2023).
- [10] R. Mackay. "Lamborghini utilise l'impression 3D pour le développement de composants légers." <https://www.javelin-tech.com/blog/fr/2016/04/lamborghini-use-3d-printing/> (accessed 02.08.2023).
- [11] J. M. Gitlin. "This car company set new track records to prove its 3D printing tech."

- <https://arstechnica.com/cars/2022/10/turning-powdered-aluminum-into-supercar-parts-with-divergent-3d/> (accessed 02.08.2023).
- [12] T. Spendlove. "Divergent Wants to Be World's First 3D Printed Supercar." <https://www.engineering.com/story/divergent-wants-to-be-worlds-first-3d-printed-supercar> (accessed 02.08.2023).
- [13] C. Clarke. "3D PRINTING SECRET TO SUCCESS IN FORMULA 1?" <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-secret-success-formula-1-99683/> (accessed 02.08.2023).
- [14] P. Ortiz. "WHAT WAS LOCAL MOTORS AND THE 3D-PRINTED OLLI SHUTTLE?" <https://housegrail.com/what-was-local-motors-and-the-3d-printed-olli-shuttle/> (accessed 02.08.2023).
- [15] B. Kreassenstein. "Local Motors to 3D Print Cars in 12 Hours, Recycle Old Cars, & Research Printing with Graphene & Metals." <https://3dprint.com/51866/local-motors-plans-3d-print/> (accessed 03.08.20223).
- [16] carbodydesign. "Ford expands use of 3D Printing in the design process." <https://www.carbodydesign.com/2015/11/ford-design-and-3d-printing/10/> (accessed 03.08.2023).
- [17] C. Ziemian, M. Sharma, and S. Ziemian, "Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modelling," *Mechanical engineering*, vol. 23, pp. 159-180, 2012.
- [18] G. W. Melenka, B. K. Cheung, J. S. Schofield, M. R. Dawson, and J. P. Carey, "Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures," *Composite Structures*, vol. 153, pp. 866-875, 2016.
- [19] R. Zou *et al.*, "Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material," *Composites Part B: Engineering*, vol. 99, pp. 506-513, 2016.
- [20] J. Liljenhjerte, P. Upadhyaya, and S. Kumar, "Hyperelastic strain measurements and constitutive parameters identification of 3d printed soft polymers by image processing," *Additive Manufacturing*, vol. 11, pp. 40-48, 2016.
- [21] D. Croccolo, M. De Agostinis, and G. Olmi, "Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of ABS-M30," *Computational Materials Science*, vol. 79, pp. 506-518, 2013.

- [22] S. H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, and P. K. Wright, "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS," *Rapid prototyping journal*, vol. 8, no. 4, pp. 248-257, 2002.
- [23] J. F. Rodríguez, J. P. Thomas, and J. E. Renaud, "Design of fused-deposition ABS components for stiffness and strength," *J. Mech. Des.*, vol. 125, no. 3, pp. 545-551, 2003.
- [24] L. Li, Q. Sun, C. Bellehumeur, and P. Gu, "Composite modeling and analysis for fabrication of FDM prototypes with locally controlled properties," *Journal of manufacturing processes*, vol. 4, no. 2, pp. 129-141, 2002.
- [25] V. Shanmugam *et al.*, "Fatigue behaviour of FDM-3D printed polymers, polymeric composites and architected cellular materials," *International Journal of Fatigue*, vol. 143, p. 106007, 2021.
- [26] M. Dawoud, I. Taha, and S. J. Ebeid, "Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques," *Journal of manufacturing Processes*, vol. 21, pp. 39-45, 2016.
- [27] S. H. Ahn, C. Baek, S. Lee, and I. S. Ahn, "Anisotropic tensile failure model of rapid prototyping parts-fused deposition modeling (FDM)," *International Journal of Modern Physics B*, vol. 17, no. 08n09, pp. 1510-1516, 2003.
- [28] A. K. Sood, R. K. Ohdar, and S. S. Mahapatra, "Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts," *Materials & Design*, vol. 31, no. 1, pp. 287-295, 2010.
- [29] B. Tymrak, M. Kreiger, and J. M. Pearce, "Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions," *Materials & Design*, vol. 58, pp. 242-246, 2014.
- [30] M. Montero, S. Roundy, D. Odell, S.-H. Ahn, and P. K. Wright, "Material characterization of fused deposition modeling (FDM) ABS by designed experiments," *Society of Manufacturing Engineers*, vol. 10, no. 13552540210441166, pp. 1-21, 2001.
- [31] A. Sood, R. Ohdar, and S. Mahapatra, "Parametric appraisal of fused deposition modelling process using the grey Taguchi method," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 224, no. 1, pp. 135-145, 2010.
- [32] A. Garg, A. Bhattacharya, and A. Batish, "Failure investigation of fused deposition modelling parts fabricated at different raster

