

INTEGRITATEA ȘI DURABILITATEA COMPONENTELOR OBȚINUTE PRIN PRINTARE 3D

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea Politehnica Timișoara
în domeniul INGINERIE MECANICĂ
de către

Ing. Cristina VĂLEAN

Conducător științific:

Referenți științifici:

Prof.univ.dr.ing. Liviu Marșavina

Prof.univ.dr.ing. Dan Mihai Constantinescu

Prof.univ.dr.ing. Adrian Marius Pascu

Prof.univ.dr.ing. Ion-Dragoș Uțu

Ziua susținerii tezei: 20 Octombrie 2023

Cuvânt înainte

Lucrarea de față a fost elaborată pe parcursul activității mele de cercetare desfășurate în cadrul Departamentului de Mecanică și Rezistența Materialelor din Facultatea de Mecanică a Universității Politehnica Timișoara.

Teza de doctorat tratează subiectul integrității și al durabilității componentelor tridimensionale, printate prin tehnologia FDM (Modelare prin Depunere Fuzionată), de altfel, un subiect de mare actualitate, fiind prima lucrare de acest gen din România. Lucrarea de față a fost concepută și realizată cu scopul investigării caracteristicilor fizice (acuratetea dimensională și masa, timpul de printare) și mecanice (proprietățile elastice și de rezistență, performanțele de absorbție a energiei) ale pieselor din PLA (Acid Polilactic) solicitate mecanic (tracțiune, compresiune, rupere fragilă, impact și oboseală).

Procesele de fabricație aditivă au luat amploare în ultimii ani, iar investigarea proprietăților componentelor obținute astfel, este, fără îndoială, crucială. Prezenta lucrare aduce un aport semnificativ în cunoașterea comportamentului mecanic al materialelor polimerice printate prin tehnologia FDM și pune baza cercetărilor viitoare din acest domeniu.

Doresc să adresez mulțumiri domnului Academician Profesor Doctor Inginer Liviu Marșavina, coordonatorul meu pe perioada stagiului de doctorat. Îi mulțumesc pentru sprijinul și îndrumarea pe care mi le-a oferit, împreună făcând ca această lucrare să ajungă de la idee la nivelul la care se află astăzi. Adresez mulțumiri comisiei de îndrumare, domnului Conf.Dr.Ing. Radu Negru, domnului Prof.Dr.Ing. Dan-Andrei Șerban și domnului Conf.Dr.Ing. Dan Ioan Stoia, pentru susținerea oferită pe parcursul stagiului. Mulțumesc, de asemenea, domnului Prof.Dr.Ing. Imre Norbert Orbulov și doamnei Asist.Dr.Ing. Alexandra Kemény, de la Universitatea de Tehnologie și Economie din Budapesta, Ungaria, care au făcut posibilă efectuarea testelor de oboseală din cadrul tezei. Adresez mulțumiri doamnei Conf.Dr.Ing. Gabriella Epasto și doamnei Drd.Ing. Giulia Palomba, din cadrul Universității din Messina, Italia, pentru ajutorul oferit în efectuarea testelor la impact.

Doresc să adresez mulțumiri colegilor din Departamentul de Mecanică și Rezistența Materialelor, cu precădere domnului Conf.Dr.Ing. Emanoil Linul, pentru tot ajutorul, suportul și sfaturile acordate în toată această perioadă.

La final, doresc să îmi exprim recunoștința față de familia mea. Le mulțumesc părinților, fraților și surorilor pentru tot suportul oferit, pentru rugăciunile lor și pentru grija pe care au purtat-o copiilor mei, ca eu să îmi pot finaliza teza. De asemenea, îi sunt mulțumitoare și profund recunoscătoare soțului meu, fără de care nu aș fi ajuns până aici.

Vă mulțumesc tuturor!

Timișoara, octombrie 2023

Cristina Vălean

Soțului meu, *Emanoil*, și copiilor noștri, *Ariana* și *Dominic*. Sunteți speciali!

Teza de doctorat a fost realizată cu sprijin parțial din proiectele:

- Proiectul European Twinning SIRAMM, program de cercetare și inovare Orizont 2020 al Uniunii Europene (H2020-WIDESPREAD-2018-03) în baza acordului de grant nr. 857124.
- „Rețea de excelență în cercetare și inovare aplicativă pentru programele de studii doctorale și postdoctorale/InoHubDoc” prin contractul de finanțare nr. POCU/993/6/13/153437, proiect cofinanțat din Fondul Social European.

CUPRINS

Listă figuri.....	8
Listă tabele.....	14
Listă notații.....	16
1. Introducere.....	20
1.1. Noțiuni generale.....	20
1.2. Tehnologii de fabricație aditivă.....	22
1.2.1. Fotopolimerizarea.....	23
1.2.2. Fuziunea în pat de pulbere.....	24
1.2.3. Procesul de fabricație cu jet de material.....	26
1.2.4. Procesul de fabricație cu jet de liant.....	27
1.2.5. Procesul de fabricație prin laminare cu foi.....	29
1.2.6. Procesul de fabricație prin depunere dirijată a energiei.....	29
1.2.7. Modelarea prin depunere fuzionată.....	31
1.3. FDM – Modelarea prin depunere fuzionată.....	31
1.3.1. Noțiuni generale FDM.....	31
1.3.2. Parametri de proces.....	34
1.3.3. Materiale pentru filament.....	40
1.3.4. Proprietăți ale componentelor FDM.....	44
1.3.5. Domenii de utilizare.....	47
1.3.6. Avantaje și dezavantaje.....	48
2. Comportamentul la tracțiune.....	51
2.1. Noțiuni generale.....	51
2.2. Scopul investigațiilor.....	53
2.3. Materiale și metode.....	54
2.3.1. Materiale.....	54
2.3.2. Proiectarea și fabricarea epruvetelor.....	55
2.3.3. Analiza dimensională.....	59
2.3.4. Programul experimental.....	59
2.3.5. Definirea proprietăților.....	60
2.4. Procesul de optimizare.....	61
2.4.1. Evaluarea dimensională.....	61
2.4.2. Evaluarea proprietăților filamentului din PLA.....	64
2.4.3. Evaluarea proprietăților epruvetelor din PLA printate.....	65
2.4.3.1. Efectul modelului de umplere.....	65
2.4.3.2. Efectul densității de umplere.....	69
2.4.3.3. Efectul orientării printării.....	72

6 Cuprins

2.4.3.4. Efectul grosimii stratului.....	75
2.4.3.5. Efectul vitezei de printare.....	78
2.4.3.6. Efectul temperaturii duzei.....	81
2.4.3.7. Efectul numărului de straturi exterioare.....	83
2.4.4. Epruvete optimizate.....	85
2.5. Comparații cu literatura de specialitate.....	92
3. Comportamentul la compresiune.....	93
3.1. Noțiuni generale.....	93
3.2. Scopul investigațiilor.....	94
3.3. Materiale și metode.....	95
3.3.1. Materiale.....	95
3.3.2. Proiectarea și fabricarea epruvetelor.....	95
3.3.3. Analiza dimensională.....	96
3.3.4. Programul experimental.....	97
3.3.5. Definirea proprietăților.....	97
3.4. Efectul densității de umplere.....	100
3.4.1. Evaluarea proprietăților fizice.....	101
3.4.2. Evaluarea proprietăților mecanice.....	104
3.4.3. Optimizarea densității de umplere.....	112
3.5. Efectul modelului de umplere.....	115
3.5.1. Evaluarea proprietăților fizice.....	117
3.5.2. Evaluarea proprietăților mecanice.....	122
3.5.3. Optimizarea modelului de umplere.....	131
3.6. Efectul formei epruvetelor.....	134
3.6.1. Evaluarea proprietăților fizice.....	135
3.6.2. Evaluarea proprietăților mecanice.....	139
4. Comportamenul la rupere fragilă.....	148
4.1. Noțiuni generale.....	148
4.2. Scopul investigațiilor.....	149
4.3. Materiale și metode.....	150
4.3.1. Materiale.....	150
4.3.2. Proiectarea și fabricarea epruvetelor.....	150
4.3.3. Programul experimental.....	152
4.3.4. Definirea proprietăților.....	153
4.4. Rezultate obținute.....	154
4.5. Analiza rezultatelor.....	160

5. Comportamentul la impact.....	163
5.1. Noțiuni generale.....	163
5.2. Scopul investigațiilor.....	165
5.3. Materiale și metode.....	165
5.3.1. Materiale.....	165
5.3.2. Proiectarea și fabricarea epruvetelor.....	165
5.3.3. Analiza dimensională.....	166
5.3.4. Programul experimental.....	166
5.3.5. Definirea proprietăților.....	168
5.4. Analiza rezultatelor.....	169
5.4.1. Evaluarea proprietăților fizice.....	169
5.4.2. Evaluarea proprietăților la impact simplu.....	171
5.4.3. Evaluarea proprietăților la impact multiplu.....	177
6. Comportamentul la oboseală.....	182
6.1. Noțiuni generale.....	182
6.2. Scopul investigațiilor.....	183
6.3. Materiale și metode.....	184
6.3.1. Materiale.....	184
6.3.2. Proiectarea și fabricarea epruvetelor.....	184
6.3.3. Analiza dimensională.....	184
6.3.4. Programul experimental.....	184
6.3.5. Definirea proprietăților.....	186
6.4. Analiza rezultatelor.....	186
6.4.1. Evaluarea proprietăților fizice.....	186
6.4.2. Evaluarea proprietăților cvasi-statice.....	187
6.4.3. Evaluarea proprietăților la oboseală.....	188
7. Concluzii și contribuții personale. Direcții noi de cercetare.....	192
7.1. Concluzii.....	192
7.2. Contribuții personale.....	203
7.3. Direcții noi de cercetare.....	206
Bibliografie.....	207

Listă figuri

Figura	Denumire	Pagina
Capitolul 1 – Introducere		
1.1.	Schema reprezentativă a procesului de fabricație aditivă	21
1.2.	Tehnologii de fabricație aditivă	22
1.3.	Procesul de bază al tehnologiei de printare prin fotopolimerizare	24
1.4.	Procesul de bază al tehnologiei de printare prin fuziune în pat de pulbere	25
1.5.	Procesul de bază al tehnologiei de printare MJ	26
1.6.	Procesul de bază al tehnologiei de printare BJ	28
1.7.	Procesul de bază al tehnologiei de printare prin depunere dirijată a energiei	30
1.8.	Procesul de bază al printării prin tehnologia FDM	33
1.9.	Evidențierea parametrilor de proces	35
1.10.	Orientările de printare	35
1.11.	Diferite ungiuri de printare	36
1.12.	Grosimea stratului de printare	36
1.13.	Gol de aer pozitiv (a), zero (b) și negativ (c)	37
1.14.	Densitate de umplere 10% (a), 40% (b) și 80% (c)	38
1.15.	Model de umplere liniar (a), concentric (b) și hexagonal (c)	39
1.16.	Număr de contururi exterioare	40
1.17.	Impactul parametrilor de proces asupra caracteristicilor componentelor	44
Capitolul 2 – Comportamentul la tracțiune		
2.1.	Filamentul din PLA utilizat în evaluarea proprietăților la tracțiune: caracteristici (a) și procesul ambalare-utilizare (b)	55
2.2.	Dimensiunile epruvetelor de tracțiune printate 3D (în mm)	55
2.3.	Vedere de ansamblu a imprimantei Infitary i3 (a) cu detaliu pe doza de printare (b)	56
2.4.	Parametrii de proces investigați pentru epruvetele PLA printate 3D	57
2.5.	Mașina universală de testare Zwick Roell 005 de 5 kN	59
2.6.	Proba de tracțiune în dispozitivul de fixare al mașinii de testare: înainte (a) și după (b) încercarea de tracțiune	60
2.7.	Erorile relative de grosime (a) și lățime (b) ale epruvetelor din PLA printate în funcție de modelul de umplere și densitatea de umplere	61
2.8.	Erorile relative de grosime și lățime ale epruvetelor din PLA în funcție de orientarea printării, pentru densități de umplere de 70% (a) și 100% (b)	62
2.9.	Erorile relative de grosime și lățime ale epruvetelor din PLA în funcție de grosimea stratului (a), viteza de printare (b), temperatura duzei (c) și numărul de straturi exterioare (d)	63

2.10.	Curbele tensiune-deformație și energie de rupere-deformație ale filamentului din PLA	64
2.11.	Valoarea medie a principalelor proprietăți la tracțiune ale filamentului din PLA	65
2.12.	Modelele de umplere investigate pentru densitatea de umplere de 40%	66
2.13.	Curbele tensiune-deformație și energie de absorbție-deformație ale epruvetelor din PLA pentru densitățile de umplere de 40% (a, b) și 70% (c, d). Efectul modelului de umplere	66
2.14.	Variația rezistenței la tracțiune și a tensiunii la rupere a epruvetelor din PLA pentru densitățile de umplere de 40% (a) și 70% (b). Efectul modelului de umplere	68
2.15.	Densitățile de umplere investigate: 40% (a), 70% (b) și 100% (c)	69
2.16.	Curbele tensiune-deformație și energie de absorbție-deformație ale epruvetelor din PLA pentru modelele de umplere de GR (a, b), HC (c, d) și TR (e, f). Efectul densității de umplere	70
2.17.	Variația rezistenței la tracțiune și a tensiunii la rupere a epruvetelor din PLA pentru modelele de umplere de GR (a), HC (b) și TR (c). Efectul densității de umplere	71
2.18.	Așezarea epruvetelor pe patul de printare, privind efectul orientării	73
2.19.	Curbele tensiune-deformație și energie de absorbție-deformație ale epruvetelor din PLA pentru densitățile de umplere de 70% (a, b) și 100% (c, d). Efectul orientării printării	73
2.20.	Variația rezistenței la tracțiune și a tensiunii la curgere a epruvetelor din PLA pentru densitățile de umplere de 70% (a) și 100% (b). Efectul orientării printării	75
2.21.	Curbele tensiune-deformație și energie de absorbție-deformație ale epruvetelor din PLA. Efectul grosimii stratului	76
2.22.	Variația rezistenței la tracțiune, tensiunii la rupere și energiei de rupere a epruvetelor din PLA. Efectul grosimii stratului	77
2.23.	Curbele tensiune-deformație și energie de absorbție-deformație ale epruvetelor din PLA. Efectul vitezei de printare	79
2.24.	Variația rezistenței la tracțiune, tensiunii la rupere și energiei de rupere a epruvetelor din PLA. Efectul vitezei de printare	80
2.25.	Curbele tensiune-deformație și energie de absorbție-deformație ale epruvetelor din PLA. Efectul temperaturii duzei	81
2.26.	Variația rezistenței la tracțiune, tensiunii la rupere și energiei de rupere a epruvetelor din PLA. Efectul temperaturii duzei	82
2.27.	Numărul de straturi exterioare investigate pentru modelul de umplere Triangular și densitatea de umplere de 70%	83
2.28.	Curbele tensiune-deformație și energie de absorbție-deformație ale epruvetelor din PLA. Efectul numărului de straturi exterioare	84
2.29.	Variația rezistenței la tracțiune, tensiunii la rupere și energiei de rupere a epruvetelor din PLA. Efectul numărului de straturi exterioare	85
2.30.	Curbele tensiune-deformație (a) și energie de absorbție-deformație (b) ale epruvetelor din PLA inițiale și optimizate (densitatea de umplere: 70%, orientarea printării: 0°)	86

10 Listă figuri

2.31.	Variația rezistenței la tracțiune, tensiunii la rupere și energiei de rupere a epruvetelor din PLA inițiale și optimizate (densitatea de umplere: 70%, orientarea printării: 0°)	86
2.32.	Curbele tensiune-deformație și energie de absorbție-deformație ale epruvetelor din PLA inițiale și optimizate pentru orientările de 0° (a, b), 45° (c, d) și 90° (e, f). Densitatea de umplere este de 100%	87
2.33.	Variația rezistenței la tracțiune (a), tensiunii la rupere (b) și energiei de rupere (c) a epruvetelor din PLA inițiale și optimizate pentru densitatea de umplere de 100%	89
2.34.	Erorile relative de grosime și lățime ale epruvetelor din PLA printate prin FDM pentru densitățile de umplere de 70% (a) și 100% (b-d)	90
2.35.	Influența parametrilor procesului asupra proprietăților la tracțiune ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM	91
2.36.	Comparația rezistenței la tracțiune a epruvetelor din PLA obținute prin procesele de printare FDM și de turnare prin injecție	92

Capitolul 3 – Comportamentul la compresiune

3.1.	Forma și parametrii geometrici ai epruvetelor de compresiune	95
3.2.	Vedere de ansamblu a imprimantei Original Prusa i3 MK3	95
3.3.	Mașina universală de testare LBG TC100 de 100 kN	97
3.4.	Curbele tensiune-deformație la compresiune. Identificarea caracteristicilor mecanice	98
3.5.	Curbele tensiune-deformație și eficiența energetică-deformație la compresiune. Determinarea punctului de densificare	99
3.6.	Curbele tensiune-deformație la compresiune. Determinarea amplitudinii tensiunii ($\Delta\sigma$) și deformației ($\Delta\varepsilon$)	99
3.7.	Densitățile de umplere investigate	100
3.8.	Epruvetele printate 3D privind studiul efectului densității de umplere	100
3.9.	Erorile relative de înălțime și lățime ale epruvetelor din PLA printate în funcție de densitatea de umplere	101
3.10.	Variația masei teoretice și măsurate a epruvetelor din PLA printate în funcție de densitatea de umplere	102
3.11.	Erorile relative de masă ale epruvetelor din PLA printate în funcție de densitatea de umplere	102
3.12.	Variația timpului de printare al epruvetelor din PLA în funcție de densitatea de umplere	103
3.13.	Curbele tensiune-deformație la compresiune ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM. Efectul densității de umplere	104
3.14.	Epruvetele deformate în funcție de densitatea de umplere	105
3.15.	Variația modulului de elasticitate la compresiune al epruvetelor din PLA printate. Efectul densității de umplere	107
3.16.	Variația rezistenței la compresiune (a), tensiunii minime (b), tensiunii de platou (c) și tensiunii la densificare (d) a epruvetelor din PLA printate. Efectul densității de umplere	108
3.17.	Variația deformațiilor corespunzătoare rezistenței la compresiune și tensiunii la densificare ale epruvetelor din PLA printate. Efectul densității de umplere	109

3.18.	Variația lungimii platoului la compresiune al epruvetelor din PLA printate. Efectul densității de umplere	109
3.19.	Variația amplitudinii tensiunii pentru epruvetele din PLA printate. Efectul densității de umplere	110
3.20.	Curbele energie de absorbție-deformație la compresiune ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM. Efectul densității de umplere	110
3.21.	Variația energiei de absorbție la densificare cu densitatea de umplere	111
3.22.	Variația eficienței energetice la densificare cu densitatea de umplere	111
3.23.	Curbele tensiune-deformație la compresiune. Comparatie material dens – material celular	112
3.24.	Generarea tensiunilor de vârf în curbele tensiune-deformație la compresiune ale epruvetelor din PLA. Efectul densității de umplere	113
3.25.	Diagramele energiei de absorbție: curbele tensiune-deformație (a) și variația tensiunii de vârf cu densitatea de umplere	114
3.26.	Deformația corespunzătoare tensiunii la vârf funcție de densitatea de umplere a epruvetelor din PLA	115
3.27.	Modelele de umplere investigate	116
3.28.	Epruvetele printate privind studiul efectului modelului de umplere	117
3.29.	Erorile relative de înălțime și lățime ale epruvetelor din PLA printate în funcție de modelul de umplere	119
3.30.	Variația masei teoretice și măsurate a epruvetelor din PLA printate în funcție de modelul de umplere	120
3.31.	Erorile relative de masă ale epruvetelor din PLA printate în funcție de modelul de umplere	121
3.32.	. Variația timpului de printare al epruvetelor din PLA în funcție de modelul de umplere	122
3.33.	Curbele tensiune-deformație la compresiune ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM. Efectul modelului de umplere	122
3.34.	Epruvetele deformate în funcție de modelul de umplere	123
3.35.	Variația modulului de elasticitate la compresiune al epruvetelor din PLA printate. Efectul modelului de umplere	125
3.36.	Variația proprietăților de rezistență a epruvetelor din PLA printate. Efectul modelului de umplere	126
3.37.	Variația deformațiilor la rezistența maximă și la densificare ale epruvetelor din PLA printate. Efectul modelului de umplere	127
3.38.	Variația lungimii platoului la compresiune al epruvetelor din PLA printate. Efectul modelului de umplere	128
3.39.	Variația amplitudinii tensiunii pentru epruvetele din PLA printate. Efectul modelului de umplere	129
3.40.	Curbele energie de absorbție-deformație la compresiune ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM. Efectul modelului de umplere	129
3.41.	Variația energiei de absorbție la densificare cu modelul de umplere	130
3.42.	Variația eficienței energetice la densificare cu modelul de umplere	130

12 Listă figuri

3.43.	Geometriile epruvetelor investigate	134
3.44.	Epruvetele printate privind studiul efectului formei epruvetelor	135
3.45.	Erorile relative de înălțime ale epruvetelor din PLA printate în funcție de forma epruvetelor	137
3.46.	Variația masei teoretice și măsurate a epruvetelor din PLA printate în funcție de forma epruvetelor	138
3.47.	Erorile relative de masă ale epruvetelor din PLA printate în funcție de forma epruvetelor	138
3.48.	Variația timpului de printare al epruvetelor din PLA în funcție de forma epruvetelor	139
3.49.	Curbele tensiune-deformație la compresiune ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM. Efectul formei epruvetelor	139
3.50.	Epruvetele deformate în funcție de forma acestora	140
3.51.	Variația modulului de elasticitate la compresiune al epruvetelor din PLA printate. Efectul formei epruvetelor	142
3.52.	Variația proprietăților de rezistență a epruvetelor din PLA printate. Efectul formei epruvetelor	143
3.53.	Variația deformațiilor la rezistența maximă și la densificare ale epruvetelor din PLA printate. Efectul formei epruvetelor	144
3.54.	Variația lungimii platoului la compresiune al epruvetelor din PLA printate. Efectul formei epruvetelor	145
3.55.	Variația amplitudinii tensiunii pentru epruvetele din PLA printate. Efectul formei epruvetelor	145
3.56.	Curbele energie de absorbție-deformație la compresiune ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM. Efectul formei epruvetelor	146
3.57.	Variația energiei de absorbție la densificare cu forma epruvetelor	146
3.58.	Variația eficienței energetice la densificare cu forma epruvetelor	147

Capitolul 4 – Comportamentul rupere fragilă

4.1.	Geometria și dimensiunile epruvetei SENB printate 3D	150
4.2.	Obținerea creștăturilor epruvetei SENB din PLA	151
4.3.	Epruvetele SENB printate pe cele trei direcții de încărcare (0° , 45° și 90°)	152
4.4.	Poziționarea epruvetei SENB pe dispozitivul de fixare al masinii Walter+bay de 10 kN: modul I (a) și modul II (b) de încărcare	152
4.5.	Configurația de testare a epruvetelor pentru modul I-SFPB (a) și modul II-ASFB (b)	153
4.6.	Curbele forță-deplasare pentru încărcarea simetrică (a) și asimetrică (b)	154
4.7.	Influența orientării epruvetei asupra tenacității la rupere (K_{IC} și K_{IIC})	154
4.8.	Curbele energie de rupere-deplasare pentru încărcarea simetrică (a) și asimetrică (b)	155
4.9.	Direcțiile de propagare ale fisurilor pentru modul I de rupere: 0° (a), 45° (b) și 90° (c)	156
4.10.	Direcțiile de propagare ale fisurilor pentru modul II de rupere: 0° (a), 45° (b) și 90° (c)	157
4.11.	Planele de rupere ale epruvetelor SENB pentru modul I de încărcare	157

4.12.	Planele de rupere ale epruvetelor SENB pentru modul II de încărcare	158
4.13.	Variația raportului K_{IIC}/K_{IC} (tenacitatea la rupere în modul II și modul I) funcție de parametrii de rupere investigați	160
4.14.	Diagrama de proiectare pentru materialul PLA. Tenacitatea la rupere în modul I funcție de rezistența la tracțiune. Sunt ilustrate liniile de proiectare pentru M_2 (linie continuă) și M_3 (linie punctată)	162
Capitolul 5 – Comportamentul la impact		
5.1.	Forma și parametrii geometrici ai epruvetelor de impact	166
5.2.	Epruvetele printate 3D utilizate pentru testele de impact: imagine de ansamblu (a) și procesul de fabricație (b)	166
5.3.	Configurația experimentală: aparat de testare Ceast Fractovis Plus (a) și epruveta testată (b)	167
5.4.	Curbele forță-deplasare la solicitarea de impact simplu pentru tipurile de impactor H10 (a), H20 (b) și TC (c)	172
5.5.	Curbele viteză-timp la solicitarea de impact simplu pentru tipurile de impactor H10 (a), H20 (b) și TC (c)	175
5.6.	Comparație a curbelor forță-deplasare (a, b) și viteză-timp (c, d) la solicitarea de impact simplu. Efectul formei impactorului	176
5.7.	Curbele forță-deplasare la solicitarea de impact multiplu pentru tipurile de impactor H10 (a), H20 (b) și TC (c)	178
5.8.	Curbele viteză-timp la solicitarea de impact multiplu pentru tipurile de impactor H10 (a), H20 (b) și TC (c)	179
5.9.	Imaginea laterală (a) și frontală (b) a unei epruvete din PLA supuse unei inspecții radiografice	180
5.10.	Imagini radiografice ale epruvetelor testate funcție de tipul impactorului	181
Capitolul 6 – Comportamentul la oboseală		
6.1.	Epruvetele printate 3D utilizate pentru testele de oboseală: imagine de ansamblu (a) și structura internă (b)	184
6.2.	Configurația experimentală: mașina universală Instron 8501 de 100 kN (a), fixarea epruvetei în dispozitivul mașinii de testare (b) și epruveta testată (c)	185
6.3.	Curbele tensiune-deformație la compresiune cvasi-statică	188
6.4.	Variația forță-număr de cicluri pentru diferite niveluri de încărcare	189
6.5.	Variația deplasare-număr de cicluri pentru diferite niveluri de încărcare	189
6.6.	Variația deformației la rupere cu numărul de cicluri pentru diferite niveluri de încărcare	190
6.7.	Curba Wöhler pentru epruvetele din PLA printate prin tehnologia FDM	191

Listă tabele

Tabel	Denumire	Pagina
Capitolul 1 – Introducere		
1.1.	Aplicații ale tehnologiei FDM	48
Capitolul 2 – Comportamentul la tracțiune		
2.1.	Specificațiile tehnice ale filamentului PLA	55
2.2.	Parametrii de proces utilizați în procesul de fabricație a epruvetelor	57
2.3.	Proprietățile la tracțiune ale filamentului din PLA	65
2.4.	Efectul modelului de umplere și densității de umplere asupra principalelor proprietăți la tracțiune ale epruvetelor din PLA printate prin FDM	67
2.5.	Efectul orientării printării asupra principalelor proprietăți la tracțiune ale epruvetelor din PLA printate prin FDM	74
2.6.	Efectul grosimii stratului asupra principalelor proprietăți la tracțiune ale epruvetelor din PLA printate prin FDM	77
2.7.	Efectul vitezei de printare asupra principalelor proprietăți la tracțiune ale epruvetelor din PLA printate prin FDM	79
2.8.	Efectul temperaturii duzei asupra principalelor proprietăți la tracțiune ale epruvetelor din PLA printate prin FDM	82
2.9.	Efectul numărului de straturi exterioare asupra principalelor proprietăți la tracțiune ale epruvetelor din PLA printate prin FDM	84
2.10.	Principalele proprietăți la tracțiune ale epruvetelor optimizate din PLA printate prin FDM pentru densitățile de umplere de 70% și 100%	88
Capitolul 3 – Comportamentul la compresiune		
3.1.	Parametrii utilizați în procesul de fabricație a epruvetelor de compresiune	96
3.2.	Proprietățile fizice și erorile asociate acestora. Efectul densității de umplere	103
3.3.	Principalele proprietăți mecanice. Efectul densității de umplere	106
3.4.	Modelele de umplere utilizate în programul experimental	115
3.5.	Proprietățile fizice și erorile asociate acestora. Efectul modelului de umplere	117
3.6.	Principalele proprietăți mecanice. Efectul modelului de umplere	123
3.7.	Matricea Decizională	132
3.8.	Evaluarea modelelor de umplere pe baza TPE	133
3.9.	Proprietățile fizice și erorile asociate acestora. Efectul formei epruvetelor	135
3.10.	Principalele proprietăți mecanice. Efectul formei epruvetelor	140

Capitolul 4 – Comportamentul rupere fragilă

4.1. Parametrii de proces ai celor două imprimante pentru fabricarea epruvetelor	151
4.2. Rezultatele tenacității la rupere pentru Modul I. Influența direcției de printare	155
4.3. Rezultatele tenacității la rupere pentru Modul II. Influența direcției de printare	156
4.4. Rezultatele medii ale tenacității la rupere pentru modul I de încărcare	159
4.5. Rezultatele medii ale tenacității la rupere pentru modul II de încărcare	159

Capitolul 5 – Comportamentul la impact

5.1. Caracteristicile impactorilor utilizați în programul experimental	168
5.2. Proprietățile fizice și erorile acestora privind epruvetele testate la impact	169
5.3. Epruvetele testate cu impactorul H10 la diferite energii de impact	173
5.4. Epruvetele testate cu impactorul H20 la diferite energii de impact	174
5.5. Epruvetele testate cu impactorul TC la diferite energii de impact	174
5.6. Proprietățile epruvetelor din PLA la impact multiplu	180

Capitolul 6 – Comportamentul la oboseală

6.1. Proprietățile fizice și erorile acestora privind epruvetele testate la oboseală	187
6.2. Principalele proprietăți mecanice la compresiune cvasi-statică	188
6.3. Rezultatele obținute la oboseală în funcție de nivelul de încărcare	190

Listă notații

Abrevieri

3D	Tridimensional
3HC	3D Honeycomb
4D	Patru dimensiuni
ABS	Acrilonitril butadien stiren
ADC	Adaptive Cubic
AFPB	Încărcare în patru puncte asimetrică (Asymmetric Four Point Bending)
AJT	Tehnologia Aerosol Jet (Aerosol Jet Technology)
ALR	Aligned Rectilinear
AM	Fabricație aditivă (Additive Manufacturing)
ARH	Archimedean Chords
ASTM	American Society for Testing Materials
BT	Bluetooth
CAD	Proiectare asistată de computer (Computer-Aided Design)
CE	Cantitate extruder
CF	Fibră de Carbon
CON	Concentric
COVID-19	Coronavirus disease 2019
CUB	Cubic
DD	Diametru duză
DDE	Deformația la densificare a epruvetelor
DED	Depunere directă de energie (Directed Energy Deposition)
DLP	Procesare digitală a luminii (Digital Light Processing)
DU	Densitate de umplere
EA	Energie de absorbție
EBAM	Imprimare cu fascicul de electroni (Electron Beam AM)
EP	Eroare procentuală
EPD	Eroare procentuală dimensională
ERM	Eroare relativă de masă
FDM	Modelare prin depunere fuzionată (Fused Deposition Modeling)
FFF	Fabricare a Filamentului Fuzionat (Fused Filament Fabrication)
FPZ	Zona procesului de rupere (Fracture Process Zone)
GE	Geometrie epruvetă
GPS	Global Positioning System
GR	Grid
GS	Grosime strat
GYR	Gyroid
HBC	Hilbert Curve
HC	Honeycomb
HCF	Oboseală în domeniul durabilităților mari (High Cycle Fatigue)
HIPS	Polistiren de mare impact
HME	Extrudare cu Topitură la Cald (Hot-Melt Extrusion)
HVI	Test de impact de mare viteză (High Velocity Impact)
IoT	Internetul Obiectelor
ISO	International Organization for Standardization

LCD	Liquid-Crystal Display
LCF	Oboseală în domeniul durabilităților mici (Low Cycle Fatigue)
LDW	Sudarea prin depunere cu laser (Laser Deposition Welding)
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LGT	Lightning
LIN	Line
LP	Lungimea platoului
LTE	Long-Term Evolution
LVI	Test de impact cu viteză redusă (Low Velocity Impact)
MCDMA	Analiza Decizională cu Criterii Multiple
MEP	Masa epruvetelor printate
MTS	Criteriul tensiunii tangențiale maxime (Maximum Tangential Stress)
MU	Model de umplere
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NFC	Near-field communication
NSE	Număr straturi exterioare
OCT	Octagram Spiral
OP	Orientare printare
PAE	Performanțele de absorbție a energiei
PC	Policarbonat
PDE	Precizia dimensională a epruvetelor
PEE	Proprietățile elastice ale epruvetelor
PEEK	Polimer de polieteretercetona
PEI	Polieterimidă
PEKK	PolyEtherKetoneKetone
PET	Tereftalat de polietilen
PETG	Polietilen tereftalat glicol
PHA	Polihidroxialcanoati
PLA	Acid polilactic
PMo	Punctajul primit de un model în funcție de mărimea proprietății
PP	Polipropilenă
PP	Precizie poziționare
PPo _{MU}	Punctajul ponderat asociat unui model de umplere
PPr	Punctajul atribuit unei proprietăți în funcție de importanță
PRE	Proprietățile de rezistență ale epruvetelor
PVA	Alcool polivinilic
REC	Rectilinear
RS	Rezoluție strat
SAE	Societatea Inginerilor Auto
SEA	Absorbția specifică de energie (Specific Energy Absorbtion)
SENB	Epruvete cu o creștătură laterală (Single Edge Notched Bend)
SFPB	Încărcare în patru puncte simetrică (Symmetric Four Point Bending)
SIS	Straturi inferioare solide
SLA	Stereolitografie (Stereolithography)
SLM	Topire selectivă cu laser (Selective Laser Melting)
SLS	Sinterizare selectivă cu laser (Selective Laser Sintering)
SSS	Straturi superioare solide
STR	Stars
SUC	Support Cubic
TC	Impactor cu cap trunchi de con
TD	Temperatură duză

18 Listă notații

TEA	Absorbția totală de energie (Total Energy Absorbtion)
TP	Temperatură pat
TPE	Elastomer termoplastic
TPE	Timp printare epruvete
TR	Triangular
UAV	Vehicul aerian fără pilot
VD	Viteză duză
VP	Viteză de printare
VPP	Fotopolimerizare în cuvă (Vat Photopolymerization)
WAAM	Fabricație aditivă cu arc de sârmă (Wire Arc Additive Manufacturing)
WLAN	Wireless Local Area Networks

Litere latine

1_M	Primul maxim local
1_m	Primul minim local
3D	Tridimensional
3HC	3D Honeycomb
4D	Patru dimensiuni
A	Regiunea liniar-elastică
a	Lungime fisurată
B	Regiunea de platou
b1, b2	Lățime epruvetă
C	Regiunea de densificare
E	Modul la compresiune
E_{ff}	Eficiența energiei de absorbție
$E_{ff,d}$	Eficiența energetică la densificare
E_i	Energie de impact
F	Forță
F_{max}	Forța maximă
G_f	Energie de rupere
h	Înălțime epruvetă
H10	Impactor cu cap emisferic $\varnothing 10$
H20	Impactor cu cap emisferic $\varnothing 20$
k	Nivelul de încărcare
K_{IC}	Tenacitatea la rupere în modul I
K_{IIC}	Tenacitatea la rupere în modul II
l_0	Lungime inițială
m_m	Masa măsurată
m_t	Masa teoretică
N_i	Numărul de cicluri până la rupere
R	Coeficient de asimetrie a ciclului
R^2	Coeficient de determinare
t_p	Timp de printare
V_N	Valoare nominală
V_R	Valoare reală
W	Înălțime probă

Litere grecești

δ	Lungire/Deplasare
$\Delta\varepsilon$	Amplitudinea deformației
δ_r	Deplasarea la rupere

$\Delta\sigma$	Amplitudinea tensiunii
ε	Deformație specifică*
ε_0	Deformație zero
ε_c	Deformație la compresiune
ε_d	Deformație la densificare
ε_m	Deformația corespunzătoare rezistenței la tracțiune/compresiune
ε_{m1}	Deformația primului minim local
ε_{M1}	Deformația primului maxim local
ε_r	Variația deformației la rupere
ε_{tb}	Deformația corespunzătoare tensiunii la rupere
ε_v	Deformația corespunzătoare tensiunii la vârf
σ	Tensiune
σ_b	Tensiune la rupere
σ_c	Rezistență la compresiune / Tensiunea de curgere
σ_d	Tensiune la densificare
σ_m	Rezistență la tracțiune
σ_{M1}	Tensiunea primului maxim local
σ_{m1}	Tensiunea primului minim local
σ_{pl}	Tensiune de platou
σ_v	Tensiune de vârf
$\sigma_{20\%}, \sigma_{40\%}$	Media aritmetică a tensiunilor corespunzătoare unor deformații la compresiune de 20% și 40%

*Atât în text, cât și în figuri/tabele se va folosi întotdeauna termenul simplu "deformație", făcându-se referire la deformația specifică.

1. INTRODUCERE

1.1. Noțiuni generale

În producerea oricărui obiect fizic, procesele de fabricație joacă, întotdeauna, un rol crucial. Tehnicile de fabricație își au originile încă din cele mai vechi timpuri, când strămoșii noștri foloseau pietrele pentru a pregăti uneltele de care aveau nevoie. În zilele noastre există diferite metode de fabricație, cum ar fi turnarea, prelucrarea, formarea, îmbinarea, fabricația aditivă (AM – Additive Manufacturing), etc. Dintre diferitele tehnici existente, procesul AM a câștigat multă popularitate în ultimele două decenii și este una dintre cele mai revoluționare tehnici de fabricație.

Fabricarea aditivă este procesul de creare a unui obiect prin construirea acestuia strat cu strat. Este opusul producției subtractive, în care un obiect este creat prin tăierea unui bloc solid de material până când produsul final este complet.

Din punct de vedere tehnic, fabricarea aditivă se poate referi la orice proces în care un produs este creat prin construirea a ceva, cum ar fi turnarea, dar de obicei se referă la imprimarea 3D.

Fabricarea aditivă a fost folosită pentru prima dată pentru a dezvolta prototipuri în anii 1980 - aceste obiecte nu erau de obicei funcționale. Acest proces a fost cunoscut sub denumirea de prototipare rapidă, deoarece permitea oamenilor să creeze rapid un model la scară al obiectului final, fără procesul tipic de configurare și fără costurile implicate în crearea unui prototip. Pe măsură ce fabricarea aditivă s-a îmbunătățit, utilizările sale s-au extins la scule rapide, care au fost folosite pentru a crea matrițe pentru produsele finale. La începutul anilor 2000, fabricarea aditivă era folosită pentru a crea produse funcționale. Mai recent, companii precum Boeing și General Electric au început să folosească AM ca parte integrantă a proceselor lor de afaceri.

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

Figura 1.1 prezintă pașii implicați în procesul AM pentru a transforma elementul din lumea digitală în obiectul din lumea reală.

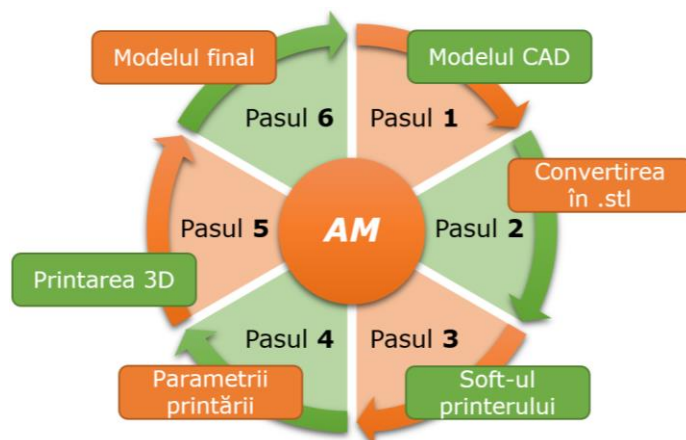


Fig. 1.1. Schema reprezentativă a procesului de fabricație aditivă

Printarea 3D se aplică pe scară largă diferitelor materiale, cum ar fi ceramică, metale, polimeri, compozite, etc. [1]. În zilele noastre sunt cunoscute mai multe tehnici pentru procesarea acestei mari varietăți de materiale, cum ar fi: topirea selectivă cu laser (SLM - Selective Laser Melting), sinterizarea selectivă cu laser (SLS - Selective Laser Sintering), depunerea directă de energie (DED - Directed Energy Deposition) și modelarea prin depunere fuzionată (FDM - Fused Deposition Modeling) [4]. Principiul de printare aplicat în aceste tehnici variază de la tip la tip. În SLM și SLS, pulberea metalică este topită sau sinterizată selectiv folosind un laser de mare putere [5]; pe de altă parte, în FDM, polimerul este alimentat ca un filament, care este extrudat prin duza încălzită, urmat de o depunere strat cu strat [6].

Pentru materialele metalice, recent, fabricația aditivă cu arc de sârmă (WAAM - Wire Arc Additive Manufacturing) a câștigat o atenție colosală; procesul WAAM este foarte asemănător cu tehnica FDM pe bază de polimeri, în care firul polimeric este extrudat dintr-o duză încălzită. În afară de extruderul încălzit, în WAAM, firul metalic este topit cu ajutorul unui fascicul laser care este direcționat cu mare precizie [7].

În ceea ce privește printarea polimerilor, alte tehnici sunt fotopolimerizarea în cuvă (VPP - Vat Photopolymerization). În această metodă, folosim un polimer lichid sau rășină sensibilă la lumină [8]. Stereolitografia (SLA - Stereolithography) este una dintre metodele de fotopolimerizare în cuvă utilizate în mod obișnuit, în care un fascicul de lumină coerent (în general din spectrul ultraviolet) este utilizat pentru fotopolimerizare. Datorită acestui fapt, rășina se solidifică strat cu strat pentru fabricarea produsului final [8]. O altă tehnică utilizată este FDM, care este o metodă de extrudare a materialelor de fabricație aditivă în care materialele sunt extrudate printr-o duză și unite împreună pentru a crea obiecte 3D. În special, procesul FDM „standard” se distinge de alte tehnici de extrudare a materialelor, cum ar fi imprimarea 3D a betonului și a metalelor, prin utilizarea materialelor termoplastice ca materie primă, de obicei sub formă de filamente sau pelete. Prin urmare, o imprimantă 3D FDM tipică ia un filament pe bază de polimer și îl forțează să treacă printr-o duză încălzită, care topește materialul și îl depune în straturi pe platforma de construcție. În timp ce încă sunt calde, aceste straturi fuzionează unele cu altele pentru a crea în cele din urmă o parte tridimensională – produsul finit.

Așadar, AM permite crearea de piese personalizate cu geometrii complexe și pierderi reduse. Unul dintre avantajele tehnologiei menționate este constituit din faptul că modificările de proiectare pot fi făcute rapid și eficient, în timpul procesului de fabricație. Spre deosebire de tehnicile tradiționale de fabricație substractive, lipsa risipei de material oferă o reducere a costurilor pentru piesele de mare valoare. De asemenea, s-a dovedit că AM reduce timpii de livrare.

În plus, piesele care anterior necesitau asamblarea din mai multe componente, pot fi fabricate ca un singur obiect care poate oferi rezistență și durabilitate îmbunătățite. AM poate fi, de asemenea, utilizat pentru a fabrica obiecte unice sau piese de schimb în cazul în care piesele originale nu mai sunt produse.

1.2. Tehnologii de fabricație aditivă

Fabricația aditivă, cunoscută și sub denumirea de „imprimare 3D” sau „prototipare rapidă”, este o metodă de fabricație actuală (comparativ cu metodele clasice de fabricație) în care straturi de material sunt depuse la un moment dat (succesiv) până la obținerea unui produs finit. În funcție de fenomen și materialul (în stare solidă, lichidă sau pulbere) utilizat de echipamentul de imprimare 3D, o parte solidă poate fi realizată folosind procese ca: jet de liant, extrudare, jet de material, energie directă, fotopolimerizare cuvă și pulbere, fuziune. În acest subcapitol s-au rezumat câteva cunoștințe referitoare la cele mai utilizate tehnologii de imprimare 3D.

În Figura 1.2. este ilustrată o reprezentare schematizată a celor mai comune tehnologii de fabricație aditivă.

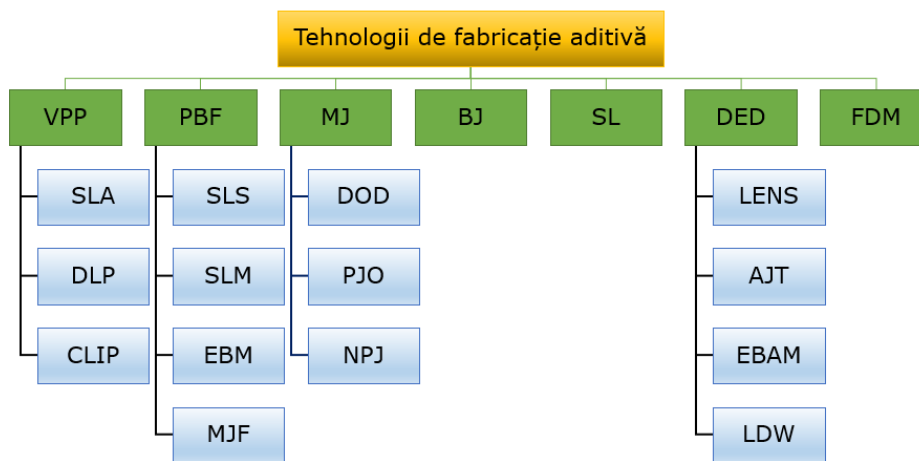


Fig. 1.2. Tehnologii de fabricație aditivă

Posibilitățile de imprimare 3D sunt nelimitate și cuprind numeroase industrii, de la materiale plastice și metale până la materiale organice și alimente. De asemenea, este utilizată o gamă largă de materiale în imprimarea 3D. Fiecare dintre ele corespunde cu atenție cerințelor tehnice ale produsului final și este de obicei specifică unui set restrictiv de tehnologii de fabricare aditivă.

1.2.1. Fotopolimerizarea

Tehnologia de imprimare 3D numită fotopolimerizare cuprinde mai multe procese diferite, care au la bază aceeași strategie: un fotopolimer lichid conținut într-o cuvă (sau rezervor) este încălzit selectiv de o sursă de căldură. Astfel, un obiect fizic 3D este construit, strat cu strat, până la finalizare.

Există mai multe tipuri de dispozitive de încălzire, pe lângă cea mai veche tehnică, care se bazează pe lasere. Proiectoarele de procesare digitală a luminii și chiar ecranele LCD (Liquid-Crystal Display) sunt acum o modalitate populară de fotopolimerizare a materialelor, având în vedere costul redus și rezoluția foarte mare. Unul dintre avantajele acestor două tehnici, în comparație cu laserele, este capacitatea lor de a întări simultan un strat complet de rășină, în timp ce laserul trebuie să ilumineze progresiv întreaga suprafață prin desenarea acesteia.

Cele mai populare tehnologii de imprimare 3D, cu fotopolimerizare în cuvă, includ următoarele:

- *Stereolitografierea* - este cunoscută și sub numele de SLA, fabricație optică, fotosolidificare sau imprimare cu rășină. În timpul procesului de fabricație, un fascicul concentrat de lumină ultravioletă sau un laser este focalizat pe suprafața unei cuve umplute cu un fotopolimer lichid. Fasciculul sau laserul este focalizat, creând fiecare strat al obiectului 3D dorit prin reticularea sau degradarea unui polimer.
- *Procesarea digitală a luminii (Digital Light Processing - DLP)* - pentru acest proces de imprimare 3D, un ecran de proiector digital este folosit pentru a proiecta o singură imagine a fiecărui strat pe întreaga platformă simultan. Deoarece proiectorul este un ecran digital, imaginea fiecărui strat este compusă din pixeli pătrați, rezultând un strat format din cărămizi dreptunghiulare mici, numite voxel. DLP poate obține timpi de imprimare mai rapizi pentru unele părți, deoarece fiecare strat întreg este expus dintr-o dată, mai degrabă decât trasat cu un laser.
- *Producția continuă de interfață lichidă (Continuous Liquid Interface Production - CLIP)* - tehnica de fotopolimerizare CLIP utilizează un rezervor de rășină ca material de bază. O parte din fundul cuvei este transparentă la lumina ultravioletă și, prin urmare, se numește fereastră. Un fascicul de lumină ultravioletă strălucește prin fereastră, luminând secțiunea transversală precisă a obiectului. Lumina face ca rășina să se solidifice (fotopolimerizare). Obiectul se ridică suficient de lent pentru a permite rășinii să curgă sub și să mențină contactul cu partea de jos a obiectului. O membrană permeabilă la oxigen se află sub rășină, ceea ce creează o zonă moartă. Această interfață lichidă persistentă împiedică atașarea rășinii de fereastră, ceea ce înseamnă că fotopolimerizarea este inhibată între fereastră și polimerizator. Spre deosebire de SLA standard, procesul de imprimare 3D este continuu și pretinde a fi de până la 100 de ori mai rapid decât metodele comerciale de imprimare 3D.

În Figura 1.3 este prezentat procesul de bază al tehnologiei de fotopolimerizare.

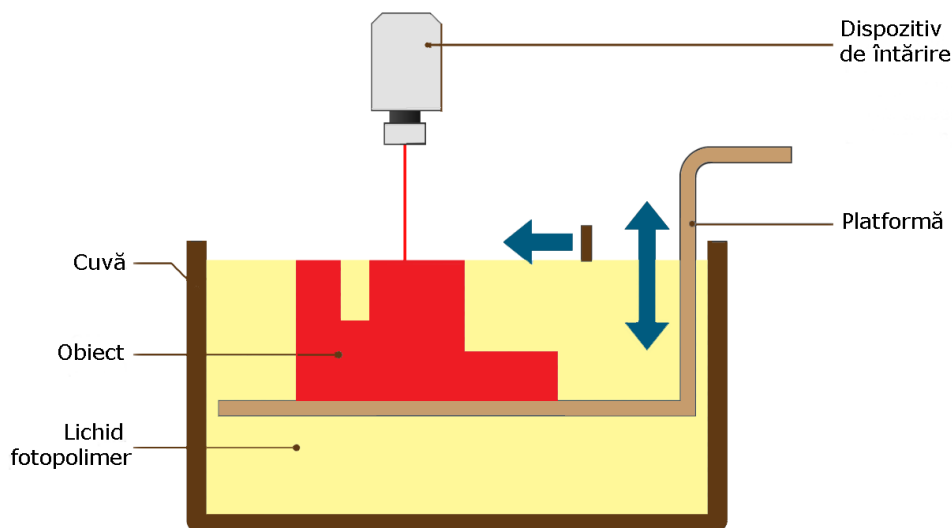


Fig. 1.3. Procesul de bază al tehnologiei de printare prin fotopolimerizare

Două abordări diferite concurează și în cadrul tehnicii de imprimare 3D prin fotopolimerizare și ambele construiesc piesa la interfața dintre ultimul strat și suprafața rezervorului de rășină. Abordarea *de sus în jos* constă în plasarea sursei de căldură sub cuvă. Platforma de imprimare 3D este apoi ridicată progresiv în aer, iar partea finală este construită cu susul în jos. A doua tehnică numită *de jos în sus*, constă în plasarea sursei de căldură deasupra cuvei. Prin urmare, platforma de imprimare 3D este scufundată progresiv în cuvă.

Fotopolimerizarea este aplicată cu succes și în cazul modelării medicale, ceea ce permite crearea unor modele 3D precise ale diferitelor regiuni anatomice ale unui pacient, pe baza datelor din scanările computerizate. Rezoluția ridicată a acestei tehnici o face, de asemenea, ideală pentru toate tipurile de prototipuri, precum și pentru producția de masă. Procesele de polimerizare în cuvă sunt excelente pentru a produce piese cu detalii fine și un calitate bună a suprafeței. Acest lucru le face ideale pentru bijuterii, piese turnate și multe aplicații stomatologice și medicale. Dezvoltarea materialelor a permis, de asemenea, tipărirea matritelor de injecție cu tiraje reduse. Principalele limitări pentru fotopolimerizare sunt dimensiunea redusă a cuvei și rezistența pieselor.

Rășinile pentru fotopolimerizare sunt disponibile în diferite culori și prezintă proprietăți fizice diferite, fiecare corespunzând unei utilizări specifice. Gama de rășini include rășină rezistentă, rășină cu reziduuri reduse (pentru turnare), rășină transparentă și rășină poliuretanică flexibilă.

1.2.2. Fuziunea în pat de pulbere

Tehnologia de printare 3D, denumită Fuziune în Pat de Pulbere (Powder Bed Fusion - PBF) generează produse cu precizie. Această tehnică de imprimare permite fabricarea unei game vaste de produse geometrice complexe, folosind o sursă de căldură, în principal laser sau fascicule de electroni, pentru a fuziona particulele de pulbere strat cu strat, formând astfel o parte solidă. Libertatea de printare este

substanțială, având în vedere că PBF prezintă mai multe tehnologii și materiale viabile.

În Figura 1.4 este prezentat procesul de bază al tehnologiei de printare prin fuziune în pat de pulbere.

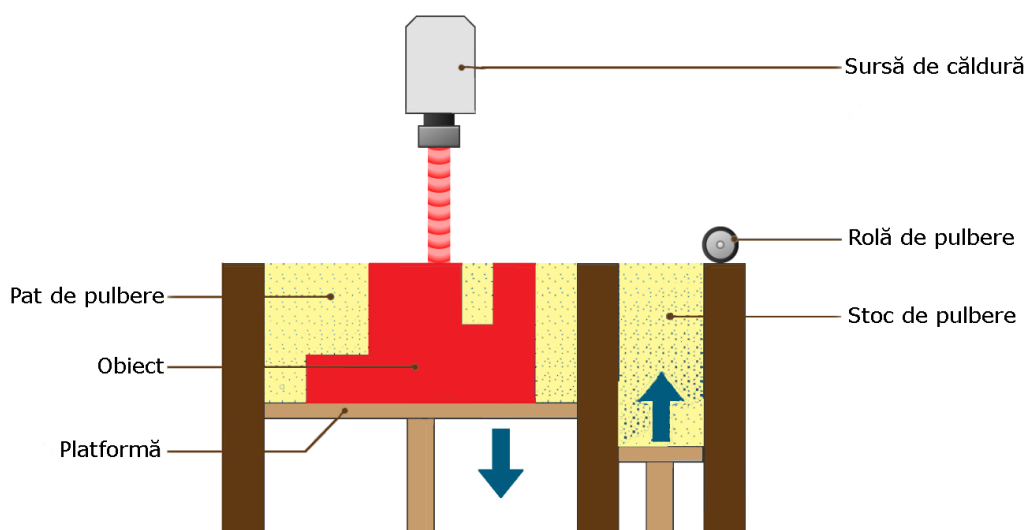


Fig. 1.4. Procesul de bază al tehnologiei de printare prin fuziune în pat de pulbere

Câteva dintre metodele de fuziune pe pat de pulbere sunt:

- *Sinterizarea selectivă cu laser (SLS)* - a apărut la sfârșitul anilor 1980 la Universitatea din Texas din Austin. De-a lungul anilor, această tehnologie a cunoscut progrese remarcabile. Practic, procesul folosește lasere pentru a sinteriza materialul strat cu strat, pentru a crea o structură solidă. Produsul final, învelit în pulbere liberă, este apoi curățat cu perii și aer sub presiune. Principalele materiale utilizate în procesul de imprimare SLS includ poliamidă, alumidă și materiale asemănătoare cauciucului.
- *Topirea selectivă cu laser (SLM) numită și sinterizarea cu laser directă a metalelor (Direct Metal Laser Sintering - DMLS)* - același principiu tehnic este utilizat pentru producerea pieselor prin SLM și DMLS, și este utilizat exclusiv pentru a produce piese metalice. SLM realizează o topire completă a pulberii, astfel încât metalele monocomponente, cum ar fi aluminiul, pot fi folosite pentru a crea piese de schimb ușoare și puternice, precum și prototipuri. DMLS sinterizează pulberile și este limitat la aliaje, inclusiv aliaje pe bază de titan. Aceste metode necesită suport suplimentar pentru a compensa solicitarea reziduală mare și pentru a limita apariția distorsiunii. Aplicațiile includ industria de bijuterii și dentară, piese de schimb și prototipuri.
- *Topirea selectivă cu fascicul de electroni (Electron Beam Melting - EBM)* - realizează fuziunea prin utilizarea unui fascicul de electroni de înaltă energie și produce mai puține tensiuni reziduale, rezultând mai

puține deformări. Utilizează mai puțină energie și poate produce straturi mai rapid decât SLS. Această metodă este cea mai utilă în industriile de mare valoare, cum ar fi industria aerospațială și de apărare, sporturile cu motor și protezarea medicală.

- *Fuziunea Multi Jet (Multi Jet Fusion - MJF)* - diferă de metodele menționate mai sus prin faptul că o matrice cu jet de cerneală este utilizată pentru a aplica agenți de fuziune și de detaliere, care sunt apoi fuzionați prin încălzirea elementelor într-un strat solid. Nu este implicat nici un laser. Agenții de detaliere sunt aruncați în jurul conturilor pentru a îmbunătăți rezoluția pieselor, deschizând astfel posibilitatea producției de obiecte realiste.

1.2.3. Procesul de fabricație cu jet de material

Tehnica de imprimare 3D, bazată pe jet de material (Material Jetting – MJ) este adesea comparată cu procesul standard de jet de cerneală 2D. Utilizarea de fotopolimeri, metale sau ceară care se solidifică atunci când sunt expuse la lumină sau căldură (într-un mod similar cu stereolitografia) asigură că obiectele fizice sunt construite câte un strat. Procesul de fabricație cu jet de material permite imprimarea 3D a diferitelor materiale în cadrul aceleiași piese.

Jetul de material distribuie un fotopolimer din sute de duze mici ale unui cap de imprimare pentru a construi o parte strat cu strat. Acest lucru permite operațiunilor MJ să depună materialul de construcție într-un mod rapid, pe linie, ceea ce poate fi comparat cu alte tehnologii de depunere punctuală care urmează o cale pentru a completa aria secțiunii transversale a unui strat, numită și felie. Pe măsură ce picăturile sunt depuse pe platforma de construcție, acestea sunt direct întărite și solidificate folosind lumina ultravioletă UV (Ultraviolet). Procesele MJ necesită suport, care este adesea imprimat 3D simultan, în timpul construcției, dintr-un material solubil. Materialul suport este apoi îndepărtat în timpul etapei de post-procesare.

Procesul de bază al MJ este ilustrat în Figura 1.5.

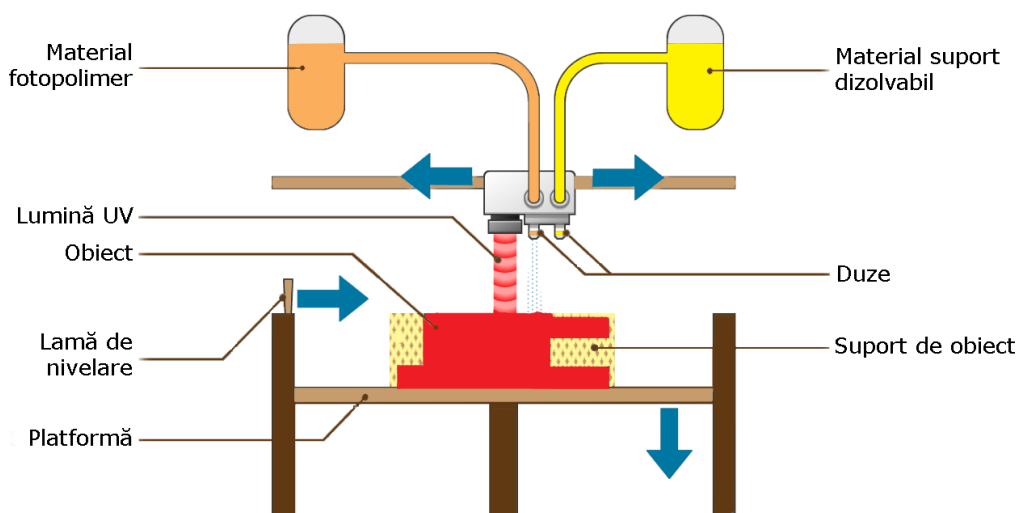


Fig. 1.5. Procesul de bază al tehnologiei de printare MJ

Mai multe tehnici alcătuiesc termenul de MJ, cele mai populare fiind:

- *Drop On Demand (DOD)* - imprimantele cu jet de material DOD au două jeturi de imprimare: unul pentru depozitarea materialului de construcție și altul pentru materialul suport. La fel ca toate mașinile de producție aditivă, imprimantele 3D DOD urmează un traseu predeterminat și depun material într-un mod punctual pentru a construi aria secțiunii transversale a unei componente. Tehnologia DOD este de obicei utilizată pentru a produce modele pentru aplicații de turnare cu ceară și fabricare de matrițe, ceea ce o face o tehnică indirectă de imprimare 3D.
- *PolyJet by Objet (PJO)* – în cazul acestei tehnologii materialele fotopolimer sunt aruncate în straturi ultra-subțiri pe o tavă de construcție într-un mod similar în comparație cu imprimarea documentelor cu jet de cerneală. Fiecare strat de fotopolimer este întărit de lumina UV imediat după ce a fost depus cu jet. Repetarea etapelor de jet și întărire, strat după strat, produce modele complet întărite care pot fi manipulate și utilizate imediat. Materialul suport, asemănător gelului, care este special conceput pentru a susține geometrii complexe, poate fi îndepărtat cu ușurință manual sau prin jet de apă.
- *NanoParticle Jetting (NPJ)* – această tehnologie de jet de material utilizează un lichid care conține nanoparticule de construcție sau nanoparticule de suport, care este încărcat în imprimantă sub formă de cartuș și depus pe tava de construcție în straturi de picături extrem de subțiri. Temperaturile ridicate din interiorul anvelopei de construcție fac ca lichidul să se evapore, lăsând în urmă părți fabricate din materialul de construcție. Această tehnică este potrivită pentru metale și ceramică.

Tehnologia de imprimare 3D cu jet de material este o alegere excelentă pentru prototipuri realiste, oferind un nivel excelent al detaliilor, precizie ridicată și finisare netedă a suprafeței. Jetul de material permite imprimarea un design în mai multe culori și cu un număr mare de materiale dintr-o singură imprimare. Pentru a desemna un material sau o culoare diferită în anumite zone ale piesei, modelul trebuie exportat ca fișiere STL separate. Când se amestecă mai multe culori sau proprietăți ale materialului, pentru a crea un material digital, designul trebuie exportat ca fișier OBJ sau VRML, deoarece aceste formate permit desemnarea proprietăților speciale (cum ar fi textura sau culoarea completă).

Principalele dezavantaje ale tipăririi cu tehnologii de jet de material sunt costul ridicat și faptul că fotopolimerii activați cu UV își pierd proprietățile mecanice în timp și pot deveni fragili.

1.2.4. Procesul de fabricație cu jet de liant

Tehnica de imprimare 3D prin jet de liant (Binder Jetting – BJ) constă în depunerea unui agent adeziv liant pe straturi subțiri de material sub formă de pulbere. Materialele sub formă de pulbere sunt fie pe bază de ceramică (de exemplu, sticlă sau gips), fie metal (de exemplu, oțel inoxidabil).

28 Introducere

În timpul procesului BJ, capul de imprimare 3D se deplasează peste platforma de construcție depunând picături de liant, imprimând fiecare strat într-un mod similar cu imprimantele 2D care imprimă cerneală pe hârtie. Când un strat este complet, patul de pulbere se mișcă în jos și un nou strat de pulbere este întins pe zona de construcție. Procesul se repetă strat cu strat până când toate părțile sunt complete. După imprimare, piesele sunt într-o stare nefinisată și necesită o post-procesare suplimentară înainte de a fi gata de utilizare. Adesea se adaugă o substanță infiltrantă pentru a îmbunătăți proprietățile mecanice ale pieselor. Substanța infiltrantă este de obicei un adeziv cianoacrilat (în cazul ceramicii) sau bronzul (în cazul metalelor). O altă strategie este introducerea piesei de prelucrat, în stare nefinisată, în interiorul unui cuptor pentru a realiza o sinterizare a granulelor de materie.

Principiul de printare prin BJ este prezentat în Figura 1.6.

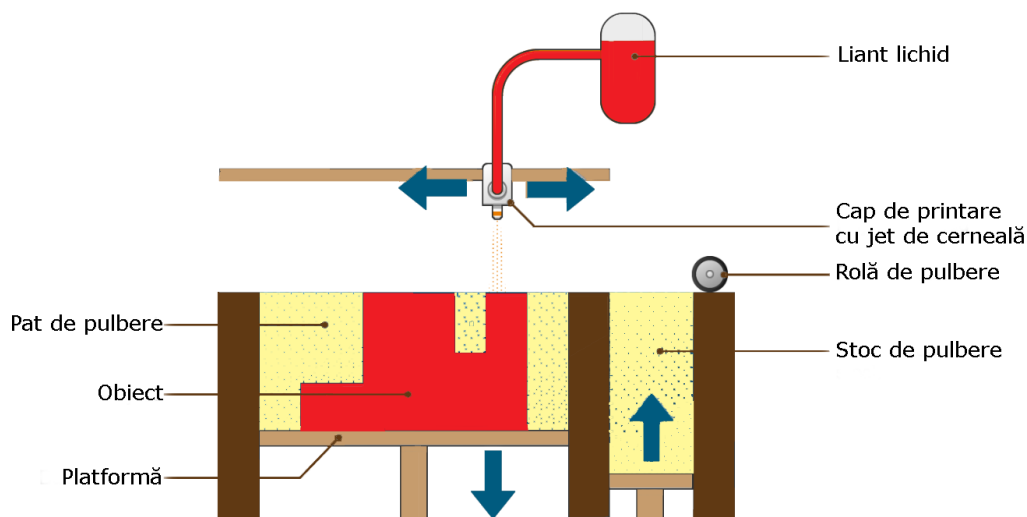


Fig. 1.6. Procesul de bază al tehnologiei de printare BJ

Procesul de imprimare 3D cu jet de liant poate funcționa cu o varietate de materiale, inclusiv metale, nisipuri și ceramică. Unele materiale, cum ar fi nisipul, nu necesită prelucrare suplimentară.

Jetul de liant este excelent pentru aplicații care necesită o estetică și o formă bună, cum ar fi modele arhitecturale, ambalaje, jucării și figurine. În general, nu este potrivit pentru aplicații funcționale din cauza naturii fragile a pieselor.

În comparație cu tehnicile de imprimare 3D PBF, metoda de jet de liant are avantajul de a nu folosi căldură în timpul procesului de construcție, ceea ce previne crearea de tensiuni reziduale în piese.

Piese create prin BJ pe bază de metal au proprietăți mecanice relativ bune datorită procesului de infiltrare. Ele sunt, de asemenea, mai rentabile decât piesele metalice SLM sau DMLS, dar au proprietăți mecanice mai slabe, deoarece granulele materialelor nu se topesc în întregime.

Există diferite tipuri de materiale de liant de imprimare 3D, fiecare potrivit pentru o anumită aplicație. Acestea pot fi enumerate în categorii, inclusiv lianți de furan (pentru aplicații de turnare în nisip), lianți fenolici (pentru matrițe și miezuri de

nisip), lianți de silicați (prietenosi cu mediul, pentru forme și miezuri de nisip) și lianți pe bază de apă (pentru metale).

1.2.5. Procesul de fabricație prin laminare cu foi

Tehnica de fabricație prin laminarea cu foi (Sheet Lamination - SL), cunoscută și sub denumirea de Fabricația de Obiecte Lamine (Laminated Object Manufacturing - LOM) constă în suprapunerea mai multor straturi de material compus din folie pentru a fabrica un obiect. Fiecare folie este tăiată la formă cu un cuțit sau cu laser pentru a se potrivi cu secțiunea transversală a obiectului.

În fabricarea obiectelor laminate pe bază de hârtie, materialul este preluat din hârtie de copiere standard. În primul rând, hârtia trece printr-o imprimantă 2D cu jet de cerneală standard pentru a fi colorată. Toate paginile colorate, necesare pentru construirea piesei finale, sunt apoi stivuite în imprimanta 3D, care le folosește una câte una. Fiecare pagină este astfel scoasă din stivă, lipită de cea anterioară și apoi tăiată cu precizie cu un cuțit. Strat cu strat piesa de prelucrat este finalizată. Hârtia rămasă poate fi îndepărtată manual. Modelele din hârtie pot fi colorate complet, au caracteristici asemănătoare lemnului și pot fi prelucrate și finisate corespunzător. Precizia rezultatului depinde în principal de grosimea materialului stratificat folosit, cum ar fi o foaie de hârtie, de exemplu. O foaie standard de hârtie are o grosime care variază între 50 și 100 de micrometri.

Aplicațiile pentru piesele de fabricație a obiectelor laminate 3D includ studii ergonomice, vizualizare topografică, modele de arhitectură pentru obiecte din hârtie. Cu materiale termoplastice și fibre este posibilă fabricarea directă a componentelor tehnice funcționale ușoare, pentru industria aerospațială și auto, la un cost foarte competitiv.

1.2.6. Procesul de fabricație prin depunere dirijată a energiei

Tehnologia de imprimare prin depunere dirijată de energie (DED) creează piese prin topirea directă a materialelor și depunerea acestora pe piesa de prelucrat, strat cu strat. Această tehnică de fabricație aditivă este utilizată în principal cu pulberi metalice.

Majoritatea imprimantelor DED sunt mașini industriale cu amprente foarte mari care necesită un mediu închis și controlat pentru a funcționa. Prin urmare, depunerea tipică de energie direcționată constă într-o duză montată pe un braț cu mai multe axe, în interiorul unui cadru închis, care depune materialul topit pe suprafața piesei de prelucrat, unde se solidifică. Procesul este similar în principiu cu tehnica de imprimare 3D prin extrudare a materialului, însă cu DED, o duză se poate deplasa în mai multe direcții, cu până la cinci axe diferite, comparativ cu doar trei pentru majoritatea imprimantelor.

Principiul de printare DED este prezentat în Figura 1.7.

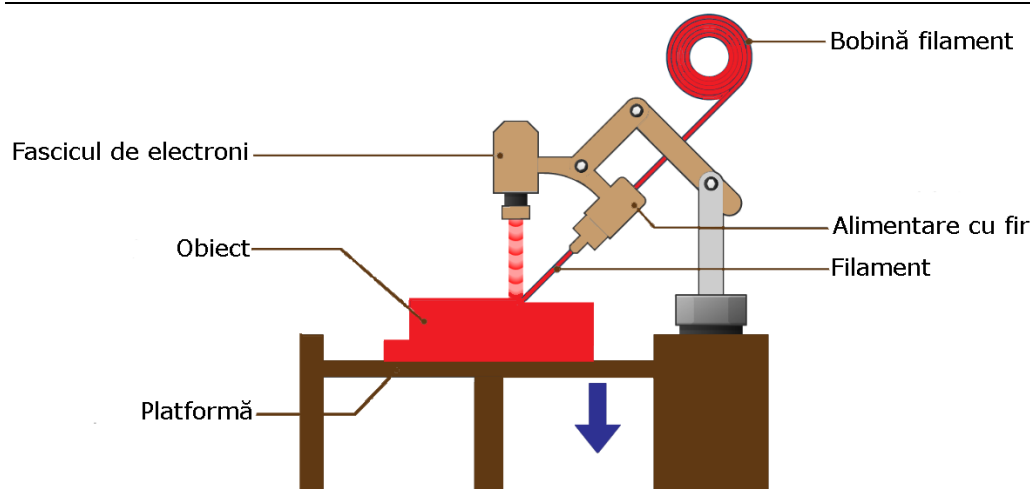


Fig. 1.7. Procesul de bază al tehnologiei de printare prin depunere dirijată a energiei

Termenul de depunere directă a energiei poate cuprinde mai multe tehnologii diferite. Se disting prin felul în care materialul este fuzionat, fiecare fiind potrivit pentru scopuri diferite și specifice. Cele mai populare sunt următoarele:

- *Tehnologia LENS* (Laser Engineered Net Shaping) - Sistemele de fabricație folosesc lasere pentru a construi obiecte strat cu strat direct din pulbere de metale, aliaje, ceramică sau compozite. Procesul LENS trebuie să aibă loc într-o cameră închisă ermetic, care este umplută cu argon, astfel încât nivelul de oxigen și umiditate să rămână foarte scăzut. Acest lucru menține piesa curată și previne oxidarea. Materialul cu pulbere metalică este livrat direct la capul de depunere a materialului. Odată ce un singur strat a fost depus, capul de depunere a materialului trece la următorul strat. Prin depunerea de straturi succesive, întreaga parte este construită. Când este completă, componenta este îndepărtată și poate fi tratată termic, presată izostatic la cald, prelucrată sau finisată în orice mod este necesar.
- *Tehnologia Aerosol Jet* (*Aerosol Jet Technology –AJT*) - oferă un proces scalabil și rentabil pentru a imprima antene funcționale și senzori direct pe componentele de consum și industriale, făcându-le dispozitive inteligente pentru Internetul Obiectelor (IoT). Posibilele antene tipărite includ LTE (Long-Term Evolution), NFC (Near-field communication), GPS (Global Positioning System), Wifi, WLAN (Wireless Local Area Networks) și BT (Bluetooth). Această tehnică este mai apropiată de tehnicile simple de depunere, dar potrivită pentru suprafețe curbe compuse complexe. Sistemele Aerosol Jet sunt potrivite în mod ideal pentru a dezvolta, fabrica, îmbunătăți și repara dispozitive electronice și biologice de înaltă performanță pentru electronice de larg consum, ambalaje de semiconductori, afișaje, produse pentru industria aerospațială/apărare și auto. Tehnologia Aerosol Jet poate funcționa cu o gamă largă de materiale, inclusiv

1.3. FDM – Modelarea prin depunere fuzionată 31

cerneluri metalice conductoare de nanoparticule, paste dielectrice, semiconductori și alte materiale funcționale.

- *Imprimarea cu fascicul de electroni (Electron Beam Additive Manufacturing - EBAM)* - este o tehnologie de fabricație aditivă care produce structuri metalice la scară largă. Pistolul cu fascicul de electroni depune metal, strat cu strat, până când piesa ajunge la o formă aproape netă și este gata pentru prelucrarea finală. Ratele de depunere a materialului variază de la 3 la 9 kg de metal pe oră. Metalele compatibile includ titanul și nichelul. Această tehnică DED poate fi folosită și pentru a repara piesele deteriorate.
- *Sudarea prin depunere cu laser (Laser Deposition Welding - LDW)* – procesul utilizează depunerea de metal printr-o duză de pulbere, care poate fi de până la 10 ori mai rapidă decât tehnologia PBF. În plus, integrarea tehnologiei de fabricație aditivă LDW într-o mașină de frezat cu 5 axe, combină flexibilitatea procesului de depunere a metalului cu laser cu precizia procesului de tăiere și, prin urmare, permite fabricarea aditivă în calitate de frezare. Această combinație face posibilă fabricarea de piese metalice de înaltă precizie pentru diferite dimensiuni.

Metalele pot fi imprimate 3D prin tehnica de fabricație aditivă DED și includ în special aluminiu, cupru, titan, oțel inoxidabil, oțel pentru scule, aliaje de cupru-nichel și mai multe aliaje de oțel. Fiecare subtehnică a secțiunii de depunere de energie direcționată are propriile sale limitări și compatibilități.

1.2.7. Modelarea prin depunere fuzionată

Tehnologia de imprimare prin depunere fuzionată (FDM) folosește un filament continuu dintr-un material termoplastic ca material de bază. Filamentul este alimentat dintr-o bobină, printr-un cap de extruder de imprimantă încălzit în mișcare, adesea abreviat ca un extruder. Materialul topit este forțat să iasă din duza extruderului și este depus mai întâi pe o platformă de imprimare 3D, care poate fi încălzită pentru o aderență suplimentară. Odată ce primul strat este finalizat, extruderul și platforma sunt despărțite într-o singură etapă, iar al doilea strat poate fi apoi depus direct pe piesa de prelucrat în creștere. Capul extruderului este mutat sub controlul computerului. Cel puțin trei axe sunt necesare pentru ca extruderul să se miște. Un strat este depus deasupra unui strat anterior până când fabricarea obiectului este completă.

Întrucât componentele fabricate prin acest procedeu de printare fac obiectul acestei teze, întreg Subcapitolul 1.3 îi este dedicat modelării FDM. Așadar, descrierea sa în detaliu va fi prezentată în cele ce urmează.

1.3. FDM – Modelarea prin depunere fuzionată

1.3.1. Noțiuni generale FDM

Extrudarea materialului este cunoscută sub denumirea de Fabricare a Filamentului Fuzionat (Fused Filament Fabrication - FFF) și este unul dintre cele mai populare procese pentru imprimarea 3D. Termenul Modelare prin Depunere Fuzionată (FDM) a fost inventat de S. Scott Crump la sfârșitul anilor 1980 și a fost comercializat

32 Introducere

în 1990 de compania Stratasys. Odată cu expirarea brevetului acestei tehnologii, există acum o mare comunitate de dezvoltare open-source numită RepRap, precum și variante comerciale și bricolaj, care utilizează acest tip de tehnologie de imprimare 3D. Acest lucru a dus la o scădere măsurabilă a prețurilor. Cu toate acestea, tehnica de extrudare a materialului are limitări de precizie dimensională și este foarte anizotropă.

Acronimele FDM și FFF sunt ambele utilizate în mod obișnuit în literatura academică. După stereolitografie, FDM este a doua cea mai frecvent utilizată tehnică de imprimare 3D [9]. Această tehnică este controlată de un computer, care poate produce piese din materiale poroase prin metoda de fabricație strat cu strat [10]. FDM implică generarea unui design digital folosind un software de proiectare 3D, care este ulterior împărțit în mai multe straturi. Aceste date sunt comunicate imprimantei care reproduce designul strat cu strat până la obținerea modelului complet. Proprietățile mecanice ale pieselor imprimate FDM depind de material, parametrii structurali (adică unghiul raster, densitatea de umplere, orientarea imprimării) și variabilele de fabricație (adică viteza de imprimare, temperatura și viteza de extrudare, timpul depunerii stratului, viteza transversală a duzei și temperatura patului) [11-14]. FDM are anumite avantaje, cum ar fi controlul arhitecturii matricei (formă, dimensiune, ramificare, geometrie, interconectivitate și orientare), producând o structură care poate varia în design și compoziție în funcție de materialul utilizat. Cu toate acestea, se fac multe cercetări pentru a îmbunătăți controlul calității printării [15, 16].

Numărul tot mai mare de noi dezvoltări și aplicații realizate de FDM în ultimii ani demonstrează potențialul mare al acestei tehnologii aditive. În timpul pandemiei de COVID-19 (Coronavirus disease 2019), FDM a fost folosit ca metodă alternativă pentru a produce echipamente de protecție personală, cum ar fi măști de față și ecrane faciale pentru respirator [17-19]. Un număr semnificativ de noi tipuri de materiale concepute pentru FDM au fost dezvoltate între 2020 și 2021, inclusiv noi compozite armate cu fibre cu proprietăți mecanice superioare [20-25], nanocompozite avansate pe bază de polimeri preparate cu adăugarea de nanomateriale de carbon [26-29] și multe alte tipuri de compozite pe bază de polimeri cu proprietăți fizice îmbunătățite [30-33]. Pentru FDM au fost dezvoltate noi materiale pe bază de ceramică realizate din polimer și pulbere ceramică, cum ar fi oxidul de aluminiu (Al_2O_3) [34], hidroxiapatita ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) [35] sau zirconia [36]. În ceea ce privește durabilitatea, au fost dezvoltate recent noi filamente naturale prietenoase cu mediul [37-41]. În plus, adăugarea de componente bioactive pentru funcționalizarea compozitelor biodegradabile, pentru FDM, la temperatură joasă a arătat proprietăți antibacteriene și biocompatibile puternice [42].

În biomedicină, compozitele polilactidice armate cu hidroxipropil-metilceluloză biocompatibile [43] și noi structuri bioinspirate au fost tipărite cu succes prin FDM [35, 44]. Compozitele polimerice acid polilactic (PLA – Polylactic acid)-oțel inoxidabil imprimate 3D au fost fabricate pentru aplicații medicale [45]. Extrudarea multicoloră FDM a fost utilizată ca metodă de imprimare 3D cu costuri reduse pentru modelele anatomice de cancer de prostată [46]. Un model de tibie canină din acrilonitril butadienă (ABS - Acrylonitrile Butadiene Styrene) [47] și proteze dentare complete au fost, de asemenea, fabricate prin FDM [48]. În farmacie, FDM combinat cu Extrudarea cu Topitură la Cald (HME - Hot-Melt Extrusion) și compozițiile de formulare optimizate s-au dovedit recent a fi o opțiune atractivă pentru dezvoltarea

1.3. FDM – Modelarea prin depunere fuzionată 33

de tablete și implanturi farmaceutice, în care sunt necesare modele de eliberare a medicamentelor ajustabile [49-52]. FDM cuplată cu difuzia pasivă s-a dovedit a fi o metodă de încărcare accesibilă pentru filamente, pentru a permite fabricarea de medicamente personalizate în medii clinice [53]. Imprimarea 3D directă cu pulbere a tabletelor pentru a simplifica FDM a fost, de asemenea, explorată recent [54].

Potențialul mare al acestei tehnologii AM a crescut considerabil numărul de aplicații industriale. De exemplu, o pedală de frână pentru autovehicule a fost produsă recent cu filamente de metal-polimer [55]. FDM a fost, de asemenea, propusă ca o tehnologie de construcție viabilă pentru locuirea pe Marte [56] și pentru fabricarea de microelectrozi și sonde multi-electrozi [57]. Camerele de scufundare din polipropilenă (PP) rezistente la șocuri, și care au prețuri accesibile, potrivite pentru scopuri de sinteză sau analitice [58] și substraturi dielectrice PLA pentru antena cu patch cu microbandă [59] au fost, de asemenea, fabricate de FDM.

Multe abordări inovatoare FDM au fost, de asemenea, raportate foarte recent, cum ar fi fabricarea pieselor de polieterimidă poroasă ierarhică (PEI - Polyetherimide) printr-o tehnologie FDM de spumare in-situ [60] și calea de producție care combină FDM și scrierea cu laser pentru fabricarea compozitelor multifuncționale poliamidă/fibră de carbon [61].

De asemenea, este importantă menționarea combinației de imprimare 3D și materiale inteligente, care se numește imprimare în patru dimensiuni (4D) și câștigă multă importanță în producția FDM ca domeniu de pionier în producerea de dispozitive inteligente funcționale [62]. Prin urmare, imprimarea 4D folosind FDM, este o inovație emergentă în AM care cuprinde materiale active în procesul de imprimare pentru a fabrica un obiect 3D care poate îndeplini o funcție activă [63]. Această tehnologie de imprimare 4D bazată pe FDM a deschis noi domenii de aplicare, cum ar fi balamalele activate termic [64], ortezele imprimate 3D [65], termoseturile de înaltă performanță și cu memorie de formă [66] și tehnologiile biomedicale și de inginerie tisulară [67].

În Figura 1.8 este reprezentat procesul de bază al printării prin tehnologia FDM.

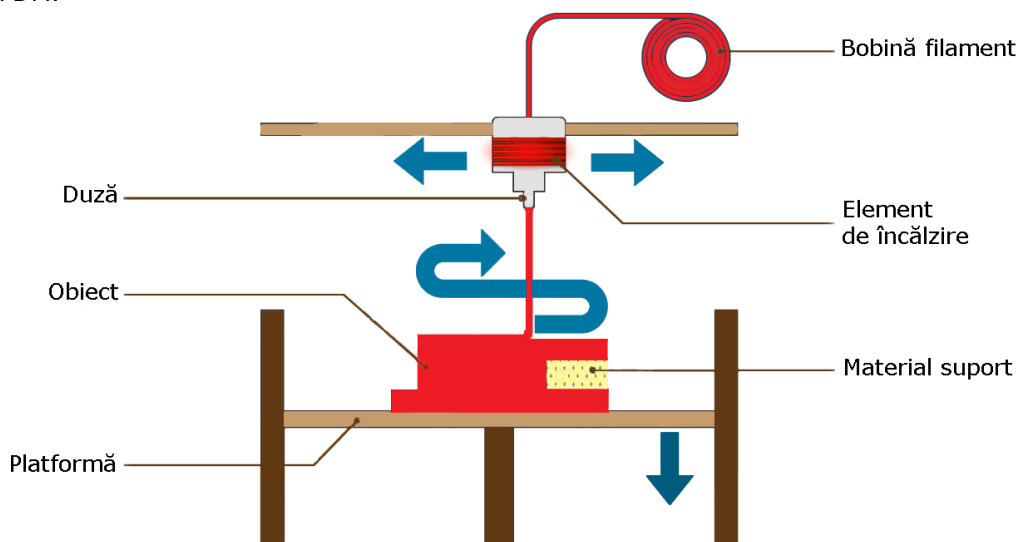


Fig. 1.8. Procesul de bază al printării prin tehnologia FDM

34 Introducere

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

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

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

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

Când imprimanta FDM începe să imprime, materia primă este extrudată ca un filament subțire prin duza încălzită. Se depune în partea de jos a platformei imprimantei, unde se solidifică. Următorul strat care este extrudat fuzionează cu stratul de dedesubt, construind obiectul de jos în sus strat cu strat.

Majoritatea imprimantelor FDM imprimă mai întâi marginile exterioare, apoi marginile interioare și, în sfârșit, interiorul stratului fie ca strat solid, fie ca matrice de umplere.

În unele obiecte / modele, există „extremități” fragile care pot cădea dacă nu li se oferă un anumit sprijin. Imprimantele FDM încorporează un mecanism prin care sunt imprimate structuri de susținere sau suporturi (numite struts) împreună cu obiectul. Acestea sunt ulterior eliminate, odată ce construcția este finalizată. Aceste structuri sunt, de obicei, din același material ca și obiectul. Unele imprimante au un al doilea extruder pentru a depune în mod specific elemente de susținere termoplastice solubile, atunci când este nevoie, pentru a preveni căderea proeminențelor. Aceste elemente pot avea o compoziție diferită de cea a termoplastului utilizat pentru modelul 3D. Ele sunt ulterior dizolvate cu un solvent adecvat.

1.3.2. Parametri de proces

Cei mai investigați parametri de proces din cadrul tehnologiei FDM includ golurile de aer, orientarea printării, temperatura de extrudare, densitatea de umplere, modelul de umplere, grosimea stratului, lățimea rasterului, unghiul rasterului și viteza de printare, așa cum se arată în Figura 1.9; acestea au efecte substanțiale asupra lipirii filamentului (inter-strat și intra-strat) și influențează astfel performanța mecanică a componentelor imprimate [68]. În plus, interacțiunile acestor parametri joacă un rol semnificativ din perspectiva proprietăților mecanice [69, 70].

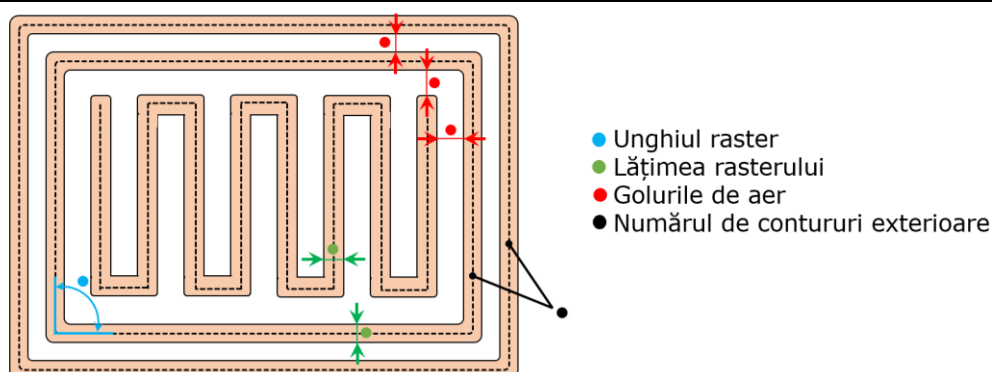


Fig. 1.9. Evidențierea parametrilor de proces

A. Orientarea printării

Orientarea printării (sau orientarea piesei [71], orientarea construcției/stratului [72]) reprezintă modul în care/ce direcție este generată piesa pe platforma de imprimare. De fapt, orientarea construcției poate reprezenta un unghi arbitrar cu orice valoare [73-75], dar în majoritatea studiilor, este privită ca un anumit unghi în raport cu axa X, Y și Z [76, 77]. În general, atunci când probele de testare sunt plasate orizontal, vertical și lateral, orientarea construcției este denumită drept plat, vertical și, respectiv, pe muchie, ceea ce este reprezentat în Figura 1.10. Orientările plat și pe muchie sunt considerate paralele cu platforma de imprimare, în timp ce vertical este de-a lungul direcției normale a platformei de imprimare.

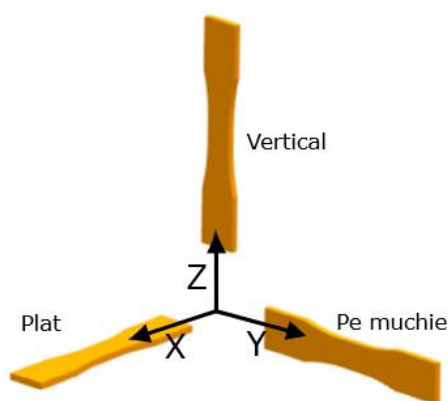


Fig. 1.10. Orientările de printare

Orientarea de printare afectează semnificativ proprietățile mecanice, care de obicei joacă rolul predominant în comparație cu alți parametri [78]. Pentru unghiuri arbitrare, în cazul în care alți parametri, cum ar fi golul de aer și unghiul raster, sunt menținuți constanți, este de preferat orientarea 0° , care arată cele mai mari valori pentru rezistența maximă la tracțiune, la compresiune și la încovoiere.

B. Unghiul raster

Unghiul raster (numit uneori orientare raster [79], orientare strat [80], orientare fibre [81] sau chiar orientare model [82]) reprezintă unghiul direcției filamentului în raport cu axa X (de obicei direcția încărcării) platformei. Unghiurile raster permise pot varia de la -90° la $+90^\circ$, iar valorile utilizate de obicei sunt 0° (axial - Figura 1.11a), 45° (cruce - Figura 1.11b), 90° (transversal - Figura 1.11c) și combinația lor. De exemplu, $45^\circ/45^\circ$ (încrucișat) reprezintă faptul că direcțiile de imprimare raster sunt 45° și 45° alternativ pentru straturi diferite, așa cum se arată în Figura 1.11d.

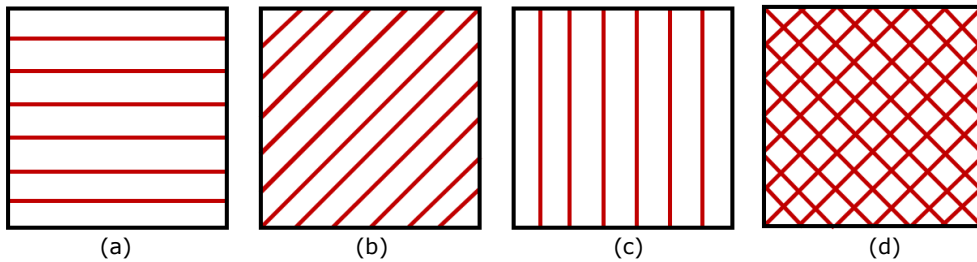


Fig. 1.11. Diferite ungiuri de printare

Poziția relativă a fibrelor în funcție de sarcina aplicată induce epruvetelor testate comportamente mecanice diferite.

C. Grosimea stratului

Grosimea stratului (sau înălțimea stratului [83]) reprezintă grosimea stratului imprimat de vârful duzei, așa cum se arată în Figura 1.12. În general, este mai mică decât diametrul duzei de extrudare (de obicei jumătate), în funcție de material și dimensiunea vârfului. Grosimea stratului este direct legată de numărul de straturi imprimate și, prin urmare, de timpul de imprimare. S-a verificat că se poate obține o precizie mai bună a componentei prin setarea unei grosimi mai mici a stratului.

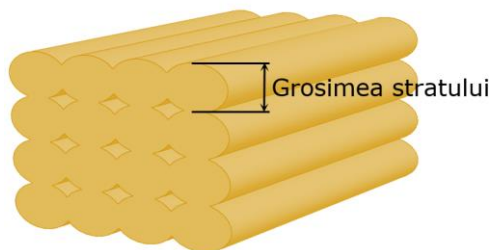


Fig. 1.12. Grosimea stratului de printare

Grosimea stratului are un efect diferit asupra rezistenței mecanice. Pentru o înălțime totală dată, grosimea unui strat are o relație invers proporțională cu numărul de straturi. Cu cât grosimea stratului este mai subțire, cu atât numărul de straturi crește. Acest răspuns va duce la un gradient de temperatură ridicat spre partea inferioară a componentei, care va îmbunătăți difuzia între rasterele adiacente,

contribuind astfel la rezistența portantă. În plus, această tendință este accentuată atunci când este la viteză mică de imprimare, ceea ce oferă o lipire mai bună cu stratul anterior. Pe de altă parte, la o creștere a numărului de straturi se adaugă și o creștere a numărului de cicluri de răcire și încălzire, care, la rândul său, dă naștere la acumularea de tensiuni reziduale. Acest comportament poate duce la distorsiuni și fisuri între straturi, ceea ce va reduce rezistența. Datorită interacțiunii acestor două influențe diferite, în general, se obține o valoare moderată a grosimii ca parametru optim [84].

D. Golurile de aer

Golul de aer reprezintă spațiul dintre două filamente imprimate învecinate pe stratul depus. În cele mai multe cazuri, spațiul de aer reprezintă distanța dintre rastere, adică spațiul de aer raster la raster. Cu toate acestea, în unele cercetări, golul de aer se distinge ca spațiul de aer raster la contur și, respectiv, golul de aer contur la contur. În general, există trei tipuri de spațiu de aer și acestea sunt „zero”, „pozitiv” și „negativ”. Tipul zero este, în general, configurația implicită, care plasează filamentele de printare unul lângă celălalt. Tipul pozitiv are un loc liber între filamente, ceea ce duce la o construcție rapidă, în timp ce tipul negativ înseamnă că două filamente se suprapun parțial, creând o componentă mai densă, așa cum se arată în Figura 1.13.

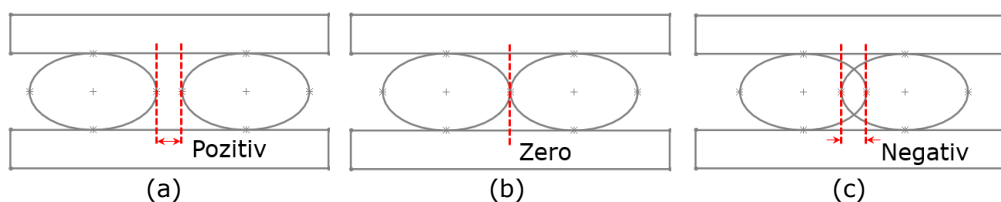


Fig. 1.13. Gol de aer pozitiv (a), zero (b) și negativ (c)

Spațiul de aer determină aria de susținere a încărcării, precum și legătura dintre filamente. Din perspectiva efectului, influența celui dintâi asupra proprietății mecanice este mai evidentă decât cea a celui din urmă. În general, golul de aer pozitiv are ca rezultat o structură cu legături slabe între filamentele adiacente, ceea ce duce la o rezistență mai mică. În schimb, în cazul celui negativ, se obține o structură mai densă, cu o legătură interfacială puternică, îmbunătățind semnificativ rezistența. Spațiul de aer zero poate spori difuzia între rasterele învecinate și poate duce la diminuarea zonei totale de legătură.

E. Lățimea rasterului

Lățimea rasterului reprezintă lățimea filamentelor imprimate sau a drumurilor raster. Lățimea rasterului depinde de dimensiunea vârfului duzei. Unii cercetători disting lățimea conturului de lățimea rasterului [85, 86]. Cu toate acestea, în majoritatea studiilor, lățimea conturului și lățimea rasterului sunt considerate ca fiind același parametru, reprezentat de lățimea drumului [87-89].

O lățime mai mare a rasterului creează o temperatură ridicată în apropierea suprafețelor de îmbinare și o zonă de legare mai mare, ceea ce poate îmbunătăți difuzia și poate duce la formarea de legături mai puternice [83]. Cu toate acestea, un

raster mai mare poate duce, de asemenea, la acumularea de tensiuni de-a lungul lățimii piesei, precum și la deteriorarea conductibilității termice [90]. Pe de altă parte, o lățime mai mică a rasterului va necesita mai puțin timp de producție și material. Per ansamblu, la valoarea intermediară a lățimii rasterului, se poate obține o masă termică mai mare care se răcește lent, ceea ce sporește legătura dintre filamente și astfel îmbunătățește puterea [91].

F. Densitatea de umplere

Regiunea exterioară a părții printate este de obicei solidă, dar zona interioară, cunoscută în general sub numele de umplură, are geometrii și dimensiuni diferite. Densitatea de umplere (sau gradul de umplere [92], raportul de umplere [89], procentul de umplere [93]) se referă la procentul de material imprimat în partea dată, unde 0% este doar înveliș și 100% este un solid. Tehnologia FDM permite controlul densității de umplere prin parametri precum spațiul de aer sau lățimea rasterului.

În Figura 1.14 sunt reprezentate diferite densități de umplere pentru o piesă printată.

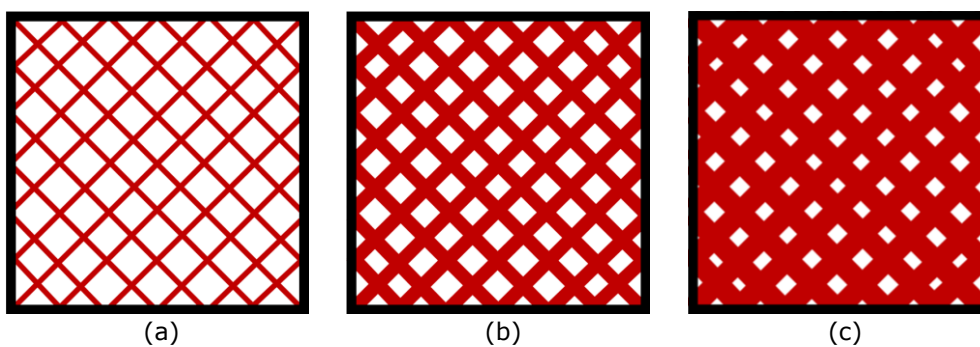


Fig. 1.14. Densitate de umplere 10% (a), 40% (b) și 80% (c)

Masa și rezistența pieselor produse cu FDM depind de densitatea de umplere. Densitatea mai mică necesită mai puțin timp și material de imprimare, economisind astfel costuri și reducând greutatea. Cu toate acestea, mai multe goluri sunt generate în cadrul structurii simultan, ceea ce duce la creșterea porozității. Ca urmare, dimensiunea regiunii legate între filamente scade și la fel și proprietățile mecanice. În schimb, componenta mai densă posedă proprietăți mecanice mai bune, dar necesită mult mai mult timp pentru a fi imprimată. De exemplu, proba construită cu o densitate de umplere de 100% prezintă de obicei rezistență maximă. În general, se recomandă o densitate de umplere cuprinsă între 50% și 98%, deoarece îmbunătățirea rezistenței mecanice este contracarată de timpii mai lungi de fabricație [93].

G. Modelul de umplere

Modelul de umplere (sau modelul de imprimare [94]) reprezintă modul în care filamentele umplu și traversează spațiul intern al piesei imprimate, așa cum se arată în Figura 1.15. Diferitele modele de umplere au, de obicei, aspecte geometrice și complexități diferite, ceea ce va afecta timpul de imprimare și materialul utilizat.

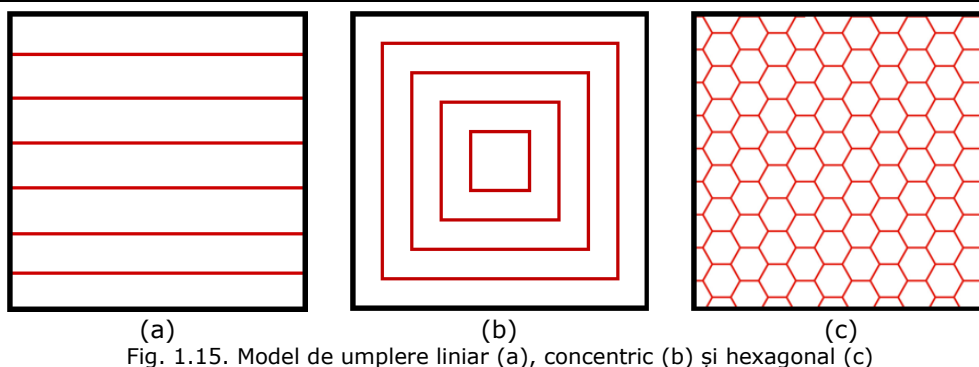


Fig. 1.15. Model de umplere liniar (a), concentric (b) și hexagonal (c)

Modelul de umplere are un efect complex asupra proprietăților mecanice ale pieselor produse prin FDM, datorită unui spectru larg de tipuri. De exemplu, în modelul hexagonal, fiecare strat se așează pe un strat anterior similar, la fel ca zona de legătură. În timp ce se află în modelul rectiliniu, stratul traversează stratul anterior în puncte, care corespund cu zona de legătură dintre fiecare strat. Cu toate acestea, combinația de modele rectilinii într-o umplutură de 100% arată o rezistență la tracțiune mai mare, în comparație cu modelul tip fagure [95]. Prin urmare, aceste rezultate trebuie analizate și explicate cu prudență.

H. Viteza de printare

Viteza de printare (sau viteza de avans [76], viteza de imprimare [96], viteza de umplere [97], viteza de depunere [98]) reprezintă viteza de deplasare a duzei în raport cu platforma de imprimare. În general, cu cât viteza de imprimare este mai mică, cu atât timpul de producție este mai lung și precizia imprimărilor este mai bună. În comparație, cu cât viteza de imprimare este mai mare, cu atât piesele sunt produse mai rapid.

Efectul vitezei de printare asupra performanței mecanice arată o tendință diferită. În general, viteza de printare mai mică oferă o mai bună aderență și interacțiune între straturile învecinate, ceea ce duce la o creștere a rezistenței la tracțiune și la încovoiere. Cu toate acestea, dacă viteza de printare este prea mică, timpul prea lung de răcire inter-strat face ca materialul tocmai depus să se răcească la o temperatură mai scăzută, ceea ce defavorizează fuziunea termoplasticelelor, prin urmare rezistența și ductilitatea sunt afectate [99]. Pe de altă parte, viteza de printare rapidă ar putea îmbunătăți eficiența, dar nu lasă suficient timp pentru ca materialele de extrudare să se plastificeze, iar cantitatea de tensiune reziduală produsă în timpul depunerii crește semnificativ [100], ceea ce duce la proprietăți mecanice slabe. Trebuie subliniat faptul că timpul de producție nu este afectat doar de viteza de printare, ci și de orientarea printării. Timpul de printare scade pe măsură ce viteza de printare crește pentru orientările plat și pe muchie, în timp ce timpul de printare rămâne aproape constant pentru orientarea verticală, cu valori de viteză mare [76].

I. Numărul de straturi exterioare

Numărul de straturi (sau numărul de perimetre [101], numărul de cochilii [102]) se referă la numărul de drumuri închise care sunt depuse de-a lungul marginii piesei. Acesta poate varia de la unu la numărul de filamente extrudate.

În Figura 1.16 este reprezentată aceeași piesă, însă cu numărul de straturi exterioare diferit, și anume 1 (Figura 1.16a), 3 (Figura 1.16b), respectiv 5 contururi (Figura 1.16c).

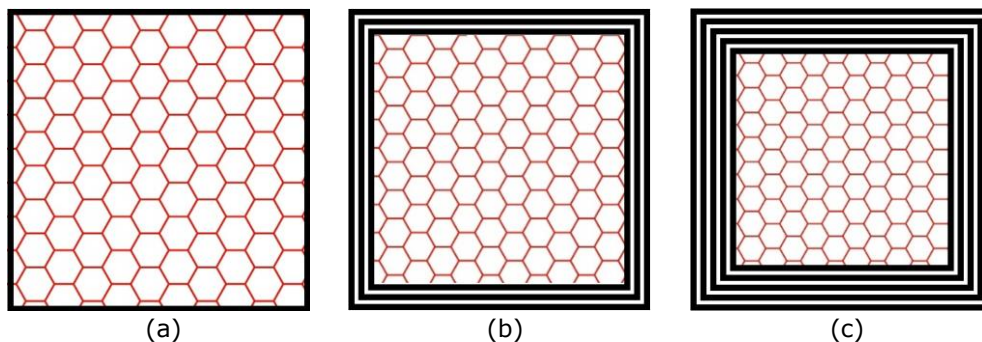


Fig. 1.16. Număr de contururi exterioare

Numărul de contururi influențează proprietățile mecanice ale piesei fabricate. Când numărul de contururi crește, efectul se vede direct în creșterea rezistenței. Acest lucru se datorează faptului că sarcina este aplicată direct pe contur, mai degrabă decât pe raster; prin urmare, un număr de contur în creștere face ca lungimea rasterului și numărul de raster să scadă, ceea ce va duce la îmbunătățirea performanței piesei.

J. Temperatura de extrudare

Temperatura de extrudare (sau temperatura de printare [89], temperatura duzei [103]) se referă la temperatura la care filamentul este încălzit în interiorul duzei în timpul procesului FDM. Temperatura de extrudare poate influența fluiditatea și caracteristicile de solidificare ale materialului topit și poate controla vâscozitatea filamentului extrudat din duză.

Temperatura de extrudare are un efect important asupra cristalinității materialului și a legăturii filamentului polimeric. Astfel, performanța mecanică a pieselor imprimate va fi de asemenea afectată. Temperatura mai mare de extrudare a filamentului depus oferă o fuziune mai bună între straturi, ceea ce are ca rezultat proprietăți mecanice mai mari. Cu toate acestea, temperatura de extrudare prea ridicată poate cauza degradarea materialului sau defectarea turnării în timpul depunerii, rezultând inexactitatea dimensională și deformarea filamentului [89]. Pe de altă parte, temperatura de extrudare mai scăzută poate împiedica materialul să se topească în mod adecvat, ceea ce duce la înfundarea duzei. Ambele cazuri de mai sus vor duce la proprietăți mecanice slabe ale pieselor imprimate.

1.3.3. Materiale pentru filament

Câteva exemple de tipuri de materiale cu filament utilizate într-o imprimantă FDM includ Acidul Polilactic (PLA), Alcoolul polivinilic (PVA - Polyvinyl alcohol), Acrilonitrilul butadien stiren (ABS), elastomerul termoplastice (TPE - Thermoplastic elastomer), policarbonatul (PC - Polycarbonate) și ranforsări ale acestora. Cu toate acestea, există multe tipuri diferite de filamente pentru același material, în funcție de specificațiile fiecărui producător, și astfel pot avea temperaturi diferite de

1.3. FDM – Modelarea prin depunere fuzionată 41

topire/procesare datorită diferitelor proprietăți în ceea ce privește mecanica și prelucrarea [104]. În plus, filamentele polimerice pot fi armate cu nanoparticule de metal pentru a pregăti filamente nanocompozite în vederea îmbunătățirii diferitelor caracteristici, cum ar fi rezistența termică și performanța mecanică [105].

Pentru a înțelege cum poate fi imprimată o piesă 3D dintr-o rolă de filament pe bază de polimer, este necesar să înțelegem comportamentul termic al filamentului pe bază de polimer atunci când temperatura atinge temperatura de tranziție sticloasă (T_g - Glass transition) sau temperatura de topire (T_m - Melting temperature). Astfel, T_g este temperatura la care are loc tranziția polimerului de la o stare cristalină la una cauciucosă [106], în timp ce T_m este temperatura la care are loc tranziția polimerului de la o stare solidă la una fluidă [107]. Când temperatura extruderului FDM atinge T_m , materialul pe bază de polimer poate fi imprimat.

În continuare se vor prezenta cele mai utilizate tipuri de material folosite în tehnologia de printare FDM.

A. Acid polilactic (PLA)

PLA este cel mai utilizat material polimeric utilizat în printarea 3D. PLA este un plastic biodegradabil obținut prin fermentarea culturilor precum porumbul sau cartofii [108, 109]. Se prindează la o temperatură între 160 și 230°C și nu necesită un pat încălzit. Este non-toxic, ieftin, dur și puternic, dar fragil în același timp [110]. Datorită biodegradabilității sale, procesabilității ușoare și proprietăților fizice și biologice excelente, aplicațiile sale sunt nesfârșite, inclusiv aplicații avansate, cum ar fi ingineria țesuturilor [111] și utilizarea în biosenzori [112].

B. Acrilonitril butadien stiren (ABS)

ABS a fost unul dintre primele materiale dezvoltate pentru printarea 3D. Este rezistent la uzură, impact, rezistă la temperaturi ridicate și are un cost redus [108]. Marele său dezavantaj este că se topește la temperaturi cuprinse între 215 și 250°C și, deci, are nevoie de un pat încălzit pentru a evita deformarea. Ca și în cazul PLA, are multe aplicații, cum ar fi fabricarea de microdispozitive [113] și microfluidic [114]. Acrilonitril stiren acrilat (ASA) este un derivat ABS imprimat în condiții similare cu ABS (temperatură între 235 și 255°C) și necesită un pat încălzit între 90 și 120°C [115]. Principalul său avantaj este că este rezistent la UV și, prin urmare, poate fi utilizat în aplicații exterioare [116].

C. Alcool polivinilic (PVA)

PVA este un material solubil în apă, adică se dizolvă în contact cu apa. Este printat la temperaturi similare cu PLA (160–230°C) și este de obicei folosit ca material suport pentru a fi ușor dizolvat ulterior [108]. Alte aplicații ale acestui polimer includ utilizarea sa pentru modele dentare [117] și utilizarea sa largă în stare reticulat în aplicații biomedicale ca hidrogel în bioprintare, adică imprimarea 3D a unui biomaterial combinat cu celule pentru medicina regenerativă [118, 119].

D. Elastomer termoplastice (TPE)

TPE este un material flexibil care se deformează ușor, astfel încât poate contracara orice tip de sarcină. Este printat la 180–230°C și nu are nevoie de un pat încălzit [120]. Datorită flexibilității sale mari, filamentul trebuie alimentat direct la

extruder fără a trece prin tubul Bowden [33]. Caracteristicile sale au revoluționat industria textilă pentru imprimarea hainelor [121]. De asemenea, este folosit pentru a face branșuri ortetice TPE [122].

E. Policarbonat (PC)

PC este un material transparent rezistent la temperaturi foarte ridicate, ușor flexibil și foarte rezistent la impact [123–126]. Cel mai mare dezavantaj al său este că trebuie printat la 200–280°C, deci are nevoie de un pat încălzit la o temperatură între 80 și 100°C [127]. În ciuda acestui dezavantaj, este utilizat pe scară largă datorită proprietăților sale biomedicale excelente pentru aplicații ortopedice, dentare [138] și ingineria țesuturilor [129].

F. Acid polilactic cu grafen (PLA/Grafen)

Grafenul este unul dintre cele mai recente materiale utilizate în imprimarea 3D [130]. Deoarece este de obicei amestecat într-o concentrație scăzută cu PLA, este printat la temperaturi similare cu PLA de 210–230°C. Cu toate acestea, are nevoie de un pat încălzit datorită proprietăților sale termice. Grafenul are proprietăți biologice și fizice excelente, cum ar fi conductivitatea mecanică, termică și electrică, care oferă filamente conductoare [131–134]. Acest material poate fi utilizat în stimularea electrică pentru a îmbunătăți proliferarea celulară sau pentru a realiza diferențierea celulelor pe suporturi poroase (imprimare 3D, pentru aplicații de inginerie tisulară) [135]. Aceste filamente sunt mai rezistente decât cele din ABS sau PLA [118,136]. Aplicațiile sale includ instrumente chirurgicale [137], bioprinting 3D [119] și ecranare cu inducție electromagnetică [138].

G. Polietilen tereftalat glicol (PETG)

PETG se bazează pe tereftalat de polietilen (PET - Polyethylene terephthalate) modificat cu glicol. PETG este printat la aproximativ 220–250°C și are nevoie de un pat de printare încălzit la 60°C [139]. Proprietățile sale sunt tenacitatea ridicată la tracțiune, transparența, flexibilitatea, procesabilitatea ridicată și rezistența chimică excelentă [140]. Unul dintre dezavantajele sale este porozitatea ridicată a produsului printat [141], dar acesta poate fi, de asemenea, un avantaj în aplicații specifice, cum ar fi modele osoase [142], hardware de laborator personalizat [143] și ortopedie [144].

H. Polimer de polieteretercetona (PEEK)

PEEK (Polyether ether ketone) este un polimer organic termoplastic cu proprietăți mecanice excelente, lubrifiere bună și rezistență chimică. Este mai flexibil decât ABS sau PLA [145]. Cu toate acestea, principalul său dezavantaj este cerința de temperatură ridicată de printare de peste 340–440°C, de care foarte puține imprimante 3D sunt capabile [146]. PEEK este utilizat în piese de avioane, rachete, mașini de curse și drone, iar în medicină pentru implanturi ortopedice, înlocuiri articulare, implanturi spinale, sisteme protetice și stomatologie [147].

I. Fibră de nailon armată cu oxid de aluminiu

Fibra de nailon întărită cu oxid de aluminiu este un nou tip de filament cu proprietăți bune, precum rezistența la tracțiune, elasticitatea [148] și stabilitatea

termică ridicată [149]. Cu toate acestea, este printat la 230–250°C și necesită un pat încălzit la temperatură ridicată [150]. Acest filament este utilizat în principal în aplicații de inginerie aerospațială și auto [147].

J. Acid polilactic cu lemn (PLA cu lemn)

Unul dintre avantajele PLA armat cu lemn este reducerea plasticului pe bază de petrol și a impactului asupra mediului [151]. Rezistența sa la tracțiune este similară cu PLA sau ABS [152]. La fel ca PLA, este printat la 210–230°C și este folosit în principal pentru a face ornamente [153].

K. Polihidroxiacanoați (PHA)

PHA (Polyhydroxyalkanoates) este un poliester termoplastic [154]. Temperatura de printare este de 110–170°C și are stabilitate termică scăzută [155]. Poate fi produs prin fermentarea a numeroase bacterii și a arheilor extremofile, ceea ce îl face un bun candidat pentru utilizare în medicină [39, 156, 157]. Cu toate acestea, deoarece producția sa este foarte costisitoare, nu este disponibil comercial în prezent și nu este viabil pentru alte aplicații industriale în afară de biomedicină.

L. Polietilen tereftalat (PET)

PET este fabricat din petrol și temperatura sa de printare este de 210–230°C. Acest material este similar cu ABS, deoarece este flexibil, puternic, biodegradabil și ieftin. Cu toate acestea, absoarbe umiditatea [116]. PET este un material biocompatibil potrivit pentru fabricarea de schele biomedicale [158].

M. Polistiren de mare impact (HIPS)

HIPS (High Impact Polystyrene) are o rezistență ridicată la impact [116] și este utilizat predominant în prototipuri [159]. Este printat la 210–240°C și necesită un pat încălzit la 80–115°C [160]. Deoarece condițiile sale de printare sunt similare cu ABS-ul și este solubil în limonen, este folosit ca material suport solubil pentru structurile ABS în biomedicină [161].

N. Materiale celulozice

Există acum un interes din ce în ce mai mare pentru materialele celulozice pentru printarea 3D, deoarece acestea sunt ușor disponibile, au o mare flexibilitate și sunt ieftine și biodegradabile [162]. Aceste materiale sunt folosite pentru o mare varietate de aplicații precum elemente decorative și în aplicații medicale, electronice sau textile [163].