- angles under tensile and flexural loading," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 231, no. 11, pp. 2031-2039, 2017.
- [33] A. Garg, A. Bhattacharya, and A. Batish, "On surface finish and dimensional accuracy of FDM parts after cold vapor treatment," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 31, no. 4, pp. 522-529, 2016.
- [34] M. Domingo-Espin, J. M. Puigoriol-Forcada, A.-A. Garcia-Granada, J. Llumà, S. Borros, and G. Reyes, "Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts," *Materials & Design*, vol. 83, pp. 670-677, 2015.
- [35] B. Huang and S. Singamneni, "Raster angle mechanics in fused deposition modelling," *Journal of Composite Materials*, vol. 49, no. 3, pp. 363-383, 2015.
- [36] Y. Zhang and K. Chou, "A parametric study of part distortions in fused deposition modelling using three-dimensional finite element analysis," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 222, no. 8, pp. 959-968, 2008.
- [37] C. Bellehumeur, L. Li, Q. Sun, and P. Gu, "Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modeling process," *Journal of manufacturing processes*, vol. 6, no. 2, pp. 170-178, 2004.
- [38] M. K. Ravari, M. Kadkhodaei, M. Badrossamay, and R. Rezaei, "Numerical investigation on mechanical properties of cellular lattice structures fabricated by fused deposition modeling," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 88, pp. 154-161, 2014.
- [39] O. S. Es-Said, J. Foyos, R. Noorani, M. Mendelson, R. Marloth, and B. A. Pregger, "Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 15, no. 1, pp. 107-122, 2000.
- [40] P. K. Gurralla and S. P. Regalla, "Multi-objective optimisation of strength and volumetric shrinkage of FDM parts: a multi-objective optimization scheme is used to optimize the strength and volumetric shrinkage of FDM parts considering different process parameters," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 9, no. 2, pp. 127-138, 2014.

- [41] P. K. Gurralla and S. P. Regalla, "Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling: This paper studies how coalescence of filaments contributes to the strength of final FDM part," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 9, no. 3, pp. 141-149, 2014.
- [42] J. C. Riddick, M. A. Haile, R. Von Wahlde, D. P. Cole, O. Bamiduro, and T. E. Johnson, "Fractographic analysis of tensile failure of acrylonitrile-butadiene-styrene fabricated by fused deposition modeling," *Additive Manufacturing*, vol. 11, pp. 49-59, 2016.
- [43] P. Mohan Pandey, N. Venkata Reddy, and S. G. Dhande, "Slicing procedures in layered manufacturing: a review," *Rapid prototyping journal*, vol. 9, no. 5, pp. 274-288, 2003.
- [44] Z. Hashin and B. W. Rosen, "The elastic moduli of fiber-reinforced materials," *Journal of applied mechanics*, vol. 31, no. 2, pp. 223-232, 1964.
- [45] S. W. Tsai, *Structural behavior of composite materials*. National Aeronautics and Space Administration Washington, DC, 1964.
- [46] L. Li, Q. Sun, C. Bellehumeur, and P. Gu, "Analysis and fabrication of FDM prototypes with locally controlled properties," *University of Calgary*, 2002.
- [47] B. H. Lee, J. Abdullah, and Z. A. Khan, "Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object," *Journal of materials processing technology*, vol. 169, no. 1, pp. 54-61, 2005.
- [48] A. Garg and A. Bhattacharya, "An insight to the failure of FDM parts under tensile loading: finite element analysis and experimental study," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 120, pp. 225-236, 2017.
- [49] A. International, *Standard test method for tensile properties of plastics*. ASTM international, 2014.
- [50] S. Anton, A. Thomas, G. Markus, and F. Martin, "Finite element analysis of thermoplastic probes under tensile load using LS-DYNA compared to ANSYS WB 14 in correlation to experimental investigations," in *Proceedings of the ANSYS conference & 30th CADFEM users' meeting*, 2012.
- [51] C. Dudescu and L. Racz, "Effects of raster orientation, infill rate and infill pattern on the mechanical properties of 3D printed materials," *ACTA Univ. Cibiniensis*, vol. 69, no. 1, pp. 23-30, 2017.

- [52] M. Lalegani Dezaki and M. K. A. Mohd Ariffin, "The effects of combined infill patterns on mechanical properties in fdm process," *Polymers*, vol. 12, no. 12, p. 2792, 2020.
- [53] D. Popescu, A. Zapciu, C. Amza, F. Baci, and R. Marinescu, "FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review," *Polymer Testing*, vol. 69, pp. 157-166, 2018.
- [54] G. C. Onwubolu and F. Rayegani, "Characterization and optimization of mechanical properties of ABS parts manufactured by the fused deposition modelling process," *International Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 2014, pp. 1-13, 2014.
- [55] B. Rankouhi, S. Javadpour, F. Delfanian, and T. Letcher, "Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS with respect to layer thickness and orientation," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 16, no. 3, pp. 467-481, 2016.
- [56] G. Ćwikła, C. Grabowik, K. Kalinowski, I. Paprocka, and P. Ociepka, "The influence of printing parameters on selected mechanical properties of FDM/FFF 3D-printed parts," in *IOP conference series: materials science and engineering*, 2017, vol. 227, no. 1: IOP Publishing, p. 012033.
- [57] H. K. Dave, N. H. Patadiya, A. R. Prajapati, and S. R. Rajpurohit, "Effect of infill pattern and infill density at varying part orientation on tensile properties of fused deposition modeling-printed poly-lactic acid part," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 235, no. 10, pp. 1811-1827, 2021.
- [58] M. Samykano, S. Selvamani, K. Kadirgama, W. Ngui, G. Kanagaraj, and K. Sudhakar, "Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, pp. 2779-2796, 2019.
- [59] L. Racz and M. C. Dudesu, "Mechanical behavior of beams with variable stiffness obtained by 3D printing," in *MATEC Web of Conferences*, 2021, vol. 343: EDP Sciences, p. 08014.
- [60] A. W. Gebisa and H. G. Lemu, "Investigating effects of fused-deposition modeling (FDM) processing parameters on flexural properties of ULTEM 9085 using designed experiment," *Materials*, vol. 11, no. 4, p. 500, 2018.
- [61] S. Sheth and R. M. Taylor, "Numerical investigation of stiffness properties of fdm parts as a function of raster orientation," in

- 2017 International Solid Freeform Fabrication Symposium, 2017: University of Texas at Austin.
- [62] O. A. Mohamed, S. H. Masood, and J. L. Bhowmik, "Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects," *Advances in manufacturing*, vol. 3, pp. 42-53, 2015.
- [63] A. A. Bakır, R. Atik, and S. Özerinç, "Mechanical properties of thermoplastic parts produced by fused deposition modeling: a review," *Rapid prototyping journal*, vol. 27, no. 3, pp. 537-561, 2021.
- [64] S. Teraiya, S. Vyavahare, and S. Kumar, "Experimental investigation on influence of process parameters on mechanical properties of PETG parts made by fused deposition modelling," in *Advances in Manufacturing Processes: Select Proceedings of RAM 2020*: Springer, 2020, pp. 283-293.
- [65] I. Khan and N. Kumar, "Fused deposition modelling process parameters influence on the mechanical properties of ABS: A review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 44, pp. 4004-4008, 2021.
- [66] A. Özen, D. Auhl, C. Völlmecke, J. Kiendl, and B. E. Abali, "Optimization of manufacturing parameters and tensile specimen geometry for fused deposition modeling (FDM) 3D-printed PETG," *Materials*, vol. 14, no. 10, p. 2556, 2021.
- [67] J. Kiendl and C. Gao, "Controlling toughness and strength of FDM 3D-printed PLA components through the raster layup," *Composites Part B: Engineering*, vol. 180, p. 107562, 2020.
- [68] M. Shojib Hossain, D. Espalin, J. Ramos, M. Perez, and R. Wicker, "Improved mechanical properties of fused deposition modeling-manufactured parts through build parameter modifications," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 136, no. 6, p. 061002, 2014.
- [69] Q. Sun, G. Rizvi, C. Bellehumeur, and P. Gu, "Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments," *Rapid prototyping journal*, vol. 14, no. 2, pp. 72-80, 2008.
- [70] S. Paul, "Finite element analysis in fused deposition modeling research: A literature review," *Measurement*, vol. 178, p. 109320, 2021.
- [71] F. Górski, W. Kuczko, R. Wichniarek, and A. Hamrol, "Computation of mechanical properties of parts manufactured by fused deposition modeling using finite element method," in *10th*

International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications, 2015: Springer, pp. 403-413.