Sunt important de menționat aspectele relevante care afectează imprimabilitatea fiecăruia dintre aceste materiale. Astfel, prezența aditivilor sau a materialelor de umplură, precum și modificările chimice și structurale produse de imprimare au potențialul de a afecta semnificativ imprimabilitatea și alte caracteristici relevante, cum ar fi reactivitatea suprafeței, funcționalizarea și asocierea cu contaminanții atmosferici, specii organice, celule și organisme [130, 151, 164]. Au fost propuși aditivi precum extensii de lanț și modificatori de impact pentru a îmbunătăți imprimabilitatea materialelor plastice de inginerie bazate pe resurse regenerabile, adaptate pentru aplicațiile FDM [165]. Amestecuri de polimeri au fost,

de asemenea, investigate pentru a îmbunătăți imprimabilitatea în FDM [124, 166]. Rezultatele experimentale au evidențiat modul în care modificările materialelor au un impact puternic asupra comportamentului reologic, care are un rol cheie în imprimabilitate [124, 167]. Astfel, imprimabilitatea materialelor cu filament de imprimare 3D neobișnuit, poate fi îmbunătățită prin umplerea cu talc [167]. Printabilitatea și, astfel, calitatea pieselor imprimate 3D se pot modifica în funcție de culoarea PLA utilizată [168]. Cuiffo și colab. [164] au arătat că procesul de imprimare FDM are ca rezultat modificări chimice și structurale în PLA. Mai multe materiale cu proprietăți mecanice excelente, cum ar fi ABS, PC, PEEK și HIPS necesită temperaturi ridicate de imprimare și un pat fierbinte [109, 146, 160]. Prin urmare, este importantă conștientizarea potențialelor probleme legate de transformările materialelor în timpul printării, precum și de natura oarecum incertă a filamentelor comerciale [164].

1.3.4. Proprietăți ale componentelor FDM

Pentru a analiza impactul parametrilor procesului asupra preciziei dimensionale, rugozității suprafeței, timpului de construcție și proprietăților mecanice, au fost efectuate un număr considerabil de cercetări.

Figura 1.17 ilustrează impactul diferiților parametri de proces asupra diferitelor caracteristici ale pieselor. Diagrama tip pește (fishbone diagram, Ishikawa diagram sau cause-and-effect diagram) a fost dezvoltată pe baza rezultatelor diferitelor studii existente. Unii parametri de proces se suprapun cu caracteristicile pieselor, deoarece un parametru de proces poate afecta mai multe caracteristici ale piesei.

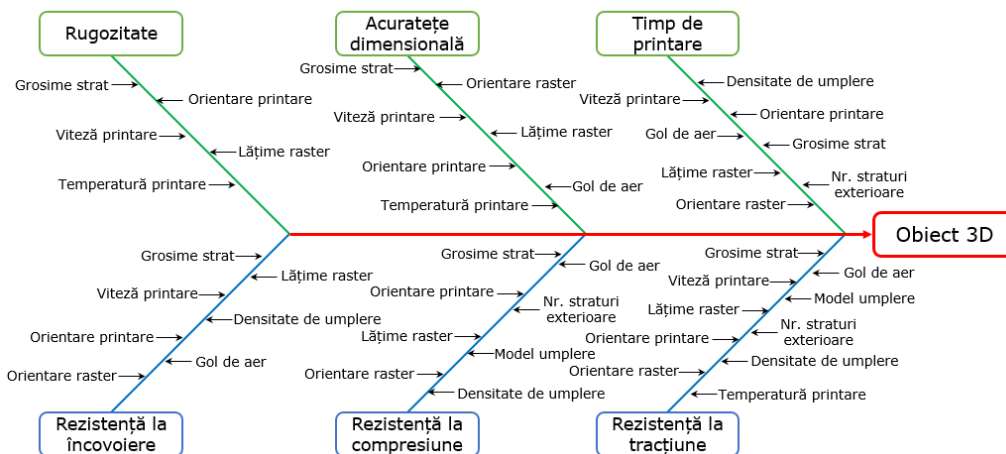


Fig. 1.17. Impactul parametrilor de proces asupra caracteristicilor componentelor

În următoarele subsecțiuni, este oferit un rezumat sistematic al cercetării care analizează caracteristicile de calitate ale pieselor printate prin tehnologia FDM.

A. Rugozitatea suprafeței

Rugozitatea suprafeței este un indice larg utilizat al calității produsului. În cele mai multe cazuri, rugozitatea suprafeței este adesea folosită ca o cerință tehnică pentru produsele mecanice. Rugozitatea suprafeței mărește aspectul estetic și este

1.3. FDM – Modelarea prin depunere fuzionată 45

importantă pentru a asigura funcționarea corectă a pieselor foarte precise, de exemplu, arbori de etanșare și plăci de frecare în sectorul auto.

Una dintre limitările procesului FDM este calitatea slabă a suprafeței din cauza efectului de scară, a rezoluției fișierului STL și a parametrilor procesului. Impactul efectului scării și al rezoluției fișierului STL depinde de complexitatea formei unei piese (de exemplu, o suprafață curbată este mai greu de obținut decât o suprafață plană). Influența parametrilor de proces asupra rugozității suprafeței nu depinde numai de forma unei piese, ci și de setarea parametrilor de proces. Calitatea suprafeței unei piese construite FDM poate fi îmbunătățită prin selectarea unei combinații optime de parametri de proces. Calitatea superioară a suprafeței reduce de obicei costul post-procesare.

O finisare ridicată a suprafeței poate fi obținută prin selectarea unei grosimi reduse a stratului, deoarece ajută la reducerea efectului de scară asupra pieselor imprimate. În afară de grosimea stratului, temperatura scăzută de extrudare și viteza de imprimare sunt de preferat pentru a obține o precizie mai mare de imprimare.

O temperatură ridicată de extrudare crește fluiditatea materialelor filamentare și, în plus, are ca rezultat deviația dimensională și rugozitatea suprafeței mari. Cele mai multe rezultate au indicat faptul că finisajul unei suprafețe imprimate de sus este mai bun decât suprafața laterală pentru orice setare a parametrilor de proces.

B. Acuratețea dimensională

Precizia dimensională este o proprietate importantă pentru piesele funcționale. Ajustarea parametrilor procesului FDM are un impact semnificativ asupra acurateții dimensionale. Mulți cercetători au lucrat intens pentru a determina modul în care parametrii procesului pot influența acuratețea dimensională a pieselor imprimate.

Conform literaturii de specialitate, grosimea stratului este unul dintre cei mai analizați și influenți factori pentru acuratețea dimensiunilor. Majoritatea cercetătorilor au concluzionat că o precizie dimensională ridicată se obține prin setarea unei temperaturi de extrudare cu grosime redusă a stratului și a numărului de învelișuri.

C. Timpul de printare

Din rezultatele lucrărilor revizuite privind timpul de construcție, s-a constatat că timpul de construcție este minim la o grosime mare a stratului, o orientare a construcției 0° și o densitate scăzută de umplere. Timpul minim de construcție înseamnă că printarea unei piese este mai rapidă. Impactul orientării rasterului și al unghiului rasterului asupra timpului de construcție este încă necunoscut. Astfel, mai sunt necesare analize suplimentare pentru a trage o concluzie mai validă. Pe o notă separată, timpul de construire poate fi, de asemenea, afectat semnificativ de imprimanta FDM în sine. O imprimanta FDM bună poate produce de obicei o piesă de calitate relativ bună mai rapid decât o imprimantă FDM slabă. O altă direcție de cercetare este studierea influenței modelului de umplere și a temperaturii de extrudare asupra timpului de construcție.

D. Proprietățile mecanice

Proprietățile mecanice ale unei piese sunt importante. În funcție de domeniile de aplicare, proprietățile mecanice pot fi utilizate ca una dintre liniile directoare pentru a explora noi aplicații sau pentru a determina durata de viață estimată a unei piese. Datorită diferiților parametri de proces (de exemplu, temperatura de extrudare și grosimea stratului), proprietățile mecanice ale unei piese construite FDM nu sunt aceleași cu proprietățile mecanice ale filamentului. Au existat o mulțime de eforturi de cercetare care au investigat impactul parametrilor procesului asupra proprietăților mecanice [68]. Rezistența la tracțiune, rezistența la compresiune și rezistența la încovoiere au fost cele trei proprietăți mecanice cele mai analizate ale pieselor obținute prin tehnologia FDM.

- **Rezistența la tracțiune** - din cercetările existente, s-a descoperit că orientarea construcției este cel mai semnificativ parametru, iar rezistența la tracțiune a fost maximă la orientarea construcției 0° . La această orientare, direcția de extrudare a fibrei filamentului este paralelă cu direcția sarcinii aplicate. Grosimea stratului depinde de alți parametri, de exemplu, orientarea construcției și este optimă la 0° . Grosimea redusă a stratului este recomandată pentru proprietățile de tracțiune. Din cercetările actuale, precum și din cunoștințele generale, se poate concluziona sigur că rezistența la tracțiune este maximă la densitate mare de umplură și un număr mare de contururi exterioare. La densitate mare, legăturile interstraturilor devin puternice. Temperatura ridicată de extrudare este de preferat pentru rezistența la tracțiune.
- **Rezistența la compresiune** - din cercetările existente, se poate concluziona inițial că un nivel ridicat de grosime a stratului crește proprietățile de compresiune. În plus, orientarea pieselor este importantă pentru rezistența completă, deoarece modifică proprietățile anizotrope ale pieselor FDM. Din rezultatele experimentale, precum și din cunoștințele generale, se poate concluziona că densitatea mare de umplură, forma complexă de umplură și un număr mare de contururi exterioare sunt de preferat pentru îmbunătățirea proprietăților de compresiune ale pieselor printate. Pentru a afla mai multe despre influența parametrilor procesului, este important să se investigheze temperatura de extrudare, lățimea rasterului modelului de umplere și orientarea rasterului. Conform ultimelor investigații, există încă cercetări limitate care compară proprietățile mecanice ale pieselor produse din diferite materiale. Acesta este un gol în cercetare care trebuie completat în acest domeniu.
- **Rezistența la încovoiere** - relația dintre rezistența la încovoiere și parametrii procesului este mai complexă în comparație cu rezistența la tracțiune sau la compresiune. Acest lucru se datorează faptului că, în timpul testării rezistenței la încovoiere, o componentă suferă atât forțe de tracțiune, cât și forțe de compresiune. Sunt necesare cercetări suplimentare pentru a cunoaște impactul diferiților parametri de proces, inclusiv grosimea stratului, orientarea rasterului, viteza de printare și spațiul de aer asupra rezistenței la încovoiere.

E. Geometria piesei

Pentru a explora mai multe capacități ale procesului FDM și pentru a extinde aplicațiile procesului FDM, este necesar să se producă părți funcționale în scopuri de cercetare, pe lângă testarea probelor conform standardelor internaționale (de exemplu, ASTM - American Society for Testing Materials și ISO - International Organization for Standardization). Caracteristicile unei piese complexe pot fi îmbunătățite prin alegerea configurațiilor geometrice adecvate. Parametrii optimi de proces legați de configurațiile geometrice pot fi determinați pentru a reduce erorile și defectele de printare. Luarea în considerare a geometriei componentelor complexe și a parametrilor de proces împreună, pentru îmbunătățirea caracteristicilor pieselor, este o lacună în cercetare în domeniul optimizării caracteristicilor pieselor FDM.

1.3.5. Domenii de utilizare

Tehnologia FDM este una dintre cele mai populare tehnologii AM care permite fabricarea de componente care nu pot fi obținute cu metode de prelucrare convențională [169-172].

Aplicațiile versatile care necesită piese rapide și ieftine, prototipuri sau piese brute și rigide pentru utilizatorii finali pot fi fabricate prin această tehnologie. FDM a găsit, de asemenea, aplicații în industria aerospațială, unde componentele metalice tradiționale sunt înlocuite cu piese printate pentru a reduce greutatea și, totuși, suficient de robuste. Ca urmare a implementării acestei tehnologii, timpul de livrare pentru repararea pieselor a fost, de asemenea, redus. S-a raportat că Mars Rover de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) avea aproximativ 70 de piese termoplastice de producție datorită proprietăților de greutate redusă și durabilitate pentru a rezista mediului dificil al spațiului.

Piese FDM sunt, de asemenea, utilizate în aplicații prototip care necesită mai puțin finisaj de suprafață, precum și mai puține rezoluții, deoarece oferă o reducere a costurilor și nu necesită postprocesare chimică [173]. Recent, s-a raportat că Stratysys și Aurora Flight Sciences au fabricat un vehicul aerian fără pilot (UAV - Unmanned aerial vehicle) cu greutate redusă, dar de mare rezistență, folosind materialul ULTEM 9085 și tehnologia FDM, în care structura internă de tip fagure a fost utilizată în interiorul designului aripii interne. Boeing folosește piese FDM pentru mânerul ușii 777-300ER și carcasa camerei sale. În plus, Moog Aircraft Group a adoptat și FDM pentru a produce dispozitive de întreținere [170,174]. De asemenea, a fost raportat că galeriile de admisie pentru automobile pentru Societatea Inginerilor Auto (SAE - Society of Automotive Engineers) au fost fabricate folosind FDM [175].

FDM a găsit, de asemenea, aplicații în industriile medicale [176] pentru medicina personalizată. Evila și colab. [177] au raportat fabricarea de stenturi traheale personalizate prin utilizarea tehnologiei FDM care oferă costuri reduse și o suprafață excelentă. Reconstrucția geometriei și funcționalității implanturilor de disc intervertebral lombar folosește și tehnologia FDM [178]. În plus, acest tip de printare a fost utilizat pe scară largă pentru schele și ingineria țesuturilor [179-184].

O listă de aplicații tipice FDM este prezentată în Tabelul 1.1.

Tabelul 1.1. Aplicații ale tehnologiei FDM

Aplicația	Referința
Matrițe de formare a tablei	[71]
Structuri de schele poroase descompuse	[183]
Modele de turnare	[185]
Modele imprimate 3D pentru chirurgia maxilo-facială	[186]
Reconstrucție cranio-facială și inserții ortopedice	[187]
Reparații dentare, schele pentru tipărirea organelor și ingineria țesuturilor	[188]
Oase artificiale cu policaprolactonă/hidroxiapatită pentru a imita femurul de capră	[189]
Chirurgie maxilo-facială folosind FDM și imprimare poli-jet împreună cu simularea și modelarea analizei cu elemente finite	[190]
Imprimarea capsulelor în industria farmaceutică	[191]
Structuri de schele pentru ingineria țesuturilor	[192]
Mână protetică economică funcțională	[193]
Ghiduri chirurgicale pentru aplicare dentară	[194]
Os personalizat pacientului și grefele respective	[195]
Dispozitiv pentru despicătură de buză și palat (câmp dentar), proteză acustică	[196]
Obiecte industriale ornamentale	[197]
Angrenaj conic de calitate industrială	[198]
Aplicații textile	[199]
Lămpi personalizate	[200]
Modele din plastic conductoare electric	[201]
Componente cu circuite electronice conductoare din plastic	[202, 203]

1.3.6. Avantaje și dezavantaje

Modelarea prin depunere fuzionată este cel mai popular tip de printare 3D și există un motiv întemeiat pentru aceasta.

FDM are multe **avantaje**, dintre care unele nu le oferă niciuna dintre celelalte tehnologii de printare 3D:

- **Tehnologia FDM este accesibilă:** Imprimarea FDM este una dintre cele mai accesibile tehnologii de printare 3D. Se pot găsi piese de schimb rapid și ieftin, iar multe companii pot întreține imprimantele FDM. Nu este nevoie de instalare și instruire costisitoare. Kit-ul se poate cumpara și asambla fără ajutor, economisind, astfel, o sumă substanțială de bani.
- **FDM funcționează cu multe materiale:** FDM lucrează cu o gamă largă de filamente, ceea ce oferă mai multe opțiuni în ceea ce privește prețul și calitatea. Unele dintre tipurile de filamente includ: ABS, PLA, PC, PET, PEEK (vezi Secțiunea 1.3.3).
- **Filamentele FDM nu sunt ușor contaminate:** Una dintre frustrările cu care se confruntă oamenii adesea când printează 3D cu rășină, la fel ca în cazul imprimantelor SLA, este contaminarea cu rășină. Deoarece acele imprimante lucrează cu cuve de rășină, este ușor ca praful sau alți contaminanți să pătrundă în cuvă și să contamineze rășina, făcând-o fără valoare pentru imprimare. Deoarece printarea

1.3. FDM – Modelarea prin depunere fuzionată 49

3D FDM alimentează și topește bobinele de filament solide, contaminarea nu este o problemă atât de mare. Puțin praf nu va afecta rezultatul printării. De fapt, probabil se va arde sau se va topi pe măsură ce filamentul trece prin duză.

- **Se pot imprima versiuni mari:** Toate imprimantele 3D își limitează dimensiunile de construcție în funcție de dimensiunea patului de printare. Ceea ce face printarea FDM diferită este faptul că este scalabilă la infinit. Dacă se dorește printarea 3D a unei case întregi, teoretic este posibil, dacă se construiește o imprimantă 3D suficient de mare. Acest lucru nu este posibil cu majoritatea celorlalte tehnologii de printare 3D; cel puțin nu încă. De asemenea, dacă se dorește printare unui model mare, dar imprimanta nu este suficient de mare, se poate împărți cu ușurință modelul în părți și se poate printa fiecare separat, urmând ca, după printare, să se asambleze piesele.
- **Modelarea este ușoară:** După cost, al doilea motiv pentru care FDM este atât de popular este probabil din cauza simplității sale. Dacă se utilizează un filament din PLA, se poate printa un model de bază în doar câteva minute. Sistemul este logic și ușor de înțeles. Datorită popularității sale, există o mulțime de resurse disponibile care ajută la îmbunătățirea imprimărilor utilizând modelarea prin depunere fuzionată.
- **FDM este relativ rapid:** Modelarea prin depunere fuzionată nu este cel mai rapid tip de printare 3D cunoscut; modelarea cu rășină încă ține locul I. Printarea poate dura ore întregi, în funcție de dimensiunea modelului și de setările alese. Cu toate acestea, ultima parte este crucială. Se pot modifica setările printării FDM în măsura în care să se poată printa mai rapid chiar decât o imprimantă cu rășină, în unele cazuri. La faza de pregătire a modelului pentru printare, se poate seta viteza de printare și grosimea stratului. Ambele setări vor afecta cât de repede se termină printarea.

Pe cât de remarcabilă este tehnologia de printare FDM, are, totuși, și unele **dezavantaje**, cum ar fi:

- **Detaliul limitat:** Deși FDM poate printa destul de multe detalii, cele fine sunt încă o provocare. Se poate modifica dimensiunea duzei, și, de asemenea, se poate alege grosimea stratului de printare, dar nu se poate merge mai jos de nivelul sutelor de microni (cel puțin nu încă). Acest lucru pune o limită asupra a cât de fine pot fi detaliile printării. Dimensiunile actuale ale stratului depus sunt mai mult decât suficient pentru majoritatea versiunilor, dar nu este nici pe departe la fel de fin ca un detaliu care se poate obține folosind o imprimantă SLA.
- **Calitatea nu este perfectă:** Principiul de bază al printării 3D FDM constă în construirea modelului strat cu strat. Din păcate, acesta este și unul dintre principalele probleme. Această abordare strat cu strat creează o suprafață aspră cu linii unde straturile se întâlnesc. Această

stratificare va deveni și mai pronunțată cu o viteză mare de printare. Pentru o suprafață mai netedă este necesar timp și efort suplimentar, în timp ce printarea SLA oferă o calitate mai bună și o construcție mai netedă chiar de la început.

- **Lipsa integrității structurale:** Același sistem de stratificare menționat adineaori are și un alt efect secundar negativ - pierderea integrității structurale. Suprafețele lipite dintre straturi vor fi întotdeauna mai slabe decât restul construcției, deoarece filamentul din straturile inferioare se va fi răcit deja în momentul în care imprimanta plasează următorul strat, astfel încât straturile nu se îmbină întotdeauna așa cum ar fi de așteptat.
- **Sunt necesare structuri de sprijin** (în unele cazuri): În funcție de ceea ce se printează, poate fi necesară adăugarea unor structuri de sprijin pe măsură ce se proiectează modelul. Orice zonă extinsă fără suport, cum ar fi un pod sau acoperișul unei case, se va lăsa dacă nu există suport. Aceste structuri de susținere necesită timp și o planificare atentă pentru a proiecta corect, deoarece ar trebui să poată fi îndepărtate fără prea mult efort și fără a lăsa pete pe modelul printat. De asemenea, printarea structurilor de susținere necesită mai mult timp și utilizează mai mult filament, irosind o parte din resurse.

Modelarea prin depunere fuzionată are câteva dezavantaje, dar tehnologia din spatele acesteia s-a îmbunătățit foarte mult în ultimii ani. Ca urmare, aceste dezavantaje sunt din ce în ce mai mici, lăsând loc avantajelor semnificative pe care le oferă FDM.

2. COMPORTAMENTUL LA TRACȚIUNE

2.1. Noțiuni generale

Datorită dezvoltării procesului de Modelare prin Depunere Fuzionată (FDM - *Fused Deposition Modeling*), numeroase lucrări din literatura de specialitate evaluează proprietățile componentelor printate 3D. Parametri de proces, precum orientarea printării [204-214], modelul de umplere [215-217], grosimea stratului [206-208, 212, 213, 217, 218], densitatea de umplere [209, 214, 216], numărul de straturi exterioare [211, 216], diametrul duzei de extrudare [209, 216, 218], unghiul raster [211, 214, 219-221], viteza de printare [210, 212], temperatura duzei [217], lățimea conturului [211], spațiul de aer [221], culoarea filamentului [213] și grosimea epruvetelor [205, 210, 213], au fost investigați de diverse echipe de cercetători. În studiile raportate, s-au realizat corelații între parametrii de proces menționați și principalele proprietăți mecanice ale materialelor printate.

Kozior și Kundera [204] au efectuat teste de compresiune și au studiat proprietățile elastice și de rezistență ale epruvetelor din ABS, printate prin tehnologia FDM. Ei au ajuns la concluzia că orientarea epruvetelor pe patul de printare este un parametru cheie, în special în ceea ce privește proprietățile reologice ale materialelor. Autorii au remarcat că orientarea de 0° induce cea mai mare valoare a modulului lui Young, respectiv orientarea de 45° evidențiază cea mai mică valoare.

Vălean și colab. [205] au investigat efectul orientării printării și grosimii epruvetelor asupra proprietăților elastice și de rezistență ale epruvetelor din PLA printate prin FDM. Autorii au remarcat că orientarea afectează rezistența la tracțiune (8%) mai mult decât modulul lui Young (1,8%), iar cele mai mari valori ale proprietăților de tracțiune au fost obținute la 0° (pentru rezistența la tracțiune) și 90° (pentru modulul lui Young). Datorită prezenței defectelor inerente în epruvete, ei au observat că modulul lui Young (30%) și rezistența la tracțiune (7%) scad semnificativ odată cu creșterea grosimii epruvetelor.

Efectele orientării epruvetelor (paralel și perpendicular pe patul de printare), al grosimii stratului (0,24; 0,16 și 0,12 mm) și al recoacerii termice (60 și 80°C), asupra proprietăților de tracțiune ale epruvetelor din PETG/PLA printate cu tehnologia FDM, au fost evaluate de Szust și Adamski [206]. Ei au observat că probele printate paralel cu patul de printare prezintă proprietăți mai bune decât cele printate perpendicular. Autorii au concluzionat că scăderea grosimii stratului are ca rezultat o creștere a modulului lui Young (12%) și a rezistenței la tracțiune (67%). Procesul de recoacere termică a fost însoțit de deformări geometrice ale epruvetelor; totuși, la 60°C, s-a obținut o creștere de 24% a rezistenței la tracțiune și o scădere de 7% a modulului lui Young.

Influența orientării epruvetelor (0, 15, 30, 45, 60, 75 și 90°) și grosimii stratului (0,1; 0,2 și 0,3 mm) asupra modulului lui Young și rezistenței la tracțiune, ale componentelor PLA printate prin tehnologia FDM, a fost studiată de Zhao și colab. [207] și Yao și colab. [208]. Autorii au demonstrat că proprietățile la tracțiune cresc

52 Comportamentul la tracțiune

cu creșterea orientării, de la 0° la 90° , și cu descreșterea grosimii stratului, de la 0,3 mm la 0,1 mm. În plus, au propus două modele teoretice pentru prezicerea modului lui Young și a rezistenței la tracțiune ale componentelor PLA printate prin FDM.

Hikmat și colab. [209] au studiat experimental și statistic rezistența la tracțiune a pieselor PLA printate prin FDM, utilizând diferiți parametri de proces. Cu toate acestea, conform analizei statistice, autorii au concluzionat că numai parametri precum orientarea printării, diametrul duzei de extrudare și densitatea de umplere sunt semnificativi pentru comportamentul la tracțiune al epruvetelor printate 3D.

Fountas și colab. [210] au obținut că o grosime mai mică a probei și o viteză scăzută de printare afectează negativ rezistența la tracțiune. În plus, ei au remarcat faptul că orientarea printării ar trebui setată corespunzător pentru a reduce lungimea umplerii și a crește numărul de geometrii de umplere.

Efectul parametrilor de proces asupra proprietăților de tracțiune ale componentelor ULTEM 9085 (Polieter Imidă - PEI) printate prin FDM a fost investigat de către Gebisa și Lemu [211]. Autorii au concluzionat că, în comparație cu orientarea printării, lățimea conturului și numărul de straturi exterioare, unghiul raster are cea mai mare influență asupra proprietăților de tracțiune.

Chacón și colab. [212] au studiat efectul orientării printării, al grosimii stratului și al vitezei de printare asupra proprietăților de tracțiune și încovoiere ale materialului PLA printat cu tehnologia FDM. Autorii au remarcat că orientarea pe muchie (on-edge) ar putea fi aleasă pentru o performanță optimă în ceea ce privește rigiditatea, rezistența și ductilitatea. Ei au mai raportat că, dacă timpul de printare urmează să fie micșorat, este necesar să se folosească o viteză mare de printare și o grosime mare a stratului de depunere.

Efectele orientării printării, grosimii stratului, grosimii probei și a culorii filamentului asupra proprietăților elastice și de rezistență sunt discutate de Marşavina și colab. [213]. Rezultatele obținute au arătat că orientarea de 0° , probele groase (10 mm) și straturile groase (0,40 mm) au prezentat cele mai mari valori ale modului lui Young și ale rezistenței la tracțiune. În plus, culoarea roșie arată cel mai mare modul de elasticitate, în timp ce culoarea violet oferă cea mai mare valoare a rezistenței la tracțiune.

Singh și colab. [214] au investigat efectul densității de umplere, al unghiului raster și al orientării de printare asupra comportamentului la tracțiune al pieselor din PLA. Autorii au menționat că toți cei trei parametri influențează caracteristicile de tracțiune ale epruvetelor, în special orientarea printării și densitatea de umplere.

Birosz și colab. [215] au efectuat teste de încovoiere, iar una dintre concluzii a fost că modelele de umplere Honeycomb și Gyroid prezintă proprietăți mecanice mai bune în comparație cu modelul Grid simplu. În plus, ei au observat că propagarea fisurilor ar putea fi afectată de orientarea stratului.

Le și colab. [216] au realizat un studiu de optimizare a parametrilor procesului FDM privind scăderea timpului de printare și minimizarea, pe cât posibil, a scăderii rezistenței la tracțiune. Autorii indică faptul că densitatea de umplere, numărul de straturi exterioare, diametrul duzei de extrudare și modelul de umplere au fost factori decisivi asupra principalelor proprietăți mecanice. Mai mult decât atât, ei au găsit că diametrul duzei a fost cel mai important factor care a contribuit la îmbunătățirea timpului de printare.

Rao și colab. [217] au studiat grosimea stratului, temperatura duzei și modelul de umplere asupra rezistenței la tracțiune a epruvetelor din PLA ranforsate cu fibră de carbon. Autorii au obținut cea mai mare rezistență la tracțiune pentru o grosime a stratului de 0,1 mm, o temperatură a duzei de 225°C și un model de umplere Cubic.

Maloch și colab. [218] au studiat influența duzei de extrudare și a grosimii stratului asupra proprietăților mecanice (rezistența la tracțiune și la încovoiere, modulul de elasticitate la tracțiune și la încovoiere) ale epruvetelor printate cu ABS. Autorii au observat că cele mai bune proprietăți se obțin pentru grosimi mici ale straturilor. Ei au remarcat, de asemenea, că o creștere a temperaturii duzei asigură o topire mai bună între straturile adiacente.

Es-Said și colab. [219] au investigat efectul orientării stratului (orientarea raster) asupra proprietăților mecanice (rezistența la tracțiune, modulul de elasticitate și rezistența la impact) ale epruvetelor obținute prin prototipare rapidă. Autorii au constatat că orientarea raster la 0°, în care s-au depus straturi pe lungimea epruvetelor, evidențiază proprietăți superioare, iar cele mai joase proprietăți au fost obținute pentru o orientare de 45°. De asemenea, ei au observat că direcțiile de rupere ale tuturor epruvetelor au avut loc întotdeauna de-a lungul interfeței stratului.

Caracterizarea la tracțiune a pieselor din Acrilonitril Butadien Stiren (ABS) și Policarbonat (PC) a fost efectuată de Cantrell și colab. [220] pentru a determina gradul de anizotropie prezent în materialele printate 3D. Rezultatele lor, obținute pe componente din ABS, au indicat că orientarea rasterului a avut un efect nesemnificativ asupra modulului lui Young și raportului lui Poisson. Pe de altă parte, orientarea raster a epruvetelor din PC relevă un comportament anizotrop, modulele și forțele variind cu până la 20%.

Dawoud și colab. [221] au investigat efectul unghiului raster și al golului de aer asupra proprietăților mecanice ale epruvetelor din ABS printate prin FDM. Autorii au observat că unghiul raster de -45°/+45° oferă rezistență maximă la tracțiune și impact, iar unghiul raster de 0°/90° oferă cea mai mare rezistență la încovoiere.

Rodríguez-Panes și colab. [222] prezintă un studiu comparativ al comportamentului la tracțiune (tensiunea de curgere la tracțiune, rezistența la tracțiune, deformația nominală la rupere și modulul de elasticitate) a diferitelor piese produse prin tehnica FDM, folosind acidul polilactic (PLA) și ABS. S-a constatat că epruvetele fabricate folosind PLA sunt mai rigide și au o rezistență la tracțiune mai mare decât cele fabricate din ABS. Pe de altă parte, rezultatele obținute cu ABS prezintă o variabilitate mai mică decât cele obținute cu PLA.

Warnung și colab. [223] au caracterizat mecanic, folosind procedeul FDM, 8 tipuri de materiale. Ei au observat că printarea 3D cu fir din Poliamidă (PA) a generat cel mai rezistent material, iar cel mai rigid material a fost produs prin utilizarea unui fir din tereftalat de polietilenă (PET) armat cu fibre de carbon.

2.2. Scopul investigațiilor

Caracterizarea mecanică a componentelor pe bază de PLA, fabricate prin diferite tehnici de fabricație aditivă, este de mare interes în rândul cercetătorilor, dat fiind faptul că proprietățile lor și influența parametrilor de printare sunt încă ambigue. Mai mult, procesul FDM, este departe de nivelul de maturitate și se află în continuă

54 Comportamentul la tracțiune

actualizare/dezvoltare, necesitând o înțelegere mai profundă a comportării mecanice a diferitelor materiale și componente structurale. De exemplu, lucrările [204-206, 212, 213, 224] raportează că cele mai mari proprietăți de întindere sunt obținute pentru orientarea de printare de 0° , în timp ce lucrările [207, 208] susțin că orientarea de printare de 90° oferă cele mai bune proprietăți. Mai mult, Referințele [206-208, 212, 217] raportează că valorile maxime ale proprietăților sunt obținute pentru grosimi mici de strat, iar Referințele [213, 225] subliniază faptul că grosimile mari de strat conduc la proprietăți maxime. Pe de altă parte, Birosz și colab. [215] afirmă că modelul de umplere Honeycomb este mai adecvat, în timp ce Rao și colab. [217] afirmă că modelul Cubic. Și, desigur, exemplele pot continua pentru ceilalți parametri de proces menționați mai sus. Prin urmare, după cum se poate observa în literatura de specialitate, încă există contradicții cu privire la efectul anumitor parametri de proces asupra proprietăților mecanice ale pieselor printate 3D.

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

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

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

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

2.3. Materiale și metode

În această secțiune se prezintă materialele utilizate, geometria și fabricarea epruvetelor, precum și programul experimental.

2.3.1. Materiale

Filamentul de PLA a fost folosit ca material de printare (vezi Figura 2.1). Datorită proprietății sale de a fi printat la o temperatură mai scăzută, materialul PLA este un material termoplastic foarte popular în domeniul printării 3D. Este potrivit pentru aproape toate tipurile de imprimante 3D și este ușor de procesat (nu necesită un pat de printare încălzit).

Alte caracteristici importante sunt date de faptul că materialul PLA este ecologic, non-toxic, biodegradabil (derivat din resurse regenerabile - de exemplu: porumb, grâu sau orez), reciclabil și compostabil. De asemenea, are o contracție scăzută combinată cu rezistență ridicată, rigiditate ridicată și modul de elasticitate înalt [204].



Fig. 2.1. Filamentul din PLA utilizat în evaluarea proprietăților la tracțiune: caracteristici (a) și procesul ambalare-utilizare (b)

Conform specificațiilor furnizorului, principalele caracteristici tehnice ale filamentului PLA sunt prezentate în Tabelul 2.1.

Tabelul 2.1. Specificațiile tehnice ale filamentului PLA

Diametru [mm]	Culoare [-]	Densitate [g/cm ³]	Temp, de printare [°C]	Alungire la rupere [%]	Temperatura de înmuiere [°C]	Rezistența la tracțiune [MPa]	Rezistența la încovoiere [MPa]
1,75	Portocaliu	1,24	190-230	160	50-60	60	108

2.3.2. Proiectarea și fabricarea epruvetelor

Inițial, designul epruvetelor a fost modelat în SolidWorks® (v2019, Dassault Systèmes, Waltham, MA, SUA) și apoi procesat în CURA® v4.3.0 (Ultimaker B.V., Utrecht, Țările de Jos).

Forma și dimensiunile epruvetelor folosite este prezentată în Figura 2.2, cu dimensiuni conform standardului ISO 527-2 [226], care reglementează încercarea de tracțiune a materialelor plastice.

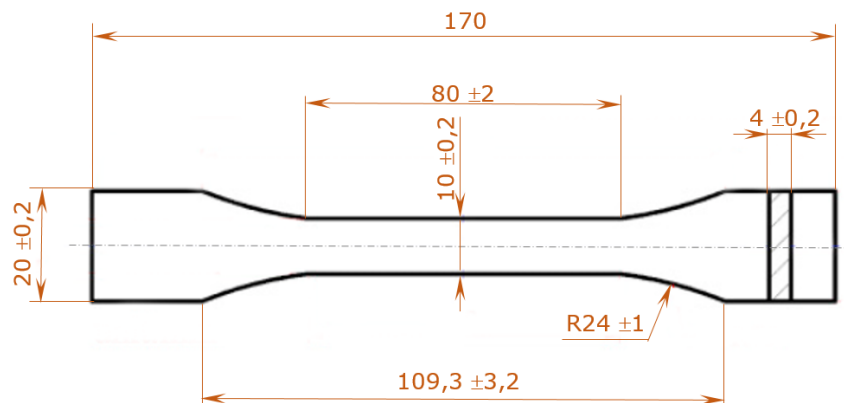


Fig. 2.2. Dimensiunile epruvetelor de tracțiune printate 3D (în mm)

56 Comportamentul la tracțiune

Semnificațiile dimensiunilor din Figura 2.2 sunt următoarele:

- 170 mm - lungimea totală a epruvetei;
- $80 \pm 2\text{ mm}$ - lungimea porțiunii calibrate a epruvetei (lungimea porțiunii de secțiune constantă în limitele toleranțelor prescrise);
- $10 \pm 0,2\text{ mm}$ - dimensiunea inițială mai mare a secțiunii transversale dreptunghiulare în partea centrală a epruvetei (lățimea inițială a epruvetei în porțiunea calibrată);
- $4 \pm 0,2\text{ mm}$ - dimensiunea inițială mai mică a secțiunii transversale dreptunghiulare în partea centrală a epruvetei (grosimea inițială a epruvetei);
- $20 \pm 0,2\text{ mm}$ - lățimea inițială a epruvetei în zona de prindere/fixare în bacurile mașinii de testat;
- $R24 \pm 1\text{ mm}$ - raza de racordare între porțiunea calibrată a epruvetei și zona de prindere/fixare în bacurile mașinii de testat;

Ulterior, epruvetele au fost fabricate cu o imprimantă comercială FDM Infitary i3 (Figura 2.3).

FDM este unul dintre procesele de imprimare 3D cu pierderi reduse, care se bazează pe conceptul de fabricație aditivă. Principalul avantaj al FDM față de alte procese de fabricare aditivă este că nu necesită solvenți organici și nici îndepărtarea ulterioară a excesului de polimeri [227].

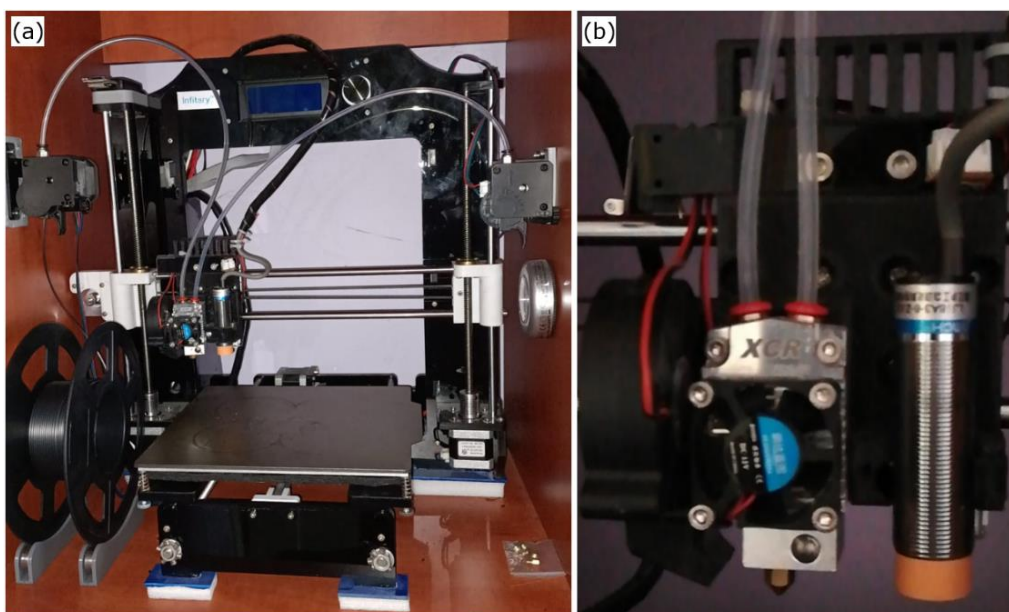


Fig. 2.3. Vedere de ansamblu a imprimantei Infitary i3 (a) cu detaliu pe doza de printare (b)

Tabelul 2.2 prezintă parametrii de configurare a imprimantei, utilizați în procesul de fabricație a epruvetelor.

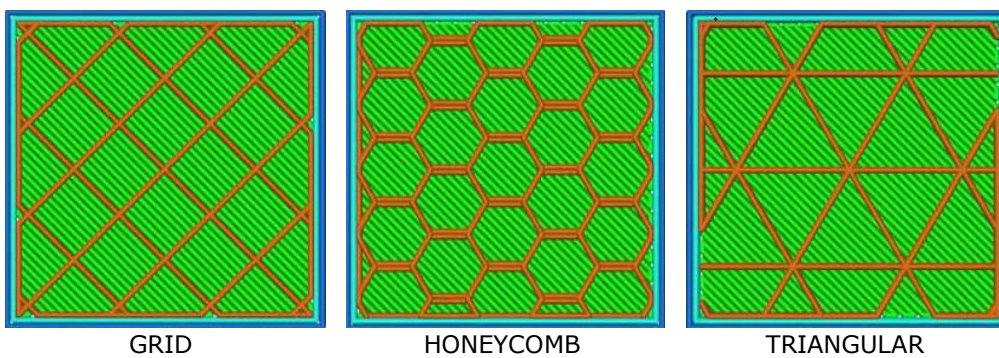
Tabelul 2.2. Parametrii de proces utilizați în procesul de fabricație a epruvetelor

Parametru	Abreviere	Unitate de măsură	Valoare
Diametrul duzei	DD	[mm]	0,6
Grosimea stratului	GS	[mm]	0,10; 0,15; 0,20
Număr straturi exterioare	NSE	[-]	1; 2; 3
Straturi superioare solide	SSS	[-]	4
Straturi inferioare solide	SIS	[-]	4
Temperatura duzei	TD	[°C]	200; 210; 220
Temperatura patului	TP	[°C]	42
Rezoluția stratului	RS	[mm]	0,05-0,3
Precizia poziționării	PP	[mm]	X/Y 0,0125; Z 0,002
Cantitatea extruderului	CE	[-]	simplu
Viteza de printare	VP	[mm/s]	20; 40; 60
Densitatea de umplere	DU	[%]	40; 70; 100
Model de umplere	MU	[-]	GR; HC; TR
Orientare printării	OP	[°]	0; 45; 90
Viteza duzei	VD	[mm/s]	100

Influența principalilor parametri de proces (densitatea de umplere, modelul de umplere, orientarea epruvetelor în plan, grosimea stratului, viteza de printare, numărul de straturi exterioare și temperatura duzei) asupra proprietăților la tracțiune este investigată în detaliu.

Figura 2.4 prezintă imagini detaliate cu privire la modelul de umplere, densitatea de umplere, orientarea epruvetelor în plan, grosimea stratului și numărul de contururi.

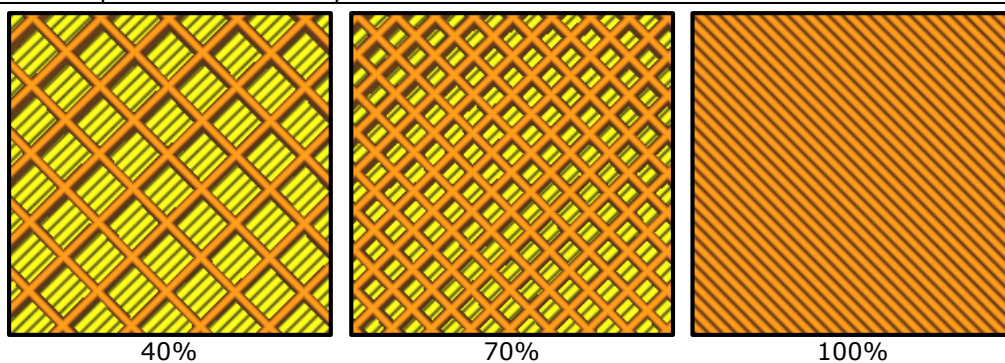
Parametrii de proces investigați în acest capitol sunt definiți în Secțiunea 1.3.2.



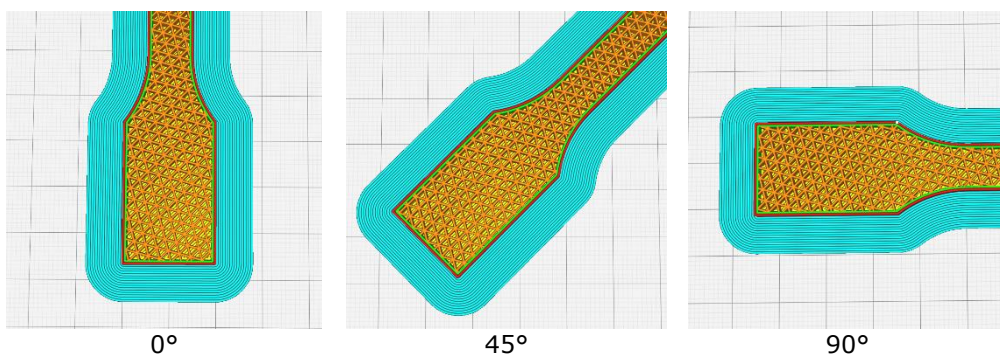
a) modelul de umplere

Fig. 2.4. Parametrii de proces investigați pentru epruvetele PLA printate 3D

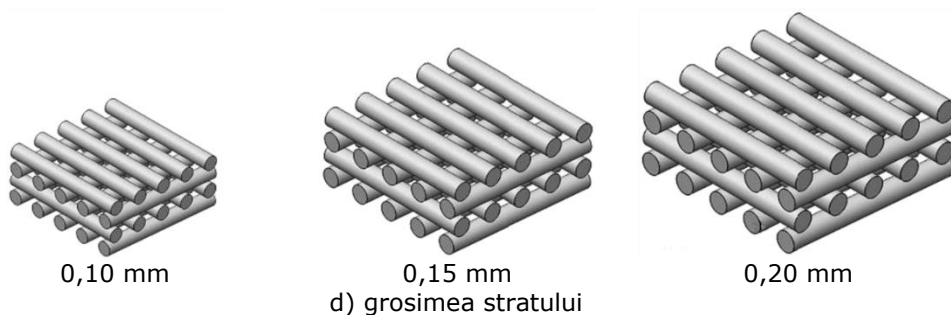
58 Comportamentul la tracțiune



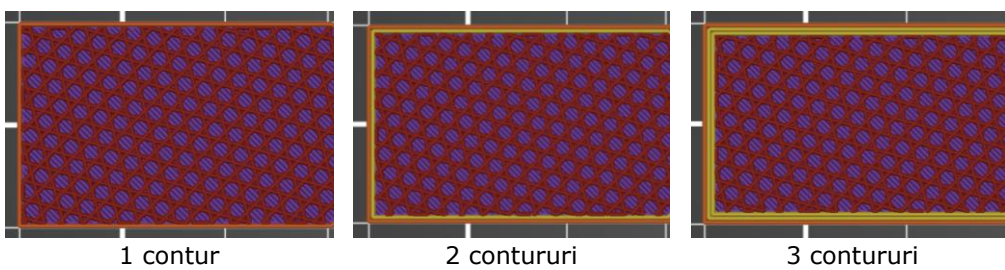
b) densitatea de umplere



c) orientarea epruvetelor în plan



d) grosimea stratului



e) numărul de straturi exterioare (contururi)

Fig. 2.4. (Continuare)

2.3.3. Analiza dimensională

Toate epruvetele printate au fost supuse unui control de calitate, în care au fost măsurate cu un șubler digital, cu o precizie de 0,01 mm. În acest sens, epruvetele fabricate au fost validate înainte de testare, din punct de vedere constructiv și dimensional.

Grosimile și lățimile rezultate în urma procesului de printare 3D au fost prelucrate statistic. Ulterior, acele epruvete ale căror erori erau în afara $\pm 5\%$ au fost considerate neconforme și au fost înlocuite.

2.3.4. Programul experimental

În acest capitol, sunt evaluate proprietățile la tracțiune ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM.

Prin urmare, etapa experimentală cuprinde o serie de încercări de tracțiune cvasi-stactice efectuate pe epruvete "dublu T" sau "os de câine" (*dog-bone*) de diferite configurații (vezi Secțiunea 2.2.2), urmând standardul ISO 527-2 [226].

Testele experimentale au fost efectuate la temperatura camerei pe mașina universală de testare Zwick Roell 005 de 5 kN (Figura 2.5).



Fig. 2.5. Mașina universală de testare Zwick Roell 005 de 5 kN

Figura 2.6 prezintă fixarea epruvetelor în dispozitivul mașinii de testare, înainte (Figura 2.6a) și după (Figura 2.6b) efectuarea testului de tracțiune.

Încercările de tracțiune au fost efectuate în controlul deplasării, cu o viteză de încărcare de 2 mm/min.

Pentru a asigura cea mai bună reproductibilitate posibilă a rezultatelor obținute, au fost testate patru epruvete pentru fiecare configurație individuală. Numărul total de probe testate în timpul investigațiilor a fost de 98.

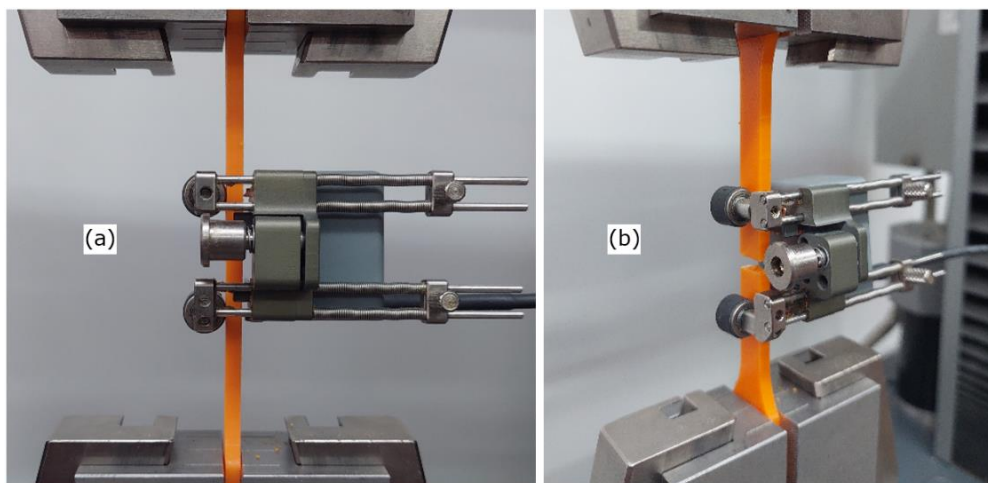


Fig. 2.6. Proba de tracțiune în dispozitivul de fixare al mașinii de testare: înainte (a) și după (b) încercarea de tracțiune

2.3.5. Definirea proprietăților

Încercarea la tracțiune se efectuează aplicând unei epruvete de dimensiuni standardizate (vezi Figura 2.2) o forță axială F crescătoare, până la ruperea epruvetei, măsurând (înregistrând) variațiile corespunzătoare ale lungimii ei (lungimea δ) [228]. Astfel, în urma încercărilor de tracțiune cvasi-statică s-au obținut curbele F - δ . Ulterior, folosind parametrii geometrici ai epruvetelor (lățimea și grosimea), curbele forță-deplasare au fost transformate în curbe tensiune (σ)-deformație (ε) [229, 230]. Tensiunea σ este egală cu raportul dintre forța axială instantanee (sau sarcina aplicată) și aria secțiunii transversale inițiale a epruvetei. Pentru a se diferenția de tensiunea reală legată de secțiunea transversală reală a epruvetei, această tensiune este numită frecvent „tensiune inginerescă” (*engineering stress*). De cealaltă parte, deformația ε este egală cu raportul dintre deformația δ a epruvetei și lungimea inițială (l_0) între reperele marcate pe epruvetă înainte de încercare.

Astfel, cu ajutorul curbelor σ - ε s-au determinat următoarele proprietăți la tracțiune ale epruvetelor:

- *rezistența la tracțiune* (σ_m): tensiunea corespunzătoare primului maxim local observat în timpul încercării de tracțiune. Cu alte cuvinte, rezistența la tracțiune este tensiunea maximă care poate fi suportată de materialul epruvetei. În unele cazuri, acesta poate fi asociată, de asemenea, cu tensiunea la care epruveta cedează sau se rupe. Este exprimată în megapascali (MPa).
- *deformația corespunzătoare rezistenței la tracțiune* (ε_m): deformația la care se atinge rezistența maximă a epruvetei. Este exprimat ca raport adimensional (-) sau ca procent (%).
- *tensiunea la rupere* (σ_b): tensiunea la care epruveta supusă testării se rupe. Este cea mai mare valoare a tensiunii pe curba σ - ε , chiar înainte de separarea epruvetei, adică direct înainte de căderea forței cauzată de inițierea fisurii. Este exprimată în megapascali (MPa).
- *deformația corespunzătoare tensiunii la rupere* (ε_{tb}): deformarea nominală la ultimul punct al datelor înregistrat înainte ca tensiunea să fie redusă la mai puțin

sau egal cu 10% din rezistență ($\sigma \leq 10\% \cdot \sigma_m$), dacă ruperea are loc după curgere. Este exprimată ca raport adimensional (-) sau ca procent (%).

- *energia de rupere* (G_f): este dată de aria de sub curba σ - ε și este calculată ca integrala curbei σ - ε luată de la deformația zero (ε_0) la deformația corespunzătoare tensiunii la rupere ε_{tb} [226]. Este exprimată în MJ/m³.

2.4. Procesul de optimizare

În această secțiune sunt descrise, analizate, discutate în detaliu și comparate cu literatura de specialitate efectele parametrilor de proces (modelul de umplere, densitatea de umplere, orientarea printării, grosimea stratului, viteza de printare, temperatura duzei și numărul de straturi exterioare) asupra comportamentului la tracțiune al epruvetelor din PLA printate cu tehnologia FDM.

2.4.1. Evaluarea dimensională

Fiecare parametru dimensional (grosime și lățime) este reprezentat ca o medie a cel puțin patru măsurători. Totuși, pentru a evidenția cât mai obiectiv efectul parametrilor de printare asupra celor geometrice ai epruvetelor, statisticile prezentate iau în considerare toate epruvetele fabricate.

Având în vedere dimensiunile reale și nominale ale epruvetelor, eroarea procentuală (EP) pentru fiecare parametru liniar menționat a fost calculată folosind Ecuația (2.1) [231].

$$EP [\%] = \frac{|V_R - V_N|}{V_N} \times 100 \quad (2.1)$$

unde V_R este valoarea reală și V_N este valoarea nominală. V_R reprezintă dimensiunea măsurată a parametrului geometric, iar V_N este dimensiunea definită în faza de proiectare (aici, 4 mm pentru grosime și 10 mm pentru lățime).

Figura 2.7 prezintă erorile relative de grosime și lățime ale epruvetelor din PLA printate în funcție de modelul de umplere și densitatea de umplere. Pentru a face o comparație mai bună, a fost folosită aceeași scară verticală de 5%.

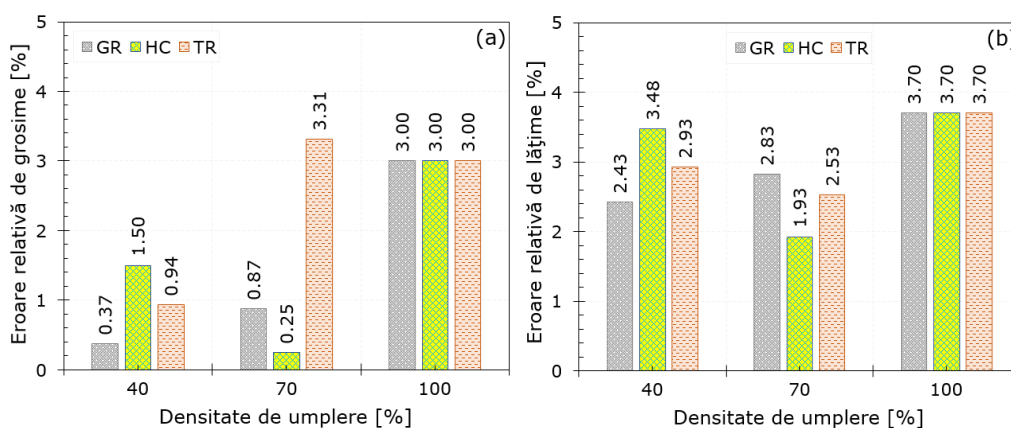


Fig. 2.7. Erorile relative de grosime (a) și lățime (b) ale epruvetelor din PLA printate în funcție de modelul de umplere și densitatea de umplere

62 Comportamentul la tracțiune

Ca o observație generală, nici o epruvetă nu a prezentat eroarea zero pentru cele două dimensiuni investigate. Mai mult, indiferent dacă se ia în considerare modelul de umplere sau densitatea de umplere, erorile geometrice de grosime și lățime arată diferențe semnificative între configurațiile epruvetelor. În general, s-a observat că erorile de lățime sunt mai mari decât erorile de grosime. Se pare că dimensiunea redusă a epruvetelor (grosimea) este mai ușor de realizat la o precizie mai mare.

În ceea ce privește parametrul densității de umplere, cele mai grupate erori ale modelelor de umplere investigate (GR, HC și TR), se regăsesc în cazul lățimii probelor (30,22% pentru densitatea de umplere de 40% și 31,86% pentru densitatea de umplere de 70%). Pe de altă parte, cele mai dispersate erori, de 75% pentru densitatea de umplere de 40% și de 92,45% pentru densitatea de umplere de 70%, se observă în cazul grosimii epruvetelor. Se pare că pe măsură ce crește gradul de umplere, cresc și erorile relative ale dimensiunilor. În plus, modelul de umplere HC prezintă cele mai mari erori de grosime la o densitate de umplere de 40% (1,5%), iar modelul TR la densitatea de umplere de 70% (3,31%). Erorile maxime de lățime la densitățile de umplere de 40% și 70% sunt reprezentate de modelele de umplere HC (3,48%) și, respectiv, GR (2,83%). Desigur, discuțiile prezentate nu includ densitatea de umplere 100% deoarece în acest caz toate epruvetele au aceleași caracteristici, iar observațiile ar fi irelevante.

Erorile relative de grosime și lățime ale epruvetelor fabricate, pentru densitățile de umplere de 70 și 100%, sunt prezentate în Figura 2.8 în funcție de parametrul de orientare a printării.

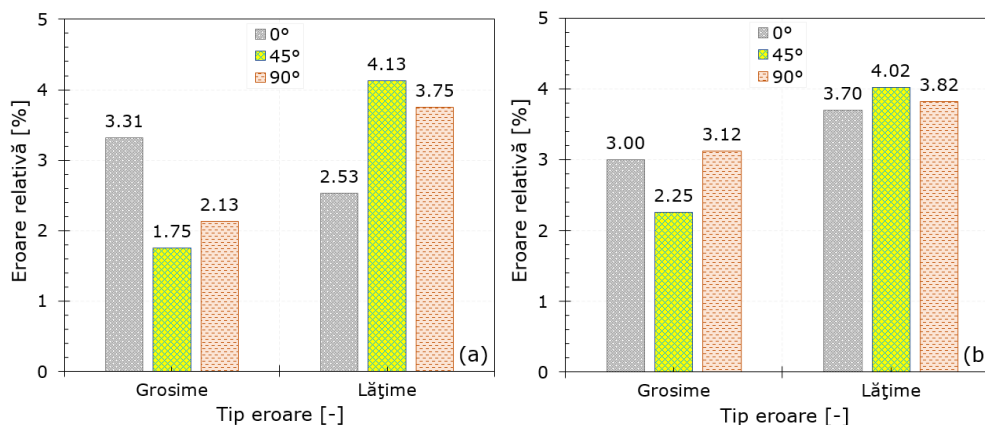


Fig. 2.8. Erorile relative de grosime și lățime ale epruvetelor din PLA în funcție de orientarea printării, pentru densități de umplere de 70% (a) și 100% (b)

Similar cu cazul precedent (modelul de umplere și densitatea de umplere), erorile de lățime sunt mai mari decât erorile de grosime. Excepție de la această regulă fac doar epruvetele printate la un unghi de 0° și o densitate de umplere de 70%, care au erori de grosime cu 23,77% mai mari decât erorile de lățime.

Din Figura 2.8 se poate observa că epruvetele printate la 45° au cele mai mici erori de grosime, în timp ce cele mai mari sunt obținute la 0° (pentru densitatea de umplere de 70%) (Figura 2.8a) și 90° (pentru densitatea de umplere de 100%)

(Figura 2.8b). Dimpotrivă, erorile de lățime sunt minime la 0° și maxime la 45° pentru ambele densități de umplere. Pentru ambii parametri geometrici (grosime și lățime), erorile legate de direcția de 45° se încadrează între celelalte două orientări de printare (0° și 45°).

Figura 2.9 prezintă erorile relative de grosime și lățime ale epruvetelor din PLA, printate 3D, în funcție de grosimea stratului, viteza de printare, temperatura duzei și numărul de straturi exterioare. Erorile arată aproximativ aceeași tendință, așa că vor fi discutate împreună, urmând ca, acolo unde este cazul, discuțiile să fie particularizate.

Toți cei patru parametri ai procesului (grosimea stratului, viteza de printare, temperatura duzei și numărul de straturi exterioare) influențează, într-o măsură mai mare sau mai mică, acuratețea dimensională a epruvetelor printate. Cu toate acestea, dimensiunea grosimii epruvetelor este mai afectată decât dimensiunea lățimii. Acest aspect se vede foarte ușor din valorile mult mai mari ale erorilor de grosime față de cele de lățime. Cele mai mari erori de grosime ajung până la 11,08% (Figura 2.9b), însă cele de lățime nu depășesc pragul de 3,1% (Figura 2.9d).

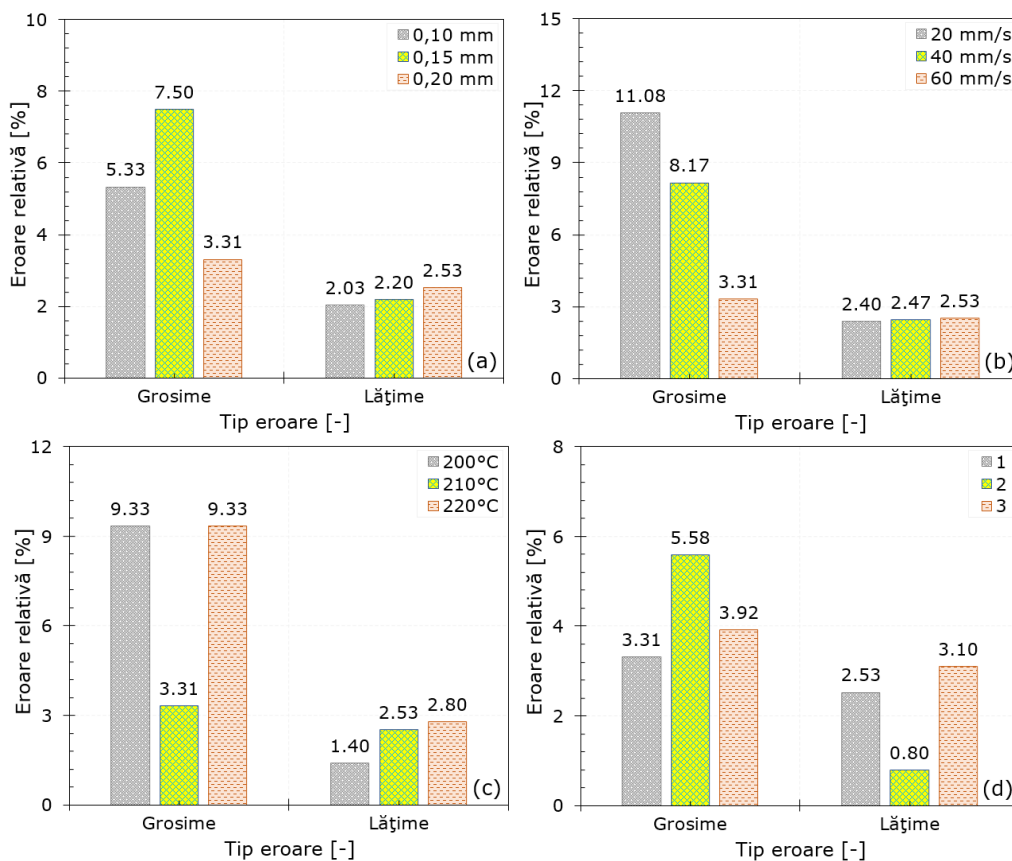


Fig. 2.9. Erorile relative de grosime și lățime ale epruvetelor din PLA în funcție de grosimea stratului (a), viteza de printare (b), temperatura duzei (c) și numărul de straturi exterioare (d)

Erorile de grosime sunt cele mai influențate de parametrii procesului, cum ar fi viteza de printare (Figura 2.9b) și temperatura duzei (Figura 2.9c), iar erorile de grosime - de parametrii temperatura duzei (Figura 2.9c) și numărul de straturi exterioare (Figura 2.9d). În plus, indiferent de parametrul investigat (grosimea stratului, viteza de printare, temperatura duzei sau numărul de straturi exterioare), erorile de grosime sunt cele mai dispersate (de exemplu, până la $\pm 3,93\%$ diferență pentru viteza de printare, Figura 2.9b), în timp ce erorile de lățime arată doar o ușoară discrepanță în cazul numărului de straturi exterioare ($\pm 1,20\%$ diferență, Figura 2.9d). În plus, grosimea stratului (diferență de $\pm 0,25\%$, Figura 2.9a) și viteza de printare (diferență de $\pm 0,06\%$, Figura 2.9b) prezintă aproximativ aceleași erori de lățime pentru toate epruvetele printate.

2.4.2. Evaluarea proprietăților filamentului din PLA

Inițial, s-au efectuat teste mecanice de tracțiune pe filamentul PLA în stare brută. Datorită noutății procesului de fabricație FDM, în prezent nu există standarde specifice pentru testarea filamentelor. Filamentul utilizat este furnizat sub formă de fire solide cu diametrul de 1,75 mm în bobine, iar încercările de tracțiune au fost efectuate prin aplicarea directă a forțelor pe filamente. Pentru a obține reproductibilitatea rezultatelor, au fost testate șase epruvete, de 125 mm lungime, prelevate din bobina de filament.

În Figura 2.10 sunt prezentate curbele tensiune-deformație și energie de rupere-deformație obținute din încercările de tracțiune ale filamentului din PLA.

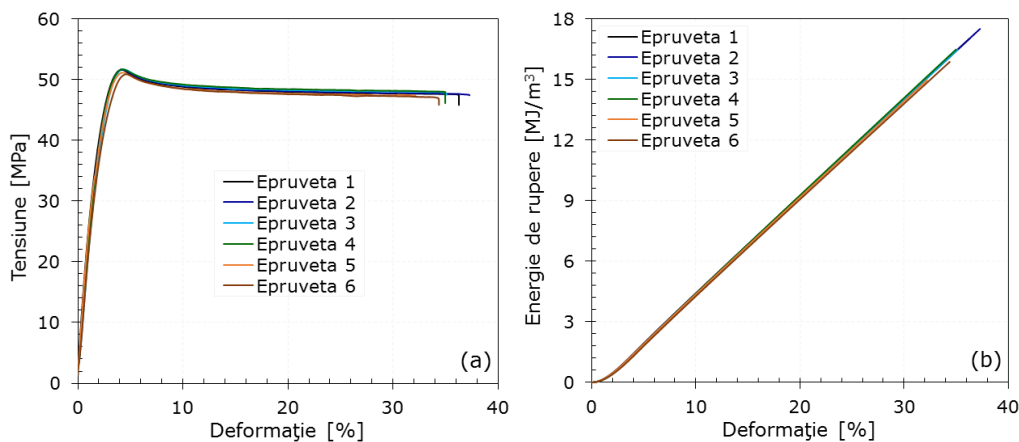


Fig. 2.10. Curbele tensiune-deformație și energie de rupere-deformație ale filamentului din PLA

Toate cele șase curbe se suprapun în mare măsură, ceea ce indică o repetabilitate foarte bună a rezultatelor. Acest lucru este evidențiat și de proprietățile determinate pentru fiecare probă individuală (Tabelul 2.3). Cele mai mici abateri standard, de 0,35%, se întâlnesc în cazul rezistenței la tracțiune, iar cele mai mari în cazul alungirii la rupere (1,75%).

Tabelul 2.3. Proprietățile la tracțiune ale filamentului din PLA

Numărul epruvetei	σ_m [MPa]	ε_m [%]	σ_b [MPa]	ε_{tb} [%]	G_f [MJ/m ³]
1	51,62	4,20	45,81	36,28	17,02
2	51,68	4,25	47,41	37,28	17,50
3	51,70	4,29	47,51	35,12	16,47
4	51,69	4,29	46,11	34,98	16,48
5	51,15	4,31	47,23	32,18	14,95
6	50,88	4,63	45,84	34,37	15,87

Figura 2.11 prezintă valoarea medie a principalelor proprietăți mecanice (rezistența la tracțiune, tensiunea la rupere, alungirea/deformația la rupere și energia de rupere) rezultate în urma testării la tracțiune a filamentului din PLA.

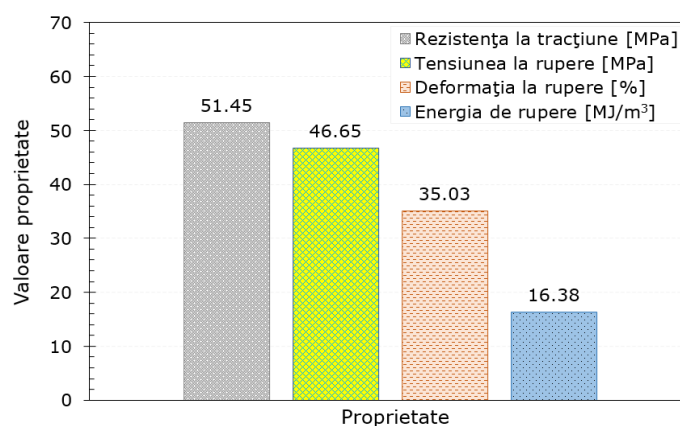


Fig. 2.11. Valoarea medie a principalelor proprietăți la tracțiune ale filamentului din PLA

După cum se poate observa, datele obținute pentru filamentul din PLA în urma testelor de tracțiune (Tabelul 2.3 și Figura 2.11) sunt destul de diferite de cele furnizate de producător (Tabelul 2.1). Rezistența la tracțiune obținută experimental este cu 14,25% mai mică decât cea asigurată de producător, în timp ce alungirea la rupere este cu aproximativ 78,1% mai mică. Acest lucru se poate datora diferențelor dintre procedurile de testare, precum și îmbătrânirii filamentului.

2.4.3. Evaluarea proprietăților epruvetelor din PLA printate

În acest subcapitol se prezintă efectul parametrilor de proces asupra comportamentului la tracțiune al epruvetelor din PLA, printate prin tehnologia FDM.

2.4.3.1. Efectul modelului de umplere

Tipul modelului de umplere influențează în cea mai mare parte proprietățile mecanice ale epruvetelor, dar și precizia dimensională și greutatea acestora. Prin urmare, identificarea unui model de umplere optim este necesară pentru a obține piese cu un raport greutate/proprietate cât mai mic. După cum s-a menționat anterior, pentru această analiză au fost luate în considerare trei modele de umplere, și anume: Grid, Honeycomb și Triangular (Figura 2.12).

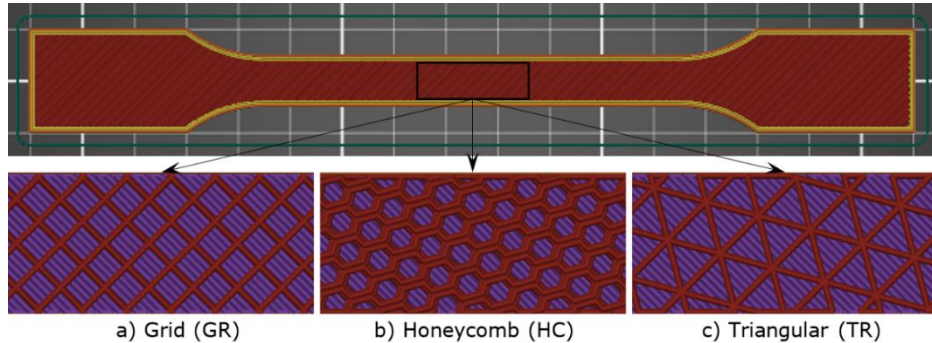


Fig. 2.12. Modelele de umplere investigate pentru densitatea de umplere de 40%

Pentru toate cele trei modele de umplere se fac comparații la densități de umplere de 40% și 70%. De departe, Grid este cel mai folosit model, autorii alegând încă două modele de umplere (Honeycomb și Triangular) care pot crește proprietățile epruvetelor. Curbele reprezentative tensiune-deformație și energie de rupere-deformație, pentru diferite modele de umplere, sunt prezentate în Figura 2.13.

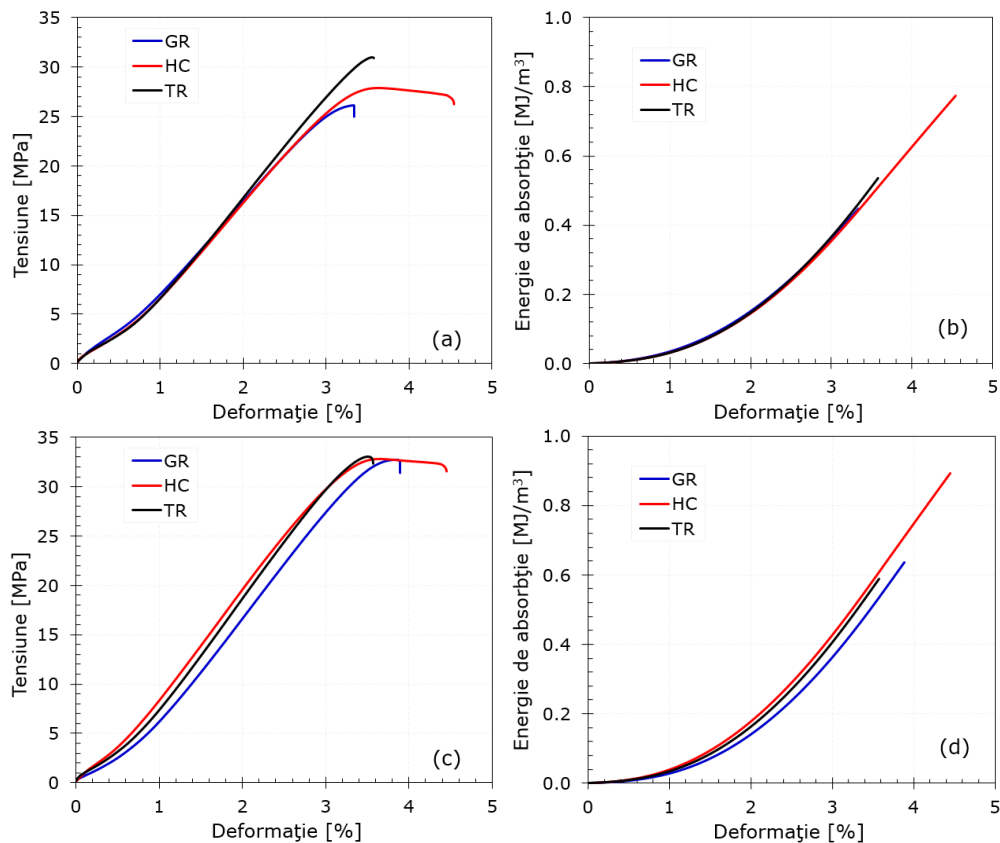


Fig. 2.13. Curbele tensiune-deformație și energie de absorbție-deformație ale epruvetelor din PLA pentru densitățile de umplere de 40% (a, b) și 70% (c, d). Efectul modelului de umplere

2.4. Procesul de optimizare 67

Curbele tensiune-deformație evidențiază o zonă scurtă de așezare (între 0-0,5% deformație), urmată de o zonă liniar-elastică extinsă (0,5-3,2% deformație). Curbele caracteristice la tracțiune se termină cu o tensiune maximă premergătoare ruperii epruvetelor. Pe baza rezultatelor obținute se poate afirma că materialul testat este cvasi-fragil, în special pentru modelele de umplere Grid și Triangular. Modelul de umplere Honeycomb descrie comportamentul tipic de curgere al materialului. Curbele energiei de rupere se suprapun aproape complet pentru toate cele trei modele de umplere. Totuși, diferența este făcută de valoarea lor maximă. Cea mai mare cantitate de energie până la rupere este absorbită de modelul de umplere Honeycomb. În comparație cu modelele Grid și Triangular, epruvetele fabricate cu model Honeycomb absorb până la 33% (pentru densitatea de umplere de 40%) și 46% (pentru densitatea de umplere de 70%) mai multă energie. Epruvetele cu modelul de umplere Honeycomb stochează mai multă energie din cauza zonei plastice extinse.

Tabelul 2.4 prezintă valorile rezistențelor (rezistența la tracțiune și tensiunea la rupere), deformațiilor (deformațiile corespunzătoare rezistenței la tracțiune și tensiunii la rupere) și energiei la rupere funcție de modelul și densitatea de umplere.

Tabelul 2.4. Efectul modelului de umplere și densității de umplere asupra principalelor proprietăți la tracțiune ale epruvetelor din PLA printate prin FDM

DU [%]	MU [-]	σ_m [MPa]	ε_m [%]	σ_b [MPa]	ε_{tb} [%]	G_f [MJ/m ³]
40	Grid	26,59	3,76	27,51	4,02	0,60
		27,75	3,61	27,60	3,75	0,53
		26,11	3,33	24,96	3,33	0,45
		25,89	3,43	25,88	3,44	0,45
	Honeycomb	29,20	3,46	28,14	4,21	0,71
		29,32	3,56	28,80	3,68	0,58
		27,83	3,64	26,19	4,54	0,77
		30,52	3,88	29,41	4,59	0,84
	Triangular	28,33	3,35	28,02	3,37	0,48
		31,00	3,55	30,93	3,58	0,54
		29,70	3,26	29,34	3,26	0,46
		29,70	3,27	29,45	3,31	0,44
70	Grid	31,88	3,74	31,82	3,84	0,65
		32,27	3,71	31,01	3,89	0,67
		31,74	3,84	31,40	3,89	0,64
		31,70	3,85	31,50	4,23	0,77
	Honeycomb	31,82	3,66	30,55	4,45	0,89
		31,51	3,74	30,68	4,83	1,02
		31,14	4,01	30,98	4,95	1,03
		33,74	3,86	32,93	5,49	1,22
	Triangular	33,06	3,51	32,35	3,57	0,59
		32,20	3,33	31,49	3,36	0,50
		32,42	3,48	31,27	3,57	0,58
		31,19	3,50	30,87	3,55	0,56

68 Comportamentul la tracțiune

Figura 2.14 prezintă variația rezistenței la tracțiune (σ_m) și a tensiunii la rupere (σ_b) a epruvetelor printate pentru densitățile de umplere de 40% și 70%. Graficele sunt prezentate pe aceeași scară de tensiune (50 MPa) pentru a face posibilă o comparație mai ușoară a rezultatelor experimentale.

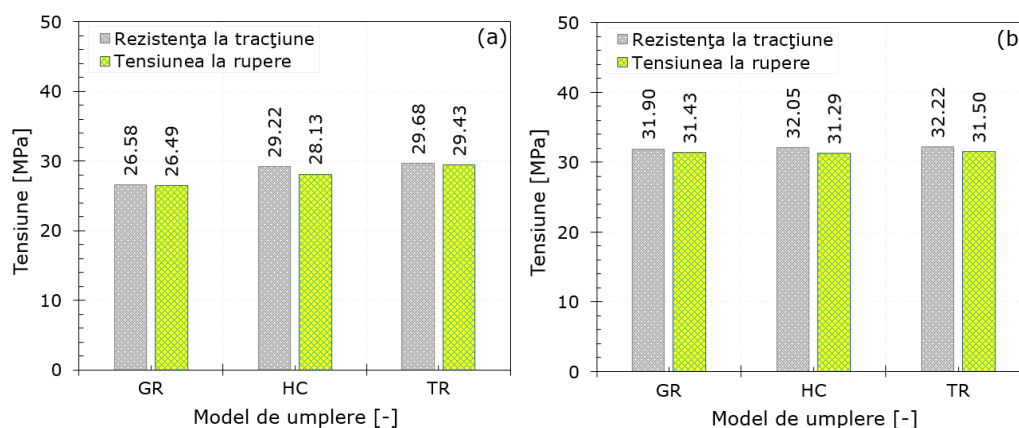


Fig. 2.14. Variația rezistenței la tracțiune și a tensiunii la rupere a epruvetelor din PLA pentru densitățile de umplere de 40% (a) și 70% (b). Efectul modelului de umplere

Datorită aceluiași grad de densitate de umplere a probelor (40% sau 70%), doar modelul de umplere a afectat rezistența la tracțiune a epruvetelor. La o densitate de umplere scăzută (40%), modelele Triangular și Honeycomb conduc la epruvete cu rezistență mai mare, ambele evidențiind o valoare a rezistenței la tracțiune de peste 29 MPa. Totuși, modelul de umplere Triangular arată valori puțin mai mari (cu 1,5%) decât modelul Honeycomb. La polul opus, modelul Grid are o valoare a rezistenței la tracțiune de numai 26,58 MPa, cu aproximativ 10% mai mică decât celelalte două modele. Odată cu creșterea densității de umplere la 70%, se observă că cele mai bune valori ale rezistenței la tracțiune se obțin în cazul modelului Triangular, urmat în ordine de modelele Honeycomb și Grid. Oarecum, ordinea valorilor este cea de la densitatea de umplere de 40%. Cu toate acestea, toate modelele investigate (Grid, Honeycomb și Triangular), la o densitate de umplere de 70%, au o rezistență la tracțiune aproape similară (sub 1% diferență între ele). Aceasta înseamnă că greutatea epruvetelor poate fi redusă la minimum prin alegerea unui model de umplere adecvat, fără a sacrifica rezistența acestora. Tensiunea la rupere urmează aceeași tendință ca și rezistența la tracțiune și este puțin mai mică decât aceasta.

Alafaghani și colab. [232] au arătat că modelele de umplere (Diamond, Linear și Hexagonal) nu au aproape nici o influență asupra proprietăților la tracțiune pentru materialul PLA printat. Mai precis, ei au observat că modelele de umplere Diamond și Linear dau aceeași valoare a rezistenței la tracțiune (doar 0,09% diferență în favoarea modelului Diamond), în timp ce modelul Hexagonal arată o valoare nesemnificativ mai mare (de 2,6%). Pe de altă parte, Dave și colab. [233] au raportat că piesele din PLA printate cu modele Rectilinear și Concentric prezintă diferențe ale rezistenței la tracțiune de numai 0,8%, în timp ce piesele printate cu modelul Hilbert Curve prezintă proprietăți mai slabe cu 17,9%. De asemenea, Priya și colab. [234] au remarcat că rezistența la tracțiune a epruvetelor printate cu modelul Triangular este mai mare cu

13,2% decât cea a epruvetelor printate cu modelul Rectilinear. Rodríguez-Reyna și colab. [235] au folosit epruvete de tracțiune din PLA cu modele de umplere Tridimensional, Hexagonal și Linear și au concluzionat că modelul Linear prezintă cea mai mare rezistență la tracțiune. Autorii au remarcat că diferențele dintre Linear-Hexagonal și Linear-Tridimensional sunt de 3,8%, respectiv 32,9%. Recent, Singh și colab. [214] au raportat că epruvetele din PLA fabricate cu modelul de umplere Concentric au prezentat o rezistență la tracțiune mai mare decât cele obținute cu modelele Triangular (cu 14,6%) și Grid (cu 20,1%).

2.4.3.2. Efectul densității de umplere

Deoarece densitatea de umplere este procentul din volumul de umplere cu material filamentar, masa și capacitatea portantă a componentelor printate depind considerabil de aceasta. Figura 2.15 prezintă densitățile de umplere investigate (40, 70 și 100%) pentru unul dintre modelele de umplere.

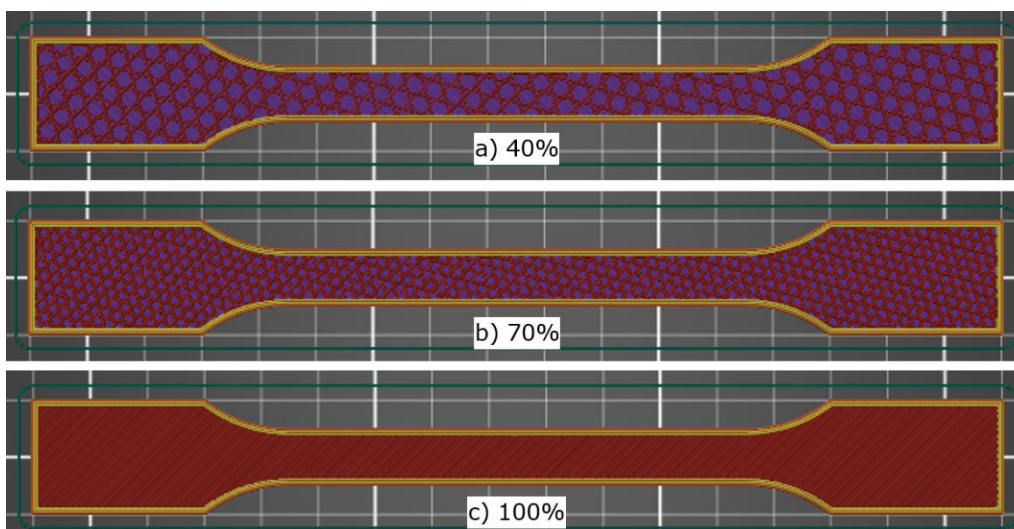


Fig. 2.15. Densitățile de umplere investigate: 40% (a), 70% (b) și 100% (c)

Figura 2.16 prezintă curbele tensiune-deformație și energie de rupere-deformație pentru fiecare model de umplere investigat (GR, HC și TR) cu trei densități de umplere diferite (40, 70 și 100%).

Din Figura 2.16 se poate observa că o gamă largă de tensiuni (între 26-53 MPa) au fost aplicate pentru a rupe modelele de umplere GR, HC și TR ale epruvetelor printate. Fiecare epruvetă s-a fisurat, și ulterior s-a rupt la o anumită tensiune aplicată, ceea ce înseamnă că modelul de umplere și densitatea de umplere dictează, într-o oarecare măsură, comportamentul lor mecanic. În cazul efectului modelului de umplere, contrar celor prezentate în Figura 2.13, curbele tensiune-deformație și energie de rupere-deformație prezintă diferențe semnificative, vizibile nu numai în mărimea valorii maxime, ci și în panta curbelor. Indiferent de tipul modelului de umplere, odată cu creșterea densității de umplere de la 40 la 100%, se obține o creștere a pantei curbelor tensiune-deformație și energie de rupere-deformație. Astfel, creșterea densității de umplere are ca rezultat o creștere atât a rezistenței, cât

70 Comportamentul la tracțiune

și a rigidității epruvetelor printate din PLA. Epruvetele cu modele de umplere GR și TR prezintă valori aproximativ egale ale energiei de rupere la aceeași densitate de umplere. Totuși, indiferent de valoarea densității de umplere, epruvetele cu model HC absorb energii de rupere cu până la 46% mai mari decât celelalte două configurații.

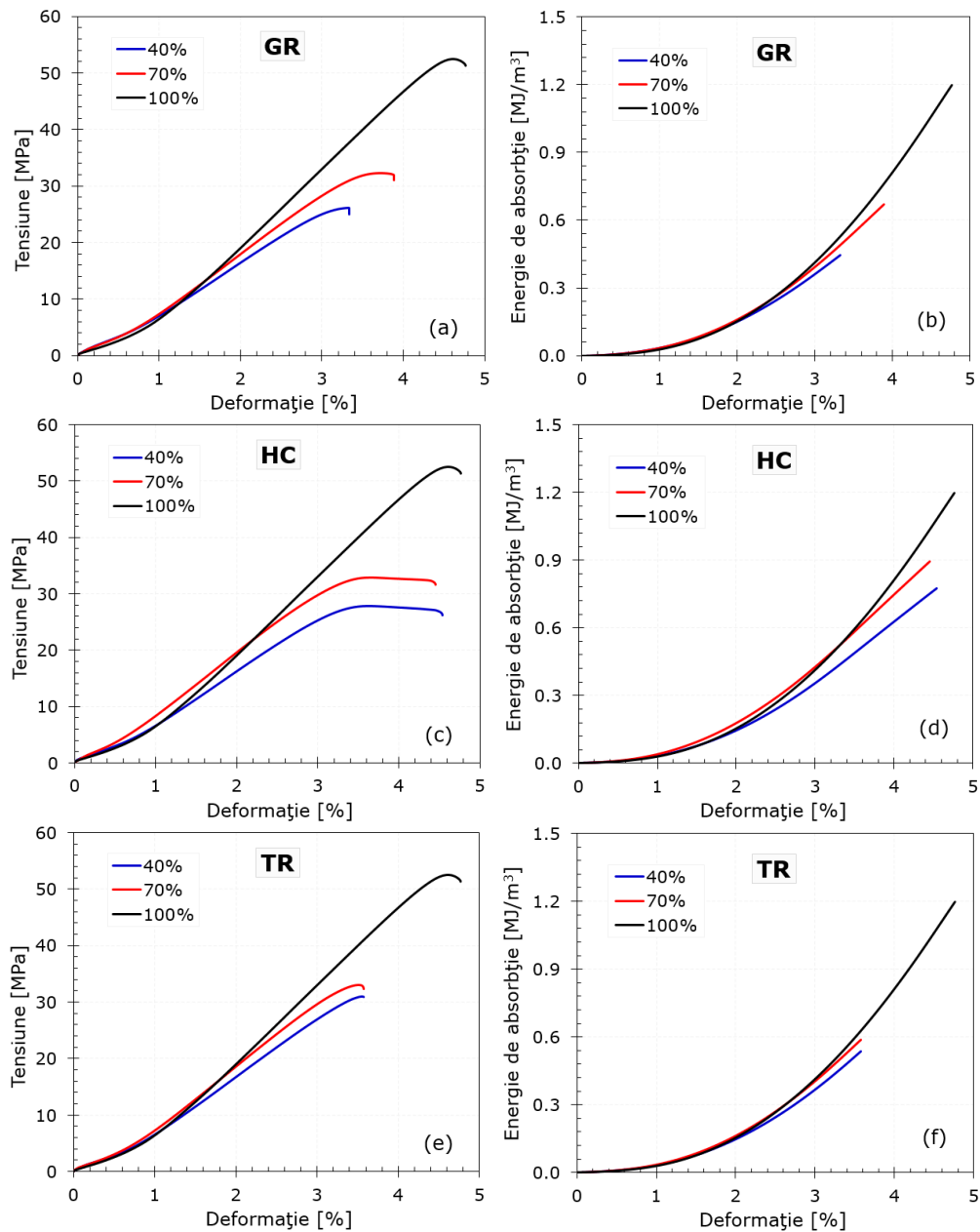


Fig. 2.16. Curbele tensiune-deformație și energie de absorbție-deformație ale epruvetelor din PLA pentru modelele de umplere de GR (a, b), HC (c, d) și TR (e, f).
Efectul densității de umplere

2.4. Procesul de optimizare 71

Pe baza rezultatelor experimentale obținute în funcție de densitatea de umplere, valorile medii ale rezistenței la tracțiune și tensiunii la rupere pentru epruvetele printate sunt prezentate în Figura 2.17. Variațiile proprietăților de rezistență sunt prezentate pentru fiecare configurație de model. Mai mult, se arată cum densitatea de umplere poate afecta mai mult sau mai puțin rezistența epruvetelor printate cu diferite modele de umplere.

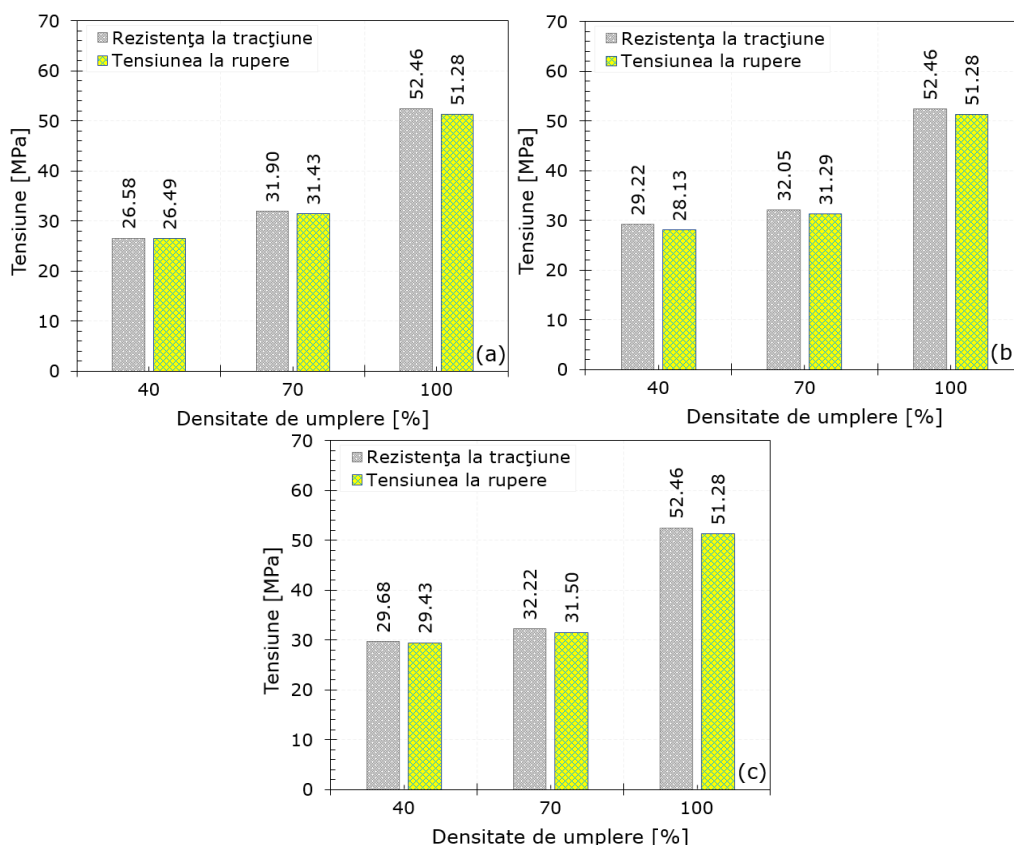


Fig. 2.17. Variația rezistenței la tracțiune și a tensiunii la rupere a epruvetelor din PLA pentru modelele de umplere de GR (a), HC (b) și TR (c). Efectul densității de umplere

Figurile 16 și 17 arată rezistența redusă a epruvetelor cu densitate de umplere scăzută (40 și 70%), dar prin ajustarea parametrilor de printare, în acest caz modelul de umplere adecvat, este posibilă creșterea proprietăților de rezistență. Rezultatele au arătat că, pe măsură ce densitatea de umplere crește, capacitatea portantă a epruvetelor crește și ea. Densitatea de umplere mai mică a dus la epruvete mai puțin rezistente, dar cu o greutate mai mică. Cu siguranță, densitatea solidă sau densitatea de umplere 100% prezintă cea mai mare capacitate portantă, dar, totodată, greutatea epruvetelor este cea mai mare. Indiferent de tipul modului de umplere, cea mai mare creștere a rezistenței la tracțiune, de 39%, se găsește între densitățile de umplere de 70 și 100%. De la densitatea de umplere de 40 la 70%, creșterea este mai mică, în special pentru modelele Honeycomb și Triangular (de doar 8%), în timp ce pentru

72 Comportamentul la tracțiune

modelul de umplere Grid se obține o creștere cu 16,7% a rezistenței la tracțiune. O lege polinomială, exprimată sub forma ecuațiilor (2.2)-(2.4), redă creșterea proprietăților de rezistență. Aceste ecuații pot fi utilizate pentru a prezice rezistența la tracțiune în intervalul densităților de umplere 40%-100% și pentru cele trei modele de umplere investigate.

$$\sigma_m(GR) = 0.0085 \cdot ID^2 - 0.7548 \cdot ID + 43.220, \quad \text{cu } R^2 = 1 \quad (2.2)$$

$$\sigma_m(HC) = 0.0098 \cdot ID^2 - 0.9793 \cdot ID + 52.769, \quad \text{cu } R^2 = 1 \quad (2.3)$$

$$\sigma_m(TR) = 0.0098 \cdot ID^2 - 0.9978 \cdot ID + 53.857, \quad \text{cu } R^2 = 1 \quad (2.4)$$

Rezistența la tracțiune măsurată este de 52,46 MPa (vezi Figura 2.17), aceasta fiind foarte apropiată de rezistența la tracțiune a materialului izotrop produs prin turnare prin injecție. Prin urmare, comportamentul la tracțiune al epruvetelor din PLA printate prin procedeul FDM este comparabil cu cel fabricat prin procesul de turnare prin injecție [205].

Comportamentul obținut este în concordanță cu datele raportate în literatura de specialitate [214, 232-235]. Rodríguez-Reyna și colab. [235] au folosit, pentru epruvete printate din PLA, densități de umplere apropiate cu cele investigate în această lucrare (33, 66 și 100%). Autorii au studiat un model de umplere Tridimensional și au observat că de la densitatea de umplere de 33 până la 66%, rezistența la tracțiune crește cu doar 3,8%, în timp ce de la 66 la 100% crește cu 29,3%. S-au obținut rezultate opuse pentru modelul de umplere Linear (21,5% de la densitatea de umplere 33 la 66% și 9,2% de la 66 la 100%) și apropiate pentru modelul de umplere Hexagonal (10,5% de la densitatea de umplere 33 la 66% și 18,3% de la 66 la 100%). Rezultate similare au fost raportate și de către Dave și colab. [233] pe probe din PLA. Autorii au raportat că modelul Rectilinear arată creșterea cea mai mică a rezistenței la tracțiune, de la densitatea de umplere 60 la 80% (0,7%), respectiv cea mai mare creștere de la 80 la 100% (29,5%). Pe de altă parte, ei au raportat că modelul Hilbert Curve arată cea mai mare creștere a rezistenței la tracțiune de la densitatea de umplere 60 la 80% (62,9%) și cea mai mică de la 80 la 100% (26,6%). Alafaghani și colab. [232] au folosit modelul Diamond și au studiat 4 densități de umplere (20, 50, 80 și 100%) pe epruvete din PLA. Spre deosebire de datele găsite în literatură și de cele prezentate în această lucrare, autorii au raportat că rezistența la tracțiune scade de la densitatea de umplere 20% (42,95 MPa) la densitatea de umplere 80% (33,74 MPa), după care crește semnificativ cu creșterea densității de umplere la 100% (46,06 MPa). Este singura lucrare găsită în literatură, care raportează scăderea proprietăților la tracțiune odată cu creșterea densității de umplere.

2.4.3.3. Efectul orientării printării

Schimbarea direcției de printare duce la epruvete cu proprietăți mecanice diferite, dar cu o precizie dimensională aproximativ similară. Figura 2.18 prezintă cele trei orientări (0, 45 și 90°) ale epruvetelor în plan utilizate în programul experimental.

Influența orientării printării asupra curbelor de tensiune-deformație și energie de absorbție-deformație ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM este prezentată în Figura 2.19. Comparația se face pentru modelul de umplere TR și densitățile de umplere de 70 și 100%. Modelul de umplere TR a fost ales în

detrimentul modelelor de umplere GR și HC deoarece acesta prezintă proprietăți de rezistență ușor superioare.

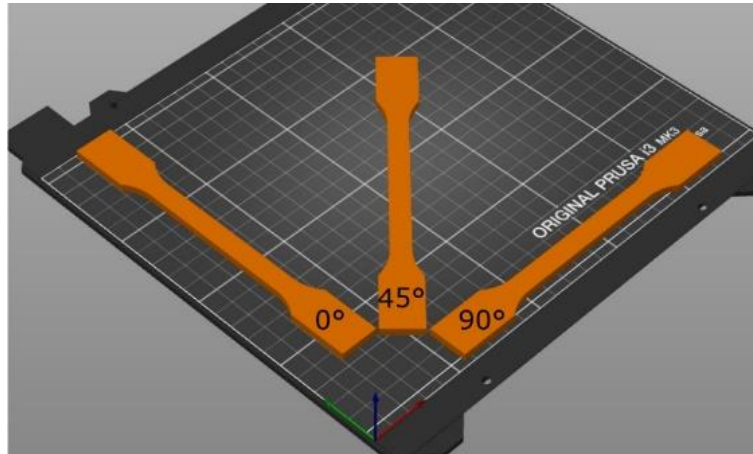


Fig. 2.18. Așezarea epruvetelor pe patul de printare, privind efectul orientării

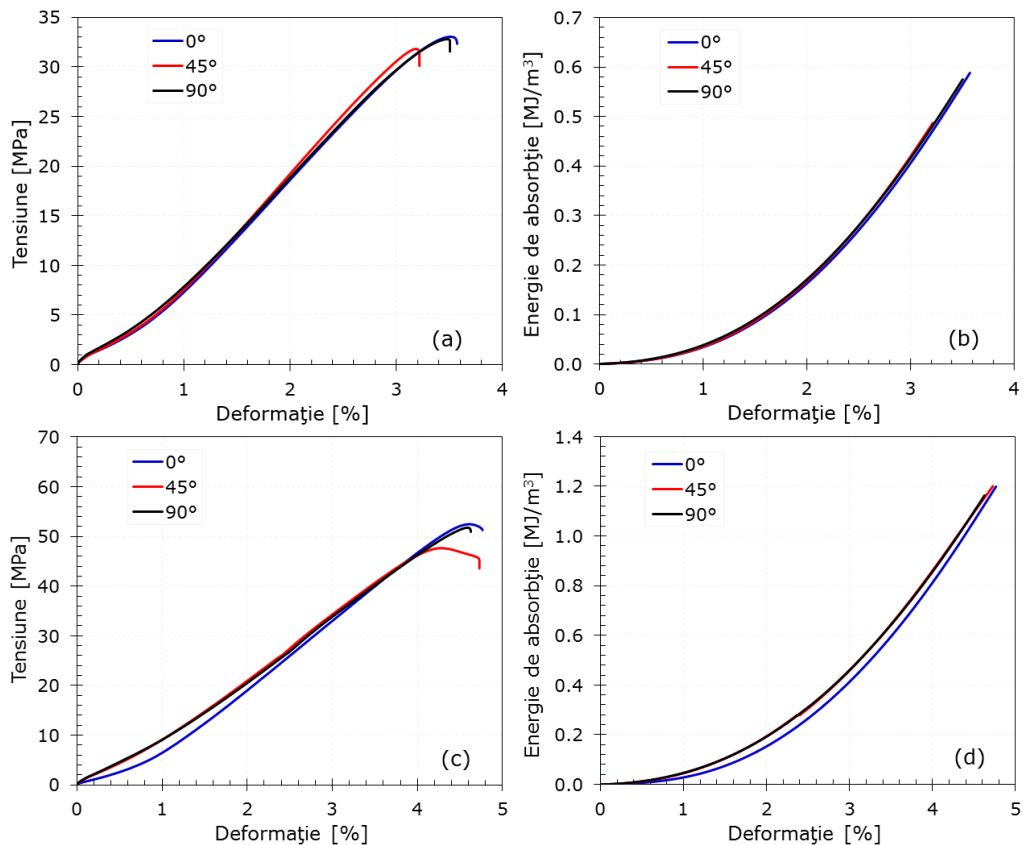


Fig. 2.19. Curbele tensiune-deformație și energie de absorbție-deformație ale epruvetelor din PLA pentru densitățile de umplere de 70% (a, b) și 100% (c, d). Efectul orientării printării

74 Comportamentul la tracțiune

Se observă că, indiferent de orientarea printării (0, 45 sau 90°) și densitatea de umplere (70 sau 100%), comportamentul la tracțiune al epruvetelor este cvasi-fragil, cu o ușoară zonă de așezare premergătoare zonei liniar-elastice. Aproape fiecare epruvetă printată la o densitate de umplere de 70% s-a rupt în jurul unei deformații de 3,4%, valori puțin mai mari (4,7%) fiind înregistrate pentru densitatea de umplere de 100%. Pentru toate cele trei orientări de printare (0, 45 și 90°), zonele liniar-elastice ale curbelor tensiune-deformație și energie de absorbție-deformație aproape se suprapun. S-a remarcat că epruvetele cu orientările de printare de 0° și 90° absorb aceeași energie până la rupere (aproximativ 0,6 MJ/m³ pentru o densitate de umplere de 70% și 1,2 MJ/m³ pentru o densitate de 100%), în timp ce epruvetele cu orientarea de 45° absorb cu aproximativ 20% mai puțină energie de rupere pentru o densitate de umplere de 70%.

Valorile rezistenței la tracțiune, tensiunii la rupere, energiei de rupere, precum și deformațiile corespunzătoare rezistenței la tracțiune și tensiunii la rupere sunt prezentate în Tabelul 2.5, în funcție de densitatea de umplere și orientarea printării.

Tabelul 2.5. Efectul orientării printării asupra principalelor proprietăți la tracțiune ale epruvetelor din PLA printate prin FDM

DU [%]	MU [-]	σ_m [MPa]	ε_m [%]	σ_b [MPa]	ε_{tb} [%]	G_f [MJ/m ³]
70	0	33,06	3,51	32,35	3,57	0,59
		32,20	3,33	31,49	3,36	0,50
		32,42	3,48	31,27	3,57	0,58
		31,19	3,50	30,87	3,55	0,56
	45	30,79	3,18	30,42	3,21	0,54
		31,84	3,19	30,12	3,22	0,49
		30,33	3,06	29,55	3,07	0,45
		30,14	3,03	29,83	3,05	0,44
	90	31,80	3,48	31,56	3,51	0,57
		31,15	3,85	30,92	4,57	0,95
		32,17	3,67	30,79	3,87	0,65
		31,54	3,54	30,45	3,56	0,59
100	0	52,92	4,52	50,98	5,02	1,18
		52,32	4,61	51,85	4,83	1,19
		51,93	4,68	51,19	4,62	1,22
		52,66	4,63	51,11	4,55	1,21
	45	47,36	4,11	41,99	4,91	1,22
		47,48	4,46	43,81	4,86	1,18
		47,55	4,36	43,72	4,72	1,18
		46,99	4,25	43,65	4,49	1,20
	90	51,46	4,21	49,68	4,65	1,12
		50,89	4,63	50,31	4,63	1,13
		51,88	4,76	50,76	4,27	1,19
		50,75	4,58	50,97	4,88	1,18

Figura 2.20 arată că epruveta printată la 0° este cea mai rezistentă (32,22 MPa pentru densitatea de umplere de 70% și 52,46 MPa pentru densitatea de 100%), urmată de epruveta printată la 90° (31,67 MPa pentru densitatea de umplere de 70% și 51,25 MPa pentru densitatea de 100%). În schimb, epruveta cu orientarea de printare la 45° a prezentat o rezistență la tracțiune σ_m de numai 30,77 MPa pentru densitatea de umplere de 70% și 47,35 MPa pentru densitatea de 100%.

Tensiunea la rupere σ_b pentru densitatea de umplere de 70% are valori aproximativ egale pentru toate cele trei orientări de printare, cu diferențe maxime de numai 4,8% între ele. Pe de altă parte, diferențele dintre orientările de printare $0/90^\circ$ și orientarea de printare de 45° sunt mult mai mari, de aproximativ 15,6%.

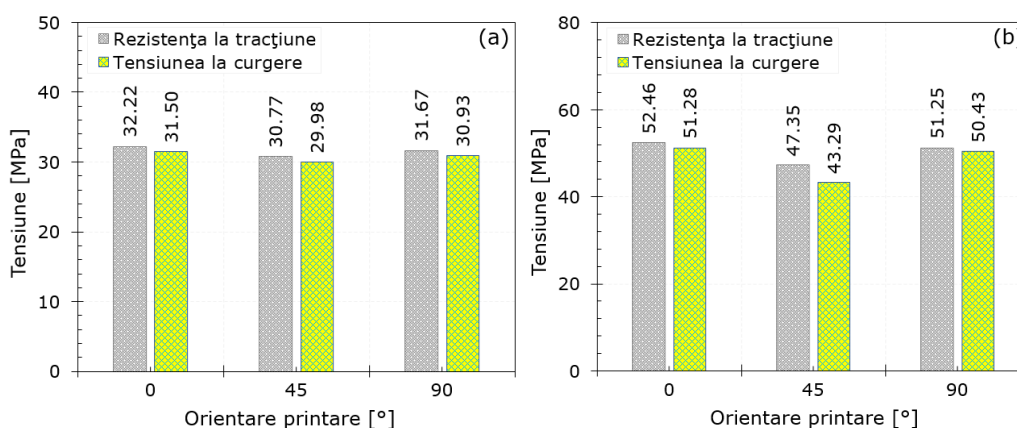


Fig. 2.20. Variația rezistenței la tracțiune și a tensiunii la curgere a epruvetelor din PLA pentru densitățile de umplere de 70% (a) și 100% (b). Efectul orientării printării

Mai multe lucrări din literatură confirmă rezultatele obținute în studiul de față [205, 213] și, desigur, unele raportează alte concluzii [207, 208]. Echipa lui Marşavina [205, 213] a descoperit că orientarea de printare de 0° prezintă cele mai bune proprietăți la tracțiune atât pentru epruvetele printate plan (*flat*) cât și pentru cele printate pe muchie (*on-edge*). În comparație cu cea mai slabă orientare de printare (45°), autorii au constatat că rezistența la tracțiune pentru epruvetele printate plan este mai mare cu 8,1%. În plus, ei au remarcat că nu există diferențe semnificative (doar 2,7%) între orientările de 0 și 90° pentru epruvetele printate plan.

Pe de altă parte, Zhao și colab. [207] și Yao și colab. [208] au raportat că, în cazul epruvetelor din PLA printate pe muchie, proprietățile de tracțiune cresc odată cu creșterea orientării printării. Indiferent dacă au folosit 0,1, 0,2 sau 0,3 mm pentru grosimea stratului, autorii au obținut că valorile rezistenței la tracțiune la o orientare de 90° sunt mai mari cu peste 50% față de cele la 0° .

2.4.3.4. Efectul grosimii stratului

În procesul FDM, alegerea grosimii stratului afectează timpul de printare, calitatea suprafeței pieselor, precum și proprietățile mecanice. Grosimea stratului (sau înălțimea stratului) este printre cei mai investigați parametri de proces. Grosimea stratului este direct legată de diametrul duzei, rezoluția imprimantei și

76 Comportamentul la tracțiune

lățimea rasterului. În studiile anterioare, grosimea stratului a variat între 0,06-0,6 mm, cele mai frecvente valori fiind în intervalul 0,1-0,3 mm [236-238].

S-a constatat că grosimile mari ale straturilor conduc la scăderea timpului de imprimare și a calității pieselor (din cauza efectului de scară), în timp ce grosimile mici ale stratului măresc cei doi parametri (datorită scăderii densității golurilor). Mai exact, se obține o dublare a timpului de printare la o scădere cu 50% a grosimii stratului [238]. Desigur, grosimea stratului corelată corect cu temperatura duzei și viteza de printare modifică semnificativ proprietățile componentelor printate. Interconectarea optimă a acestor trei parametri de proces (grosimea stratului, temperatura duzei și viteza de printare) conduce la crearea unei legături interfaciale superioare între straturile depuse succesiv. Prin urmare, trebuie găsit un compromis între grosimea stratului și acuratețea dimensională a epruvetelor printate 3D.

Efectul grosimii stratului asupra comportamentului la tracțiune al epruvetelor din PLA printate cu tehnologia FDM este prezentat în Figura 2.21. După cum se poate observa, atât nivelul tensiunilor, cât și energiile de absorbție sunt influențate de grosimea stratului de printare. Principalele deformații investigate (deformația corespunzătoare rezistenței la tracțiune și alungirea la rupere) cresc odată cu creșterea grosimii stratului.

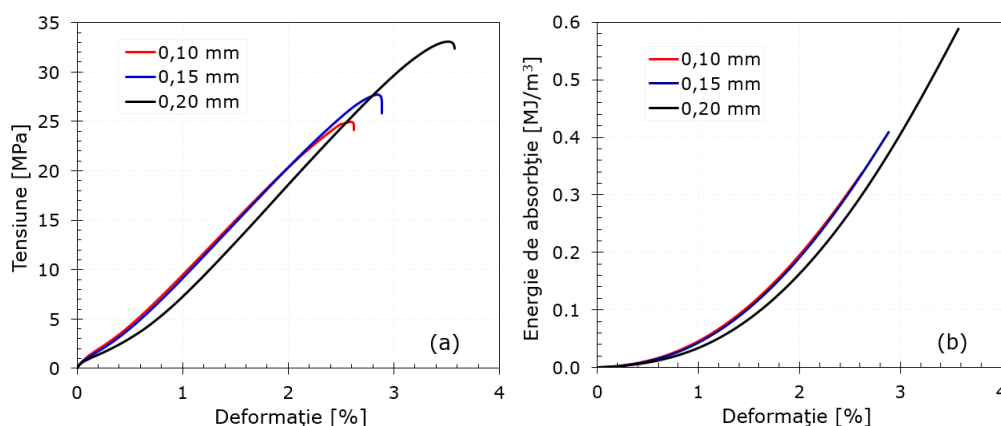


Fig. 2.21. Curbele tensiune-deformație și energie de absorbție-deformație ale epruvetelor din PLA. Efectul grosimii stratului

Valorile tensiunilor (rezistența la tracțiune și tensiunea la rupere), deformațiilor (corespunzătoare rezistenței la tracțiune și tensiunii la rupere) și energiei de rupere, legate de parametrii procesului prezentați în Figura 2.21, sunt enumerate în Tabelul 2.6.

Pentru o mai bună înțelegere a corelației dintre diferitele game ale parametrului investigat (grosimea stratului) asupra comportamentului mecanic, reprezentarea grafică a rezultatelor la tracțiune este ilustrată în Figura 2.22. Acest grafic prezintă rezistența la tracțiune, tensiunea la rupere și energia de rupere în funcție de grosimea stratului.

Tabelul 2.6. Efectul grosimii stratului asupra principalelor proprietăți la tracțiune ale epruvetelor din PLA printate prin FDM

DU [%]	MU [-]	TD [°C]	NSE [-]	σ_m [MPa]	ε_m [%]	σ_b [MPa]	ε_{tb} [%]	G_f [MJ/m ³]
0,10	60	210	1	26,49	2,74	26,39	2,77	0,38
				24,95	2,59	24,12	2,62	0,34
				25,81	2,70	22,90	2,79	0,38
				25,09	2,62	23,85	2,71	0,36
0,15	60	210	1	28,79	3,29	26,70	3,56	0,56
				29,20	2,93	28,96	2,96	0,44
				27,71	2,84	25,81	2,89	0,41
				28,01	3,01	28,22	3,11	0,45
0,20	60	210	1	33,06	3,51	32,35	3,57	0,59
				32,20	3,33	31,49	3,36	0,50
				32,42	3,48	31,27	3,57	0,58
				31,19	3,50	30,87	3,55	0,56

Atât proprietățile de rezistență (rezistența la tracțiune și tensiunea la rupere), cât și energia de rupere variază liniar cu parametrul investigat (grosimea stratului). Graficul prezintă ecuațiile care definesc variația proprietăților de tracțiune, împreună cu coeficientul de determinare (R^2). Aceste ecuații pot prezice, cu o precizie foarte mare ($R^2 > 0,99$), proprietățile menționate în intervalele caracteristice 0,1-0,2 mm ale grosimii stratului. S-a constatat că odată cu creșterea grosimii stratului de la 0,1 la 0,2 mm (vezi Figura 2.22), rezistența la tracțiune a epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM crește de la 25,59 la 32,22 MPa (creștere de 20,58%). Creșteri similare, de 22,80% și 34,54%, au fost observate și pentru tensiunea la rupere și energia de rupere. Vanaei și colab. [239] au raportat că prin creșterea grosimii stratului, gradul de cristalinitate este crescut. Prin urmare, grosimea mai mare a stratului poate permite gradientul de temperatură în filament și, în același timp, rearanjarea lanțurilor polimerice.