- [72] F. Górski, W. Kuczko, and R. Wichniarek, "Impact strength of ABS parts manufactured using Fused Deposition Modeling technology," *Archives of Mechanical Technology and Automation*, vol. 31, no. 1, pp. 3-12, 2014.
- [73] M. Caminero, J. Chacón, I. García-Moreno, and G. Rodríguez, "Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling," *Composites Part B: Engineering*, vol. 148, pp. 93-103, 2018.
- [74] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, and M. Dolen, "The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0," *Procedia manufacturing*, vol. 11, pp. 545-554, 2017.
- [75] D. D. Camacho *et al.*, "Applications of additive manufacturing in the construction industry—A forward-looking review," *Automation in construction*, vol. 89, pp. 110-119, 2018.
- [76] J.-Y. Lee, J. An, and C. K. Chua, "Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials," *Applied materials today*, vol. 7, pp. 120-133, 2017.
- [77] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, and D. Hui, "3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective," *Composites Part B: Engineering*, vol. 110, pp. 442-458, 2017.
- [78] P. Parandoush and D. Lin, "A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites," *Composite Structures*, vol. 182, pp. 36-53, 2017.
- [79] S. Khan, K. Joshi, and S. Deshmukh, "A comprehensive review on effect of printing parameters on mechanical properties of FDM printed parts," *Materials Today: Proceedings*, vol. 50, pp. 2119-2127, 2022.
- [80] N. S. Jap, G. M. Pearce, A. K. Hellier, N. Russell, W. C. Parr, and W. R. Walsh, "The effect of raster orientation on the static and fatigue properties of filament deposited ABS polymer," *International Journal of Fatigue*, vol. 124, pp. 328-337, 2019.
- [81] O. Ezeh and L. Susmel, "Fatigue strength of additively manufactured polylactide (PLA): effect of raster angle and non-zero mean stresses," *International Journal of Fatigue*, vol. 126, pp. 319-326, 2019.
- [82] M. F. Afrose, S. Masood, P. Iovenitti, M. Nikzad, and I. Sbarski, "Effects of part build orientations on fatigue behaviour of FDM-

- processed PLA material," *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 1, pp. 21-28, 2016.
- [83] R. Jerez-Mesa, J. A. Travieso-Rodriguez, J. Llumà-Fuentes, G. Gomez-Gras, and D. Puig, "Fatigue lifespan study of PLA parts obtained by additive manufacturing," *Procedia Manufacturing*, vol. 13, pp. 872-879, 2017.
- [84] J. M. Puigoriol-Forcada, A. Alsina, A. G. Salazar-Martín, G. Gomez-Gras, and M. A. Pérez, "Flexural fatigue properties of polycarbonate fused-deposition modelling specimens," *Materials & Design*, vol. 155, pp. 414-421, 2018.
- [85] J. Lee and A. Huang, "Fatigue analysis of FDM materials," *Rapid prototyping journal*, vol. 19, no. 4, pp. 291-299, 2013.
- [86] G. Gomez-Gras, R. Jerez-Mesa, J. A. Travieso-Rodriguez, and J. Lluma-Fuentes, "Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens," *Materials & Design*, vol. 140, pp. 278-285, 2018.
- [87] M. Fischer and V. Schöppner, "Fatigue behavior of FDM parts manufactured with Ultem 9085," *Jom*, vol. 69, no. 3, pp. 563-568, 2017.
- [88] L. Safai, J. S. Cuellar, G. Smit, and A. A. Zadpoor, "A review of the fatigue behavior of 3D printed polymers," *Additive manufacturing*, vol. 28, pp. 87-97, 2019.
- [89] S. Ziemian, M. Okwara, and C. W. Ziemian, "Tensile and fatigue behavior of layered acrylonitrile butadiene styrene," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 21, no. 3, pp. 270-278, 2015.
- [90] L. Racz and M. C. Dudesco, "Numerical Investigation of the Infill Rate upon Mechanical Properties of 3D-Printed Materials," *Polymers*, vol. 14, no. 10, p. 2022, 2022.
- [91] M. Lalegani Dezaki, M. K. A. Mohd Ariffin, and S. Hatami, "An overview of fused deposition modelling (FDM): Research, development and process optimisation," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 562-582, 2021.
- [92] A. Qattawi, "Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 36, pp. 164-174, 2018.
- [93] J. Torres, M. Cole, A. Owji, Z. DeMastry, and A. P. Gordon, "An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of

- experiments," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 22, no. 2, pp. 387-404, 2016.
- [94] S. Dev and R. Srivastava, "Optimization of fused deposition modeling (FDM) process parameters for flexural strength," *Materials Today: Proceedings*, vol. 44, pp. 3012-3016, 2021.
- [95] M. H. MUNTEAN and M. C. DUDESCU, "DEVELOPMENT THROUGH REVERSE ENGINEERING OF A FIXTURE FOR AUTOMATED 3D SCANNING," *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 19, no. 4, 2021.