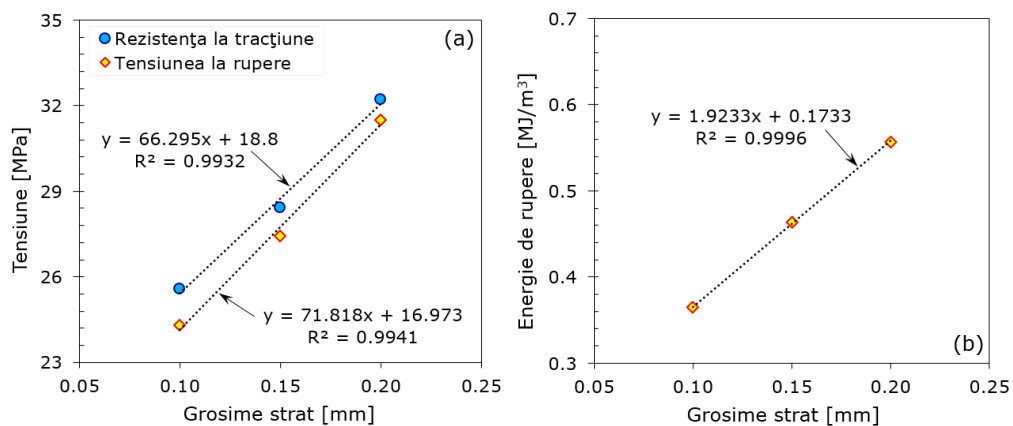


Fig. 2.22. Variația rezistenței la tracțiune, tensiunii la rupere și energiei de rupere a epruvetelor din PLA. Efectul grosimii stratului

78 Comportamentul la tracțiune

Rezultatele obținute, privind influența grosimii stratului asupra proprietăților la tracțiune ale PLA printat, sunt în concordanță cu literatura de specialitate [213, 225, 234, 240, 241]. Priya și colab. [234] au printat epruvete de tracțiune din material PLA cu model de umplere TR și au observat că rezistența la tracțiune pentru grosimea stratului de 0,2 mm este mai mare (43,78 MPa) decât cea pentru grosimea stratului de 0,1 mm (42,52 MPa). Atakok și colab. [225] au obținut creșteri ale rezistenței la tracțiune cu o creștere a grosimii stratului (de la 0,15 la 0,25 mm) de 24% pentru PLA și 22% pentru PLA reciclat. Pereira și colab. [240] au observat o creștere a rezistenței la tracțiune de la 39,43 MPa (pentru grosimea stratului de 0,06 mm) la 46,92 MPa (pentru grosimea stratului de 1,4 mm). Prin creșterea grosimii stratului de la 0,1 la 0,4 mm, Alafaghani și colab. [232] au obținut o creștere de 6,91 MPa a rezistenței la tracțiune. Rajpurohit și colab. [241] au raportat, de asemenea, acest comportament prin creșterea grosimii stratului de la 0,1 la 0,3 mm pentru unghiuri raster de 0, 30, 45, 60 și 90° și lățimea rasterului de 0,5 mm. Recent, Marșavina și colab. [213] au descoperit că, odată cu creșterea grosimii stratului de la 0,15 la 0,4 mm, se obține o creștere a proprietăților epruvetelor din PLA cu peste 37%.

Cu toate acestea, s-a constatat că grosimea stratului este un parametru mai controversat. Există și studii care susțin că o creștere a grosimii stratului induce o scădere, mai mică sau mai pronunțată, a proprietăților [70, 206-209, 212, 217, 240, 242, 243]. Zhao și colab. [207], Yao și colab. [208] și Hanon și colab. [242] raportează scăderi ale rezistenței la tracțiune a materialului din PLA printat cu aproximativ 15, 22 și 38% odată cu creșterea grosimii stratului de la 0,1 la 0,3 mm. Aceeași gamă de grosimi de strat (0,1-0,3 mm) este investigată și de Rao și colab. [217], pentru PLA armat cu Fibre de Carbon, constatând o scădere cu 27% odată cu creșterea grosimii stratului. Scăderi extreme ale proprietăților (2% și 71%) odată cu creșterea grosimii stratului au fost observate de Szust și colab. [206] pentru același material PLA. Tymrak și colab. [243] au raportat că epruvetele cu grosimea stratului de 0,2 mm dau o rezistență la tracțiune mai mare (cu peste 9%) comparativ cu cele cu grosimea stratului de 0,4 mm. Fountas și colab. [210] au investigat epruvete printate cu trei grosimi diferite de strat (0,05; 0,125 și 0,2 mm) și au observat că pentru a obține proprietăți ridicate, grosimea stratului trebuie stabilită la niveluri scăzute. Prin urmare, analizând toate datele raportate, se constată că există încă incertitudini cu privire la performanța proprietăților pieselor PLA printate cu diferite grosimi de strat. De exemplu, Chacón și colab. [212] au concluzionat că rezistența la tracțiune a crescut mai întâi (cu 56%), și apoi a scăzut (cu 12%) pe măsură ce grosimea stratului a crescut de la 0,06 la 0,12 mm și de la 0,12 la 0,24 mm. În plus, Sood și colab. [70] au observat că rezistența la tracțiune scade mai întâi, iar apoi crește odată cu creșterea grosimii stratului (0,127, 0,178, 0,254 mm). Astfel, parametrul procesului de grosime a stratului ar trebui analizat în continuare din cauza rezultatelor contradictorii raportate.

2.4.3.5. Efectul vitezei de printare

Viteza de printare influențează semnificativ timpul de construcție și acuratețea dimensională a pieselor printate. Cercetătorii au variat viteza de printare de la 12,5 la 170 mm/s [222, 232, 237, 244-246]. O viteză de printare excesiv de mare duce la scăderea timpului de fabricație, dar, totodată, și la scăderea calității epruvetelor printate [222]. Pentru a nu întâmpina probleme legate de acuratețea

dimensională a epruvetelor printate, în această investigație s-au ales viteze de printare de 20, 40 și 60 mm/s. Figura 2.23 prezintă efectul vitezei de printare asupra comportamentului la tracțiune al epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM.

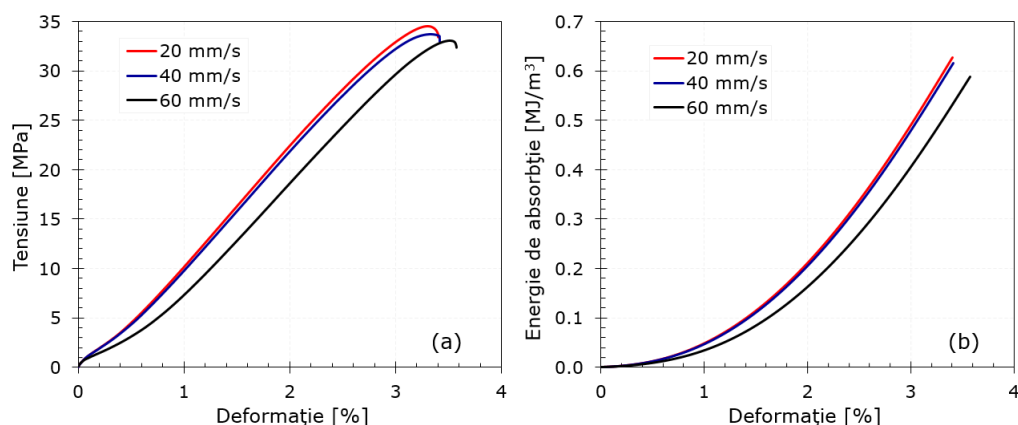


Fig. 2.23. Curbele tensiune-deformație și energie de absorbție-deformație ale epruvetelor din PLA. Efectul vitezei de printare

Tabelul 2.7. Efectul vitezei de printare asupra principalelor proprietăți la tracțiune ale epruvetelor din PLA printate prin FDM

VP [mm/s]	GS [mm]	TD [°C]	NSE [-]	σ_m [MPa]	ε_m [%]	σ_b [MPa]	ε_{tb} [%]	G_f [MJ/m ³]
20	0,20	210	1	34,48	3,30	33,38	3,40	0,63
				33,29	3,27	33,13	3,30	0,57
				33,72	3,14	33,29	3,15	0,55
				34,39	3,20	33,35	3,20	0,61
40	0,20	210	1	33,12	3,22	33,04	3,23	0,56
				32,94	3,20	32,25	3,22	0,54
				33,73	3,33	32,96	3,41	0,62
				32,88	3,25	32,31	3,35	0,55
60	0,20	210	1	33,06	3,51	32,35	3,57	0,59
				32,20	3,33	31,49	3,36	0,50
				32,42	3,48	31,27	3,57	0,58
				31,19	3,50	30,87	3,55	0,56

Comportarea mecanică la tracțiune a epruvetelor este influențată de viteza de printare, iar deformațiile acestora cresc odată cu creșterea vitezei de printare. La polul opus, tensiunile și energiile scad liniar odată cu creșterea vitezei de printare. Tabelul 2.7 prezintă valorile proprietăților la tracțiune în funcție de viteza de printare.

Creșterea vitezei de printare induce o scădere a timpului de fabricație a probelor, dar înrăutățește proprietățile la tracțiune. Din Figura 2.24 s-a constatat că viteza de printare mai mare (60 mm/s) duce la o scădere a rezistenței la tracțiune cu

80 Comportamentul la tracțiune

5,44% (de la 33,97 la 32,22 MPa). Scăderi aproape identice (5,68 și 5,93%) au fost obținute pentru celelalte două proprietăți (tensiunea la rupere și energia de rupere). Viteza de printare mare (60 mm/s) reduce gradul de solidificare a straturilor deja depuse la depunerea de noi straturi. Acest aspect poate duce la alunecări între straturile succesive și, prin urmare, la scăderi de proprietăți. Pe de altă parte, o viteză de printare mai mică (20 mm/s) îmbunătățește rezistența la tracțiune datorită legăturii puternice între interfețele straturilor depuse succesiv. În acest caz, aderența straturilor nu este grăbită ca în cazul vitezelor mari de printare. Ecuatiile prezentate pot prezice cu precizie ridicată ($R^2 > 0,96$) proprietățile la tracțiune în intervalul vitezelor de printare de 20-60 mm/s.

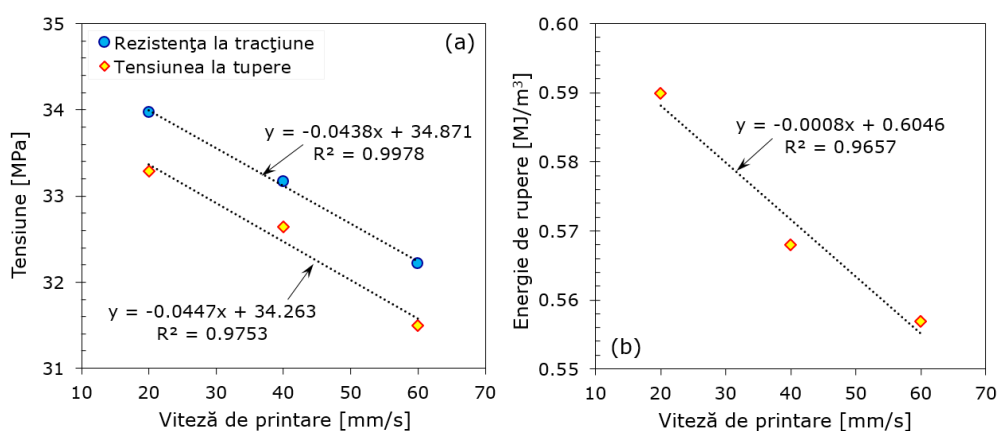


Fig. 2.24. Variația rezistenței la tracțiune, tensiunii la rupere și energiei de rupere a epruvetelor din PLA. Efectul vitezei de printare

Aceste rezultate sunt în concordanță cu cele raportate în literatura de specialitate pentru materialul PLA fabricat la diferite viteze de printare [209, 232, 247-249]. Rezultatele lui Hikmat și colab. [209], Ning și colab. [247], Khosravani și colab. [248] și Christiyana și colab. [249] au arătat că rezistența la tracțiune scade pe măsură ce viteza de printare crește. Chacón și colab. [212] au observat că, indiferent de orientarea epruvetei (în poziție verticală <vertical>, plan <flat> sau pe muchie <on-edge>), creșterea vitezei de printare (de la 20 la 80 mm/s) duce la o scădere a rezistenței la tracțiune cu aproximativ 18% (pentru grosimea stratului de 0,24 mm). Pentru grosimi mai mici de strat (0,06, 0,12 și 0,18 mm), autorii au observat că proprietățile la tracțiune cresc odată cu creșterea vitezei de printare de la 20 la 50 mm/s și scad odată cu creșterea vitezei de printare de la 50 la 80 mm/s. Alafaghani și colab. [232] au descoperit că, în intervalul 70-170 mm/s, viteza de printare influențează rezistența la tracțiune a epruvetelor sub 1%. Spre deosebire de majoritatea rapoartelor, Fountas și colab. [210] au afirmat că vitezele scăzute de printare provoacă deformații termice, care la rândul lor afectează negativ rezistența la tracțiune a epruvetelor. Autorii precizează că vitezele de printare medii (35 mm/s) și mari (43,75 mm/s) sunt mai favorabile decât cele mici (26,25 mm/s). Pereira și colab. [240] au observat că rezistența la tracțiune scade (de la 45 la 41,76 MPa) odată cu creșterea vitezei de printare (de la 40 la 80 mm/s) pentru un unghi raster de 0°/90°, respectiv crește ușor (de la 48,09 la 49,68 MPa) cu creșterea vitezei de

printare pentru un unghi raster de $-45^{\circ}/+45^{\circ}$. De asemenea, Mazurchevici și colab. [250] raportează că la creșterea vitezei de printare de la 40 la 80 mm/min se obține o creștere a rezistenței la tracțiune cu 5,5% (de la 32,22 la 34,1 MPa). Acest parametru de proces este important deoarece este direct legat de timpul de printare și, în consecință, de costul de producție.

2.4.3.6. Efectul temperaturii duzei

Temperaturile duzei între 175 și 255°C [70, 206, 208, 210, 212-214, 225, 232, 237, 240, 251-257] au fost folosite de diferiți cercetători pentru a obține diferite componente PLA prin procesul de printare FDM. Cele mai multe dintre studiile menționate au folosit recomandările date de producătorii de filamente. Cu toate acestea, este puțin probabil ca toate aceste temperaturi să ducă la aceleași caracteristici, așa că este de așteptat ca anumite temperaturi să evidențieze proprietăți maxime, iar altele proprietăți minime. S-a raportat că la temperaturi scăzute ale duzei (sub 180°C), topirea nu este completă, astfel încât difuzia interstrat nu are loc întotdeauna [256]. În plus, difuzia scăzută între straturi poate duce la delaminare. Mai mult decât atât, la temperaturi scăzute ale duzei, se obțin proprietăți de întindere scăzute deoarece golurile de aer dintre liniile raster sunt mai mari [257]. La cealaltă extremă, pentru temperaturile duzei peste 240°C, se obține o difuzie mai bună a straturilor, dar este afectată acuratețea dimensională a epruvetelor printate 3D [256].

În urma rapoartelor anterioare, investigațiile privind efectul temperaturii duzei asupra caracteristicilor mecanice ale epruvetelor din PLA printate au fost efectuate în intervalul de temperatură 200-220°C. Valorile alese ale temperaturii duzei sunt corelate cu punctul de topire al materialului PLA (160 până la 180°C). Prin urmare, efectul temperaturii duzei asupra comportamentului la tracțiune al epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM este prezentat în Figura 2.25.

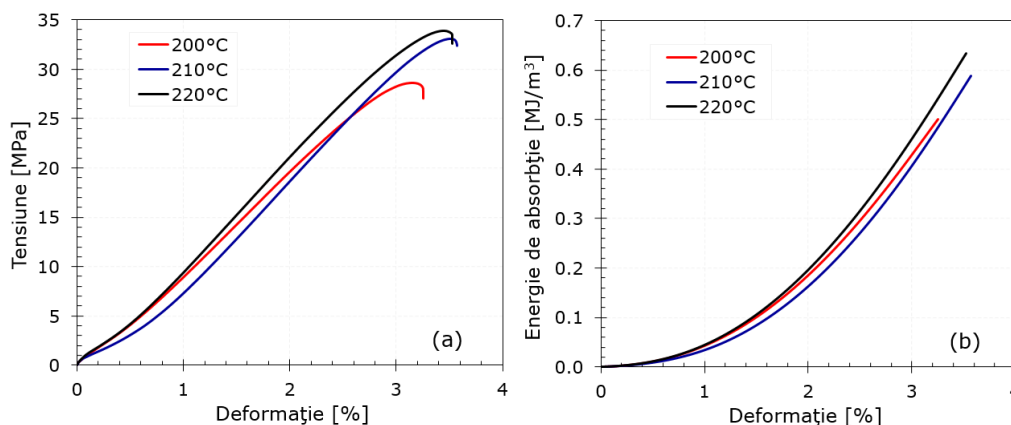


Fig. 2.25. Curbele tensiune-deformație și energie de absorbție-deformație ale epruvetelor din PLA. Efectul temperaturii duzei

Tabelul 2.8 sintetizează rezultatele obținute privind influența temperaturii duzei asupra principalelor caracteristici mecanice, în urma prelucrării datelor experimentale.

82 Comportamentul la tracțiune

Tabelul 2.8. Efectul temperaturii duzei asupra principalelor proprietăți la tracțiune ale epruvetelor din PLA printate prin FDM

TD [°C]	VP [mm/s]	GS [mm]	NSE [-]	σ_m [MPa]	ϵ_m [%]	σ_b [MPa]	ϵ_{tb} [%]	G_f [MJ/m ³]
200	60	0,2	1	28,64	3,15	27,06	3,25	0,50
				27,81	3,17	26,97	3,54	0,58
				28,12	2,98	26,96	3,18	0,48
				28,45	3,08	27,02	3,35	0,55
210	60	0,2	1	33,06	3,51	32,35	3,57	0,59
				32,20	3,33	31,49	3,36	0,50
				32,42	3,48	31,27	3,57	0,58
				31,19	3,50	30,87	3,55	0,56
220	60	0,2	1	32,88	3,28	31,29	3,42	0,58
				33,86	3,44	32,57	3,52	0,63
				32,86	3,17	32,54	3,38	0,59
				33,82	3,33	32,51	3,45	0,58

Din Figura 2.26 se poate observa cu ușurință că proprietățile la tracțiune cresc odată cu creșterea temperaturii duzei. Cea mai mare creștere procentuală se obține pentru tensiunea la rupere (16,21%), urmată în ordine de rezistența la tracțiune (15,29%) și energia de rupere (11,8%). Proprietățile de rezistență au evidențiat cea mai mare creștere de la 200°C la 210°C (12,3% pentru rezistența la tracțiune și 14,3% pentru tensiunea la rupere), în timp ce energia de rupere de la 210°C la 220°C (6,6%). Având în vedere creșterea nesemnificativă a proprietăților de rezistență de la 210°C la 220°C (sub 3%), s-a ajuns la concluzia că 220°C poate fi considerată temperatura optimă. Se pare că o temperatură mai ridicată a duzei oferă proprietăți mecanice mai ridicate datorită difuziei mai bune între straturile epruvetelor. Creșterea proprietăților la tracțiune cu creșterea temperaturii duzei este una polinomială pentru proprietățile de rezistență (rezistența la tracțiune și tensiunea la rupere), respectiv una liniară pentru energia de rupere.

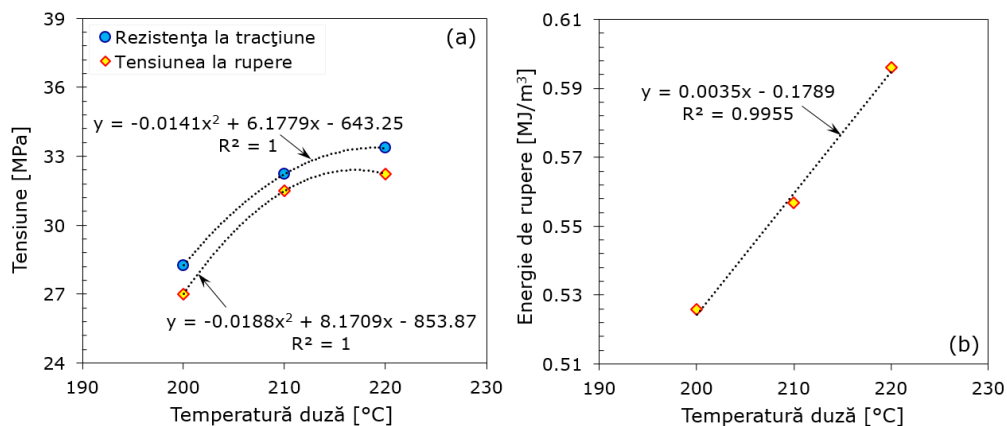


Fig. 2.26. Variația rezistenței la tracțiune, tensiunii la rupere și energiei de rupere a epruvetelor din PLA. Efectul temperaturii duzei

Creșteri similare ale rezistenței la tracțiune au fost observate în literatură odată cu creșterea temperaturii duzei [209, 217, 232]. De exemplu, Hikmat și colab. [209] au folosit 3 valori pentru temperatura duzei (210, 215 și 220°C) și au constatat că cele mai bune performanțe se obțin la 220°C. O creștere a rezistenței la tracțiune odată cu creșterea temperaturii duzei de la 175 la 205°C, pentru un material PLA, a fost, de asemenea, raportată de Alafaghani și colab. [232]. Autorii au descoperit că între 175-180°C creșterea este mai pronunțată (29,5%) decât în intervalul 180-205°C (7,3%). În plus, Rao și colab. [217] au studiat efectul temperaturii duzei (205, 215 și 225°C) asupra proprietăților de tracțiune ale materialului PLA armat cu fibră de carbon. Autorii au obținut că pentru modelele de umplere Cubic și Cubic Sub Division, temperatura duzei de 225°C prezintă proprietăți mai mari (cu peste 6% și, respectiv, 12%), comparativ cu temperatura duzei de 205°C. Dimpotrivă, ei au observat că modelul de umplere Quarter Cubic prezintă o scădere de aproximativ 3% a proprietăților odată cu creșterea temperaturii duzei de la 205°C la 225°C.

După cum se poate observa din analiza rezultatelor, se pare că nu este întotdeauna cea mai viabilă metodă de a respecta recomandările producătorilor pentru obținerea unor componente cu proprietăți maxime. Prin urmare, trebuie făcute cercetări aprofundate pentru a afla temperatura optimă a duzei.

2.4.3.7. Efectul numărului de straturi exterioare

Numărul de straturi exterioare va determina, inițial, cantitatea de material folosită și durata procesului de printare și, în cele din urmă, va dicta proprietățile mecanice. Cu toate acestea, numărul minim de straturi exterioare este 1, dar acesta nu ar trebui să fie prea mare deoarece crește costul total al piesei printate.

În studiul de față s-au luat în considerare epruvete cu 1, 2 și 3 straturi exterioare. Figura 2.27 ilustrează cele trei configurații de epruvete pentru modelul de umplere Triangular și densitatea de umplere de 70%.

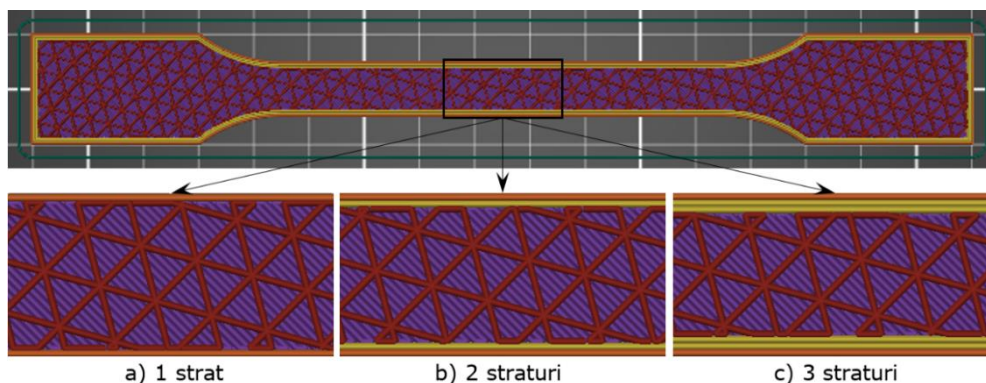


Fig. 2.27. Numărul de straturi exterioare investigate pentru modelul de umplere Triangular și densitatea de umplere de 70%

Literatura de specialitate arată foarte puține investigații privind efectul conturării sau efectul numărului de straturi exterioare asupra comportamentului mecanic al componentelor din PLA printate prin tehnologia FDM, majoritatea concentrându-se asupra materialului ABS [258, 259]. Ahn și colab. [258] au studiat pe scurt efectul numărului de straturi asupra rezistenței la tracțiune, subliniind rolul

84 Comportamentul la tracțiune

său important în limitarea concentrației tensiunilor în componentele ABS cu creștături (de exemplu racordările). Crococo și colab. [259] a analizat impactul numărului de straturi exterioare (1, 4, 7 și 10) asupra principalelor proprietăți de tracțiune ale pieselor din ABS-M30 printate 3D și au arătat că rezistența la tracțiune crește odată cu creșterea numărului de straturi. Gebisa și Lemu [260] au fabricat epruvete de polieterimidă (ULTEM 9085) cu 1 și 5 contururi și au observat că rezistența la încovoiere este mai mare, cu aproape 31%, la epruvetele cu un număr mai mare de straturi exterioare (5).

Ținând cont de acest aspect, de lipsa de informații privind efectul de conturare asupra comportamentului epruvetelor din PLA, Figura 2.28 arată influența numărului de straturi exterioare asupra curbelor tensiune-deformație și energie de absorbție-deformație. Tensiunile, deformațiile și energiile sunt influențate de numărul de straturi și cresc odată cu creșterea acestuia. Valorile proprietăților investigate aferente numărului de straturi exterioare sunt prezentate în Tabelul 2.9.

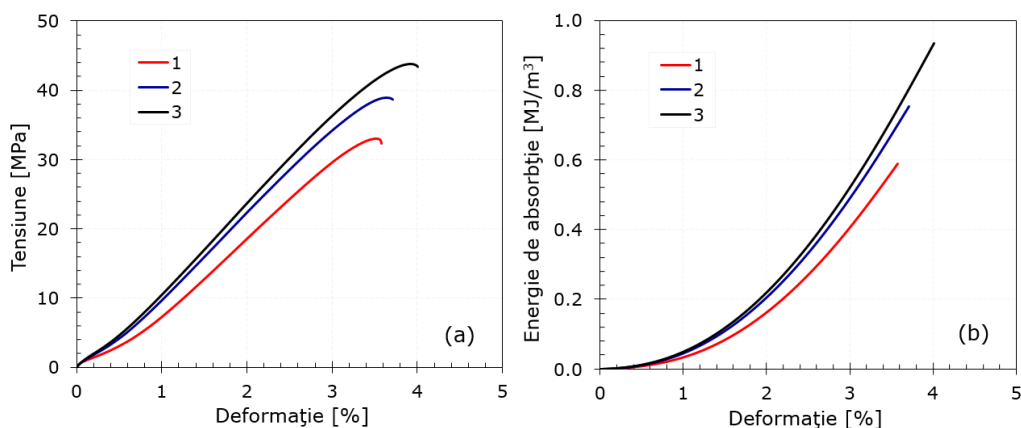


Fig. 2.28. Curbele tensiune-deformație și energie de absorbție-deformație ale epruvetelor din PLA. Efectul numărului de straturi exterioare

Tabelul 2.9. Efectul numărului de straturi exterioare asupra principalelor proprietăți la tracțiune ale epruvetelor din PLA printate prin FDM

NSE [-]	VP [mm/s]	TD [°C]	GS [mm]	σ_m [MPa]	ε_m [%]	σ_b [MPa]	ε_{tb} [%]	G_f [MJ/m ³]
1	60	210	0,2	33,06	3,51	32,35	3,57	0,59
				32,20	3,33	31,49	3,36	0,50
				32,42	3,48	31,27	3,57	0,58
				31,19	3,50	30,87	3,55	0,56
2	60	210	0,2	39,29	3,75	39,07	3,80	0,78
				38,95	3,63	38,68	3,71	0,75
				38,98	3,68	37,94	3,68	0,73
				38,94	3,68	38,56	3,72	0,74
3	60	210	0,2	43,74	3,92	43,34	4,01	0,93
				43,51	4,05	42,51	4,26	0,99
				42,61	3,97	40,47	4,26	1,00
				43,65	3,99	42,88	4,15	0,97

Influența numărului de straturi exterioare asupra principalelor proprietăți la tracțiune ale epruvetelor din PLA este prezentată în Figura 2.29. Toate cele trei proprietăți (rezistența la tracțiune, tensiunea la rupere și energia de rupere) cresc liniar odată cu creșterea numărului de straturi.

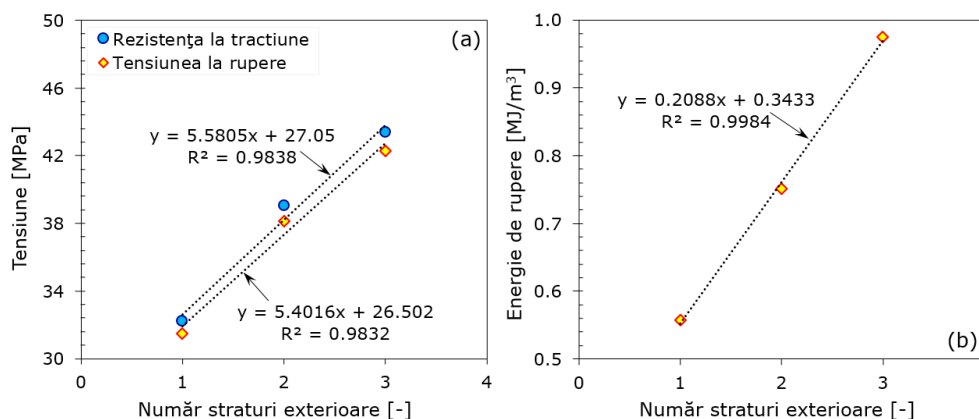


Fig. 2.29. Variația rezistenței la tracțiune, tensiunii la rupere și energiei de rupere a epruvetelor din PLA. Efectul numărului de straturi exterioare

Se poate observa că numărul de straturi (contururi) exterioare are un efect puternic asupra proprietăților materialului PLA. Creșterea numărului de straturi de la 1 la 3, conduce la o creștere a proprietăților de rezistență (rezistența la tracțiune, tensiunea la rupere) cu peste 25%, în timp ce energia de rupere prezintă o creștere mult mai semnificativă (de 42,8%). Acest lucru se datorează creșterii numărului de straturi exterioare care are ca rezultat scăderea lungimii și a numărului de raster. Prin urmare, sarcina aplicată este preluată mai mult de straturile exterioare decât de raster, ceea ce duce la o creștere a performanței materialului PLA printat.

Rezultatele, privind efectul numărului de straturi exterioare asupra proprietăților la tracțiune, sunt prezentate ca o confirmare a analizei statistice efectuate de Hikmat și colab. [209], singura lucrare găsită în literatura de specialitate pe materialul PLA. Ei au studiat influența numărului de straturi (2, 3 și 4) asupra comportamentului la tracțiune al pieselor din PLA fabricate prin tehnologia FDM. Autorii au descoperit că cele mai bune proprietăți se obțin pentru 3 straturi exterioare. Astfel, numărul mic de studii raportate asupra efectului numărului de straturi exterioare necesită mai multă atenție, deoarece poate crește semnificativ caracteristicile mecanice ale materialelor printate.

2.4.4. Epruvete optimizate

În urma investigațiilor experimentale, s-a constatat că nivelurile optime ale celor 7 parametri de proces considerați sunt următoarele:

- modelul de umplere: *Triangular*;
- densitatea de umplere: *100%*;
- orientarea epruvetelor în plan: *0°*;
- grosimea stratului: *0,20 mm*;
- viteza de printare: *20 mm/s*;
- temperatura duzei: *220°C*;
- numărul de straturi exterioare: *3*.

86 Comportamentul la tracțiune

După optimizarea parametrilor procesului, s-au printat epruvete de tracțiune cu parametrii optimi. Inițial, având în vedere că optimizarea a fost efectuată pentru o densitate de umplere de 70%, epruvetele au fost printate cu parametrii optimi pentru această densitate. Analiza efectuată, folosind o densitate de umplere de 70% și nu 100%, a vizat doar utilizarea cât mai rațională a filamentului. Ulterior, s-a făcut extrapolarea pentru densitatea de umplere 100%, printând astfel epruvete cu parametrii optimi și pentru această densitate.

Figurile 2.30 și 2.31 prezintă rezultatele la tracțiune, inițiale și optimizate, obținute pentru o densitate de umplere de 70%. Curbele optimizate tensiune-deformație (Figura 2.30a) și energie de rupere-deformație (Figura 2.30b) arată un comportament net superior celor inițiale. Acești parametri optimizați au condus la obținerea unei rezistențe la tracțiune de 49,48 MPa, a unei tensiuni la rupere de 48,51 MPa și a unei energii de rupere de 1,08 MJ/m³. Prin urmare, creșterile proprietăților de tracțiune au fost semnificative, 34,88% (rezistența la tracțiune), 35,06% (tensiunea la rupere) și respectiv 48,15% (energia de rupere).

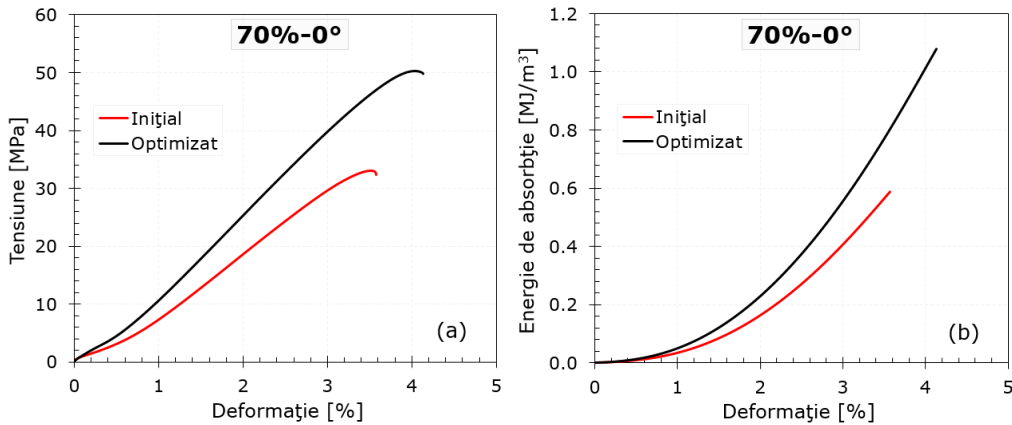


Fig. 2.30. Curbele tensiune-deformație (a) și energie de absorbtie-deformație (b) ale epruvetelor din PLA inițiale și optimizate (densitatea de umplere: 70%, orientarea printării: 0°)

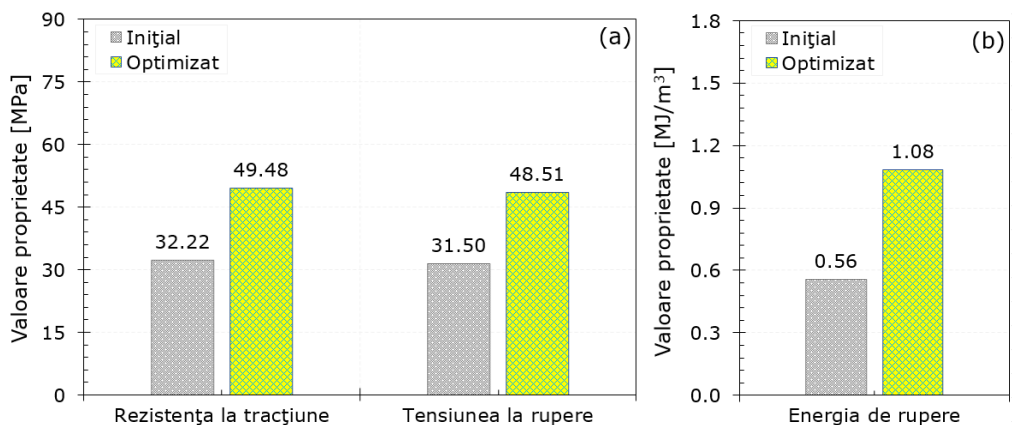


Fig. 2.31. Variația rezistenței la tracțiune, tensiunii la rupere și energiei de rupere a epruvetelor din PLA inițiale și optimizate (densitatea de umplere: 70%, orientarea printării: 0°)

Atakok și colab. [225] au utilizat aceeași densitate de umplere (70%) și au investigat comportamentul la tracțiune al epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM. Ei au obținut o rezistență la tracțiune de 43,86 MPa, valoare cu 11,4% mai mică decât în studiul de față. Epruvetele printate cu parametri optimizați la o densitate de umplere de 70% evidențiază proprietăți aproape similare cu cele printate inițial (neoptimizat) pentru o densitate de 100%. Epruvetele cu densitatea de 100% inițiale au arătat valori ale rezistenței la tracțiune cu doar 5,68% mai mari decât cele cu densitatea de umplere de 70% optimizate. Așadar, pentru a evita un consum excesiv de material și pentru a obține proprietăți superioare, este întotdeauna necesar să se realizeze un proces de optimizare a parametrilor de printare.

Figurile 2.32 și 2.33 prezintă rezultatele la tracțiune inițiale și optimizate obținute pentru o densitate de umplere de 100%. Astfel, curbele reprezentative tensiune-deformație și energie de rupere-deformație pentru parametri optimizați sunt prezentate în Figura 2.32. Compararea se realizează pentru cele trei orientări de printare (0, 45 și 90°). În cazul de față, au fost investigate toate cele trei orientări pentru a putea compara ulterior rezultatele la tracțiune cu literatura de specialitate.

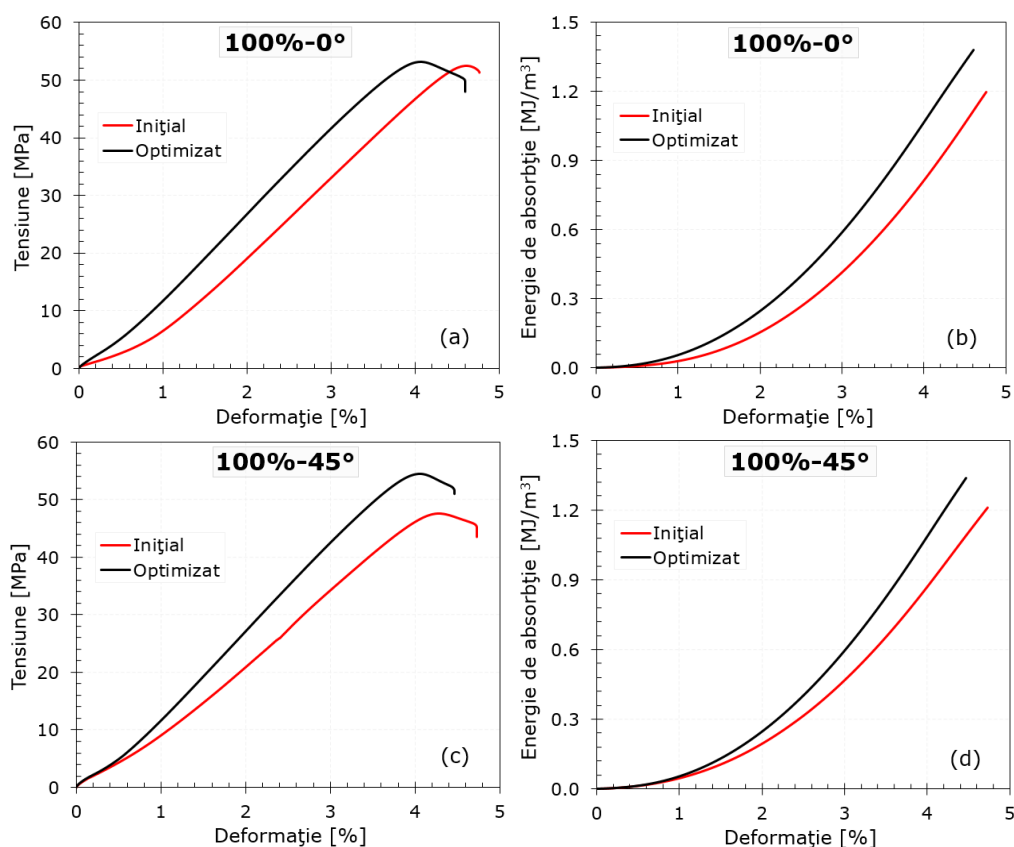


Fig. 2.32. Curbele tensiune-deformație și energie de absorpție-deformație ale epruvetelor din PLA inițiale și optimizate pentru orientările de 0° (a, b), 45° (c, d) și 90° (e, f). Densitatea de umplere este de 100%

88 Comportamentul la tracțiune

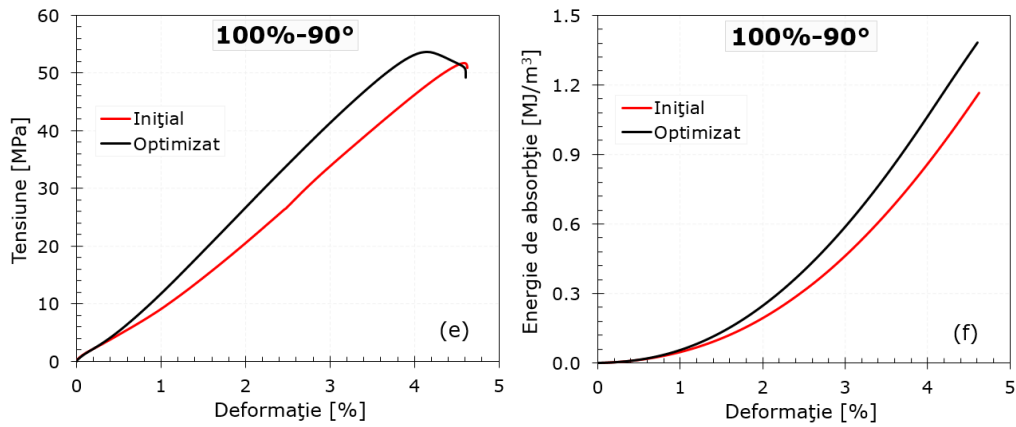


Fig. 2.32. (Continuare)

Indiferent de orientarea printării (0, 45 și 90°), epruvetele optimizate au prezentat caracteristici mecanice superioare celor inițiale. Dintre toate proprietățile, vezi Tabelele 2.5 și 2.10, doar deformația nominală la rupere (ε_{tb}) prezintă aproximativ aceleași valori. Cu toate acestea, au fost observate mici diferențe pentru orientarea epruvetelor la 45°.

Tabelul 2.10. Principalele proprietăți la tracțiune ale epruvetelor optimizate din PLA printate prin FDM pentru densitățile de umplere de 70% și 100%

DU [%]	OP [°]	σ_m [MPa]	ε_m [%]	σ_b [MPa]	ε_{tb} [%]	G_f [MJ/m ³]
70	0	49,23	4,43	48,19	4,54	1,07
		48,88	4,12	47,43	4,33	1,10
		50,24	4,04	49,75	4,13	1,08
		49,55	4,25	48,66	4,42	1,09
100	0	53,17	4,07	48,00	4,60	1,38
		52,55	4,19	47,72	4,56	1,29
		52,81	4,16	47,88	4,58	1,32
		53,01	4,15	47,93	4,57	1,35
	45	54,51	4,07	51,03	4,47	1,34
		53,53	4,01	51,74	4,22	1,21
		55,08	4,15	50,80	5,02	1,60
		54,43	4,12	51,27	4,88	1,36
	90	53,37	4,22	49,98	4,79	1,44
		53,62	4,14	49,18	4,60	1,38
		53,44	4,21	50,52	4,68	1,39
		53,52	4,22	49,99	4,72	1,41

Figura 2.33 arată compararea rezistenței la tracțiune, a tensiunii la rupere și a energiei de rupere a probelor inițiale și optimizate pentru densitatea de umplere de 100%. În cazul densității de umplere de 100% (vezi Figura 2.33a), epruvetele optimizate prezintă o creștere a proprietăților, dar nu la fel de considerabilă ca în cazul densității de 70% (vezi Figura 2.33b). Cea mai mare creștere a rezistenței la tracțiune pentru densitatea de umplere de 100%, de 12,9%, este obținută pentru orientarea de 45°, urmată de orientările de 90° (4.2%) și 0° (0.8%). Tensiunea la rupere arată o creștere doar pentru orientarea de 45° (15,5%), în timp ce pentru orientările de 0 și 90° se obțin scăderi de 7,1%, respectiv 1,0%. În ceea ce privește energia de rupere, aceasta prezintă creșteri de peste 10% pentru toate orientările de printare, cu un maxim la orientarea de 90° (17,5%).

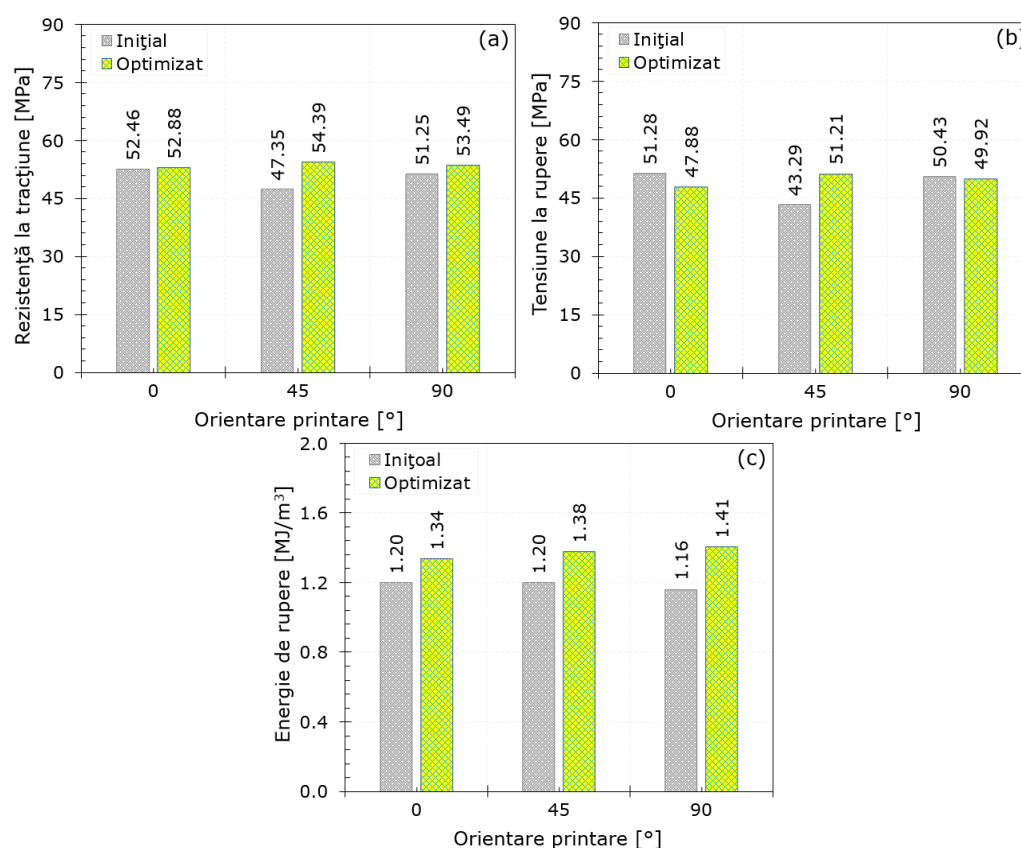


Fig. 2.33. Variația rezistenței la tracțiune (a), tensiunii la rupere (b) și energiei de rupere (c) a epruvetelor din PLA inițiale și optimizate pentru densitatea de umplere de 100%

Pe de altă parte, epruvetele inițiale au prezentat cele mai bune proprietăți la tracțiune pentru orientarea printării la 0°, urmate în ordine de epruvetele printate la 90 și 45°. Spre deosebire de rezultatele inițiale, epruvetele optimizate prezintă cele mai bune proprietăți la orientarea de 45° și cele mai slabe la orientarea de 0°.

Figura 2.34 arată influența parametrilor optimizați ai procesului asupra preciziei dimensionale a epruvetelor printate.

90 Comportamentul la tracțiune

Toate graficele arată aceeași tendință, așa că vor fi discutate împreună. Parametrii de proces optimizați oferă proprietăți mecanice mai ridicate (vezi Figurile 2.30-2.33), dar afectează, uneori pozitiv și alteori negativ, și acuratețea dimensională a epruvetelor printate. Datorită alunecării materialului depus, erorile relative de grosime sunt mai mari în cazul probelor optimizate. Au fost înregistrate creșteri dimensionale de până la 1,86 ori mai mari (de la 3% la 5,58%, Figura 2.34b) decât în cazul epruvetelor printate inițial. Creșteri mai mici, datorită reducerii cantității de material, au fost observate pentru densitatea de umplere de 70% (1,24 ori mai mare, de la 3,31% la 4,09%). Pe de altă parte, erorile de lățime ale epruvetelor optimizate prezintă valori foarte mici față de cele inițiale. În cazul lățimii epruvetelor, erorile relative au fost reduse de până la 37 de ori (de la 3,7% la 0,1%, Figura 2.34b). Se pare că dimensiunea mare a epruvetelor (lățimea) este mai puțin afectată de parametrii optimizați ai procesului decât dimensiunea lor mică (grosimea).

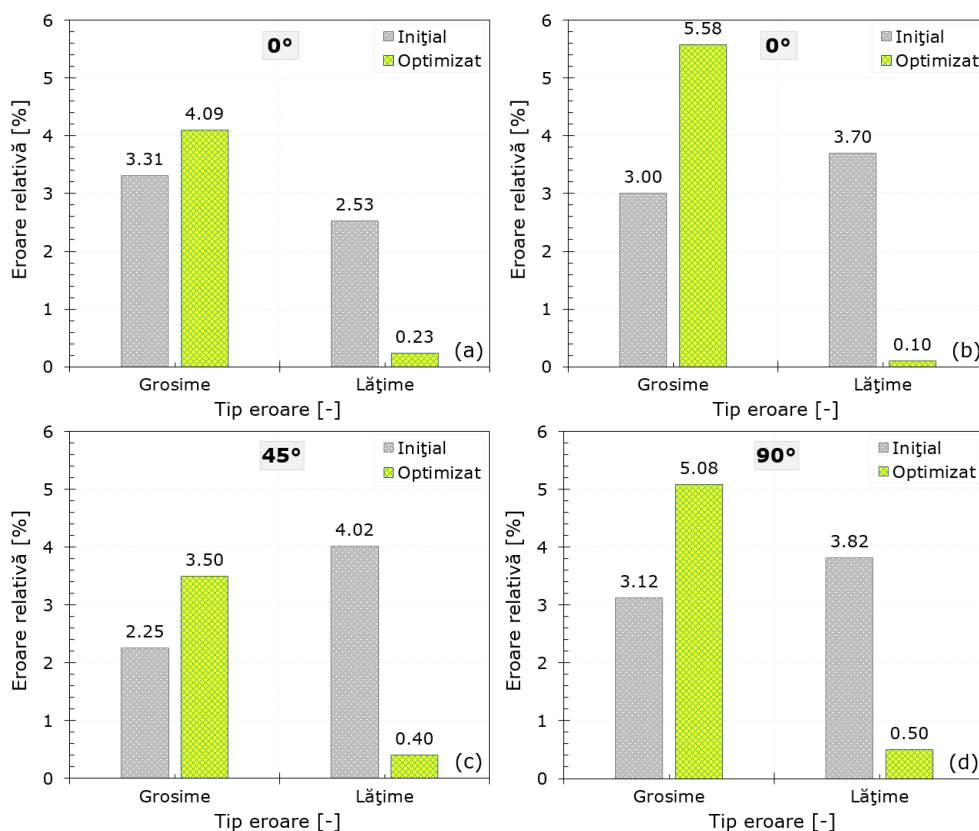


Fig. 2.34. Erorile relative de grosime și lățime ale epruvetelor din PLA printate prin FDM pentru densitățile de umplere de 70% (a) și 100% (b-d)

În Figura 2.35 este prezentată influența celor șapte parametri de proces investigați (modelul de umplere, densitatea de umplere, orientarea printării, grosimea stratului, viteza de printare, temperatura duzei și numărul de straturi exterioare) asupra principalelor proprietăți la tracțiune (rezistența la tracțiune, deformația

corespunzătoare rezistenței la tracțiune și energia de rupere). Rezultatele sunt prezentate în termenii creșterii procentuale ale proprietăților fiecărui parametru.

Parametrii procesului cu cea mai mare influență asupra rezistenței la tracțiune sunt densitatea de umplere (43,41%) și numărul de straturi exterioare (25,73%). La polul opus, modelul de umplere are influențe minore asupra proprietăților de rezistență (doar 0,99%), influența sa fiind de aproape 44 de ori mai mică decât cea a densității de umplere. S-a constatat că densitatea de umplere și grosimea stratului influențează semnificativ rezultatele deformațiilor. Astfel, densitatea de umplere a arătat o creștere procentuală a deformației corespunzătoare rezistenței la tracțiune de 27,49%, în timp ce grosimea stratului de 22,94%. S-au observat valori mai mici ale creșterii procentuale a deformațiilor pentru viteza de printare (6,52%) și modelul de umplere (9,52%).

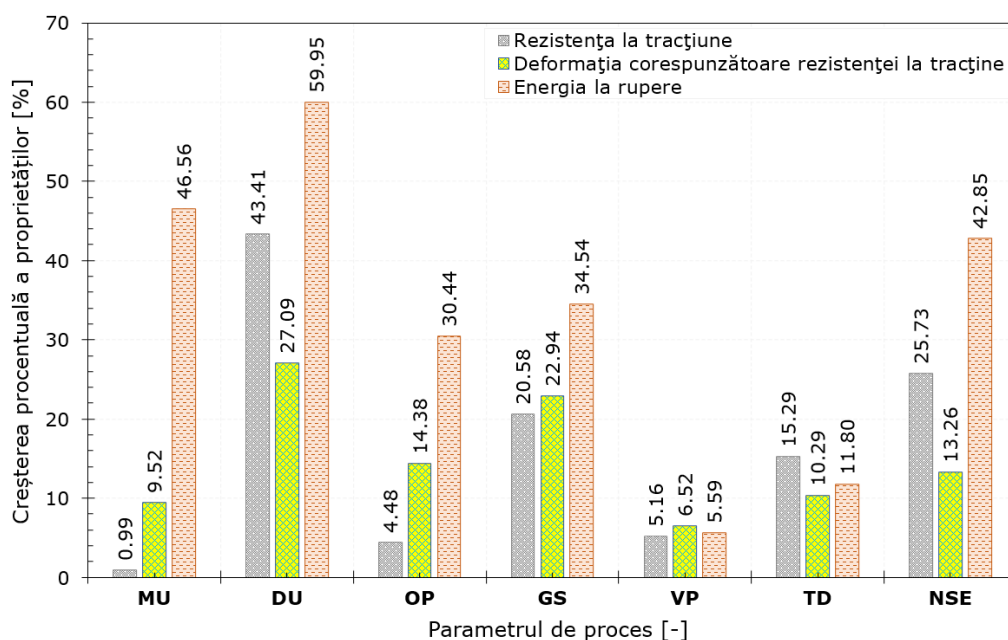


Fig. 2.35. Influența parametrilor procesului asupra proprietăților la tracțiune ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM

Trebuie remarcat faptul că toți parametrii procesului au avut un efect major asupra energiei de rupere a epruvetelor printate 3D. Cele mai mari creșteri procentuale ale energiei de rupere au fost înregistrate de densitatea de umplere (59,95%) și modelul de umplere (46,56%), în timp ce viteza de printare și temperatura duzei au înregistrat creșteri de 5,59% și, respectiv, 11,80%.

Prin urmare, dacă se urmărește obținerea de componente rezistente care să absoarbă cantități mari de energie până la rupere, trebuie efectuat un proces de optimizare a densității de umplere și a numărului de straturi exterioare. Pe de altă parte, dacă se dorește modificarea deformațiilor componentelor în timpul funcționării, trebuie luate în considerare densitatea de umplere și grosimea stratului.

2.5. Comparații cu literatura de specialitate

În final, rezultatele inițiale și optimizate sunt comparate cu literatura de specialitate. Figura 2.36 arată rezistența la tracțiune a diferitelor tipuri de epruvete din PLA fabricate prin tehnologia FDM și procesul de turnare prin injecție.

Pentru epruvetele printate 3D se face comparația pentru orientările de printare de 0, 45 și 90°, în timp ce pentru cele injectate sunt prezentate limitele superioare (linia roșie) și inferioare (linia albastră). La prima vedere, se poate observa că majoritatea studiilor efectuate în literatură se regăsesc pentru orientarea printării la 0°. Cercetătorii raportează limita inferioară, și uneori limita superioară, a rezistenței la tracțiune pentru piesele injectate ușor diferit [261-264].

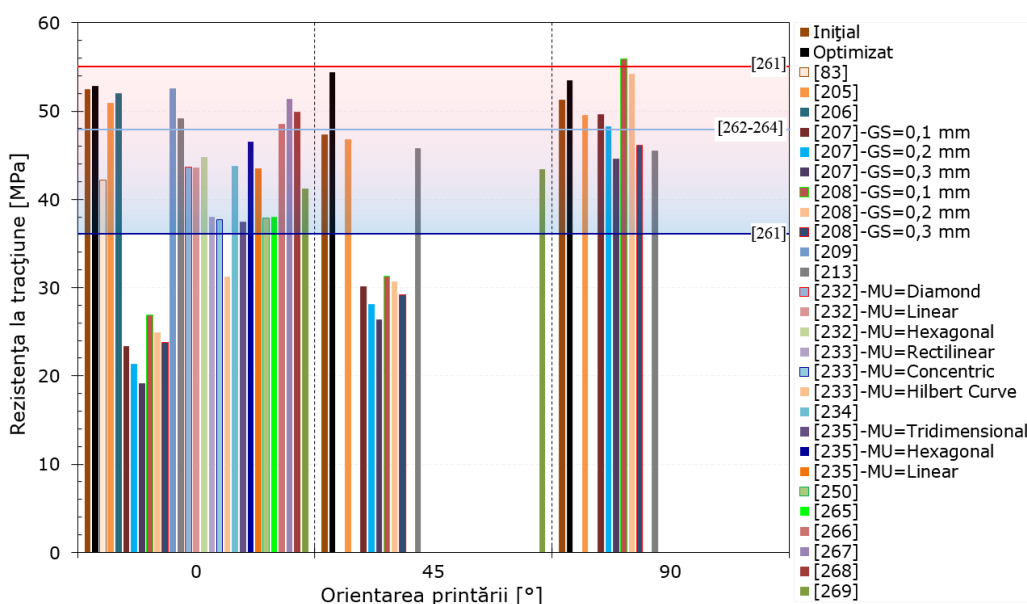


Fig. 2.36. Comparația rezistenței la tracțiune a epruvetelor din PLA obținute prin procesele de printare FDM și de turnare prin injecție [83, 205-209, 213, 232-235, 250, 261-269]

Valorile inițiale și optimizate ale rezistenței la tracțiune pentru PLA obținute prin tehnologia FDM sunt în bună concordanță cu cele raportate în literatura de specialitate pentru același material. În majoritatea cazurilor, în special rezultatele optimizate, acestea sunt net superioare celor din literatură. Mai mult, rezultatele obținute se încadrează în limitele celor injectate (vezi regiunea evidențiată în Figura 2.36), cu o preponderență în regiunea mijlocie-superioară.