LISTA FIGURILOR

Figura 1.1	Reprezentarea metodei de fabricație FDM.....	17
Figura 1.2	Reprezentarea metodei de fabricație SLA.....	18
Figura 1.3	Reprezentarea metodei de fabricație SLS.....	19
Figura 1.4	Reprezentarea metodei de fabricație PolyJet.....	21
Figura 1.5	EOS F1 pedală de frână la Formnext 2016.....	26
Figura 1.6	Mașina imprimată 3D produsă de Local Motors.....	27
Figura 2.1	Reprezentare schematică a procesului FDM.....	31
Figura 2.2	Niveluri și tipuri de analiză pentru piese FDM ca material compozit.....	38
Figura 2.3	Definirea axelor principale ale materialului și a axelor de încărcare pentru o lamină.....	38
Figura 2.4	Definiția ρ_2	43
Figura 2.5	Densitatea golurilor în împachetarea fibrelor unidirecționale a) model ideal, b) fotografie în secțiune transversală la microscop, c) efect de aplatizare.....	44
Figura 2.6	Decalaj pozitiv în depunere unidirecțională model teoretic, b) imaginea secțiunii transversale la microscop.....	45
Figura 2.7	Geometria golului negativ model teoretic, b) imagine a secțiunii transversale la microscop.....	46
Figura 2.8	(a) Localizarea fracturii în dreptul racordării pentru epruveta cu raza de racordare de 76 mm și (b) localizarea fracturii în dreptul zonei calibrate pentru epruveta adoptată cu raza de racordare de 244 mm.....	48
Figura 2.9	Vederi de ansamblu ale epruvetelor de tip 2 (a) și tip 5 (b) și detalii (c și d) privind geometria, orientarea filamentelor și dimensiunile principale ale secțiunii transversale.....	49
Figura 2.10	Vederi laterale și frontale ale epruvetelor în zona calibrată realizate din mai multe elemente; (a) epruveta întreagă, (b), (b'), (b''), (b''') vedere deformată și mărită, (c), (c'), (c''), (c''') vedere deformată și mărită pentru epruveta de tip 2 (b și c), 4 (b', c'), 5 (b'', c'').....	51
Figura 2.11	Modelul filamentului înclinat similar unei bare solicitat de forța $F_{\alpha(0)}$ și alungit având deplasarea verticală v	53

Figura 2.12 Filamente înclinate cu lungime redusă (a) și determinarea deplasării verticale care trebuie luată în considerare în modelul de rigiditate (b).....	56
Figura 2.13 (a) Schema dispozitivului de prindere, (b) epruveta de tracțiune conform standardului ASTM D638, (c) ilustrare schematică a diferitelor unghiuri ale straturilor de filamente.....	60
Figura 2.14 Formarea găturii între două straturi raster adiacente, unde a, w și h reprezintă lungimea regiunii de găturii, lățimea filamentului și înălțimea filamentului.....	62
Figura 2.15 Structura discretizată a epruvetei utilizând elemente finite tetraedrale tip C3D4.....	63
Figura 2.16 Condiții la limită aplicate pentru epruveta de tracțiune FDM.....	64
Figura 2.17 Modul de distribuție al tensiunilor pentru epruveta având unghiul de înclinare de 0° cu grosimea stratului (a) 0,178 mm, (b) 0,254 mm, (c) 0,330 mm.....	65,66
Figura 3.1 Dimensiunile epruvetei de tracțiune.....	69
Figura 3.2 Modelul de umplere: triunghiular, grilă, rectiliniu, fagure complet, fagure rapid și ondulatoriu.....	70
Figura 3.3 Orientarea filamentelor pentru o epruveta imprimată 3D.....	71
Figura 3.4 Variația cu rata de umplere: a) rezistența la tracțiune, b) deformația specifică la tracțiune pentru tensiunea maximă și c) modulul de elasticitate longitudinal.....	71,72
Figura 3.5 Variația în funcție de modelul de umplere pentru: a) rezistența la tracțiune, b) deformația specifică la tracțiune la tensiune maximă c) modulul lui Young.....	73,74
Figura 3.6 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.....	75
Figura 3.7 Secțiunea de umplere (1) și secțiunea de înveliș (2) a unei epruvete de tracțiune tip ISO_5271A imprimată 3D.....	82
Figura 3.8. Geometria filamentelor tipărite: (a) Segment din codul G al imprimantei; (b) Dimensiunile teoretice ale unei fibre (L_w și L_h corespund lățimii extruderului și înălțimii stratului).....	83
Figura 3.9 Poziția secțiunii transversale analizate în raport cu marginea epruvetei.....	84
Figura 3.10 Modelarea geometrică și extragerea secțiunii transversale în programul ANSA: (a) geometria epruvetei de tracțiune;	

(b) reprezentarea geometrică a filamentelor; (c) secțiunea transversală a modelului geometric; (d) rezultatul calculului ariei pentru secțiunea transversală.....	85
Figura 3.11 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.....	86
Figura 3.12 Formarea gâtuirii între filamente adiacente.....	86
Figura 3.13 Determinarea suprafeței de contact dintre filamente (a) gâtuire între straturi; (b) gâtuire în interiorul stratului.....	87
Figura 3.14 Reprezentarea filamentului: (a) geometria inițială; (b) ajustată pentru a reprezenta gâtuirea intra și inter-strat.....	88
Figura 3.15 Setarea lungimii perimetrului la o valoare care să permită o reprezentare precisă a straturilor.....	91
Figura 3.16 Reprezentarea FEM a filamentelor. (Segment dintr-o epruvetă standard de încercare la tracțiune).....	92
Figura 3.17 Rezultatul simulării în a) Epilysis și în b) Nastran.....	93
Figura 3.18 Influența lungimii mai mari a laturilor elementelor finite asupra reprezentării filamentelor individuale.....	94
Figura 3.19 Modele de secțiuni transversale în funcție de rata de umplere: (a) 20%; (b) 40%; (c) 60%; (d) 80%; (e) 100%.....	97
Figura 3.20. Curbe de tensiune-deformație specifică recalulate pe baza suprafețelor secțiunilor transversale estimate numeric ale epruvetelor cu ratele de umplere: (a) 20%; (b) 40%; (c) 60%; (d) 80%; (e) 100%.....	99,100
Figura 3.21 Valoarea modulului de elasticitate pentru diferite rate de umplere recalulate pe baza ariilor secțiunii transversale estimate numeric.....	102
Figura 3.22 Aproximarea cu o funcție polinomială a ratei de umplere în funcție de modulul de elasticitate al epruvetelor.....	103
Fig. 3.23 Secțiuni transversală a epruvetelor de tracțiune pentru diferite modele de umplere: a) grid 0°-90° b) grid ±45°, c) fast honeycomb, d) full honeycomb, e) triangular 60° și f) wiggle.....	107,108
Figura 3.24 Curbe tensiune - deformație specifică comparative pentru toate modelele de umplutură analizate.....	109,110,111
Figura 3.25 Rezultate comparative ale modulelor de elasticitate longitudinale cu și fără ajustarea ariei secțiunii transversale pentru diferite modele de umplere.....	112

Figura 4.1 Tipuri de epruvete pentru incercarea la impact: a) cu crestătură U; b) cu crestătură V.....	117
Figura 4.2 Epruvete imprimare 3D având crestătură în V cu diferite rate de umplere.....	118
Figura 4.3 Imagine microscopică a crestăturii epruvetelor analizată cu software-ul Digimizer.....	118
Figura 4.4 Standul experimental pentru încercarea de încovoiere prin șoc: a) ciocanul Charpy, b) fixarea epruvetei cu crestătură.....	119
Figura 4.5 Epruvete cu diferite grade de umplere după ruperea la încovoiere prin impact.....	121
Figura 4.6 Epruvete cu diferite modele de umplere după ruperea la încovoiere prin impact.....	122
Figura 4.7 Curbele tensiune - deformație specifică ale epruvetelor cu diferite modele de umplere.....	129
Figura 4.8 Curba Wöhler a epruvetelor cu modelul de umplere grid 0°: a) coordonate S-N, b) coordonate log_S-log_N.....	130
Figura 4.9 Diagramele Wöhler pentru diferite modele de umplere și parametri curbei de aproximare.....	130,131,132,133
Figura 4.10 a) Curbe tensiune-număr de cicluri S-N pentru diferite modele de umplere; (b) Curbe tensiune-număr de cicluri S-N cu tensiune normalizată.....	134,135
Figura 4.11 Imagini SEM ale suprafețelor de fractură ale epruvetelor de oboseală cu următoarele modele de umplere (a) Rectilinear 0°; (b) Rectilinear 90°; (c) Grid 0-90°; (d) Grid ±45°; (e) Triangular 60°; (f) Wiggle; (g) Fast Honeycomb; (f) Full Honeycomb.....	137,138,139
Figura 5.1 Încercarea la încovoiere în trei puncte pentru proba imprimată 3D cu rată de umplere variabilă.....	144
Figura 5.2 Setări ale epruvetei de încovoiere a) setări ale sub-modelului, b) setări ale procesului, c) definirea geometrică a sub-modelelor.....	145
Figura 5.3 Epruvetă în timpul procesului de imprimare cu pereți subțiri interni evidențiați între diferite setări. (Partea stângă: specimenul imprimat, partea dreaptă: setările imprimantei).....	146
Figura 5.4 Epruvetă îmbunătățită în timpul procesului de imprimare fără a genera pereți subțiri între diferite setări. (Partea stângă: specimenul imprimat, partea dreaptă: setările imprimantei).....	146