În general, componentele injectate sunt fabricate la presiune înaltă, ceea ce dezvoltă o conectare excelentă a lanțurilor polimerice, rezultând componente rezistente. Pe de altă parte, în procesul FDM, straturile inferioare și superioare adesea nu se leagă perfect între ele, ducând ulterior la dezvoltarea unor structuri poroase cu spații mari între raster-uri [255]. Acestea sunt principalele cauze care duc la micile diferențe între componentele printate și cele injectate, și în același timp la ușoara superioritate a celor injectate.

3. COMPORTAMENTUL LA COMPRESIUNE

3.1. Noțiuni generale

Prototiparea rapidă se utilizează pe scară tot mai largă în diverse industrii de top și nu numai. Cu toate acestea, majoritatea investigațiilor efectuate se concentrează pe comportamentul la tracțiune sau încovoiere al componentelor printate 3D, în timp ce foarte puține studii au fost îndreptate către comportamentul la compresiune al acestora. În acest sens, în capitolul de față s-au analizat proprietăți precum rezistența la tracțiune [79, 270, 271], alungirea la rupere [266, 272], modulul de elasticitate [243, 273] și rezistența la încovoiere [70, 274, 275].

Există, totuși, echipe de cercetători care abordează într-o oarecare măsură comportamentul la compresiune al componentelor printate 3D. Hernandez și colab. [275] au menționat modificări ale comportamentului la compresiune al epruvetelor din ABS P430 prin schimbarea orientării acestora pe patul de printare. Ei au raportat valori mai ridicate ale proprietăților mecanice la compresiune (rezistența la compresiune și modulul de compresiune) la orientarea de 0°, respectiv valori mai mici pentru orientarea de 45°.

Ang și colab. [276] au studiat efectul golului de aer și al lățimii rasterului asupra porozității și comportamentului la compresiune al pieselor cilindrice din ABS. Autorii au remarcat că piesele cu porozitate minimă au dezvoltat o rezistență la compresiune mai bună.

Sood și colab. [277] au propus un model statistic neliniar pentru a prezice rezistența la compresiune a epruvetelor din ABS P400. Ei au raportat că un unghi de printare mai mic și o grosime mai mare a stratului au evidențiat o rezistență mai mare la compresiune. În plus, autorii au observat că efectul lățimii rasterului asupra rezistenței la compresiune nu a fost semnificativ.

Dominguez-Rodríguez și colab. [278] au evaluat influența orientării și a modelului de umplere asupra rezistenței la compresiune a pieselor din ABS. Autorii au observat că piesele construite de-a lungul direcției verticale au arătat o rezistență mai bună în comparație cu piesele printate transversal.

Aloyaydi și colab. [279] prezintă efectul modelelor de umplere (triangle, grid, quarter cubic, și tri-hexagon) asupra proprietăților mecanice ale epruvetelor din PLA printate 3D prin efectuarea unor teste de compresiune. Rezultatele lor au arătat că modelul Grid a prezentat cea mai mare rezistență la compresiune (72 MPa), datorită mai multor straturi aliniate de-a lungul direcției de încărcare. Autorii au raportat cele mai joase valori ale rezistenței la compresiune (27,2 MPa) pentru modelul de umplere quarter cubic.

Lee și colab. [280] au încercat să descrie optimizarea parametrilor procesului FDM pentru performanța optimă a prototipurilor din ABS în ceea ce privește elasticitatea și flexibilitatea. Din rezultatele lor, se constată că parametrii precum grosimea stratului, unghiul raster și golurile de aer afectează semnificativ performanța elastică a epruvetelor printate.

94 Comportamentul la compresiune

Vasudevarao și colab. [281] au explorat impactul variației parametrilor asupra rezistenței structurii componentelor din ABS, fabricate prin FDM, iar rezultatele acestora au relevat faptul că rezistența la compresiune a fost afectată semnificativ de golurile de aer și de lățimea rasterului.

Bagsik și colab. [282] au explorat efectul a două orientări (0° și 90°) asupra rezistenței la compresiune a pieselor fabricate din materialul ULTEM9085. Autorii au concluzionat că rezistența la compresiune a piesei printate la 90° a fost mai mare decât a celei printate la 0° .

Wu și colab. [88] au raportat grosimea stratului ca un parametru important care afectează rezistența la compresiune a epruvetelor din ABS și PEEK printate 3D prin FDM. Ei au raportat că materialul PEEK deține proprietăți de rezistență mai bune în comparație cu ABS, în timp ce proprietățile elastice sunt aproape similare.

Baich și colab. [283] au demonstrat o creștere a rezistenței la compresiune, odată cu creșterea complexității piesei. Rezultatele la compresiune au evidențiat o relație liniară între volumul materialului și performanța rezistență-cost.

Uz Zaman și colab. [284] au fabricat piese funcționale din PLA și PETG pentru industria aerospațială și au studiat impactul parametrilor procesului FDM asupra proprietăților la compresiune. Rezultatele lor au relevat o rezistență la compresiune mai mare a pieselor din PETG în comparație cu cele din PLA. Autorii au constatat că densitatea de umplere a fost cel mai dominant factor în ceea ce privește valorile ridicate ale caracteristicilor mecanice. Conform analizei lor statistice, combinația optimă a parametrilor de proces a inclus o grosime a stratului de 0,2 mm, un număr de 4 straturi exterioare, modelul de umplere tip diamant și un procent de umplere de 70%.

Recent, efectul parametrilor de proces (grosimea stratului, densitatea de umplere și orientarea printării) asupra rezistenței la compresiune a pieselor din ABS printate prin tehnologia FDM a fost investigat de către Fahad și colab. [285]. Rezultatele au arătat că densitatea de umplere mare și grosimea mare a stratului au dus la valori mai mari ale rezistenței la compresiune. Ei au observat că orientarea XZ a arătat valori mai bune ale rezistenței la compresiune la toate densitățile și grosimile de strat.

3.2. Scopul investigațiilor

Analizând proprietățile la compresiune studiate de către alți cercetători s-a constatat că acestea se concentrează în totalitate pe două categorii de proprietăți: elastice și de rezistență (vezi Secțiunea 3.1). Cu toate acestea, având în vedere că prototiparea rapidă oferă o gamă variată de parametri de proces (vezi Secțiunea 1.3.2), comportamentul mecanic al componentelor printate 3D poate fi abordat și din prisma capacităților de absorbție a energiei.

Așadar, Capitolul 3 este dedicat în întregime procesului de optimizare al epruvetelor din PLA, printate prin tehnologia FDM. Optimizarea ține cont de influența a trei parametri de proces (densitatea de umplere, modelul de umplere și forma epruvetelor) asupra principalelor proprietăți la compresiune (proprietățile elastice și de rezistență, precum și performanțele de absorbție a energiei). Pentru studiul energiei de absorbție se utilizează conceptele asociate materialelor celulare.

3.3. Materiale și metode

3.3.1. Materiale

Materialul utilizat pentru printarea 3D a epruvetelor investigate este filamentul PLA. Avantajele, aplicațiile și caracteristicile tehnice ale acestuia sunt prezentate în detaliu în Secțiunea 2.3.1.

3.3.2. Proiectarea și fabricarea epruvetelor

Pentru determinarea comportamentului la compresiune s-au folosit epruvete cubice. Figura 3.1 prezintă forma și parametrii geometrici ai epruvetelor investigate.

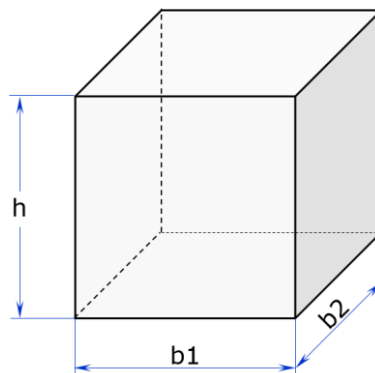


Fig. 3.1. Forma și parametrii geometrici ai epruvetelor de compresiune

Epruvetele au fost modelate în programul SolidWorks® și apoi procesate în Ultramaker Cura 5.0.0. Toate epruvetele au avut dimensiunea laturii cubului de 30 mm. Pentru fabricarea epruvetelor s-a folosit imprimanta Original Prusa i3 MK3, prezentată în Figura 3.2.



Fig. 3.2. Vedere de ansamblu a imprimantei Original Prusa i3 MK3 (stânga) și a epruvetelor din PLA printate 3D (dreapta)

96 Comportamentul la compresiune

Tabelul 3.1 prezintă parametrii de configurare ai imprimantei utilizați în procesul de fabricație a epruvetelor.

Tabelul 3.1. Parametrii utilizați în procesul de fabricație a epruvetelor de compresiune

Parametru	Abreviere	Unitate de măsură	Valoare
Diametrul duzei	DD	[mm]	0.6
Grosimea stratului	GS	[mm]	0.20
Număr straturi exterioare	NSE	[-]	3
Straturi superioare solide	SSS	[-]	4
Straturi inferioare solide	SIS	[-]	4
Temperatura duzei	TD	[°C]	220
Temperatura patului	TP	[°C]	42
Rezoluția stratului	RS	[mm]	0.05-0.3
Precizia poziționării	PP	[mm]	X/Y 0.0125, Z 0.002
Cantitatea extruderului	CE	[-]	simplu
Viteza de printare	VP	[mm/s]	20
Densitatea de umplere	DU	[%]	30*
Model de umplere	MU	[-]	Star**
Orientarea printării	OP	[°]	0
Viteza duzei	VD	[mm/s]	100
Geometrie epruvetă	GE	[-]	Cub***

*Excluzând efectul densității de umplere, unde s-au folosit 10 densități diferite (vezi Secțiunea 3.4), toate celelalte investigații au utilizat o densitate de umplere de 30%.

**Excluzând efectul modelului de umplere, unde s-au folosit 17 modele diferite (vezi Secțiunea 3.5), toate celelalte investigații au utilizat modelul de umplere Star.

***Excluzând efectul formei epruvetei, unde s-au folosit 16 geometrii diferite (vezi Secțiunea 3.6), toate celelalte investigații au utilizat epruvete cubice cu latura de 30 mm.

În acest capitol s-a investigat în detaliu efectul a 3 parametri de proces (densitatea de umplere, modelul de umplere și forma epruvetelor) asupra proprietăților la compresiune (proprietăți elastice, proprietăți de rezistență și performanțele energiei de absorbție) ale epruvetelor printate 3D prin tehnologia FDM. Detalii referitoare la acești parametri sunt prezentate în subcapitolele în care se investighează fiecare parametru în parte.

3.3.3. Analiza dimensională

Inițial, epruvetele cubice printate 3D au fost supuse, din punct de vedere constructiv și dimensional, unui control de calitate. Valorile celor trei dimensiuni (înălțimea h , lățimea b_1 și lățimea b_2), rezultate în urma procesului de printare 3D, au fost prelucrate statistic și validate înainte de testare. Ulterior, epruvete considerate neconforme (cu erori mai mari de $\pm 5\%$) au fost înlocuite.

3.3.4. Programul experimental

Programul experimental cuprinde o serie de încercări de compresiune efectuate pe epruvete cubice (Secțiunea 3.3.2). Testele mecanice au fost efectuate la temperatura camerei pe mașina de testare LBG TC100 de 100 kN (Figura 3.3).



Fig. 3.3. Mașina universală de testare LBG TC100 de 100 kN

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

3.3.5. Definierea proprietăților

Încercarea cvasi-statică de compresiune se efectuează aplicând unei epruvete cubice o forță axială crescătoare, până la compactarea/comprimarea acesteia. În urma încercării de compresiune se obțin curbele forță (F) – deplasare (δ). Folosind aria secțiunii transversale (dimensiunile b_1 și b_2) și înălțimea epruvetei (dimensiunea h), curbele F - δ se transformă în curbe tensiune (σ)-deformație (ϵ).

Figura 3.4 prezintă o curbă caracteristică la compresiune, obținută în urma testării unui material celular (de exemplu: spumă, structură printată 3D) [286, 287]. Analizând curba σ - ϵ , se pot identifica următoarele regiuni caracteristice:

- regiunea liniar-elastică, A;
- regiunea de platou, B;
- regiunea de densificare, C.

Regiunea A este cea mai scurtă, se găsește la deformații joase și este definită de comportamentul elastic al materialului.

Regiunea B este cea mai extinsă regiune din curba tensiune-deformație și este definită de mecanismele de cedare care au loc la nivel celular (flambajul pereților verticali, încovoierea pereților orizontali, etc.).

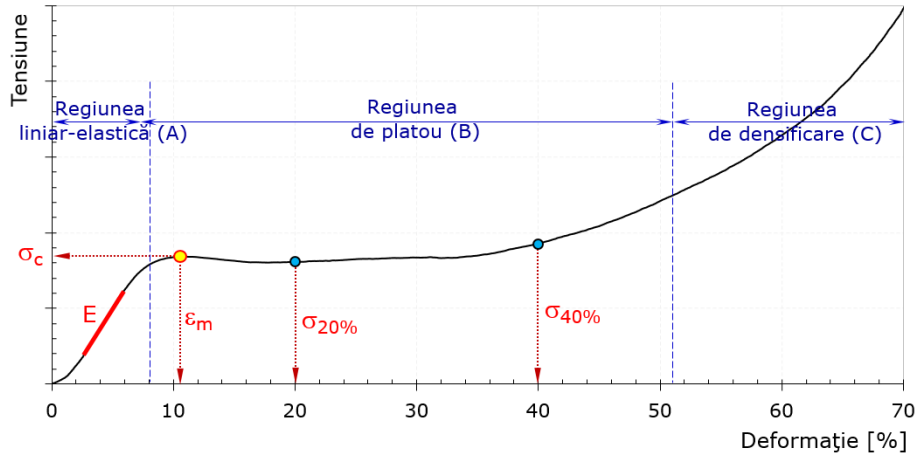


Fig. 3.4. Curbele tensiune-deformație la compresiune. Identificarea caracteristicilor mecanice

Regiunea C este definită de compactarea celulelor epruvetei și comportarea acesteia este asemenea materialului din care este confecționată.

Prelucrând curbele σ - ε se determină caracteristicile mecanice la compresiune ale epruvetelor. Principalele proprietăți se definesc astfel [288-290]:

- *modulul la compresiune* (E): principala caracteristică referitoare la deformabilitatea (rigiditatea) materialului și se determină de pe regiunea liniar-elastică a curbei σ - ε (domeniul de valabilitate al legii lui Hooke), vezi Figura 3.4. El este, de asemenea, cunoscut și sub denumirea de modul de elasticitate longitudinal sau constantă de material. Este definit ca fiind raportul dintre tensiunea axială și deformația relativă axială și este exprimat în megapascali (MPa).
- *rezistența la compresiune* (σ_c): tensiunea corespunzătoare primului maxim local din curba σ - ε la compresiune, vezi Figura 3.4. Reprezintă raportul dintre forța maximă măsurată la apariția primei fisuri sau la deformarea plastică a epruvetei și aria secțiunii transversale inițiale a epruvetei. Este exprimată în MPa.
- *deformația corespunzătoare rezistenței la compresiune* (ε_m): deformația la care se atinge rezistența maximă la compresiune a epruvetei, vezi Figura 3.4. Este exprimată adimensional (-) sau procentual (%).
- *tensiunea de platou* (σ_{pl}): media aritmetică a tensiunilor corespunzătoare unor deformații la compresiune de 20% ($\sigma_{20\%}$), respectiv 40% ($\sigma_{40\%}$), vezi Figura 3.4. Este exprimată în megapascali (MPa).
- *tensiunea la densificare* (σ_d): tensiunea corespunzătoare unei eficiențe energetice maxime (vezi Figura 3.5). Este exprimată în megapascali (MPa).
- *deformația la densificare* (ε_d): deformația corespunzătoare unei eficiențe energetice maxime (vezi Figura 3.5). Este exprimată adimensional (-) sau procentual (%).
- *energia de absorbție* (EA): aria de sub curba σ - ε la compresiune, calculată până la o deformație de 50% ($EA_{50\%}$) sau până la începutul densificării (EA_d), vezi Figura 3.5. Energia de absorbție se determină cu relația (3.1) și este exprimată în MJ/m³.

$$EA_i = \int_0^{\varepsilon_i} \sigma d\varepsilon \quad (3.1)$$

unde $i=50\%$ (pentru o deformație de 50%) și $i=d$ (pentru deformația la densificare).

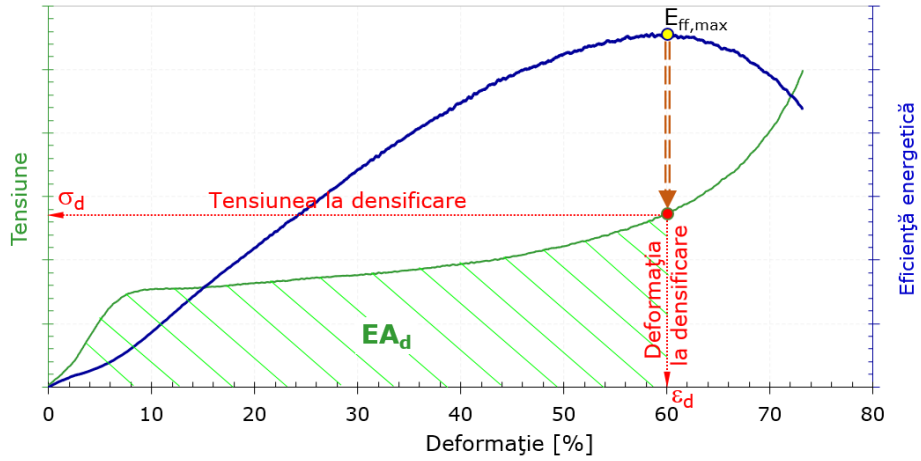


Fig. 3.5. Curbele tensiune-deformație și eficiența energetică-deformație la compresie. Determinarea punctului de densificare

- *eficiența energiei de absorbție (E_{ff}):* absorbția de energie împărțită la produsul tensiunii maxime (σ_c) și mărimea intervalului de deformare (ε_d). Eficiența energetică la densificare se determină cu relația (3.2). Este exprimată adimensional (-) sau procentual (%).

$$E_{ff,d} = \frac{EA_d}{\sigma_c \cdot \varepsilon_d} \tag{3.2}$$

- *amplitudinea tensiunii ($\Delta\sigma$):* diferența dintre tensiunea (σ_M) primului maxim local (1_M) și tensiunea (σ_m) primului minim local (1_m) din curba tensiune-deformație la compresie (vezi Figura 3.6). Amplitudinea tensiunii se determină cu relația (3.3) și este exprimată în megapascali (MPa).

$$\Delta\sigma = \sigma_M - \sigma_m \tag{3.3}$$

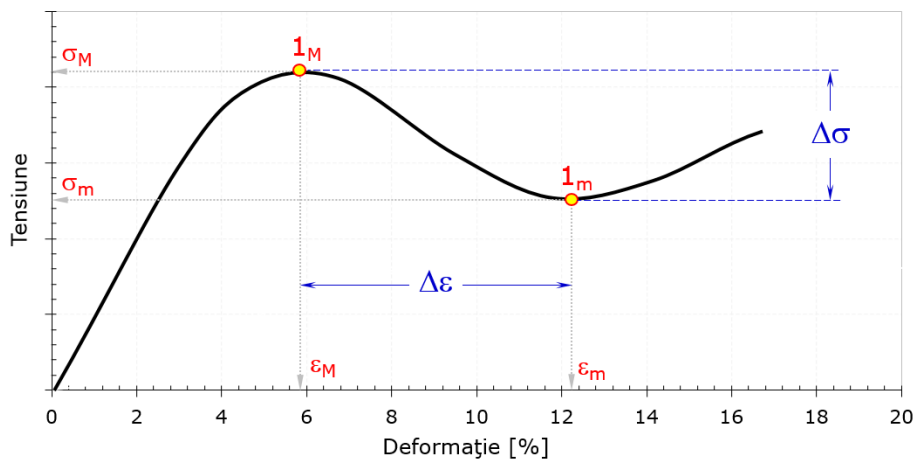


Fig. 3.6. Curbele tensiune-deformație la compresie. Determinarea amplitudinii tensiunii ($\Delta\sigma$) și deformației ($\Delta\varepsilon$)

- *amplitudinea deformației* ($\Delta\varepsilon$): diferența dintre deformația (ε_m) primului minim local (1_m) și deformația (ε_M) primului maxim local (1_M) din curba tensiune-deformație la compresiune (vezi Figura 3.6). Amplitudinea deformației se determină cu relația (3.4) și este exprimată adimensional (-) sau procentual (%).

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_m - \varepsilon_M \quad (3.4)$$

3.4. Efectul densității de umplere

Acest subcapitol investighează efectul densității de umplere (DU) asupra comportamentului la compresiune al epruvetelor cubice din PLA fabricate prin tehnologia FDM. Analiza se concentrează pe acuratețea dimensională, proprietățile mecanice și performanțele de absorbție a energiei. Pentru a investiga efectul densității asupra proprietăților amintite, s-au luat în considerare 10 densități de umplere în domeniul 10-100%, cu un pas de 10% (Figura 3.7).

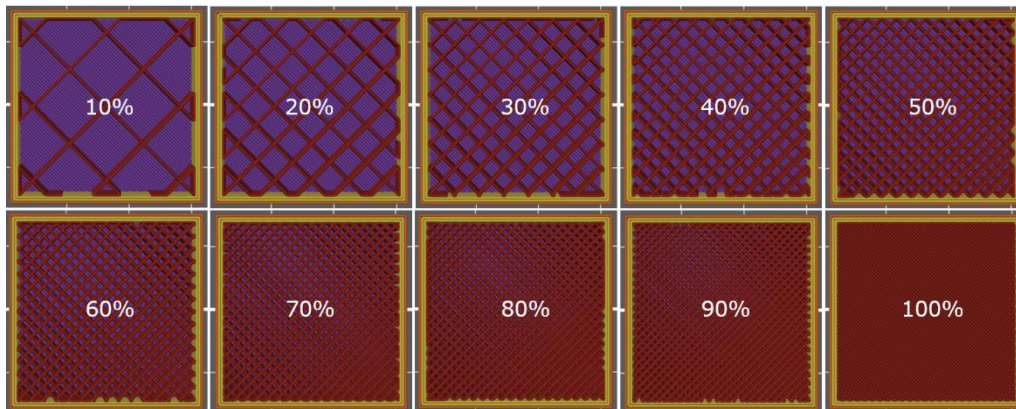


Fig. 3.7. Densitățile de umplere investigate

Figura 3.8 prezintă o imagine de ansamblu a epruvetelor printate, și, ulterior, evaluate dimensional și experimental.

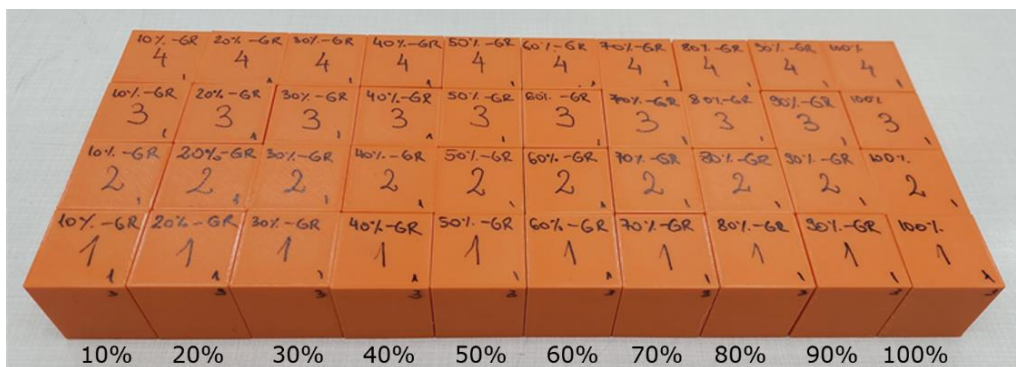


Fig. 3.8. Epruvetele printate 3D privind studiul efectului densității de umplere

Epruvetele de compresiune investigate au fost printate utilizând parametrii de proces enumerați în Tabelul 3.1. În plus, pentru a putea compara rezultatele, toate epruvetele au prezentat modelul de umplere Grid.

3.4.1. Evaluarea proprietăților fizice

S-au evaluat dimensional trei parametri ai epruvetelor (vezi Figura 3.1): înălțime (h), lățime 1 (b_1) și lățime 2 (b_2). Parametrii evaluați sunt prezentați ca media a cel puțin patru măsurători. Eroarea procentuală dimensională (EPD) pentru fiecare parametru menționat a fost calculată folosind Ecuația (2.1), ținând cont de dimensiunile reale și nominale ale epruvetelor printate 3D. În relația (2.1), valoarea reală V_R reprezintă dimensiunea măsurată a parametrilor geometrici, iar valoarea nominală V_N este dimensiunea definită în faza de proiectare (în cazul de față, 30 mm pentru toate cele trei dimensiuni).

Figura 3.9 prezintă erorile relative de înălțime (h) și lățime (b_1 și b_2) ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM în funcție de densitatea de umplere. În mare parte, s-a observat că erorile de înălțime sunt mai mici decât erorile de lățime, ceea ce înseamnă că epruvetele prezintă o precizie dimensională mai bună pe direcția de creștere comparativ cu direcțiile în plan.

Ca și observație generală, epruvetele printate au prezentat o precizie dimensională foarte ridicată, obținându-se erori maxime de 0,14%. Totuși, nu au existat epruvete care să prezinte eroarea zero pentru cele trei dimensiuni investigate, cea mai mică eroare înregistrată fiind de 0,01%. Pentru toate densitățile de umplere, erorile geometrice prezintă diferențe semnificative, cu excepția densității de 70% unde se obțin valori identice (0,03%).

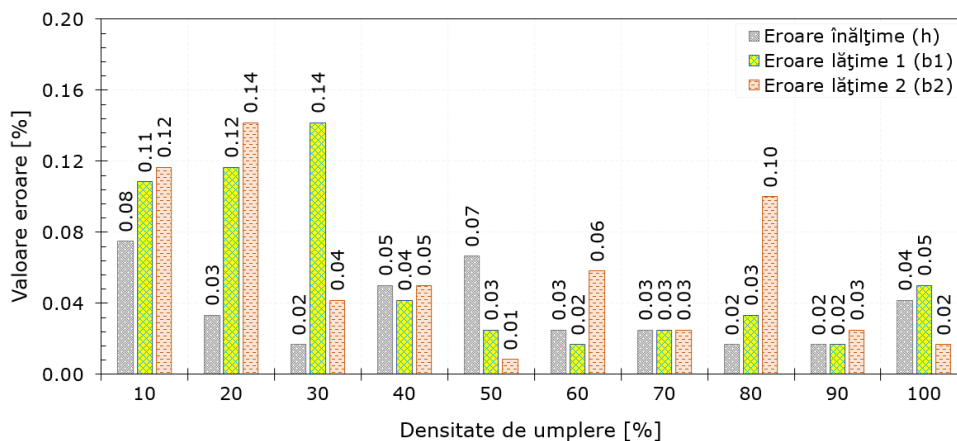


Fig. 3.9. Erorile relative de înălțime și lățime ale epruvetelor din PLA printate în funcție de densitatea de umplere

Variația masei (teoretice și măsurate) epruvetelor printate în funcție de densitatea de umplere este prezentată în Figura 3.10. Cele două mase cresc liniar odată cu creșterea densității, conform Ecuațiilor (3.5) și (3.6). Ambele ecuații prezintă un coeficient de determinare $R^2 > 0,9995$, evidențiind acuratețea acestora.

$$m_m = 0,2449 \cdot DU + 7,3255, \quad \text{cu } R^2 = 0,9996 \quad (3.5)$$

$$m_t = 0,2618 \cdot DU + 7,5253, \quad \text{cu } R^2 = 0,9998 \quad (3.6)$$

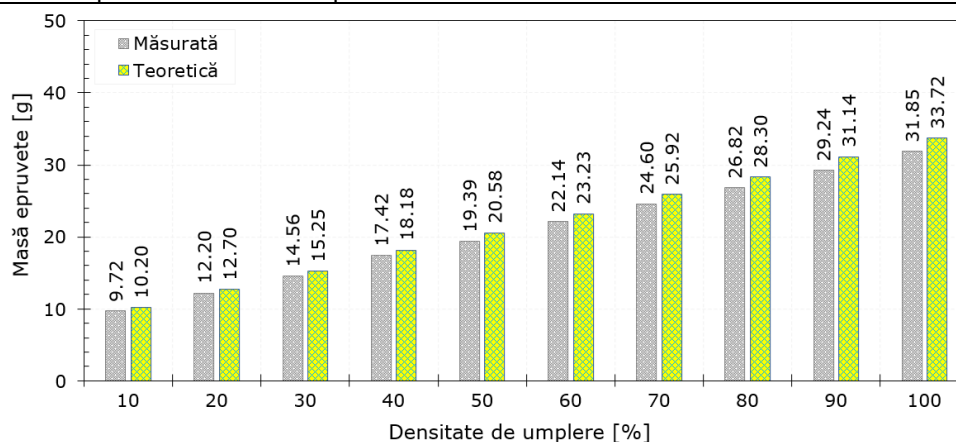


Fig. 3.10. Variația masei teoretice și măsurate a epruvetelor din PLA printate în funcție de densitatea de umplere

Ambele mase prezintă o creștere aproximativ identică cu creșterea densității epruvetelor (69,5% pentru m_m și 69,7% pentru m_t). Cea mai mare diferență între masa teoretică și cea măsurată este găsită pentru densitatea de 90% (6,12%), iar cea mai mică pentru densitatea de 20% (3,96%) (Figura 3.11). Diferențele dintre m_m și m_t prezintă o deviație standard de 0,7% în intervalul de densități 10-100%.

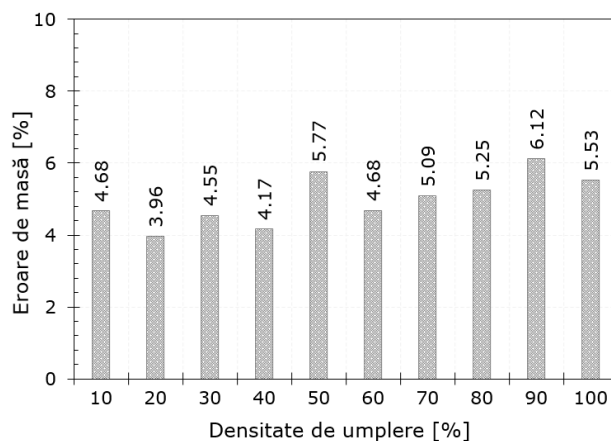


Fig. 3.11. Erorile relative de masă ale epruvetelor din PLA printate în funcție de densitatea de umplere

Erorile relative de masă (ERM), din Figura 3.11, s-au calculat pentru fiecare densitate de umplere folosind Ecuația (3.7):

$$ERM [\%] = \frac{|m_m - m_t|}{m_t} \times 100 \quad (3.7)$$

cu m_m și m_t definite anterior.

Variația timpului de printare (t_p) al epruvetelor în funcție de densitatea de umplere este prezentată în Figura 3.12. Timpul de printare crește liniar, conform Ecuației (3.8), cu creșterea densității epruvetelor.

$$t_p = 0,7947 \cdot DU + 54,8560, \quad \text{cu } R^2 = 0,9902 \quad (3.8)$$

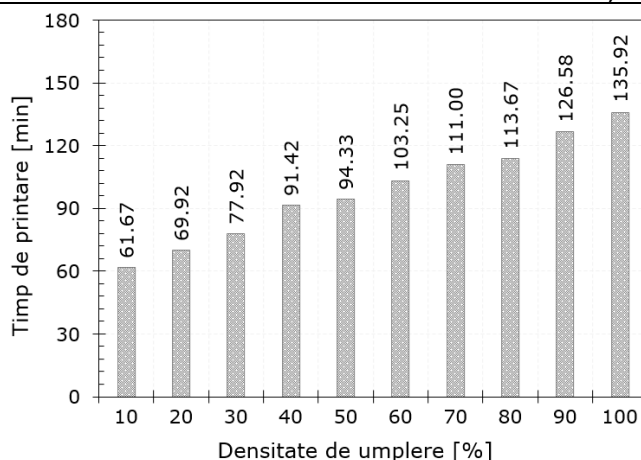


Fig. 3.12. Variația timpului de printare al epruvetelor din PLA în funcție de densitatea de umplere

Între epruvetele printate cu o densitate de 10% și cele cu 100% se înregistrează o creștere a timpului de printare t_p cu 54,6%. Cea mai mică creștere a t_p , de 2,3%, este obținută între densitățile 70 și 80%, iar cea mai mare de la 30 la 40% (14,8%). Deviația standard pentru fiecare interval caracteristic (10-20%, 20-30%, ..., 90-100%) este de 4%.

Tabelul 3.2 prezintă valorile proprietăților fizice și a erorilor relative aferente obținute în urma prelucrării datelor.

Tabelul 3.2. Proprietățile fizice și erorile asociate acestora. Efectul densității de umplere

DU [%]	h [mm]	b1 [mm]	b2 [mm]	EPD-h [%]	EPD-b1 [%]	EPD-b2 [%]	m_t [g]	m_m [g]	ERM [%]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	29,99	30,02	30,00	0,03	0,07	0,00	10,20	9,721	4,71
	30,04	30,03	30,05	0,13	0,10	0,17		9,737	4,55
	29,97	30,04	30,07	0,10	0,13	0,23		9,720	4,72
	30,01	30,04	30,02	0,03	0,13	0,07		9,719	4,73
20	30,00	30,05	30,07	0,00	0,17	0,23	12,70	12,202	3,90
	30,02	30,06	30,05	0,07	0,20	0,17		12,188	4,01
	29,99	30,02	30,03	0,03	0,07	0,10		12,184	4,04
	29,99	30,01	30,02	0,03	0,03	0,07		12,206	3,87
30	30,00	30,02	30,00	0,00	0,07	0,00	15,25	14,559	4,54
	30,00	30,06	30,00	0,00	0,20	0,00		14,557	4,55
	29,98	30,04	29,98	0,07	0,13	0,07		14,565	4,50
	30,00	30,05	30,03	0,00	0,17	0,10		14,551	4,59
40	30,01	30,00	30,01	0,03	0,00	0,03	18,18	17,414	4,19
	29,98	30,03	30,03	0,07	0,10	0,10		17,400	4,26
	29,99	30,00	29,99	0,03	0,00	0,03		17,417	4,17
	29,98	30,02	29,99	0,07	0,07	0,03		17,440	4,04
50	29,97	30,00	29,99	0,10	0,00	0,03	20,58	19,401	5,73
	29,97	29,99	30,00	0,10	0,03	0,00		19,428	5,60
	30,01	30,01	30,00	0,03	0,03	0,00		19,379	5,84
	29,99	30,01	30,00	0,03	0,03	0,00		19,367	5,90

Tabelul 3.2. (Continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
60	30,02	30,01	30,02	0,07	0,03	0,07	23,23	22,131	4,73
	30,00	30,00	30,03	0,00	0,00	0,10		22,118	4,78
	30,00	30,00	30,00	0,00	0,00	0,00		22,157	4,62
	30,01	30,01	29,98	0,03	0,03	0,07		22,160	4,60
70	30,01	30,02	30,00	0,03	0,07	0,00	25,92	24,605	5,08
	30,00	30,00	30,02	0,00	0,00	0,07		24,622	5,02
	30,01	30,00	29,99	0,03	0,00	0,03		24,581	5,18
	30,01	30,01	30,00	0,03	0,03	0,00		24,604	5,09
80	30,01	30,01	30,06	0,03	0,03	0,20	28,30	26,753	5,47
	30,00	29,99	30,03	0,00	0,03	0,10		26,847	5,14
	30,00	30,01	30,01	0,00	0,03	0,03		26,862	5,09
	30,01	30,01	30,02	0,03	0,03	0,07		26,805	5,29
90	29,99	30,01	30,00	0,03	0,03	0,00	31,14	29,249	6,08
	30,00	30,00	30,01	0,00	0,00	0,03		29,224	6,16
	30,01	30,00	30,01	0,03	0,00	0,03		29,270	6,01
	30,00	30,01	30,01	0,00	0,03	0,03		29,202	6,23
100	29,99	29,98	29,99	0,03	0,07	0,03	33,72	31,903	5,38
	29,97	29,97	30,00	0,10	0,10	0,00		31,847	5,55
	30,01	30,00	30,01	0,03	0,00	0,03		31,816	5,64
	30,00	30,01	30,00	0,00	0,03	0,00		31,852	5,54

3.4.2. Evaluarea proprietăților mecanice

După cum se poate observa în Figura 3.13, comportamentul la compresiune al epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM este unul asemănător materialelor celulare. În acest sens, se disting următoarele trei regiuni caracteristice:

- regiunea liniar-elastică, A;
- regiunea de platou, B;
- regiunea de densificare, C.

Fiecare regiune mai sus amintită, este definită de proprietăți și mecanisme de cedare distincte (vezi Secțiunea 3.3.5).

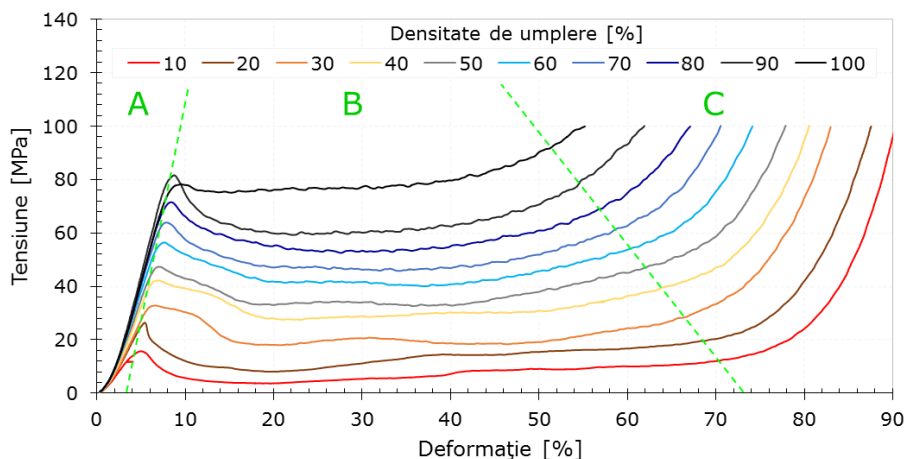


Fig. 3.13. Curbele tensiune-deformație la compresiune ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM. Efectul densității de umplere

3.4. Efectul densității de umplere 105

Zona de început a curbelor tensiune-deformație prezintă o ușoară deviație de la liniaritate, aspect datorat așezării epruvetei sub bacurile mașinii de testare. Indiferent de densitatea de umplere a probei, regiunea liniar-elastică se inițiază în jurul unei deformații de 1,5%, dar extinderea acesteia este puternic influențată de densitate. Astfel, pentru densități joase (10%) limita superioară a zonei liniar-elastice se găsește la deformații de 4%, aceasta crescând până la 9% pentru densitatea maximă (100%).

Zona A se încheie cu punctul de curgere, dincolo de acesta epruvetele intră în zona plastică și, totodată, în regiunea platoului curbelor tensiune-deformație. Regiunea B este foarte importantă pentru aplicațiile componentelor printate utilizate în domeniul absorbției de energie, aspect discutat în detaliu în Secțiunea 3.4.3. După cum se poate vedea în Figura 3.13, atât punctul de început, cât și cel de sfârșit sunt puternic influențate de către densitatea de umplere a epruvetei. Contrar celor prezentate pentru deformațiile asociate inițierii zonei B (cresc odată cu creșterea densității de umplere de la 4 la 9%), deformațiile aferente încheierii acestei zone scad odată cu creșterea densității de umplere (de la valoarea de 70% pentru densitatea de umplere de 10%, până la valoarea 50% pentru densitatea de 100%).

Ultima regiune, cea de densificare, este caracterizată de o creștere accentuată a tensiunii la creșteri relativ reduse ale deformației. În regiunea C are loc compactarea și densificarea epruvetelor supuse testării. Mai exact, la finalul acestei zone, epruveta începe să se comporte asemenea solidului din care este fabricată (filamentul din PLA). Desigur, deoarece regiunea C se dezvoltă imediat după regiunea B, aceasta la rândul ei este influențată de densitatea de umplere, lungimea ei scăzând odată cu creșterea densității.

Figura 3.14 prezintă o vedere de ansamblu a epruvetelor deformate în funcție de densitatea de umplere. Indiferent de densitate, epruvetele au fost încărcate cu aceeași forță maximă de 90 kN. Se poate observa că la densități joase (10%) epruvetele de deformează mai pronunțat, pe când la densități mari, acestea prezintă o înălțime mai mare în urma testului de compresiune.

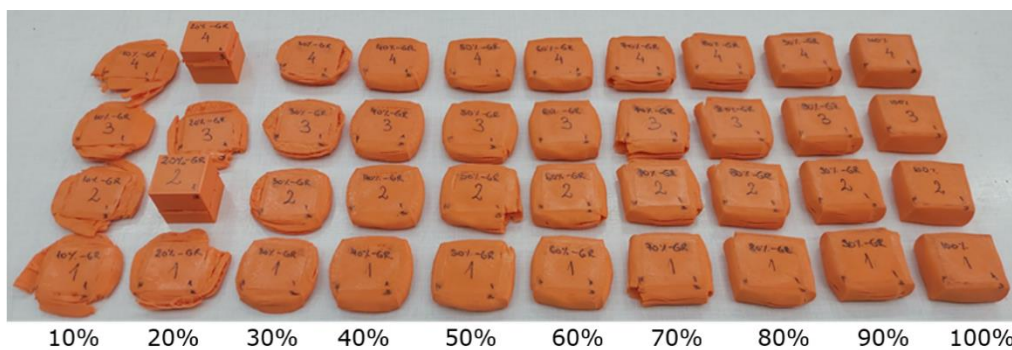


Fig. 3.14. Epruvetele deformate în funcție de densitatea de umplere

Principalele proprietăți mecanice (E , σ_c , ε_m , σ_m , σ_{pl} , σ_d , ε_d , EA_d și $E_{ff,d}$) obținute în urma prelucrării datelor experimentale sunt prezentate în Tabelul 3.3.

106 Comportamentul la compresiune

Tabelul 3.3. Principalele proprietăți mecanice. Efectul densității de umplere

DU	E	σ_c	ε_m	σ_m	σ_{pl}	σ_d	ε_d	EA _d	Eff,d
[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MJ/m ³]	[-]
10	451,58	15,69	5,01	3,63	5,42	11,03	67,62	4,92	0,45
	436,22	15,45	5,06	3,36	5,08	11,28	73,18	5,26	0,47
	454,78	15,72	5,01	3,45	4,63	10,01	63,80	4,15	0,41
	430,68	15,62	4,89	3,06	4,28	7,77	70,15	4,55	0,59
20	642,68	26,40	5,46	8,04	11,27	18,26	66,00	8,70	0,48
	641,34	25,86	5,19	7,99	11,09	14,42	66,20	8,80	0,51
	630,20	26,23	5,39	8,67	12,15	17,05	66,71	9,00	0,53
	606,89	25,64	5,31	8,62	12,02	15,63	66,12	8,87	0,52
30	693,93	32,77	6,69	17,97	18,39	19,15	62,28	11,15	0,53
	693,47	32,76	6,26	18,76	19,84	21,24	66,90	11,82	0,56
	699,09	33,06	6,22	17,60	19,96	23,09	63,52	11,34	0,49
	709,22	32,67	6,03	17,94	20,61	22,49	63,56	11,71	0,52
40	891,56	42,19	6,97	27,47	29,09	34,06	62,39	17,12	0,50
	897,37	41,79	6,69	27,44	29,37	33,98	62,36	16,53	0,49
	904,41	42,41	6,68	27,19	28,41	38,28	62,67	18,69	0,49
	893,87	42,13	6,62	26,88	27,97	32,19	62,60	16,23	0,50
50	946,14	47,34	7,09	32,63	32,93	48,72	62,11	22,92	0,47
	946,64	47,24	6,92	31,13	32,36	44,06	62,32	21,31	0,48
	941,78	46,94	6,88	31,39	32,12	41,92	60,47	20,53	0,49
	940,55	46,41	7,02	31,24	32,18	44,82	60,73	20,78	0,46
60	1041,20	56,42	7,64	40,01	41,25	54,88	61,28	26,08	0,48
	1041,60	56,17	7,54	40,36	41,57	53,02	60,83	25,83	0,49
	1038,10	56,42	7,48	39,70	41,35	52,32	58,84	24,71	0,47
	1078,70	56,53	7,20	39,44	40,37	53,03	59,41	24,95	0,47
70	1106,80	63,89	7,87	45,78	46,97	59,64	57,92	27,41	0,46
	1116,80	64,64	7,73	45,56	46,64	58,52	58,13	27,36	0,47
	1117,70	63,38	7,76	44,90	46,15	57,31	56,53	26,29	0,46
	1123,90	64,29	7,69	44,88	46,60	59,66	58,34	27,49	0,46
80	1227,00	71,49	8,43	52,53	55,12	69,07	57,08	30,88	0,45
	1277,00	72,08	8,19	52,70	54,02	70,44	57,29	31,08	0,44
	1240,50	71,97	8,10	52,89	53,84	67,05	55,44	29,75	0,44
	1206,20	70,45	8,25	52,47	54,05	66,65	55,74	29,87	0,45
90	1316,00	81,60	8,75	59,23	61,12	76,76	54,03	32,41	0,42
	1295,10	80,55	8,66	59,21	61,48	76,06	52,49	31,43	0,41
	1301,10	81,14	8,49	59,42	61,80	79,11	53,89	32,63	0,41
	1314,20	80,64	8,47	60,08	61,45	74,01	52,89	31,61	0,43
100	1270,10	79,52	8,98	76,47	78,67	103,88	51,28	41,29	0,40
	1272,60	79,80	9,57	76,13	78,59	99,10	51,68	40,11	0,40
	1273,00	78,18	9,55	75,06	77,89	99,82	51,15	40,43	0,41
	1286,80	79,34	8,99	75,50	78,46	96,06	52,18	38,74	0,40

Modulul de elasticitate la compresiune (E) crește odată cu creșterea densității de umplere (Figura 3.15). Diferența procentuală între valorile extreme este de 66,1%. Cea mai mare creștere a modulului la compresiune, de 29,7%, s-a obținut între densitățile 10-20%. Un aspect interesant este legat de faptul că densitatea de

umplere de 100% prezintă valori mai mici ale modului comparativ cu densitatea de 90%. În acest caz, scăderea procentuală este de 2,4%.

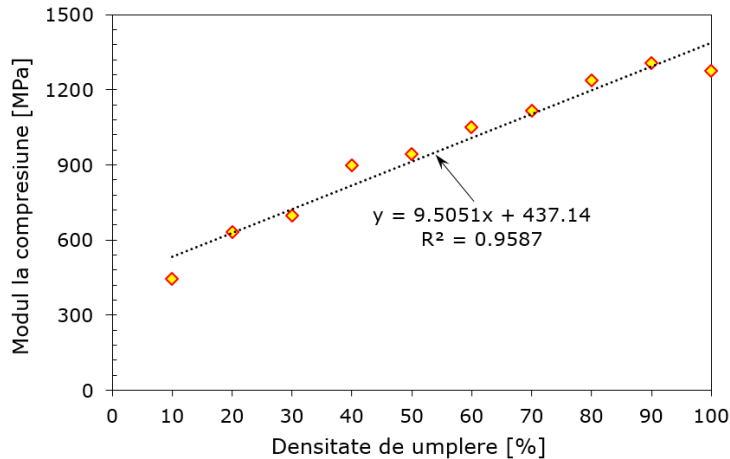


Fig. 3.15. Variația modului de elasticitate la compresiune al epruvetelor din PLA printate. Efectul densității de umplere

Variația modului la compresiune cu densitatea este una liniară și urmează Ecuația (3.9). Aceasta relație prezintă un coeficient de determinare $R^2=0,9587$.

$$E = 9,5051 \cdot DU + 437,14, \quad \text{cu } R^2 = 0,9587 \quad (3.9)$$

Figura 3.16 prezintă variația proprietăților de rezistență (rezistența la compresiune - σ_c , tensiunea minimă - σ_m , tensiunea de platou - σ_{pl} și tensiunea la densificare - σ_d) cu densitatea de umplere. Ca observație generală, toate proprietățile de rezistență cresc liniar cu creșterea densității epruvetelor printate. Creșterea proprietăților este exprimată cu ajutorul Ecuațiilor (3.10)-(3.13). Coeficientul de determinare R^2 este foarte apropiat de 1 pentru toate relațiile, ceea ce indică o precizie ridicată a prezicerii proprietăților de rezistență în intervalul de densități investigat (10-100%).

$$\sigma_c = 0,7427 \cdot DU + 10,7200, \quad \text{cu } R^2 = 0,9869 \quad (3.10)$$

$$\sigma_m = 0,7546 \cdot DU - 5,3324, \quad \text{cu } R^2 = 0,9869 \quad (3.11)$$

$$\sigma_{pl} = 0,7551 \cdot DU - 3,6169, \quad \text{cu } R^2 = 0,9847 \quad (3.12)$$

$$\sigma_d = 0,9353 \cdot DU - 3,0448, \quad \text{cu } R^2 = 0,9783 \quad (3.13)$$

Ca și variație, rezistența la compresiune (Figura 3.16a) urmează tiparul modului de elasticitate la compresiune (vezi Figura 3.15). Mai exact, σ_c crește semnificativ (80,7%) între densitățile de umplere 10 și 90%, după care scade ușor de la 90 la 100% (2,2%). Cea mai mare creștere a σ_c , de 40,0%, se regăsește între densitățile de umplere 10 și 20%, iar cea mai mică (10,3%) între densitățile 40-50%.

Tensiunea minimă (Figura 3.16b), de platou (Figura 3.16c) și la densificare (Figura 3.16d) prezintă variații similare și vor fi discutate împreună. Toate tensiunile cresc cu peste 90% între densitățile de umplere extreme (10-100%), și anume: 95,5% (σ_m), 93,8% (σ_{pl}), respectiv 90,0% (σ_d). Între primele două densități (10-20%) se obține cea mai mare creștere procentuală pentru toate tensiunile (59,5%- σ_m , 58,3%- σ_{pl} și 38,7%- σ_d). Mai mult decât atât, creșteri aproape identice între cele

108 Comportamentul la compresiune

trei proprietăți de rezistență (cu deviații standard sub 1%), se obțin între 70-80% (14,0%- σ_m , 14,1%- σ_{pl} și 13,9%- σ_d), 80-90% (11,5%- σ_m , 11,7%- σ_{pl} și 10,7%- σ_d) și 90-100% (21,5%- σ_m , 21,6%- σ_{pl} și 23,3%- σ_d).

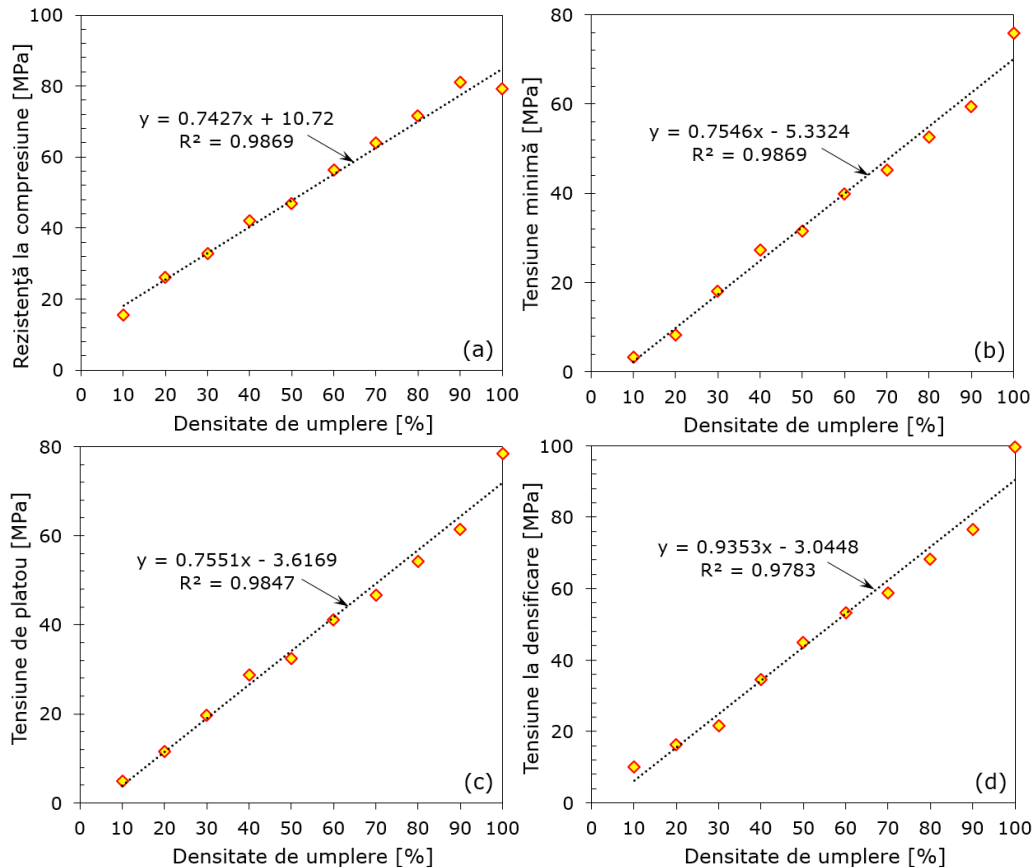


Fig. 3.16. Variația rezistenței la compresiune (a), tensiunii minime (b), tensiunii de platou (c) și tensiunii la densificare (d) a epruvetelor din PLA printate. Efectul densității de umplere

Figura 3.17 prezintă variația deformațiilor corespunzătoare rezistenței la compresiune (ε_c) și tensiunii la densificare (ε_d) ale epruvetelor din PLA printate în funcție de densitatea de umplere. Ambele proprietăți variază liniar cu densitatea, cu observația că ε_c crește, în timp ce ε_d scade odată cu creșterea densității de umplere. Legile de variație sunt prezentate sub forma Ecuțiilor (3.14) și (3.15). Ecuțiile deformațiilor ε_c și ε_d prezintă un coeficient de determinare $R^2 > 0,98$.

$$\varepsilon_c = 0,0452 \cdot DU + 4,6815, \quad \text{cu } R^2 = 0,9848 \quad (3.14)$$

$$\varepsilon_d = -0,1810 \cdot DU + 70,1570, \quad \text{cu } R^2 = 0,9904 \quad (3.15)$$

Odată cu creșterea densității de umplere de la 10% la 100%, ε_c prezintă o creștere procentuală de 46,2%, în timp ce ε_d evidențiază o descreștere de 33,2%. Între intervalele învecinate de densități se obțin valori destul de apropiate, atât pentru ε_c (cu deviații standard sub 3,6%), cât și pentru ε_d (cu deviații standard sub 1,2%).

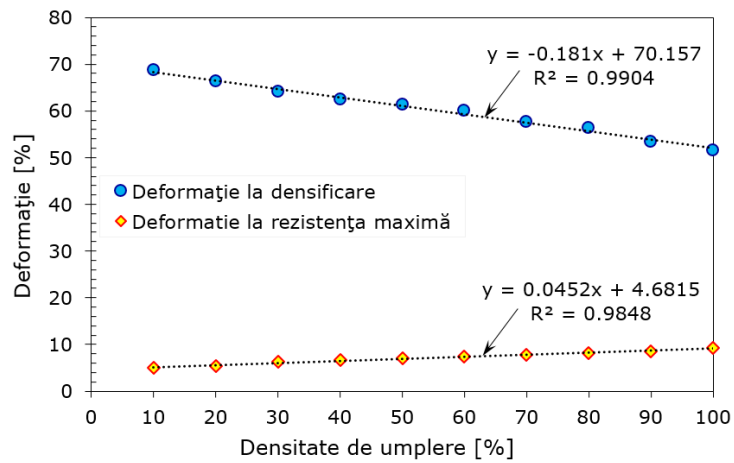


Fig. 3.17. Variația deformațiilor corespunzătoare rezistenței la compresiune și tensiunii la densificare ale epruvetelor din PLA printate. Efectul densității de umplere

În Figura 3.18 este prezentat efectul densității de umplere al epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM asupra lungimii platoului (LP). Epruvetele cu densitate scăzută prezintă cea mai mare lungime a platoului, aceasta scăzând liniar (Ecuația (3.16)) odată cu creșterea densității de umplere la 100%.

$$LP = 0,0452 \cdot DU + 4,6815, \quad \text{cu } R^2 = 0,9848 \quad (3.16)$$

Lungimea platoului, LP, scade cu peste 50% în intervalul de densități studiat (10 → 100%). Scăderile procentuale între două intervale consecutive de densități se încadrează între un minim de 2,4% (între DU 40 și 50%) și un maxim de 7,6% (între DU 80 și 90%).