Figura 5.5 Comparație între curbele forță aplicată – săgeata grinzii pentru epruvetele solicitate la încovoiere imprimate uniform și cu rată de umplere variabilă.....	148
Figura 5.6 Rezultatele analizei FEM a modelului Tetraida; a) săgeata grinzii, b) distribuției tensiunii normale.....	150
Figura 5.7 Rezultatele analizei FEM a modelului Hexaida; a) săgeata grinzii, b) distribuția tensiunilor normale.....	150
Figura 5.8 Reprezentarea schematică a modelului analitic.....	151
Figura 5.9 Realizarea modelului CAD al pedalei: a) sistemul de scanare optică 3D Atos Core, b) modelul CAD rezultat în urma generării.....	155
Figura 5.10 Modele imprimate ale pedalei de frână. a) cu filamentele orientate transversal în raport cu axa longitudinală a pedalei, b) model cu filamentele orientate după axa longitudinală a pedalei.....	156
Figura 5.11 Standul experimental pentru studiul comportamentului mecanic al pedalei de frână imprimate 3D.....	157
Figura 5.12 Interfață de măsurare a forțelor și deformațiilor specifice.....	157
Figura 5.13 Măsurarea deformațiilor specifice ale pedalei prin tensometrie electrică rezistivă: a) pedala imprimată având filamentele orientate după axa longitudinală, b) pedala imprimată având filamentele orientate transversal, c) pedala injectată comercială.....	158,159
Figura 5.14 Analiza numerică a deformațiilor specifice a pedalelor analizate: a) pedala imprimata 3D, b) pedala originală realizată prin injecție de masă plastică.....	160

LISTA TABELELOR

Tabelul 1.1 Compararea procesului FDM cu procesele tradiționale.....	25
Tabelul 3.1 Parametrii de imprimare.....	69
Tabelul 3.2 Lungimea filamentelor înclinate.....	78
Tabelul 3.3 Alungirea filamentelor înclinate.....	79
Tabelul 3.4 Compararea deplasărilor de la testul experimental de tracțiune (EXP) cu rezultatele simulării cu două lungimi diferite ale elementelor (FEA1 și FEA2).....	96
Tabelul 3.5 Secțiuni transversale estimate în funcție de rata de umplere și de finețea discretizării.....	98
Tabelul 3.6 Variația lungimii filamentului și a greutateii epruvetei în funcție de rata de umplere.....	98
Tabelul 3.7 Modulul de elasticitate la al epruvetelor imprimate cu secțiunea transversală determinată geometric.....	101
Tabelul 3.8 Valorile deformațiilor specifice obținute prin simulări numerice vs. cele determinate experimental.....	107
Tabelul 3.9 Aria secțiunii transversale a epruvetelor de tracțiune calculată numeric.....	109
Tabelul 3.10 Valorile modulului E pentru diferite modele de umplutură.....	112
Tabelul 4.1 Parametrii de imprimare.....	116
Tabelul 4.2 Valorile medii ale rezilienței pentru epruvetele tipărite cu același model de umplere, dar cu rate de umplere diferite.....	120
Tabelul 4.3 Valorile medii ale rezilienței pentru epruvetele tipărite cu aceeași rată de umplere, dar cu diferite modele de umplere.....	123
Tabelul 4.4 Valorile medii ale rezilienței probelor în ordine crescătoare.....	123
Tabelul 4.5. Rezistența la tracțiune măsurată pentru epruvete cu diferite modele de umplutură.....	129
Tabelul 4.6 Coeficienții modelului liniar și acuratețea aproximării.....	133
Tabelul 4.7 Durata de viață a diferitelor modele de umplere.....	135
Tabelul 5.1. Rezultatele încercărilor la încovoiere în trei puncte ale epruvetelor imprimate.....	147
Tabelul 5.2. Valorile deformațiilor specifice măsurate pe diferite tipuri de pedale.....	159
Tabelul 5.3. Caracteristici mecanice utilizate în modele numerice.....	160

ANEXE

Anexa 1. Codul sursă al programului plug in dezlotat in limbajul Beta Scripting

```
//def main()
defbutton stl_to_curves() Laszlo
{

NEW("discard");

// Read "GCODE"-File

// Select-Files to use
files_sel = SelectOpenFile(1,"NASTRAN-files (*.gcode)");
if (!files_sel) goto ENDE;

file_in = Fopen(files_sel[0],"r");

// Reading each row > search for "layer"
layer_found = 0;
grid_found = 0;
while(Read(file_in,read_line))
{

if(read_line(1:8) == "; layer ")
{
separator = "=";
layer_z =
TokenizeString(read_line,separator,0);
zp[0] = layer_z[1]; zp[1] = zp[0];
layer_found = 1;
}

/* if(read_line(1:5) == "G92 E")
{
```



```

        grid_found = 0;
    }
*/

    if(read_line(1:4) == "G1 X")
    {
        separator = " ";
        layer_g1 =
TokenizeString(read_line,separator,0);
        xp[0] = layer_g1[1](2:); yp[0] =
layer_g1[2](2:);

        if (layer_g1[3] == "F4800")
        {
            grid_found = 0;
        }
        if(layer_found == 1)
        {
            if(grid_found == 1)
            {

                CreateCurve(2,xp,yp,zp);
            }
            xp[1] = xp[0]; yp[1] = yp[0];
            grid_found = 1;
        }
    }
}

```

ENDE:

ZoomAll();

```

Print("");
Print("End of Program");
Print("");
}

```

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](https://doi.org/10.1006/06612500014) (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](https://doi.org/10.3390/polym14102022), WOS:[000803270500001](https://doi.org/10.100803270500001) (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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.1016/j.procedia.2023.03.004) (ELSEVIER/SCOPUS)

Citări indexate Web of Science ale lucrărilor publicate

Lucrările publicate au următoarele citări:

Publicația	Citări Google Academic	Citări Web of Science
P2	4	3
P3	3	1
P4	102	49

[PDF] [Effects of raster orientation, infill rate and infill pattern on the mechanical properties of 3D printed materials](#)

[C Dudescu](#), [L Racz](#) - ACTA Univ. Cibiniensis, 2017 - sciendo.com

Three-dimensional printing is an additive manufacturing process that allows rapid design and manufacture of complex component based on computer-aided design models. Compared ...

★ Save [Cite](#) [Cited by 102](#) [Related articles](#) [All 3 versions](#) [»](#)

[HTML] [Numerical Investigation of the Infill Rate upon Mechanical Proprieties of 3D-Printed Materials](#)

[L Racz](#), [MC Dudescu](#) - Polymers, 2022 - mdpi.com

The paper proposes a novel method of numerical simulation of the fused deposition molding 3Dprinted parts. The single filaments are modeled by a script using the G-code of the 3D ...

★ Save [Cite](#) [Cited by 4](#) [Related articles](#) [All 9 versions](#) [Web of Science: 3](#) [»](#)

[HTML] [Effect of infill pattern on fatigue characteristics of 3D printed polymers](#)

[MC Dudescu](#), [L Racz](#), [F Popa](#) - Materials Today: Proceedings, 2023 - Elsevier

The effect of the structure that is printed inside an object, known as infill pattern, on fatigue life of 3D printed specimens made of ABS was investigated in this paper. There are several ...

★ Save [Cite](#) [Cited by 3](#) [Related articles](#)

[Mechanical behavior of beams with variable stiffness obtained by 3D printing](#)

[L Racz](#), [MC Dudescu](#) - MATEC Web of Conferences, 2021 - matec-conferences.org

Additive manufacturing or 3D printing gained a widespread popularity in recent years due to the ability of the method to manufacture components with high geometrical complexity. The ...

☆ Save [Cite](#) [Cited by 1](#) [Related articles](#) [All 2 versions](#) [»](#)

[EVALUATION OF IMPACT PROPRIETIES OF 3D PRINTED MATERIALS](#)

[R Laszlo](#), [MC DUDESCU](#) - ACTA TECHNICA NAPOCENSIS ..., 2020 - atna-mam.utcluj.ro

The aim of this article is to analyze the influence of infill percentage and infill pattern on the impact toughness of parts printed using the fused deposition modeling method. The ...

★ Save [Cite](#) [Related articles](#) [»](#)