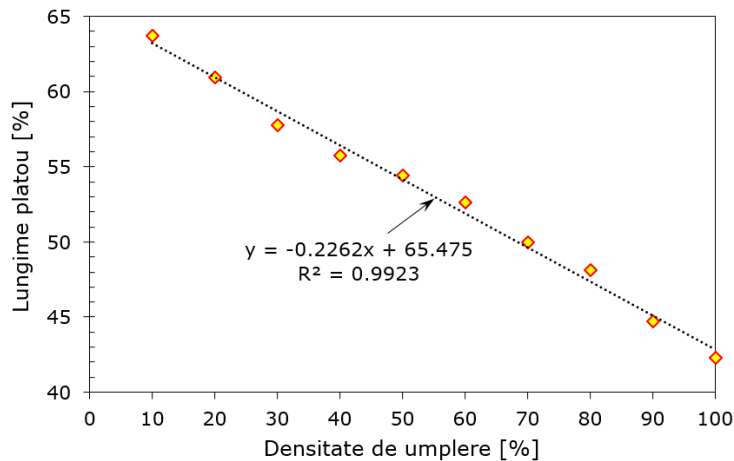


Fig. 3.18. Variația lungimii platoului la compresiune al epruvetelor din PLA printate. Efectul densității de umplere

Variația amplitudinii tensiunii ($\Delta\sigma$) în funcție de densitatea de umplere este prezentată în Figura 3.19. S-a obținut că densitatea de 90% evidențiază cea mai mare valoare pentru $\Delta\sigma$ (21,50 MPa), iar cea mai mică (3,42 MPa) este găsită în dreptul

110 Comportamentul la compresiune

densității de 100%. Diferența procentuală între cele două valori ale amplitudinii tensiunii este de 84,1%. Acest aspect este, de asemenea, ușor de identificat și confirmat din analiza curbelor tensiune-deformație (vezi Figura 3.13) rezultate în urma testelor de compresiune.

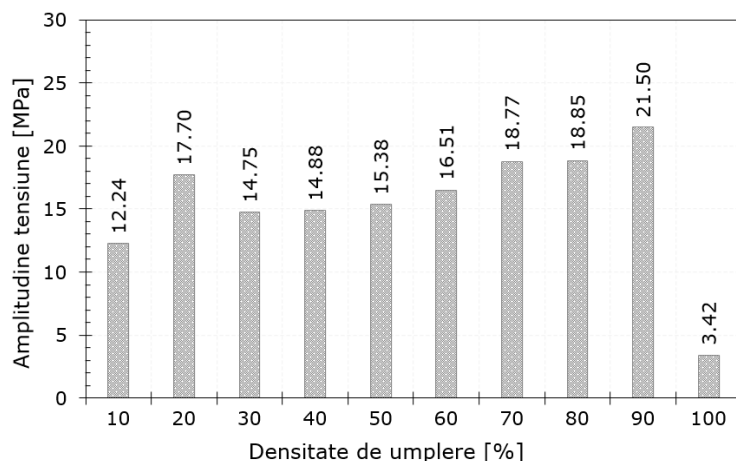


Fig. 3.19. Variația amplitudinii tensiunii pentru epruvetele din PLA printate. Efectul densității de umplere

Figura 3.20 prezintă efectul densității de umplere (10-100%) asupra curbelor energie de absorbție-deformație, obținute în urma testelor de compresiune. Se poate vedea ușor că densitatea influențează semnificativ performanțele energiei de absorbție ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM. Panta curbelor crește semnificativ odată cu creșterea densității de umplere. În Figura 3.20, alături de curbele energie de absorbție-deformație, sunt prezentate și regiunile caracteristice care se regăsesc și în Figura 3.13: regiunea liniar-elastică (A), regiunea de platou (B) și regiunea de densificare (C). S-a obținut că zona de platou absoarbe cea mai mare cantitate de energie (peste 70% din energia totală), urmată de zona de densificare, în timp ce zona liniar-elastică absoarbe o cantitate nesemnificativă de energie.

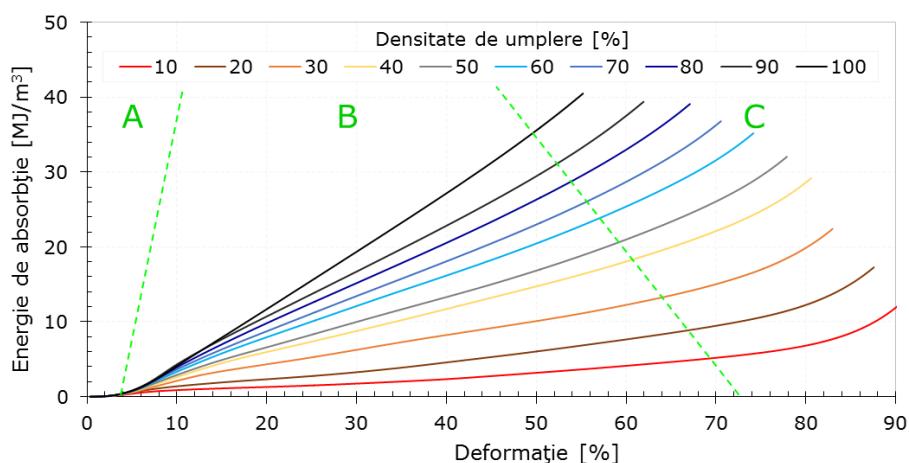


Fig. 3.20. Curbele energie de absorbție-deformație la compresiune ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM. Efectul densității de umplere

3.4. Efectul densității de umplere 111

Energia de absorbție la densificare (EA_d) se determină pe baza Ecuției (3.5). S-a obținut că energia absorbită la densificare, de către epruvete în timpul testelor de compresiune, crește liniar odată cu creșterea densității de umplere (Figura 3.21). Diferența de energie absorbită între cea mai mică (10%) și cea mai mare (100%) densitate este una considerabilă (peste 88%). Variația EA_d cu densitatea de umplere este prezentată sub forma Ecuției (3.17), unde coeficientul de determinare R^2 are o valoare de 0,9843.

$$EA_d = 0,3694 \cdot DU + 1,5524, \quad \text{cu } R^2 = 0,9843 \quad (3.17)$$

Desigur, ecuația propusă este valabilă pentru intervalul de densități de umplere investigat (10-100%).

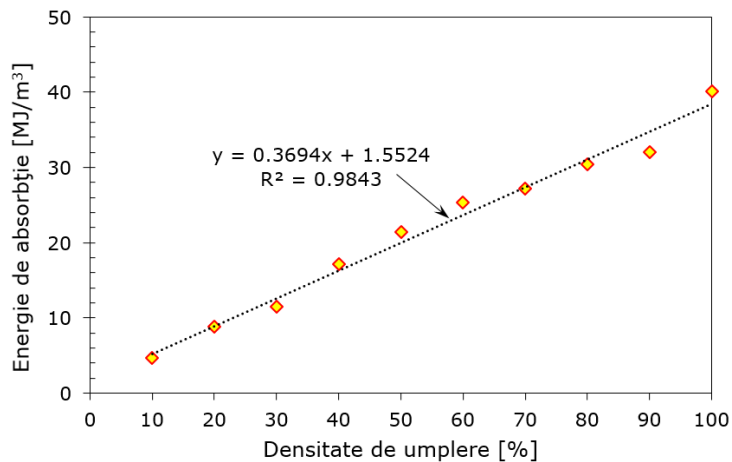


Fig. 3.21. Variația energiei de absorbție la densificare cu densitatea de umplere

Cu ajutorul Ecuției (3.2) s-a determinat eficiența energetică la densificare ($E_{ff,d}$) pe care o evidențiază epruvetele din PLA printate 3D (Figura 3.22). Se poate observa ușor că cea mai mare $E_{ff,d}$ (52,46%) este identificată în dreptul densității de umplere de 30%, iar cea mai mică $E_{ff,d}$ (40,26%) pentru densitatea cea mai mare (100%).

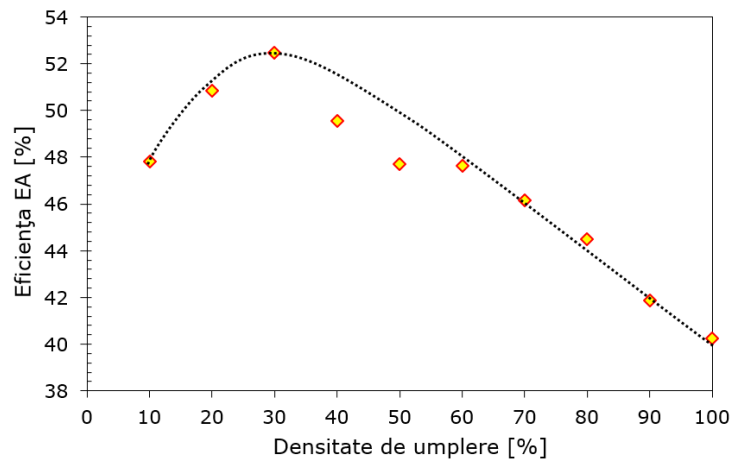


Fig. 3.22. Variația eficienței energetice la densificare cu densitatea de umplere

Ca urmare a rezultatelor găsite în Figura 3.22, Secțiunea 3.4.3 prezintă un studiu amplu al energiei de absorbție. Scopul studiului este de a identifica densitatea optimă care să absoarbă cea mai mare cantitate de energie la o anumită valoare prestabilită a încărcării/tensiunii.

3.4.3. Optimizarea densității de umplere

Cercetările privind componentele printate 3D se concentrează în marea lor majoritate asupra proprietăților de rezistență și rigiditate, în timp ce foarte puține dintre acestea prezintă performanțele de absorbție a energiei.

Se cunoaște foarte bine din literatura de specialitate că materialele celulare prezintă cele mai bune capacități de absorbție a energiei [291]. Aceste materiale au atras atenția din ce în ce mai mult datorită modului lor stabil de deformare (disipă energia cinetică într-o manieră controlabilă) și a mecanismelor de cedare care au loc la nivel celular.

Datorită acestor performanțe, materialele celulare naturale (pluta, lemnul, oasele, tulpinile de plante, bureții marini etc.) și sintetice (spumele, fagurii, structurile auxetice etc.) sunt folosite în multe industrii de top. De la ambalarea mărfurilor până la dispozitive militare, de la inginerie civilă la inginerie aerospațială, aceste materiale au fost utilizate în aplicațiile ingineresti unde capacitatea de absorbție a energiei este una dintre cele mai dorite caracteristici [291].

Componentele structurale pe bază de materiale celulare pot absorbi mai multă energie de impact decât structurile solide dense. Pentru a întări această afirmație, în Figura 3.23 se prezintă o comparație între energia absorbită de un material solid și un material celular obținut din aceeași matrice ca și cea a solidului.

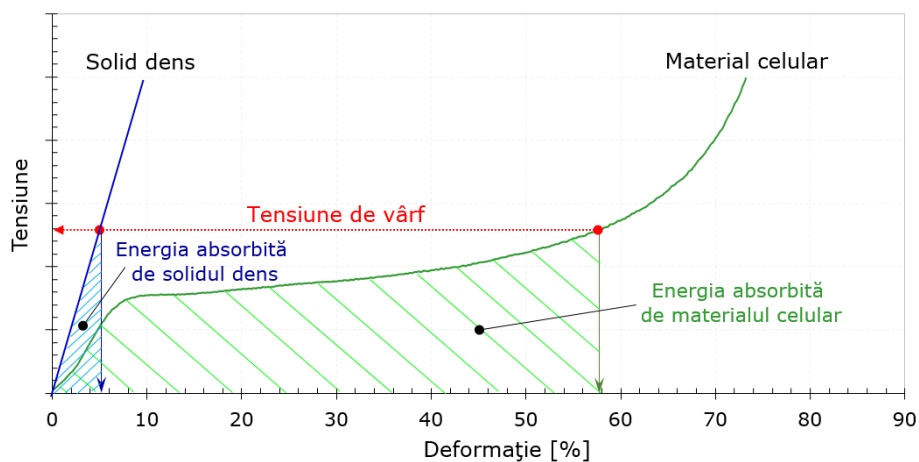


Fig. 3.23. Curbele tensiune-deformație la compresiune. Comparație material dens - material celular

După cum se poate vedea în Figura 3.23, pentru aceeași valoare a tensiunii (tensiune de vârf în cazul de față), materialul celular absoarbe o cantitate de energie mult mai mare comparativ cu materialul solid. După cum s-a amintit anterior, diferența este făcută de către mecanismele (flambajul, curgerea sau ruperea pereților celulelor) care iau naștere la nivel celular pe durata încărcării, în special în regiunea platoului. În acest caz, valoarea tensiunii de vârf (σ_v) este aleasă în mod arbitrar doar pentru a evidenția importanța investigării materialelor celulare pentru domeniul

absorbției de energie. Obținerea tensiunii de vârf σ_v va fi descrisă în detaliu în textul aferent Figurii 3.24.

Ținând cont de cele prezentate, aspectul performanțelor materialelor celulare în domeniul absorbției de energie nu ar trebui neglijat, ci mai degrabă implementat componentelor obținute prin prototipare rapidă. Comparativ cu majoritatea materialelor celulare sintetice existente pe piață (spume polimerice, metalice și ceramice), componentele printate 3D prezintă o structură celulară mult mai uniformă, aspect limitat de celelalte tipuri de materiale celulare.

Astfel, prin optimizarea densității de umplere (aspect prezentat în cele ce urmează) și a modelului de umplere (aspect discutat în detaliu în Secțiunea 3.5.3) este posibilă obținerea de componente printate cu proprietăți mecanice optime și o capacitate mare de absorbție a energiei. Capacitatea de absorbție a energiei a componentelor printate celulare poate oferi îndrumări valoroase inginerilor în aplicațiile de impact și absorbție de energie.

Figura 3.24 prezintă modul de determinare al tensiunilor de vârf în curbele tensiune-deformație pentru toate cele 10 densități de umplere investigate.

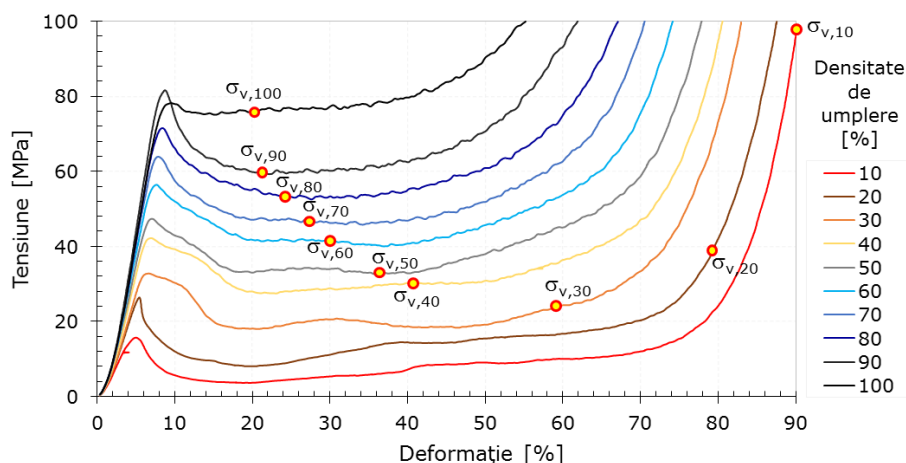


Fig. 3.24. Generarea tensiunilor de vârf în curbele tensiune-deformație la compresiune ale epruvetelor din PLA. Efectul densității de umplere

Inițial, utilizând relația (3.1) se determină energia absorbită de fiecare epruvetă testată, aceasta fiind reprezentată de aria de sub curbele caracteristice. Ulterior, în funcție de valoarea maximă a energiei absorbite, se alege o valoare a EA care poate fi realizată de fiecare densitate de umplere în parte. Analizând Figura 3.20 se observă că cea mai joasă cantitate de energie, până la încărcarea prestabilită în programul experimental (90 kN, valoare aleasă arbitrar pentru deformarea tuturor epruvetelor din intervalul 10-100%), este absorbită de epruveta cu densitatea de 10% (12,18 MJ/m³), iar cea mai mare de epruvetă cu densitatea de 100% (40,47 MJ/m³). Așadar, pentru a putea determina densitatea optimă este necesară alegerea unei valori a EA sub 12,18 MJ/m³. În caz contrar, dacă s-ar alege o valoare mai mare a EA (de exemplu 25 MJ/m³), densitățile de umplere care nu reușesc să absoarbă acea cantitate de energie ar fi excluse automat (în cazul de față densitățile de 10, 20 și 30%), lucru nedorit într-un studiu de optimizare. Pentru a satisface condiția menționată, se alege o valoare a EA de 12 MJ/m³ (energie absorbită de toate epruvetele investigate). În final, ținând cont de îndeplinirea condiției EA₁₀=EA₂₀=...=EA₁₀₀=12 MJ/m³, se aleg tensiunile de vârf $\sigma_{v,i}$ ($i=10, 20, \dots, 100\%$)

114 Comportamentul la compresiune

pentru fiecare densitate de umplere. Spre exemplu, $\sigma_{v,10}$ este tensiunea de vârf din curba caracteristică tensiune-deformație aleasă astfel încât epruveta cu densitatea de umplere de 10% să absoarbă exactă cantitatea de energie de 12 MJ/m^3 . Pentru celelalte 9 densități (20-100%) ale epruvetelor testate se procedează în mod analog.

Figura 3.25a prezintă curbele tensiune-deformație până la tensiunile de vârf caracteristice fiecărei densități de umplere. Pe baza celor prezentate anterior, Figura 3.25b prezintă variația tensiunilor de vârf, asociate aceleiași cantități de energie absorbită (12 MJ/m^3), cu densitatea de umplere.

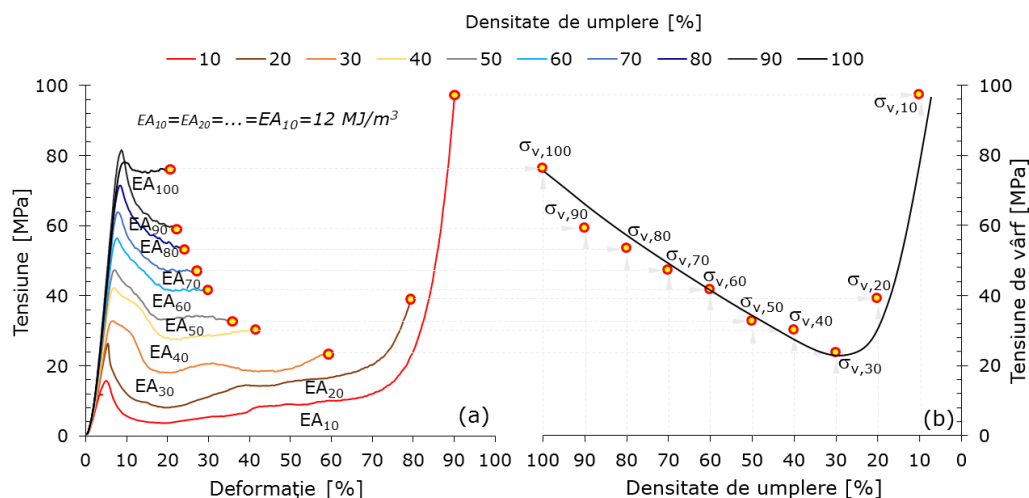


Fig. 3.25. Diagramele energiei de absorbție: curbele tensiune-deformație (a) și variația tensiunii de vârf cu densitatea de umplere

Epruvetele cu cea mai mică densitate de umplere (10%) sunt capabile să absoarbă cantitatea prescrisă de energie EA₁₀ (12 MJ/m^3) la valori foarte mari a deformațiilor (90,09%). Acest aspect este datorat atât tensiunii de platou scăzute (4,85MPa), cât și începutului întârziat al densificării (68,69%). Astfel, densitatea de 10% generează o tensiune de vârf foarte mare de 97,35 MPa.

De partea cealaltă, epruvetele cubice printate cu cea mai mare densitate (100%) absorb cantitatea de energie EA₁₀₀=EA₁₀ la cele mai reduse deformații (20,43%), dar la tensiuni de vârf mari (76,17 MPa).

Analizând cu atenție diagramele energiei de absorbție, se poate observa că între cele două extreme, se găsește densitatea de umplere ideală (30%). Aceasta densitate este optimă deoarece absoarbe aceeași cantitate prescrisă de energie EA₃₀=EA₁₀=EA₁₀₀ (12 MJ/m^3) la cea mai mică valoare a tensiunii de vârf (23,57 MPa), respectiv la o deformație de 58,92%, valoare apropiată cu deformația la densificare ε_d (64,06%).

Figura 3.26 prezintă variația deformației corespunzătoare tensiunii la vârf (ε_v) în funcție de densitatea de umplere a epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM. Cea mai mare valoare a ε_v este obținută pentru densitatea de 10%, iar cea mai mică pentru cea de 100%. Scăderea deformației ε_v este una polinomială conform Ecuației (3.18), între cele două valori înregistrându-se o diferență de 77,32%.

$$\varepsilon_v = 0,012 \cdot DU^2 - 2,0757 \cdot DU + 110,91, \quad \text{cu } R^2 = 0,9842 \quad (3.18)$$

Astfel, pentru investigațiile ulterioare privind efectul modelului de umplere se va utiliza densitatea de umplere identificată ca fiind cea optimă (**30%**).

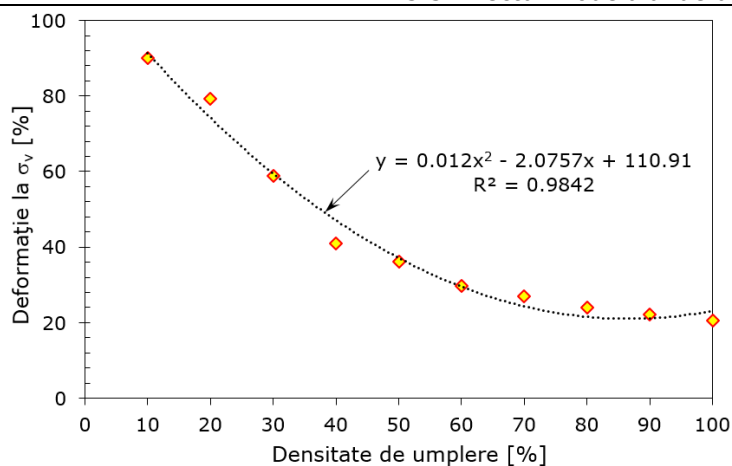


Fig. 3.26. Deformația corespunzătoare tensiunii la vârf funcție de densitatea de umplere a epruvetelor din PLA

3.5. Efectul modelului de umplere

Influența modelului de umplere (MU) asupra comportamentului la compresiune cvasi-statică a epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM este investigată în acest subcapitol. În acest scop, s-au analizat 17 modele de umplere. Tabelul 3.4 enumeră denumirile modelelor împreună cu abrevierile lor, iar Figura 3.27 prezintă geometria acestora.

Se studiază în detaliu acuratețea dimensională și proprietățile mecanice ale epruvetelor printate. În finalul subcapitolului se realizează un studiu de optimizare privind cel mai eficient model de umplere.

Tabelul 3.4. Modelele de umplere utilizate în programul experimental

Nr. crt.	Model de umplere	Abreviere
1	Hilbert Curve	HBC
2	Gyroid	GYR
3	Grid	GR
4	Cubic	CUB
5	Concentric	CON
6	Honeycomb	HC
7	Triangles	TR
8	3D Honeycomb	3HC
9	Stars	STR
10	Archimedean Chords	ARH
11	Octagram Spiral	OCT
12	Lightning	LGT
13	Support Cubic	SUC
14	Adaptive Cubic	ADC
15	Line	LIN
16	Aligned Rectilinear	ALR
17	Rectilinear	REC

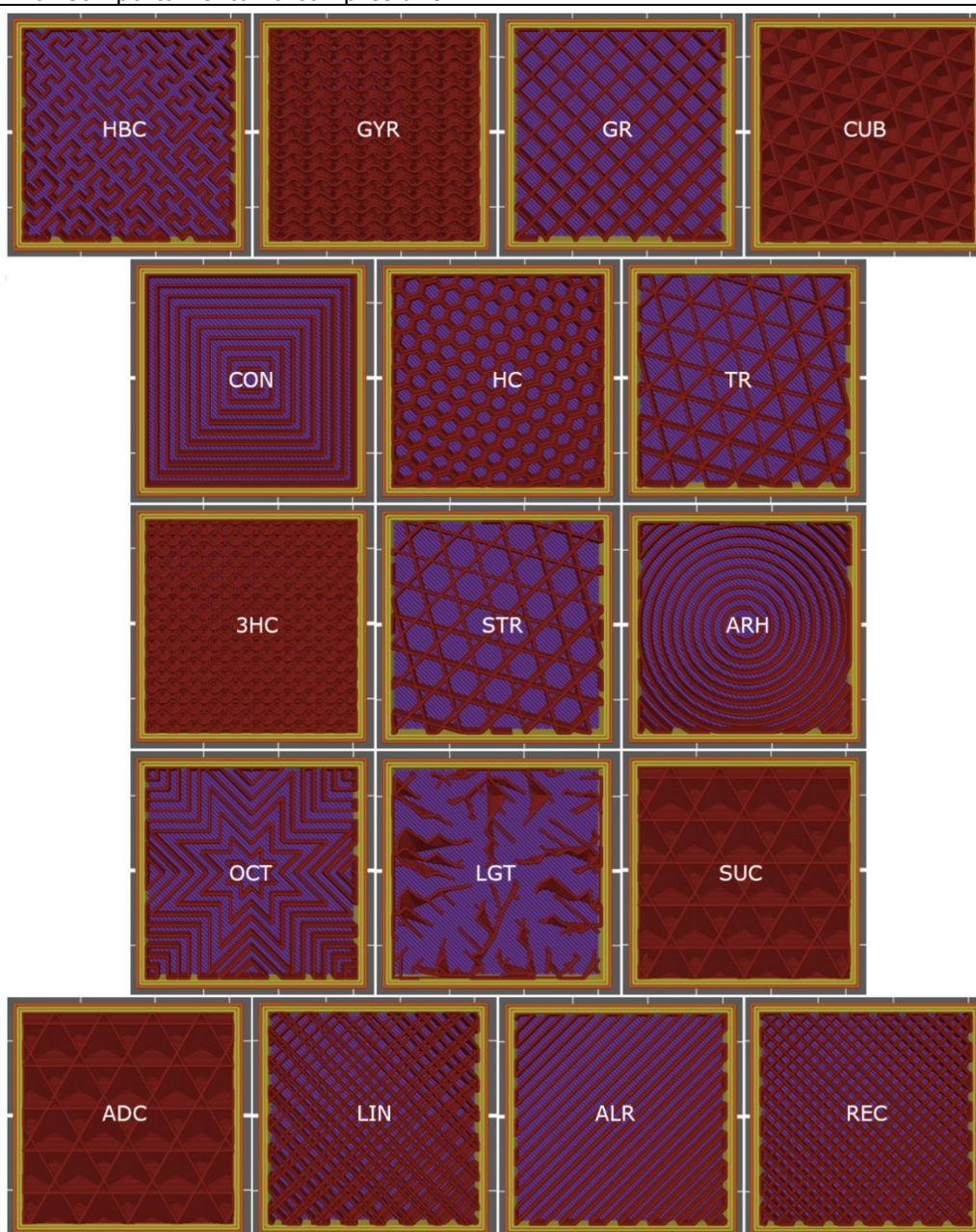


Fig. 3.27. Modelele de umplere investigate

În Figura 3.28 se prezintă o vedere de ansamblu a epruvetelor printate în scopul identificării modelului de umplere optim. Epruvetele supuse investigațiilor au fost printate utilizând parametrii de proces din Tabelul 3.1. Având în vedere că în Subcapitolul 3.4 s-a realizat un studiu de optimizare a densității de umplere, în acest

subcapitol toate epruvetele evaluate au fost printate cu densitatea ideală (30%) identificată anterior.

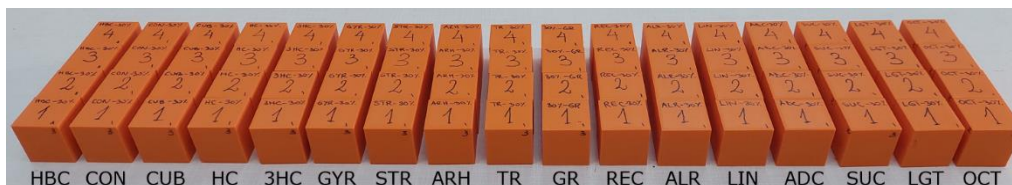


Fig. 3.28. Epruvetele printate privind studiul efectului modelului de umplere

3.5.1. Evaluarea proprietăților fizice

Pentru evaluarea dimensională a epruvetelor, privind efectul modelului de umplere, s-au utilizat aceiași trei parametri ca și în Secțiunea 3.4.1: înălțime (h), lățime 1 (b_1) și lățime 2 (b_2) (vezi Figura 3.1). Eroarea procentuală dimensională (EPD) și eroarea relativă de masă (ERM) s-au determinat cu relațiile (2.1) și (3.7), folosind valorile nominale (dimensiunile și masa definite în faza de proiectare) și reale (dimensiunile și masa rezultate în urma măsurărilor) ale epruvetelor printate.

Valorile proprietăților fizice și a erorilor relative aferente acestora sunt prezentate în Tabelul 3.5.

Tabelul 3.5. Proprietățile fizice și erorile asociate acestora. Efectul modelului de umplere

MU	h	b_1	b_2	EPD- h	EPD- b_1	EPD- b_2	m_t	m_m	ERM
[%]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[%]	[%]	[g]	[g]	[%]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HBC	29.99	30.03	29.98	0.03	0.10	0.07	15.59	14.830	4.89
	30.00	30.02	29.98	0.00	0.07	0.07		14.863	4.68
	29.97	30.00	29.96	0.10	0.00	0.13		14.790	5.15
	30.00	30.00	29.99	0.00	0.00	0.03		14.825	4.92
GYR	30.00	29.99	29.99	0.00	0.03	0.03	14.97	14.270	4.64
	30.01	30.02	29.97	0.03	0.07	0.10		14.284	4.55
	30.00	30.01	29.99	0.00	0.03	0.03		14.278	4.59
	29.99	30.01	29.99	0.03	0.03	0.03		14.266	4.67
GR	30.00	30.02	30.00	0.00	0.07	0.00	15.25	14.559	4.54
	30.00	30.06	30.00	0.00	0.20	0.00		14.557	4.55
	29.98	30.04	29.98	0.07	0.13	0.07		14.565	4.50
	30.00	30.05	30.03	0.00	0.17	0.10		14.551	4.59
CUB	29.99	30.01	30.03	0.03	0.03	0.10	15.33	14.565	5.01
	30.01	30.02	30.01	0.03	0.07	0.03		14.554	5.08
	29.99	30.01	30.00	0.03	0.03	0.00		14.539	5.18
	29.99	30.03	30.01	0.03	0.10	0.03		14.553	5.08
CON	30.00	29.99	30.01	0.00	0.03	0.03	15.42	14.661	4.94
	30.00	30.00	29.99	0.00	0.00	0.03		14.668	4.89
	30.01	29.99	29.98	0.03	0.03	0.07		14.647	5.03
	30.00	29.96	29.95	0.00	0.13	0.17		14.679	4.82
HC	29.99	30.05	30.01	0.03	0.17	0.03	17.37	16.482	5.13
	29.99	30.02	29.99	0.03	0.07	0.03		16.499	5.03
	30.01	30.03	30.01	0.03	0.10	0.03		16.510	4.96
	30.00	30.02	30.00	0.00	0.07	0.00		16.509	4.97

Tabelul 3.5. (Continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TR	30.03	30.00	30.00	0.10	0.00	0.00	15.39	14.560	5.41
	30.01	30.00	30.00	0.03	0.00	0.00		14.548	5.49
	30.02	30.02	30.00	0.07	0.07	0.00		14.555	5.44
	30.02	30.00	30.00	0.07	0.00	0.00		14.544	5.51
3HC	29.99	29.98	29.97	0.03	0.07	0.10	16.22	15.344	5.42
	29.99	30.00	30.01	0.03	0.00	0.03		15.336	5.46
	30.01	30.01	29.99	0.03	0.03	0.03		15.320	5.56
	30.02	30.00	30.01	0.07	0.00	0.03		15.316	5.59
STR	29.97	30.00	30.00	0.10	0.00	0.00	15.14	14.145	6.56
	29.99	30.00	30.01	0.03	0.00	0.03		14.149	6.53
	30.00	30.00	29.98	0.00	0.00	0.07		14.135	6.62
	29.98	30.01	29.98	0.07	0.03	0.07		14.152	6.51
ARH	30.02	29.98	29.98	0.07	0.07	0.07	15.57	14.549	6.53
	30.00	30.01	29.99	0.00	0.03	0.03		14.509	6.78
	29.99	30.00	29.98	0.03	0.00	0.07		14.554	6.50
	30.01	30.01	29.99	0.03	0.03	0.03		14.505	6.81
OCT	29.99	30.00	30.00	0.03	0.00	0.00	15.67	14.656	6.47
	30.02	29.98	29.97	0.07	0.07	0.10		14.644	6.55
	30.00	30.00	29.94	0.00	0.00	0.20		14.606	6.79
	29.99	30.00	30.00	0.03	0.00	0.00		14.692	6.24
LGT	29.96	29.96	30.01	0.13	0.13	0.03	7.57	7.064	6.65
	29.98	30.00	29.97	0.07	0.00	0.10		7.078	6.47
	30.01	30.01	29.98	0.03	0.03	0.07		7.062	6.68
	29.97	30.01	29.97	0.10	0.03	0.10		7.062	6.68
SUC	29.99	30.00	30.00	0.03	0.00	0.00	10.30	9.644	6.39
	30.00	30.00	29.98	0.00	0.00	0.07		9.628	6.55
	30.01	30.01	30.01	0.03	0.03	0.03		9.631	6.52
	30.01	30.01	30.01	0.03	0.03	0.03		9.632	6.51
ADC	29.99	29.98	30.01	0.03	0.07	0.03	12.63	11.780	6.73
	30.00	29.96	29.97	0.00	0.13	0.10		11.778	6.75
	30.00	30.01	30.00	0.00	0.03	0.00		11.780	6.73
	30.01	29.98	30.00	0.03	0.07	0.00		11.784	6.70
LIN	29.97	29.97	29.97	0.10	0.10	0.10	15.28	14.273	6.58
	29.99	30.00	29.99	0.03	0.00	0.03		14.263	6.64
	30.00	30.00	29.98	0.00	0.00	0.07		14.264	6.63
	30.03	29.99	29.97	0.10	0.03	0.10		14.267	6.61
ALR	29.97	30.00	29.96	0.10	0.00	0.13	15.44	14.423	6.59
	29.99	30.01	29.98	0.03	0.03	0.07		14.406	6.70
	30.01	29.99	30.00	0.03	0.03	0.00		14.411	6.66
	30.01	30.00	30.00	0.03	0.00	0.00		14.431	6.53
REC	30.00	29.99	30.00	0.00	0.03	0.00	15.44	14.375	6.90
	30.01	30.01	30.00	0.03	0.03	0.00		14.355	7.03
	30.00	30.00	29.99	0.00	0.00	0.03		14.364	6.97
	30.00	29.99	29.99	0.00	0.03	0.03		14.370	6.93

Figurile 3.29 și 3.30 prezintă erorile relative de înălțime și lățime, respectiv variația teoretică și măsurată a masei epruvetelor în funcție de modelul de umplere.

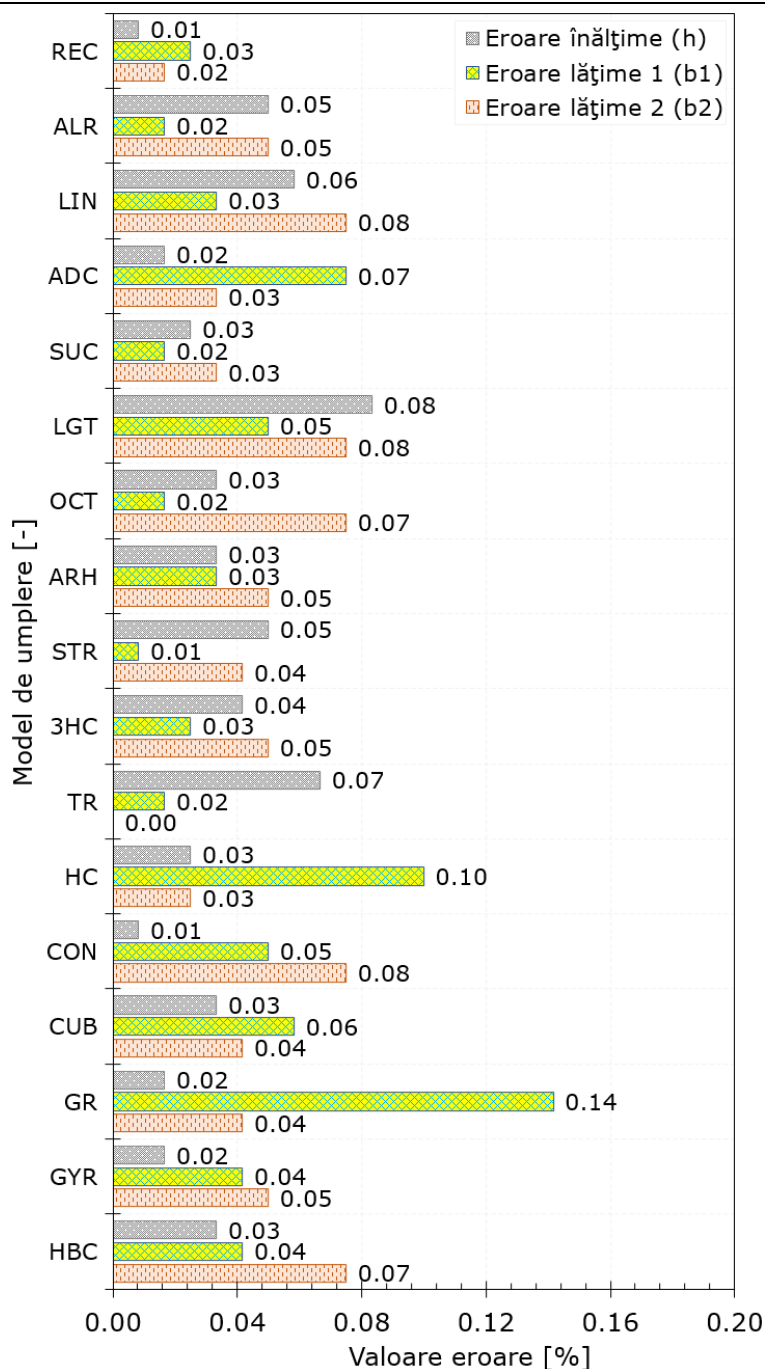


Fig. 3.29. Erorile relative de înălțime și lățime ale epruvetelor din PLA printate în funcție de modelul de umplere

Exceptând modelele LGT, STR și TR, toate celelalte modele prezintă erorile de înălțime mai mici sau cel mult egale cu erorile de lățime (vezi Figura 3.29).

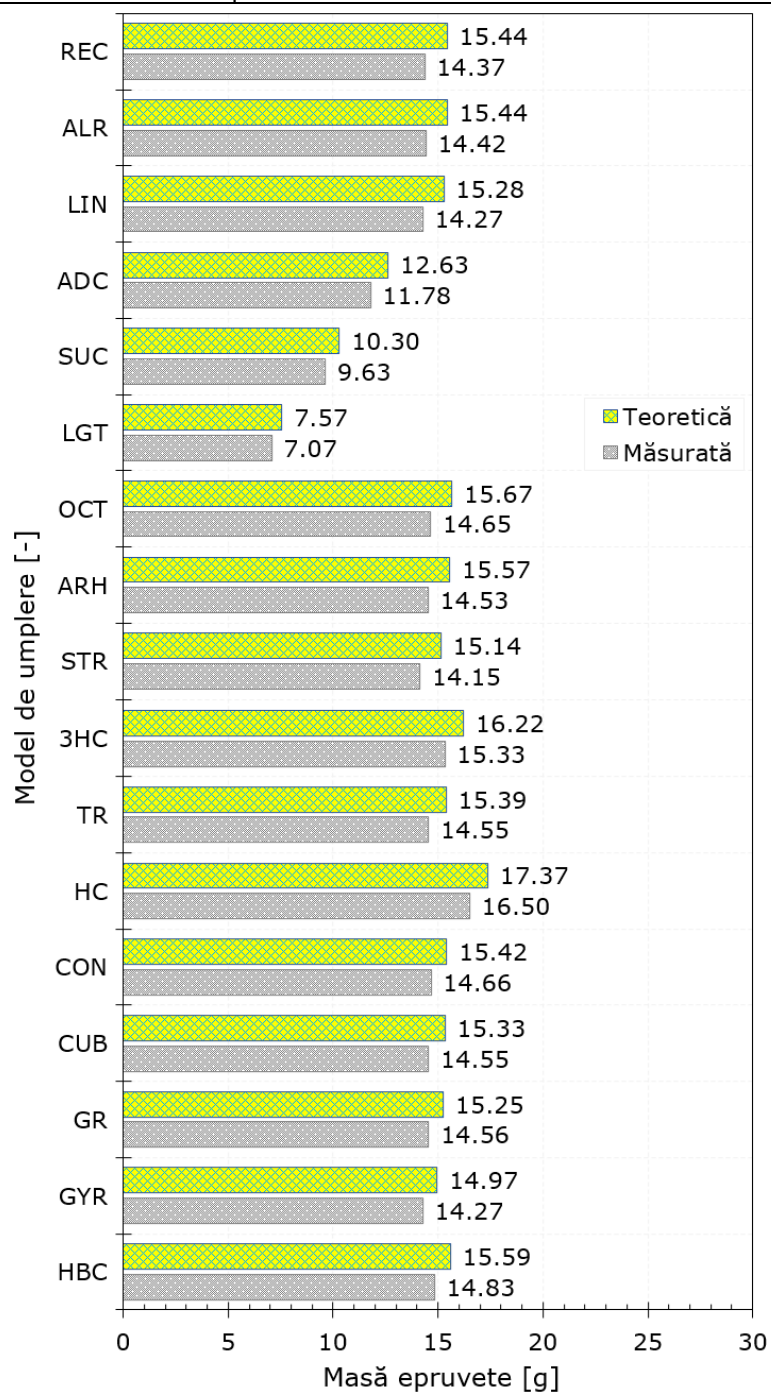


Fig. 3.30. Variația masei teoretice și măsurate a epruvetelor din PLA printate în funcție de modelul de umplere

Cele mai mari erori de înălțime le prezintă modelul LGT (0,08%), iar cele mai mici modelele REC și CON (0,01%). De cealaltă parte, erorile de lățime cele mai mari, de 0,14%, sunt evidențiate de către modelul de umplere GR. Singurul model care prezintă erorile 0% este modelul TR. Cele mai multe erori se regăsesc în domeniul 0,02-0,05%, acest aspect evidențiind calitatea ridicată a suprafețelor epruvetelor printate (vezi Figura 3.29).

Indiferent de modelul de umplere analizat, masa teoretică m_t este mai mare decât masa măsurată m_m a epruvetelor (vezi Figura 3.30). Modelul GR prezintă cea mai mică diferență între m_t și m_m , în timp ce diferența majoră este înregistrată de modelul REC. Pentru toate modelele de umplere, diferențele dintre m_t și m_m prezintă o deviație standard de 0,9%.

Cea mai scăzută masă este identificată în dreptul modelului LGT (7,07 g), iar ce mai mare este obținută de către modelul HC (16,50 g). Așadar, între cele două extreme se obține o diferență de 57,2%. S-a observat că majoritatea modelelor de umplere prezintă mase cuprinse între 15,1-15,6 g (vezi Figura 3.30).

Figura 3.31 prezintă erorile relative de masă (ERM) ale epruvetelor printate în funcție de modelul de umplere.

ERM extreme s-au obținut pentru modelele GR (4,55%) și REC (6,95%). Astfel, modelul GR prezintă ERM cu până la 34,6% mai reduse comparativ cu modelul REC. Majoritatea erorilor sunt grupate în două intervale majore, și anume: 4,5-5,1% și 6,5-6,7%.

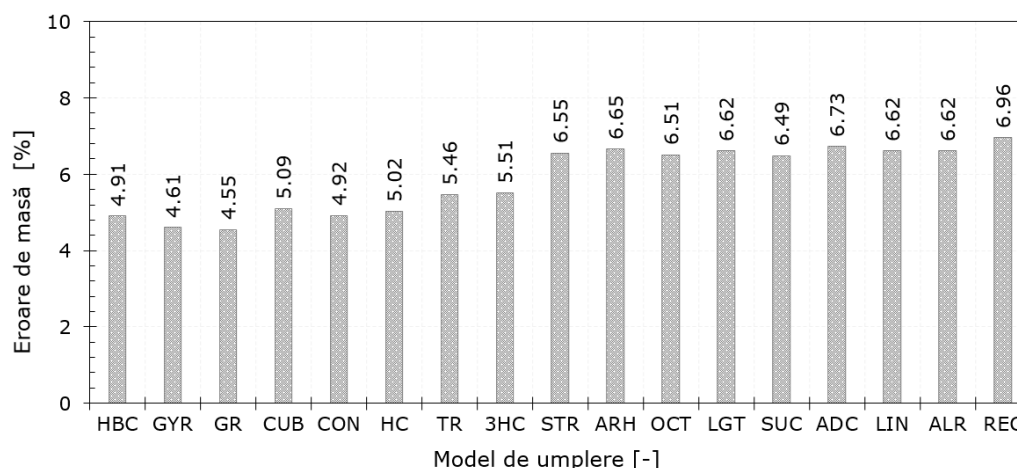


Fig. 3.31. Erorile relative de masă ale epruvetelor din PLA printate în funcție de modelul de umplere

Cel mai favorabil timp de printare t_p , de 62,75 minute, este obținut de către epruvetele fabricate cu modelul de umplere LGT, urmat foarte îndeaproape de modelul SUC cu 65,50 minute (Figura 3.32). La polul opus, modelele HC și LGT prezintă cei mai mari timpi de printare (129,25 și 124,00 min). Așadar, între timpii extremi se obține o diferență procentuală de 51,5% în favoarea modelului LGT.

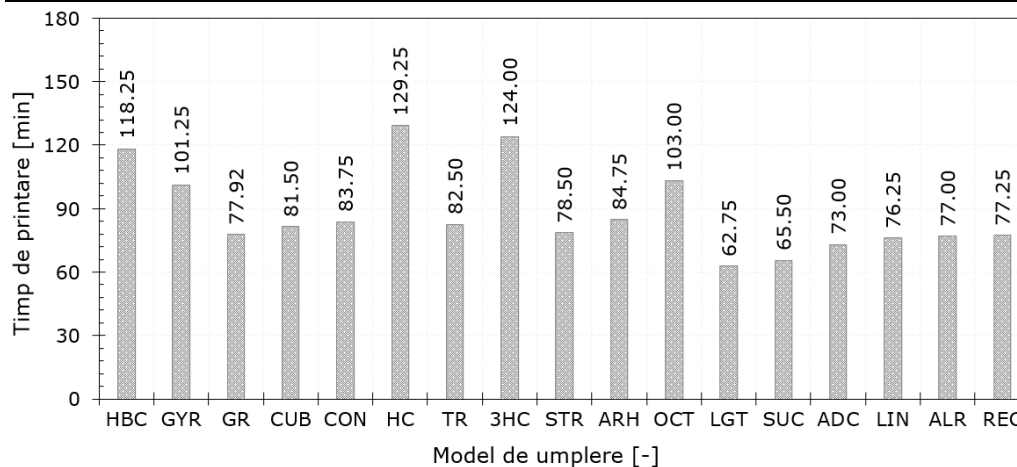


Fig. 3.32. Variația timpului de printare al epruvetelor din PLA în funcție de modelul de umplere

3.5.2. Evaluarea proprietăților mecanice

Figura 3.33 prezintă influența modelului de umplere asupra curbelor tensiune-deformație la compresiune ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM. Modelul de umplere prezintă un efect asemănător densității de umplere (vezi Figura 3.13), evidențiindu-se ușor cele trei regiuni caracteristice: regiunea liniar-elastică (A), regiunea de platou (B) și regiunea de densificare (C).

Majoritatea modelelor de umplere prezintă o deformare plastică pronunțată cu o regiune de platou extinsă. Cu toate acestea, s-au identificat două modele de umplere care prezintă o rupere fragilă: modelele LGT și SUC. Aceste modele sunt caracterizate doar de regiunea liniar-elastică, ruperea având loc chiar după atingerea tensiunii maxime la compresiune.

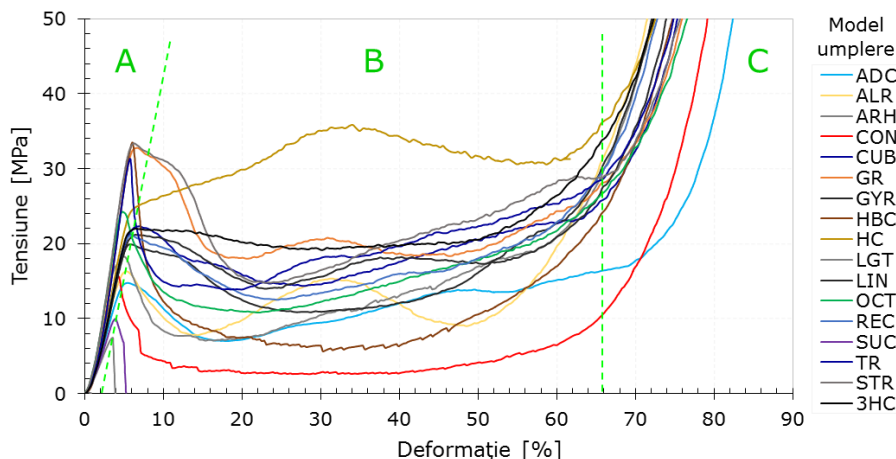


Fig. 3.33. Curbele tensiune-deformație la compresiune ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM. Efectul modelului de umplere

În Figura 3.24 este prezentată o imagine de ansamblu a epruvetelor testate la compresiune. Modul de deformare arată, de asemenea, comportamentul ductil sau fragil al epruvetelor testate.



Fig. 3.34. Epruvetele deformate în funcție de modelul de umplere

Tabelul 3.6 centralizează principalele proprietăți mecanice (E , σ_c , ε_m , σ_m , σ_{pl} , σ_d , ε_d , EA_d și $E_{ff,d}$) obținute în urma prelucrării datelor experimentale. Rezultatele obținute vor fi reprezentate grafic în cele ce urmează, prin media proprietăților investigate.

Tabelul 3.6. Principalele proprietăți mecanice. Efectul modelului de umplere

MU	E	σ_c	ε_m	σ_m	σ_{pl}	σ_d	ε_d	EA_d	$E_{ff,d}$
[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MJ/m ³]	[-]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HBC	748.91	33.85	5.81	5.31	7.08	6.00	38.47	3.82	0.62
	752.49	34.47	5.67	5.62	6.85	6.01	38.26	3.59	0.59
	752.39	33.96	5.84	5.73	6.79	6.18	38.07	3.54	0.61
	727.62	33.51	6.04	5.71	6.82	6.10	38.15	3.79	0.61
GYR	485.71	21.18	6.45	13.97	16.61	18.12	55.14	9.12	0.50
	472.35	21.24	6.49	13.73	15.62	14.19	48.23	7.51	0.53
	475.29	21.09	6.96	13.65	15.97	15.67	50.97	8.22	0.52
	491.30	21.00	6.25	13.78	16.70	16.68	55.49	9.18	0.55
GR	693.93	32.77	6.69	17.97	18.39	19.15	62.28	11.15	0.53
	693.47	32.76	6.26	18.76	19.84	21.24	66.90	11.82	0.56
	699.09	33.06	6.22	17.60	19.96	23.09	63.52	11.34	0.49
	709.22	32.67	6.03	17.94	20.61	22.49	63.56	11.71	0.52
CUB	492.25	22.32	6.98	14.36	16.70	23.36	63.32	11.20	0.48
	487.41	22.12	7.14	14.49	16.80	24.43	64.30	11.37	0.47
	488.18	22.01	6.76	14.51	16.77	24.28	63.21	11.22	0.46
	489.75	21.75	6.57	14.42	16.64	23.28	62.08	10.84	0.47
CON	476.22	16.49	4.49	0.45	1.70	0.45	5.35	0.43	0.97
	452.81	15.70	4.21	2.56	2.71	2.65	39.86	1.61	0.61
	468.55	15.69	4.02	3.51	4.50	3.53	29.59	1.67	0.47
	464.36	15.53	4.04	1.46	1.93	1.80	34.67	1.19	0.66
HC	479.00	24.28	7.05	24.28	31.86	29.78	60.30	17.49	0.59
	548.68	23.86	5.65	23.86	32.24	31.29	61.69	18.20	0.58
	609.23	24.75	6.12	24.75	31.93	31.28	61.41	18.06	0.58
	576.91	24.60	5.65	24.60	31.80	31.32	60.59	17.84	0.57
TR	708.24	31.32	5.78	13.87	16.75	26.76	63.22	11.81	0.44
	711.22	31.78	5.78	14.06	16.84	24.43	58.17	10.43	0.43
	722.33	30.65	5.59	13.16	16.79	23.62	58.28	11.03	0.47
	636.20	27.12	5.25	13.78	16.33	24.77	58.85	11.32	0.46

124 Comportamentul la compresiune

Tabelul 3.6. (Continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3HC	525.20	22.01	6.49	19.14	19.95	21.43	52.56	10.09	0.47
	542.92	21.67	7.96	18.72	19.57	21.64	53.13	10.01	0.46
	505.10	21.61	7.59	18.52	19.96	21.07	53.61	10.16	0.48
	515.47	21.72	6.60	18.60	19.14	20.74	52.55	9.81	0.47
STR	723.25	33.63	6.78	16.39	17.33	28.65	66.48	14.40	0.50
	695.29	33.05	6.88	15.79	18.42	28.84	66.33	14.28	0.50
	734.30	33.12	6.50	15.64	18.05	28.71	66.94	14.49	0.50
	736.74	33.38	6.24	14.76	17.98	29.69	67.58	14.86	0.50
ARH	607.32	18.42	4.80	6.88	10.90	16.27	52.62	5.99	0.37
	646.72	18.33	4.88	7.05	10.28	18.94	57.26	6.71	0.35
	608.31	18.06	4.81	6.71	11.06	15.97	52.15	5.70	0.36
	588.16	17.92	4.59	6.20	9.76	15.15	50.21	5.30	0.35
OCT	627.86	24.13	5.05	10.86	12.87	25.31	63.17	9.66	0.38
	637.19	24.32	4.99	10.51	12.63	17.06	49.92	6.62	0.39
	670.16	24.24	4.81	10.80	12.95	20.64	58.20	8.36	0.41
	673.47	24.04	4.88	10.52	12.65	19.52	53.16	7.31	0.37
LGT	257.28	7.61	3.80	-	-	-	-	-	-
	258.79	7.57	3.67	-	-	-	-	-	-
	265.07	7.44	3.57	-	-	-	-	-	-
	264.57	7.48	3.54	-	-	-	-	-	-
SUC	331.23	10.13	4.11	-	-	-	-	-	-
	324.62	9.95	4.02	-	-	-	-	-	-
	328.57	9.95	3.87	-	-	-	-	-	-
	319.45	9.97	3.85	-	-	-	-	-	-
ADC	388.43	14.74	5.44	6.98	9.61	17.01	69.09	7.93	0.47
	391.21	14.66	5.68	6.57	9.11	15.43	67.87	7.45	0.48
	389.54	14.56	5.35	6.90	9.47	16.60	68.85	7.59	0.46
	387.19	14.47	5.25	7.42	9.86	16.43	67.60	7.64	0.47
LIN	473.41	20.34	6.05	12.50	14.14	13.22	43.67	6.37	0.48
	497.75	20.05	5.78	10.83	13.26	17.31	52.16	7.24	0.42
	494.16	19.90	5.76	10.83	12.26	12.62	42.81	5.57	0.44
	479.95	19.90	5.67	12.73	13.87	13.84	46.24	6.55	0.47
ALR	444.16	16.62	5.13	8.73	11.21	9.25	47.49	5.43	0.59
	439.19	16.30	5.29	7.77	10.89	9.00	48.63	5.48	0.61
	448.63	16.27	4.99	7.85	11.36	10.52	49.47	5.67	0.54
	457.14	16.24	4.94	7.48	10.38	10.52	50.11	5.46	0.52
REC	513.82	21.06	5.85	12.50	14.62	20.58	56.86	8.79	0.43
	503.19	20.90	5.80	12.21	14.68	17.26	52.85	7.95	0.46
	513.05	21.04	5.78	12.88	14.24	16.23	47.56	6.95	0.43
	507.83	20.71	5.63	13.06	15.07	17.71	50.79	7.73	0.44

Variația modului de elasticitate la compresiune, E , al epruvetelor din PLA este prezentată în Figura 3.35. Cele mai rigide epruvete sunt obținute cu ajutorul modelului HBC, urmat îndeaproape de modelul STR. Astfel, pentru modelele HBC (745,35 MPa) și STR (722,40 MPa) se obțin singurele valori de peste 700 MPa ale modului la compresiune. De cealaltă parte, modelele LGT (261,43 MPa) și SUC (325,97 MPa) evidențiază cele mai mici valori caracteristice regiunii liniar-elastice.

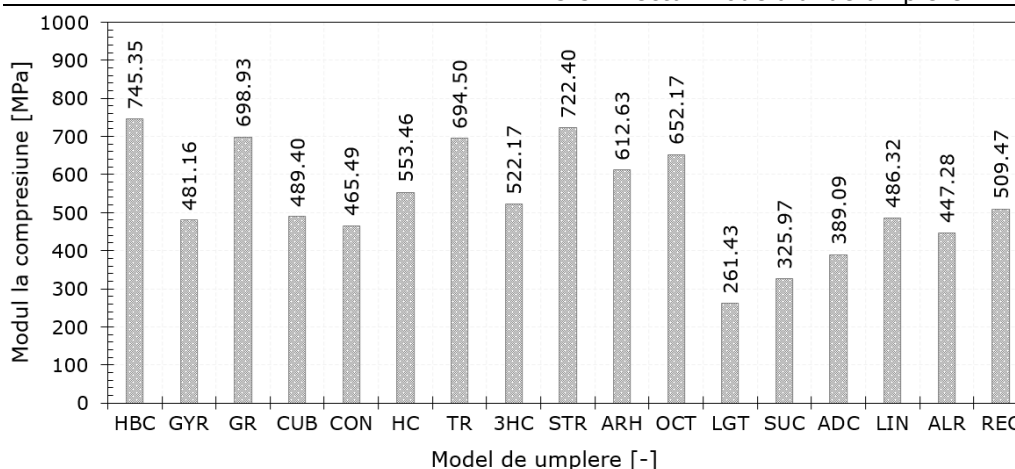


Fig. 3.35. Variația modului de elasticitate la compresiune al epruvetelor din PLA printate. Efectul modelului de umplere

Figura 3.36 prezintă variația proprietăților de rezistență (rezistența la compresiune, tensiunea minimă, tensiunea de platou și tensiunea la densificare) cu modelul de umplere. Pentru majoritatea modelelor de umplere, rezistența la compresiune prezintă cele mai mari valori comparativ cu celelalte tensiuni. Excepțiile sunt găsite în dreptul modelelor ADC, HC și CUB, unde tensiunea la densificare este ușor mai mare decât rezistența la compresiune.

Valorile rezistenței la compresiune pot fi împărțite în cinci mari intervale:

- 5-10: SUC și LGT;
- 10-15: ADC;
- 15-20: ARH, ALR și CON;
- 20-25: HC, OCT, CUB, 3HC, GYR REC și LIN;
- 30-35: HBC, STR, GR și TR.

Se poate observa ușor că doar patru densități de umplere dau valori ale rezistenței la compresiune peste 30 MPa, marea majoritate a valorilor grupându-se în intervalul 20-25 MPa.

Cele mai mici valori ale rezistenței la compresiune sunt înregistrate de către modelele LGT (7,53 MPa) și SUC (10 MPa). Astfel, între valorile extreme ale rezistenței la compresiune (HBC-LGT) se obțin diferențe de 77,8% în favoarea modelului HBC. Deviația standard a rezultatelor obținute este de peste 7,5 MPa. S-a constatat că în intervalul 25-30 MPa nu s-a regăsit nici un model de umplere.

Având în vedere că modelele de umplere LGT și SUC prezintă o rupere fragilă (vezi Figura 3.33), cele mai mici valori ale tensiunii minime, de 0 MPa, se obțin în dreptul acestora. Excluzând cele două cazuri excepționale (LGT și SUC), cele mai mici valori ale tensiunii minime sunt date de modelul CON (2,00 MPa). Astfel, între valorile extreme se obține o diferență de aproximativ 92% în favoarea modelului HC.

Dintre toate proprietățile de rezistență, tensiunea minimă prezintă cea mai mică deviație standard între modelele de umplere studiate (6,8 MPa). La polul opus, tensiunea la densificare prezintă valorile maxime, acestea ajungând până la 9,5 MPa.

Datorită modului de deformare stabil, modelul HC prezintă valori ale tensiunii de platou de aproximativ 32 MPa, cu peste 38% mai mare decât modelul următor (GR). S-a obținut că între modelele GR și 3HC este o diferență nesemnificativă (doar 0,2%). Pentru modelele LGT și SUC, datorită formei curbei tensiune-deformație, nu a fost posibilă determinarea tensiunilor de platou, minime și de densificare.

126 Comportamentul la compresiune

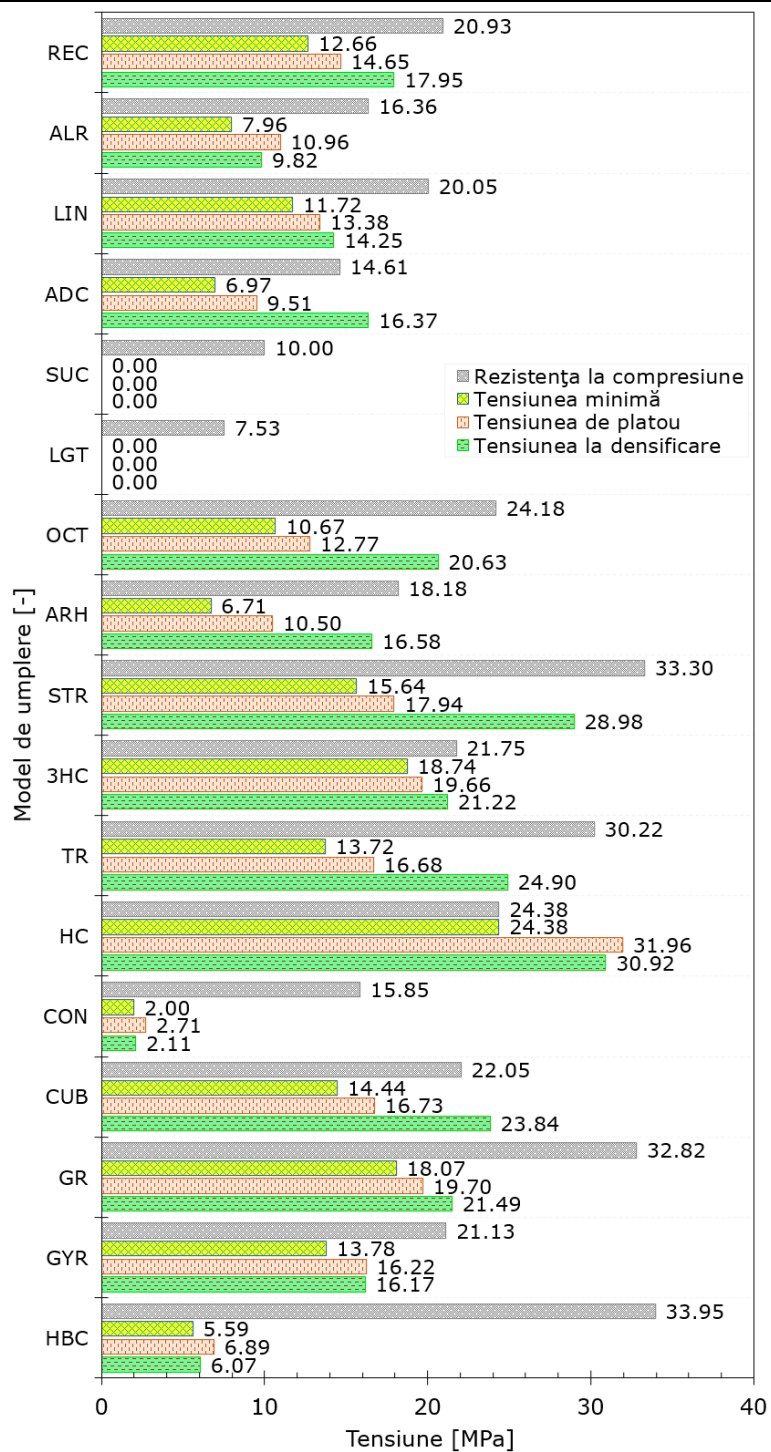


Fig. 3.36. Variația proprietăților de rezistență a epruvetelor din PLA printate. Efectul modelului de umplere

Diferențele între deformațiile caracteristice la compresiune (deformația corespunzătoare rezistenței la compresiune și deformația la densificare) sunt foarte mari, peste 84% (Figura 3.37). Excluzând modelele LGT și SUC (unde nu se poate determina deformația la densificare, datorită formei curbei tensiune-deformație), diferența maximă dintre cele două deformații se găsește în dreptul modelului ADC (92,1%), iar minimă pentru modelul CON (84,7%).

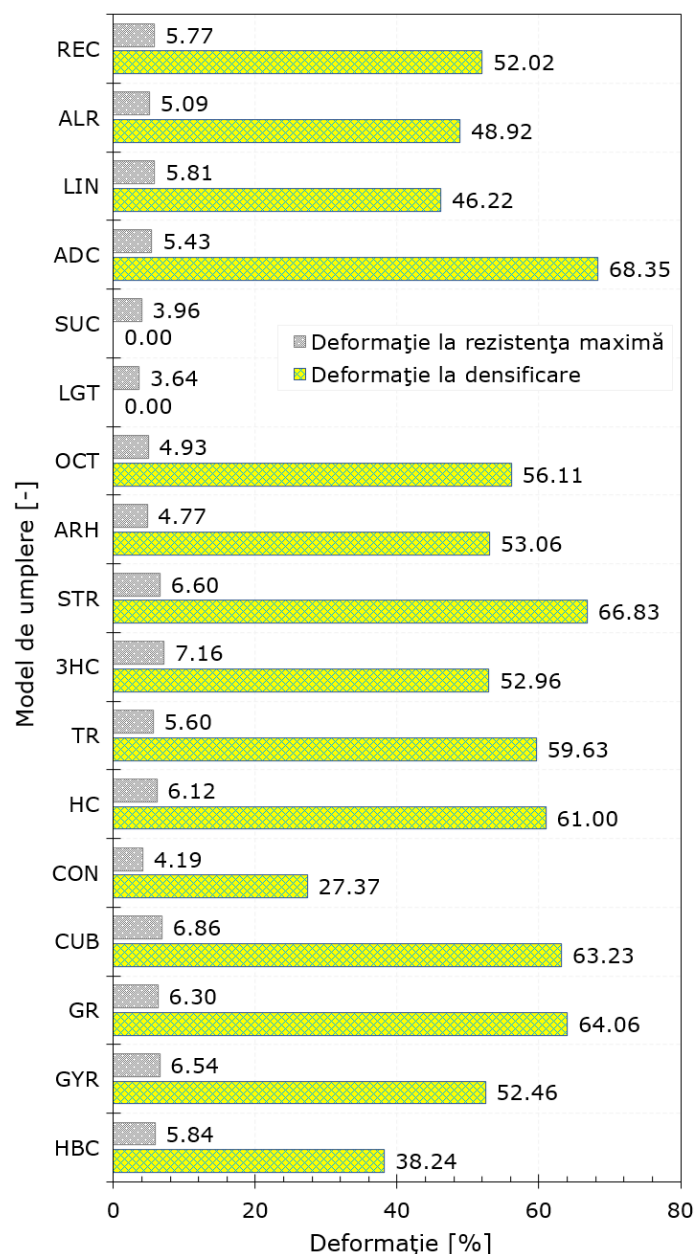


Fig. 3.37. Variația deformațiilor la rezistența maximă și la densificare ale epruvetelor din PLA printate. Efectul modelului de umplere

128 Comportamentul la compresiune

Singurele valori ale deformației la rezistența maximă peste 7% sunt înregistrate pentru modelul 3HC (7,16%). De cealaltă parte, doar două modele prezintă valori ale deformației sub 4%: SUC (3,96%) și LGT (3,64%).

Deformația la densificare prezintă valorile extreme pentru modelele ADC (68,35%) și CON (27,37%). Din nou, modelele LGT și SUC au fost excluse datorită motivului prezentat anterior.

Majoritatea modelelor de umplere investigate prezintă deformațiile la rezistența maximă în intervalul 4,7-5,9% (modelele HBC, TR, ARH, OCT, ADC, LIN, ALR și REC), iar deformațiile la densificare în intervalul 52-64% (modelele GYR, GR, CUB, HC, TR, 3HC, ARH, OCT și REC).

Deviațiile standard pentru deformațiile caracteristice la compresiune ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM sunt de 1% pentru deformația la rezistența maximă și de 11% pentru deformația la densificare.

Figura 3.38 prezintă variația lungimii platoului la compresiune pentru fiecare model de umplere. Modelele LGT și SUC au o lungime a platoului egală cu 0 deoarece pe durata testului acestea nu ajung în regiunea de densificare (vezi Figura 3.33).

Modelul de umplere ADC evidențiază cea mai lungă regiune de platou (62,92%), pe când modelul CON este caracterizat de cea mai scurtă regiune (23,18%). Așadar, între cele două valori se obține o diferență procentuală de 63,16%.

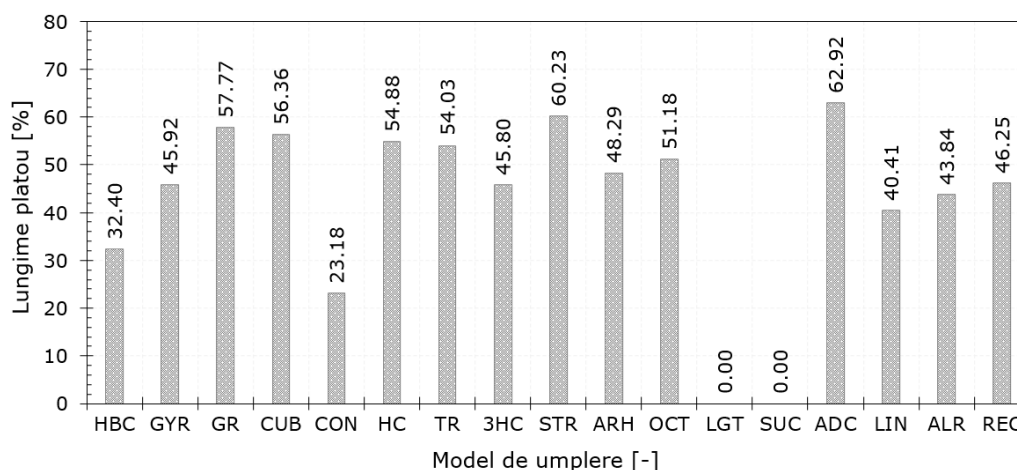


Fig. 3.38. Variația lungimii platoului la compresiune al epruvetelor din PLA printate. Efectul modelului de umplere

Variația amplitudinii tensiunii în funcție de modelul de umplere este prezentată în Figura 3.39. Mărimea amplitudinii tensiunii, fiind diferența dintre tensiunea maximă și cea minimă, este dată de către saltul în tensiune, regăsit imediat după rezistența la compresiune. Modelul de umplere HC are amplitudinea tensiunii egală cu 0 deoarece curbele tensiune-deformație nu prezintă o scădere după punctul de curgere, ci o întărire. Astfel, pe începutul regiunii de platou tensiunea crește până la o deformație de aproximativ 30%, după care scade ușor până la deformația de 60% (vezi Figura 3.33).

După cum se poate vedea din Figura 3.39, modelul de umplere HBC prezintă cel mai mare salt în tensiune (28,35 MPa). Acesta este urmat, la o diferență procentuală destul de mare (37,7%), de modelul STR (17,65 MPa). Cea mai mică amplitudine o prezintă modelul 3HC (3,01 MPa). Astfel, între valorile extreme se obține o diferență de 89,4%.

Majoritatea valorilor amplitudinilor se găsesc în intervalul 7,3-8,4 MPa (modelele GYR, CUB, LGT, ADC, LIN, ALR și REC).

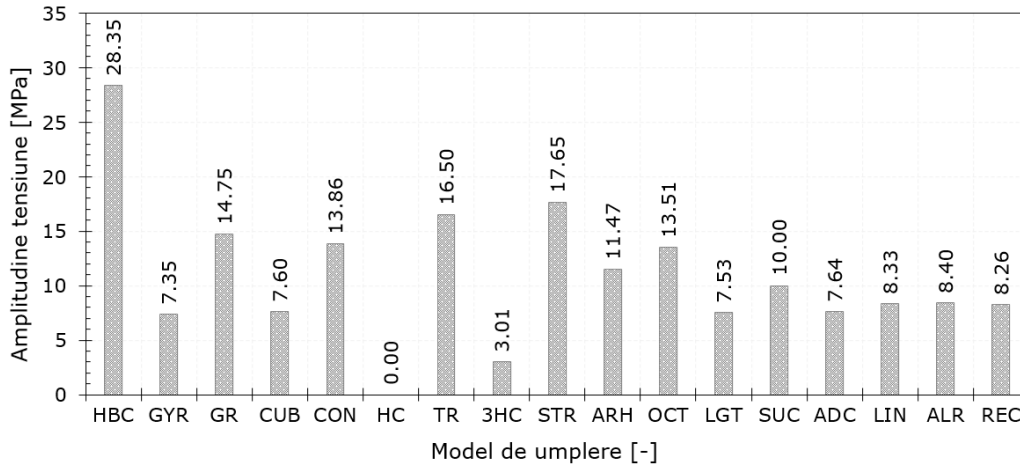


Fig. 3.39. Variația amplitudinii tensiunii pentru epruvetele din PLA printate. Efectul modelului de umplere

În Figura 3.40 se prezintă efectul modelului de umplere asupra curbelor energie de absorbție-deformație la compresiune. Se observă că în regiunea liniar elastică (A) toate modelele absorb o cantitate neînsemnată de energie. Marea majoritate a energiei este absorbită în regiunea de platou (B). Curbele modelelor de umplere HC și CON prezintă variațiile extreme, desigur în favoarea modelului HC. Regiunea de densificare (C) absoarbe, de asemenea, cantități considerabile de energie, deoarece aici are loc compactarea epruvetelor până la deformarea completă a acestora.

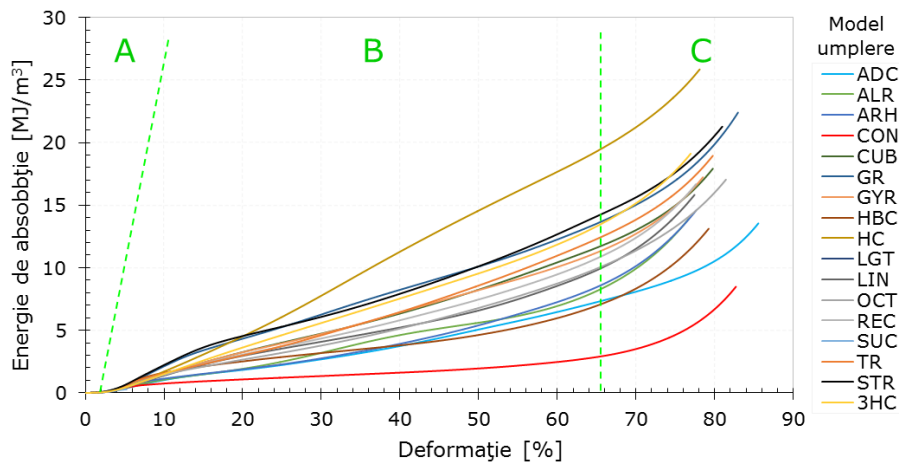


Fig. 3.40. Curbele energie de absorbție-deformație la compresiune ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM. Efectul modelului de umplere

Figura 3.41 prezintă variația energiei de absorbție la densificare cu modelul de umplere. Datorită ariei extinse de sub curbele tensiune-deformație (Figura 3.33),

130 Comportamentul la compresiune

modelul HC absoarbe cea mai mare cantitate de energie până la densificare (17,90 MJ/m³), acesta fiind urmat de modelul STR (14,51 MJ/m³). Contrar, valorile minime ale energiei sunt absorbite de către modelele LGT (0,14 MJ/m³) și SUC (0,28 MJ/m³), aspect asociat comportamentului liniar-elastic al epruvetelor testate. Diferența între extrema superioară și cea inferioară este de 99,2% în favoarea modelului HC.

Valorile energiei de absorbție diferă semnificativ în funcție de modelul de umplere utilizat, acestea neputând fi încadrate într-un interval specific.

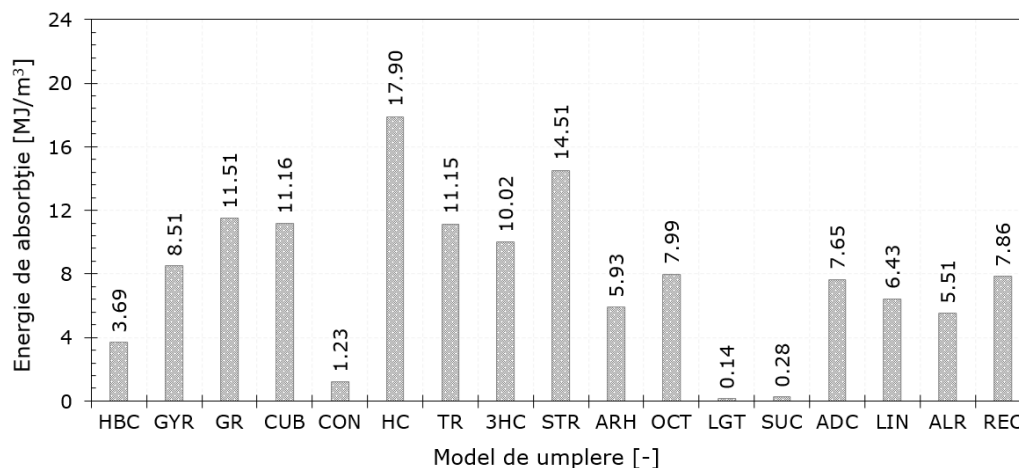


Fig. 3.41. Variația energiei de absorbție la densificare cu modelul de umplere

Cea mai mare eficiență energetică la densificare este identificată în dreptul modelelor de umplere CON (67,84%) și HBC (60,78%), acestea fiind singurele care prezintă valori peste 60% (Figura 3.42). Modelele LGT (17,05%) și SUC (30,71%) prezintă valorile minime ale eficienței, obținându-se astfel o scădere a eficienței de aproximativ 75% comparativ modelul CON.

Marea majoritate a modelelor investigate prezintă eficiențe energetice în domeniul procentual 45-57% (modelele GYR, GR, CUB, TR, 3HC, STR, ADC, LIN, ALR și REC).

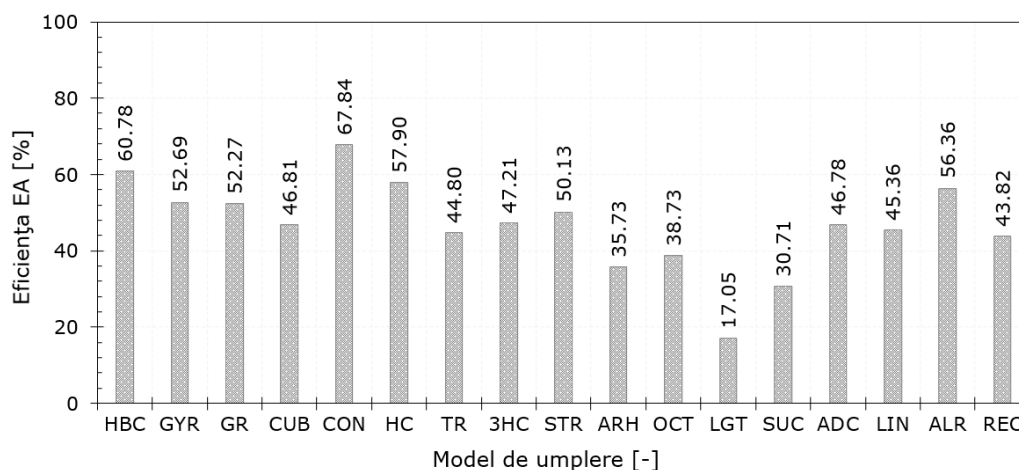


Fig. 3.42. Variația eficienței energetice la densificare cu modelul de umplere

3.5.3. Optimizarea modelului de umplere

Pentru identificarea corectă a modelului de umplere optim al epruvetelor printate 3D a fost necesară parcurgerea unui proces de optimizare. În acest sens, s-a utilizat Matricea Decizională, cunoscută și sub denumirea de Matrice Pugh sau Analiză Grid.

Matricea Decizională este utilizată pentru a defini criteriile care afectează procesul de luare a deciziilor într-un număr de opțiuni disponibile și se bazează pe Analiza Decizională cu Criterii Multiple (MCDA – Multiple-Criteria Decision Analysis). Astfel, în această metodă, fiecărui criteriu i se atribuie un scor în funcție de importanța și relevanța sa.

Comparativ cu alte metode de optimizare, Matricea Decizională are următoarele avantaje [292-294]:

- Oferă o idee clară a criteriilor care trebuie luate în considerare în alegerea finală și a ponderii fiecărei alegeri înainte de a începe procesul de luare a deciziilor;
- Elimină criteriile personale și folosește criteriile clare favorabile convenite pentru a decide;
- Reduce timpul de luare a deciziilor prin evaluarea mai multor alegeri în același timp. De asemenea, sistemul de rating accelerează procesul de luare a deciziilor.

În această analiză se va crea o matrice decizională pentru a evalua o serie de proprietăți (fizice și mecanice) și a decide care model de umplere este cel optim. Modelele de umplere sunt prezentate în Tabelul 3.4, iar criteriile de evaluare (proprietățile) sunt prezentate în Tabelele 3.5 și 3.6. Dintre toate proprietățile s-au considerat cele mai relevante pentru acest tip de materiale, și anume:

- masa epruvetelor printate (MEP);
- timpul de printare al epruvetelor (TPE);
- precizia dimensională a epruvetelor (PDE);
- performanțele de absorbție a energiei (PAE);
- proprietățile de rezistență ale epruvetelor (PRE);
- proprietățile elastice ale epruvetelor (PEE);
- deformația la densificare a epruvetelor (DDE).

Pentru obținerea Matricei Decizionale s-au parcurs următoarele etape:

❖ **Etapa 1.** S-a creat un tabel (Tabelul 3.7) în care coloanele reprezintă criteriile de evaluare (proprietățile), iar rândurile includ opțiunile (modelele de umplere).

❖ **Etapa 2.** S-a stabilit o scală de evaluare pentru fiecare criteriu.

Evaluarea variază între 5 (cel mai important) și 1 (cel mai puțin important). S-au adăugat aceste evaluări (punctaje) sub fiecare criteriu din tabel (vezi linia 2 din Tabelul 3.7). Astfel, fiecare proprietate a primit următoarele punctaje:

- masa epruvetelor printate: MEP=2;
- timpul de printare al epruvetelor: TPE=2;
- precizia dimensională a epruvetelor: PDE=1;
- performanțele de absorbție a energiei: PAE=5;
- proprietățile de rezistență ale epruvetelor: PRE=4;
- proprietățile elastice ale epruvetelor: PEE=3;
- deformația la densificare a epruvetelor: DDE=3.

În atribuirea punctajelor, accentul a fost pus pe PAE și PRE, criterii mai puțin importante fiind PDE, MEP și TPE. Se dorește obținerea unor epruvete optime care să prezinte performanțe ridicate de absorbție a energiei, cuplate cu proprietăți de rezistență bune. Acest studiu este o continuare a investigațiilor de optimizare inițiate în Secțiunea 3.4.3.

132 Comportamentul la compresiune

Tabelul 3.7. Matricea Decizională

Opțiuni (Model de umplere)	Criterii de evaluare (proprietăți)							Total
	MEP	TPE	PDE	PAE	PRE	PEE	DDE	
PPr	2*	2	1	5	4	3	3	
HBC	1**	1	2	1	5	5	1	49
PPo _{HBC}	2***	2	2	5	20	15	3	
GYR	2	3	4	3	3	3	3	59
PPo _{GYR}	4	6	4	15	12	9	9	
GR	2	4	1	4	5	5	3	77
PPo _{GR}	4	8	1	20	20	15	9	
CUB	2	4	3	4	3	3	5	71
PPo _{CUB}	4	8	3	20	12	9	15	
CON	2	4	3	1	2	3	1	40
PPo _{CON}	4	8	3	5	8	9	3	
HC	1	1	2	5	4	3	4	68
PPo _{HC}	2	2	2	25	16	9	12	
TR	2	4	4	4	5	5	5	86
PPo _{TR}	4	8	4	20	20	15	15	
3HC	1	1	3	3	3	3	3	52
PPo _{3HC}	2	2	3	15	12	9	9	
STR	2	4	4	5	5	5	5	91
PPo_{STR}	4	8	4	25	20	15	15	
ARH	2	4	3	2	3	4	4	61
PPo _{ARH}	4	8	3	10	12	12	12	
OCT	2	2	3	3	4	5	4	69
PPo _{OCT}	4	4	3	15	16	15	12	
LGT	5	5	1	1	1	1	0	33
PPo _{LGT}	10	10	1	5	4	3	0	
SUC	4	5	5	1	1	1	0	35
PPo _{SUC}	8	10	5	5	4	3	0	
ADC	3	5	3	3	2	2	5	63
PPo _{ADC}	6	10	3	15	8	6	15	
LIN	2	4	2	2	3	3	1	48
PPo _{LIN}	4	8	2	10	12	9	3	
ALR	2	4	3	2	2	2	2	45
PPo _{ALR}	4	8	3	10	8	6	6	
REC	2	4	5	3	3	3	3	62
PPo _{REC}	4	8	5	15	12	9	9	

❖ **Etapa 3.** S-a evaluat fiecare model de umplere pe baza fiecărui criteriu (proprietăți).

Punctajul este, din nou, de la 1 la 5 (1 înseamnă că modelul este cel mai puțin calificat pe baza proprietăților alese, iar 5 înseamnă că modelul este foarte calificat pentru proprietățile selectate). Punctajele se atribuie în funcție de valorile proprietăților prezentate în Secțiunea 3.5.2.

În Tabelul 3.8 se prezintă un exemplu de evaluare a modelelor de umplere pentru timpul de printare al epruvetelor (TPE). În acest sens, toate proprietățile au fost împărțite pe intervale egale de valori (vezi coloana 1 din Tabelul 3.8).

De exemplu, modelul de umplere LIN a fost evaluat cu 4, ceea ce înseamnă că modelul este *bine calificat* în ceea ce privește TPE. A primit un punctaj de 4 deoarece timpul de printare al epruvetelor, utilizând acest model, a fost de 76,3 minute, timp încadrat în al doilea interval (74-88 minute).

Tabelul 3.8. Evaluarea modelelor de umplere pe baza TPE

Interval TPE	Modele de umplere → TPE* [min]	Punctaj
60-74	LGT→62,8; SUC→65,5; ADC→73,0	5
74-88	GR→77,9; CUB→81,5; CON→83,8; TR→82,5; STR→78,5; ARH→84,8; LIN→76,3; ALR→77,0; REC→77,3	4
88-102	GYR→101,3	3
102-116	OCT→103,0	2
116-130	HBC→118,3; HC→129,3; 3HC→124,0	1

*valori preluate din Figura 3.32 (înregistrate pe durata printării epruvetelor)

Toate celelalte proprietăți (MEP, PDE, PAE, PRE, PEE și DDE) au urmat un tipar similar cu TPE (timpul de printare al epruvetelor).

❖ **Etapa 4.** Se calculează scorul (punctajul) ponderat pentru fiecare model de umplere pe baza fiecărui criteriu ales.

Valoarea punctajului ponderat este rezultatul înmulțirii punctajelor proprietăților și modelelor, așa cum se arată în Ecuația (3.19):

$$PPo_{MU} = PPr \times PMo \quad (3.19)$$

unde: PPo_{MU} – punctajul ponderat asociat unui model de umplere;

PPr – punctajul atribuit unei proprietăți în funcție de importanță;

PMo – punctajul primit de un model în funcție de mărimea proprietății.

De exemplu, punctajul ponderat pentru modelul de umplere HBC, asociat proprietății MEP (masa epruvetelor printate), se obține astfel:

$$PPo_{HBC} = PPr_{MEP} \times PMo_{MEP} = 2^* \times 1^{**} = 2^{***} \text{ (vezi Tabelul 3.7)}$$

❖ **Etapa 5.** Se calculează scorul/punctajul total ponderat pentru fiecare model de umplere și se scrie în ultima coloană a Tabelului 3.7.

Punctajul ponderat total se obține prin însumarea fiecărui punctaj ponderat asociat proprietăților considerate.

❖ **Etapa 6.** În cele din urmă, modelele de umplere (opțiunile) sunt prioritizate de la cel mai mare scor la cel mai mic scor.

În cazul de față, pe baza rezultatului final, modelul de umplere STR (cu un punctaj de 91) prezintă modelul optim care satisface cel mai bine criteriile/condițiile de evaluare (proprietățile) propuse/necesare. La polul opus se găsește modelul LGT cu un punctaj de 33, acesta fiind opțiunea cea mai nefavorabilă.

Așadar, în evaluările ulterioare ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM, se va utiliza un model de umplere **STAR** cu o densitate de umplere de **30%**. Aceasta alegere este rezultatul procesului de optimizare rezultat din Secțiunile 3.4 și 3.5.

3.6. Efectul formei epruvetelor

Subcapitolul 3.6 investighează influența formei epruvetelor asupra comportamentului la compresiune al epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM. În acest scop, s-au studiat epruvete prismatice cu 16 forme constructive diferite (prisme cu 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22 și ∞ laturi), vezi Figura 3.43. Epruveta cu ∞ laturi este asociată cu epruveta cilindrică.

Pentru a putea compara rezultatele obținute în urma testelor experimentale, toate epruvetele au prezentat aceeași înălțime și același volum (s-au variat doar lungimile laturilor prismelor).

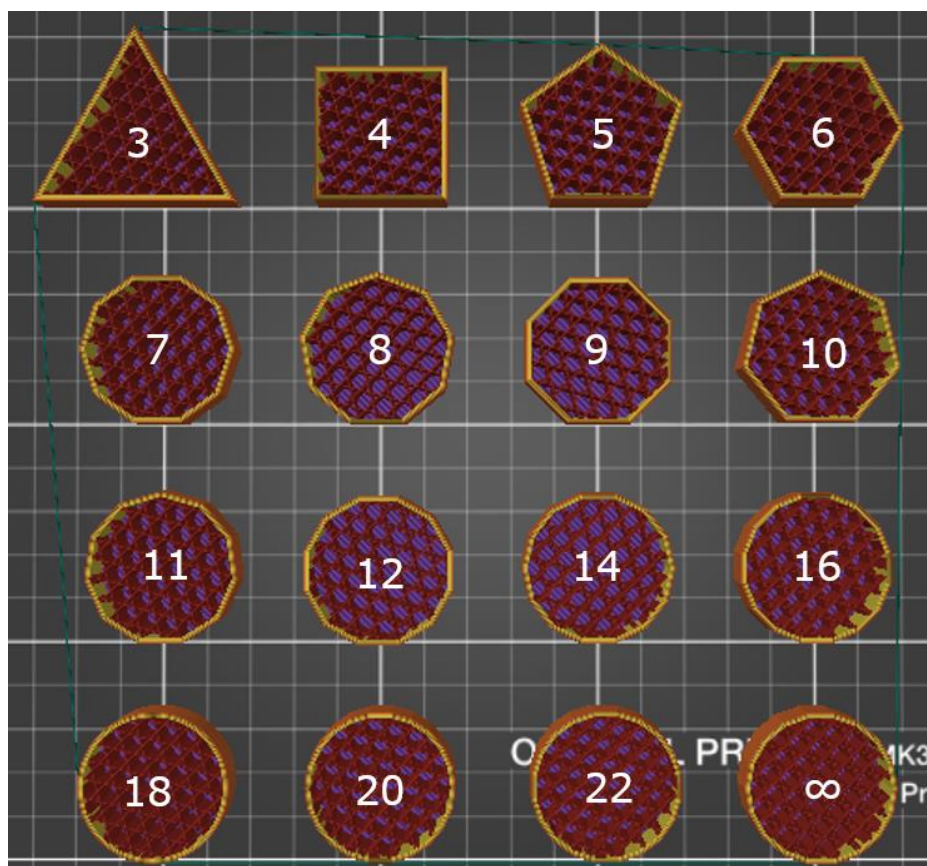


Fig. 3.43. Geometriile epruvetelor investigate

În Figura 3.44 se prezintă o vedere de ansamblu a epruvetelor printate în scopul identificării formei/geometriei optime.

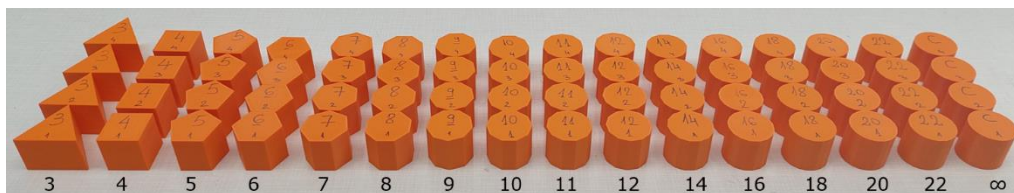


Fig. 3.44. Epruvetele printate privind studiul efectului formei epruvetelor

Epruvetele supuse investigațiilor au fost printate utilizând parametrii de proces din Tabelul 3.1. Având în vedere faptul că în Subcapitolele 3.4 și 3.5 s-au realizat studii de optimizare a densității și modelului de umplere, în acest subcapitol toate epruvetele studiate au fost printate cu parametrii ideali/optimi determinați anterior, și anume: densitatea de umplere de 30% și modelul de umplere STAR.

3.6.1. Evaluarea proprietăților fizice

Pentru evaluarea dimensională, privind efectul formei epruvetelor, s-a utilizat doar înălțimea (h) a epruvetelor (vezi Figura 3.1). Celelalte două dimensiuni (lățimile b_1 și b_2) nu au putut fi luate în considerare datorită formei geometrice a epruvetelor. Erorile investigate (EPD și ERM) s-au determinat cu relațiile (2.1) și (3.7), folosind valorile nominale și reale ale epruvetelor printate 3D.

Tabelul 3.9 prezintă valorile proprietăților fizice (h și m_f) și a erorilor relative (EPD- h și ERM) aferente acestora. Valorile medii, asociate acestor proprietăți, vor fi prezentate sub forma unor grafice coloană comparative.

Tabelul 3.9. Proprietățile fizice și erorile asociate acestora. Efectul formei epruvetelor

Tip prisma	h	EPD- h	m_f	m_m	ERM
[-]	[mm]	[%]	[g]	[g]	[%]
1	2	3	4	5	6
3	29,95	0,17	15,68	14,28	8,92
	29,96	0,13		14,29	8,88
	30,00	0,00		14,30	8,83
	29,97	0,10		14,29	8,85
4	30,03	0,10	15,2	14,32	5,77
	30,00	0,00		14,30	5,89
	30,01	0,03		14,30	5,95
	29,98	0,07		14,32	5,78
5	29,95	0,17	14,99	14,01	6,54
	29,93	0,23		14,00	6,60
	29,95	0,17		13,99	6,68
	29,94	0,20		13,98	6,72

136 Comportamentul la compresiune

Tabelul 3.9. (Continuare)

1	2	3	4	5	6
6	29,96	0,13	14,93	13,92	6,75
	29,95	0,17		13,88	7,03
	29,96	0,13		13,88	7,06
	29,93	0,23		13,87	7,11
7	29,97	0,10	14,84	13,85	6,66
	29,98	0,07		13,81	6,97
	29,95	0,17		13,86	6,64
	29,93	0,23		13,84	6,73
8	29,91	0,30	14,99	13,98	6,77
	29,94	0,20		13,97	6,82
	29,98	0,07		13,96	6,90
	29,94	0,20		13,96	6,84
9	29,89	0,37	14,92	13,57	9,03
	29,91	0,30		13,57	9,04
	29,94	0,20		13,59	8,89
	29,93	0,23		13,56	9,14
10	29,91	0,30	14,86	13,52	9,01
	29,96	0,13		13,52	9,04
	29,97	0,10		13,53	8,92
	29,98	0,07		13,52	9,02
11	29,90	0,33	14,91	13,60	8,80
	29,93	0,23		13,60	8,82
	29,94	0,20		13,60	8,79
	29,93	0,23		13,58	8,89
12	29,93	0,23	14,91	13,74	7,82
	29,94	0,20		13,74	7,86
	29,91	0,30		13,73	7,89
	29,91	0,30		13,72	7,97
14	29,98	0,07	14,90	13,71	8,00
	29,96	0,13		13,70	8,05
	29,96	0,13		13,69	8,10
	29,97	0,10		13,71	7,99
16	29,96	0,13	14,91	13,72	7,97
	29,98	0,07		13,72	7,98
	29,98	0,07		13,73	7,95
	30,00	0,00		13,73	7,91

Tabelul 3.9. (Continuare)

1	2	3	4	5	6
18	29,95	0,17	14,89	13,69	8,04
	30,00	0,00		13,71	7,94
	29,96	0,13		13,72	7,89
	30,00	0,00		13,69	8,09
20	29,98	0,07	14,90	13,69	8,10
	29,98	0,07		13,69	8,11
	29,99	0,03		13,72	7,92
	29,98	0,07		13,68	8,19
22	29,96	0,13	14,70	13,53	7,93
	29,98	0,07		13,51	8,07
	30,00	0,00		13,51	8,11
	29,99	0,03		13,53	7,98
∞	29,99	0,03	14,87	13,77	7,42
	29,98	0,07		13,78	7,36
	29,94	0,20		13,78	7,36
	29,96	0,13		13,77	7,40

În Figura 3.45 sunt reprezentate erorile relative de înălțime ale epruvetelor printate în funcție de forma epruvetelor. Probele printate au prezentat o precizie dimensională ridicată, acestea evidențiind erori de înălțime sub 0,3%. Nici o geometrie nu a indicat erori de înălțime zero. Cele mai mari erori de înălțime s-au înregistrat pentru epruvetele prismatice cu 9 laturi (0,27%), iar cele mai mici - pentru cele cu 4 laturi (0,05%). Astfel, s-au obținut diferențe procentuale între cele două extreme de 81,8%. Rezultatele erorilor prezintă o deviație standard de 0,07%.

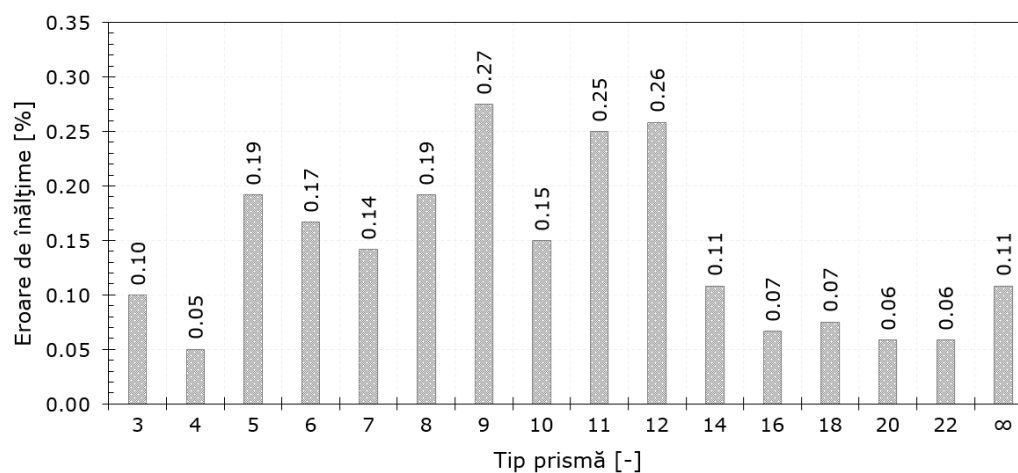


Fig. 3.45. Erorile relative de înălțime ale epruvetelor din PLA printate în funcție de forma epruvetelor

138 Comportamentul la compresiune

În Figura 3.46 este prezentată variația masei (teoretică- m_t și măsurată- m_m) epruvetelor în funcție de geometria acestora. S-a obținut că m_t a epruvetelor este mai mare decât m_m pentru toate configurațiile studiate. Cea mai mare m_t se identifică în dreptul prisme triunghiulare (15,68 g), în timp ce prisma patrulateră evidențiază cea mai mare m_m (14,31 g). De partea cealaltă, masele minime ($m_t=14,70$ g și $m_m=13,52$ g) se găsesc în dreptul prisme cu 22 de laturi.

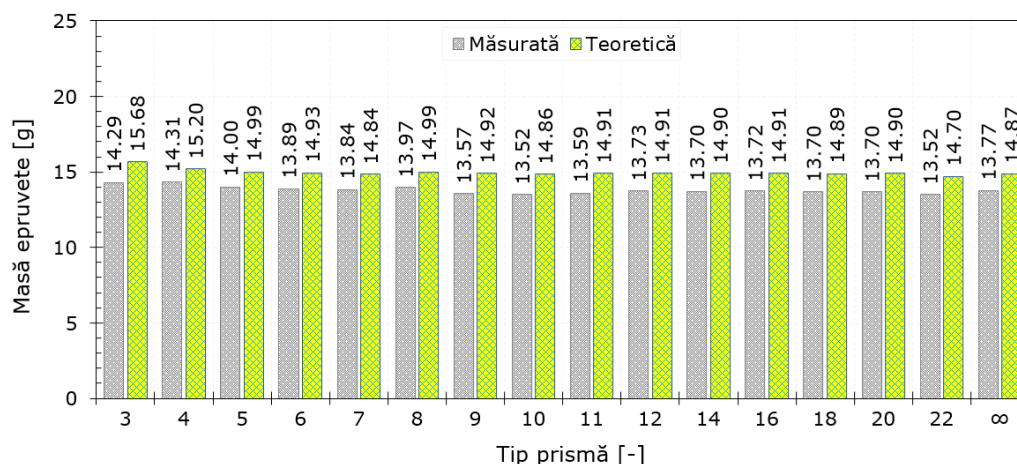


Fig. 3.46. Variația masei teoretice și măsurate a epruvetelor din PLA printate în funcție de forma epruvetelor

Figura 3.47 ilustrează erorile relative de masă (ERM) ale epruvetelor printate în funcție de configurațiile investigate. Prisma patrulateră prezintă cea mai mică diferență procentuală între m_t și m_m (5,85%), în timp ce diferența majoră este înregistrată de prisma cu 9 laturi (9,02%). Pentru toate configurațiile, diferențele procentuale dintre m_t și m_m prezintă o deviație standard sub 1%. Astfel, epruvetele prismatice cu 4 laturi prezintă ERM cu până la 35,2% mai reduse comparativ cu geometriile cu 9 laturi. ERM majoritare sunt grupate în intervalul 6,6-8,1%.

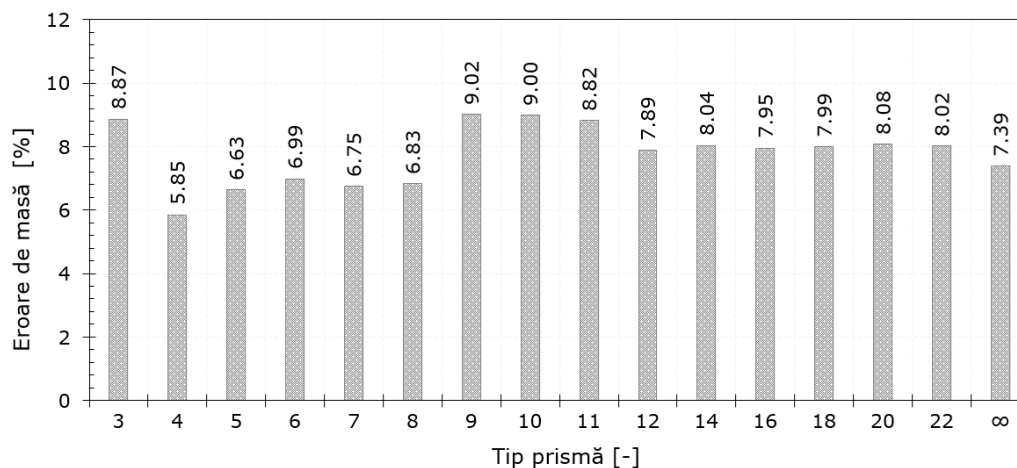


Fig. 3.47. Erorile relative de masă ale epruvetelor din PLA printate în funcție de forma epruvetelor

Majoritatea epruvetelor au prezentat un timp de printare de 75 sau 76 minute. Figura 3.48 prezintă un grafic coloană cu timpii necesari pentru printarea configurațiilor de epruvete investigate. Cel mai mare timp de printare t_p este obținut de către epruvetele prismatice triunghiulare (83 minute), iar cel mai favorabil este găsit în dreptul prisme hexagonale (72 minute). Astfel, între timpii extremi de printare se obține o diferență procentuală de 13,3%. Deviația standard între toți timpii de printare este de sub 2,5 minute.

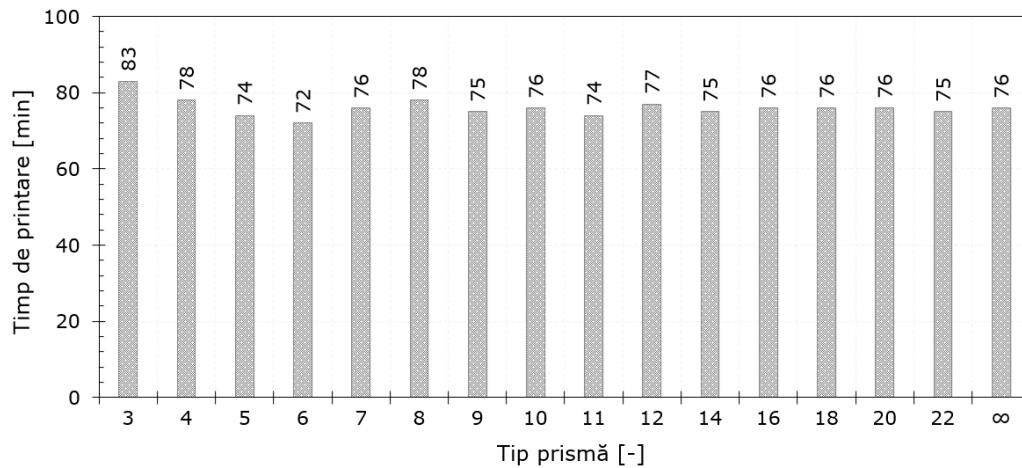


Fig. 3.48. Variația timpului de printare al epruvetelor din PLA în funcție de forma epruvetelor

3.6.2. Evaluarea proprietăților mecanice

Figura 3.49 prezintă o comparație a curbelor tensiune-deformație la compresie pentru toate cele 16 forme constructive ale epruvetelor (prisme cu 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22 și ∞ laturi). Se observă că pe regiunea liniar-elastică (A) toate curbele tensiune-deformație aproape se suprapun. Diferențele încep să se observe la sfârșitul acestei regiuni, unde se obțin amplitudini diferite ale punctului de curgere.

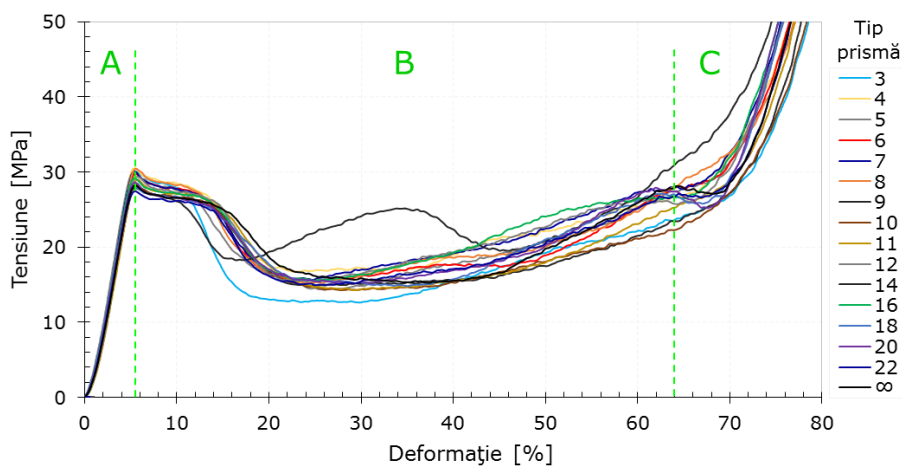


Fig. 3.49. Curbele tensiune-deformație la compresie ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM. Efectul formei epruvetelor

140 Comportamentul la compresiune

Cele mai mari diferențe între comportamentele la compresiune ale epruvetelor printate 3D sunt evidențiate de către regiunea de platou (B), în special a doua jumătate a acesteia. Exceptând ordinul de mărime al tensiunilor, toate epruvetele prezintă în principiu același tipar, mai puțin epruvetele prismatice cu 3 și 14 laturi, care, pe regiunea de platou, prezintă comportamente diferite.

La sfârșitul regiunii de densificare (C), curbele converg spre o valoare comună a deformației. Acest aspect este legat de compactarea epruvetelor. Totuși, la începutul acestei regiuni se observă unele diferențe între epruvete, în special pentru epruveta cu 14 laturi.

În Figura 3.50 este prezentată o imagine de ansamblu a epruvetelor testate la compresiune. În funcție de geometria epruvetei s-au obținut diferite moduri de deformare. Prismele triunghiulare și cele patrulatere prezintă o deformare mai neregulată, aceasta devenind tot mai uniformă odată cu creșterea numărului de laturi.



Fig. 3.50. Epruvetele deformate în funcție de forma acestora

În Tabelul 3.10 sunt prezentate valorile principalelor proprietăți mecanice obținute în urma testelor de compresiune pe epruvete cu diferite forme geometrice. Pentru o mai ușoară interpretare a rezultatelor, figurile următoare vor prezenta variația valorilor medii ale proprietăților investigate.

Tabelul 3.10. Principalele proprietăți mecanice. Efectul formei epruvetelor

TP	E	σ_c	ε_m	σ_m	σ_{pl}	σ_d	ε_d	EA_d	$E_{ff,d}$
[-]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MJ/m ³]	[-]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	688.20	30.57	6.45	15.30	17.25	29.08	68.94	14.16	0.49
	723.90	30.57	5.61	14.74	16.78	23.41	57.32	10.93	0.47
	708.84	30.05	5.55	13.61	15.35	23.23	63.14	11.51	0.50
	714.58	30.06	5.59	12.61	14.23	24.59	66.52	11.94	0.49
4	726.03	30.73	5.63	16.82	18.69	28.30	68.29	14.42	0.54
	724.56	30.64	5.48	13.15	17.65	28.71	69.74	13.77	0.56
	723.12	30.56	5.55	14.32	17.21	29.49	67.71	13.93	0.47
	728.10	30.51	5.40	16.73	18.29	27.39	66.44	14.10	0.51
5	720.73	30.56	5.56	15.02	17.18	28.68	66.48	13.87	0.48
	717.80	30.51	5.45	14.63	16.99	22.61	57.55	11.04	0.49
	725.87	30.13	5.48	15.89	17.55	27.20	66.29	13.92	0.51
	726.57	30.00	5.33	14.32	17.05	28.52	67.52	13.65	0.48

3.6. Efectul formei epruvetelor 141

Tabelul 3.10. (Continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	696.87	30.68	5.72	17.27	18.55	27.16	65.34	13.90	0.51
	708.34	29.90	5.63	16.84	18.26	26.59	66.03	13.95	0.52
	727.04	29.96	5.48	15.01	17.16	28.12	67.53	13.99	0.50
	719.39	29.77	5.51	15.50	17.05	18.21	49.03	9.23	0.51
7	695.32	30.20	5.63	14.80	17.38	27.74	67.72	14.05	0.51
	727.66	29.76	5.40	15.59	17.17	26.85	66.70	14.05	0.52
	732.10	30.07	5.43	15.64	18.00	28.56	66.81	14.23	0.50
	723.42	30.06	5.41	15.51	17.51	19.07	46.20	8.89	0.47
8	718.83	30.45	5.57	15.21	17.51	22.60	56.27	10.94	0.48
	715.73	30.45	5.56	15.27	17.14	19.59	48.59	9.25	0.47
	724.98	30.18	5.59	14.99	17.24	29.89	67.34	14.13	0.47
	729.20	30.37	5.52	15.27	17.46	19.95	49.75	9.56	0.48
9	687.14	28.63	5.77	15.03	17.31	26.36	65.70	13.40	0.51
	647.78	28.03	5.84	16.58	17.90	25.58	63.60	12.73	0.50
	665.05	28.65	5.76	15.19	17.68	28.05	66.13	13.43	0.48
	698.62	28.06	6.88	14.77	16.02	19.76	56.62	10.18	0.52
10	688.48	28.47	5.88	16.06	17.30	24.27	65.21	12.88	0.53
	671.07	28.14	5.74	14.69	16.37	27.82	67.95	13.29	0.48
	680.60	28.32	5.63	14.26	15.98	22.37	64.28	11.75	0.53
	689.29	28.00	5.61	16.03	16.82	25.36	67.32	13.35	0.53
11	684.83	28.99	5.76	14.26	16.52	17.86	49.84	8.95	0.50
	686.94	28.65	5.52	17.62	18.03	22.81	59.98	11.90	0.52
	701.53	28.96	5.45	16.09	17.00	29.60	68.51	14.37	0.49
	677.25	28.42	5.49	14.68	17.15	24.39	65.87	13.03	0.53
12	705.81	29.36	5.71	15.43	17.84	26.43	66.49	13.98	0.53
	710.10	29.55	5.58	15.67	17.91	26.73	65.10	13.77	0.52
	690.19	29.40	5.57	15.40	17.32	25.98	67.31	14.10	0.54
	697.07	29.44	5.49	15.40	18.20	25.56	65.90	14.03	0.55
14	697.30	27.92	5.74	18.04	20.98	20.86	50.56	10.85	0.52
	687.40	28.06	5.56	18.33	21.09	21.18	51.23	11.01	0.52
	677.72	27.88	5.45	18.25	20.86	19.56	47.17	10.11	0.52
	691.17	27.87	5.41	18.37	20.92	20.69	50.09	10.80	0.52
16	718.27	29.52	5.52	16.03	17.91	26.06	66.01	14.02	0.54
	693.90	29.34	5.63	17.00	18.35	26.99	65.75	14.02	0.52
	712.01	29.33	5.48	16.15	17.95	27.66	66.30	14.06	0.51
	703.41	29.19	5.36	15.56	18.11	26.47	65.26	13.84	0.52

142 Comportamentul la compresiune

Tabelul 3.10. (Continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
18	667.93	28.10	5.50	16.92	18.67	29.11	67.60	14.62	0.50
	689.91	28.09	5.44	14.72	16.77	20.78	58.18	10.69	0.51
	697.52	27.99	5.41	18.11	20.59	26.08	58.69	12.86	0.49
	673.47	28.03	5.33	14.79	16.73	25.99	67.62	13.59	0.52
20	699.61	28.91	5.83	16.25	18.13	26.51	66.44	14.17	0.53
	715.67	28.76	5.48	15.78	17.07	24.45	66.79	13.77	0.56
	695.81	28.59	5.48	15.15	16.99	25.24	67.76	13.71	0.54
	687.01	28.67	5.40	14.98	17.27	25.77	67.00	13.76	0.53
22	693.37	27.61	5.54	14.19	16.21	20.68	59.13	10.61	0.51
	678.13	27.67	5.59	14.44	16.14	19.58	54.77	9.78	0.50
	668.64	27.45	5.44	14.92	16.63	26.79	67.78	13.48	0.50
	680.75	27.41	5.33	14.76	16.21	25.30	68.43	13.42	0.53
∞	705.35	28.40	5.51	15.94	17.84	25.71	66.55	14.00	0.54
	694.36	28.23	5.50	15.25	17.09	27.42	69.37	14.09	0.51
	674.69	27.93	5.43	14.32	17.01	16.08	47.49	8.60	0.53
	677.83	28.10	5.39	16.17	18.24	28.37	68.33	14.38	0.51

În Figura 3.51 este prezentată variația modului la compresiune, E , pentru epruvetele investigate. Toate rezultatele sunt destul de apropiate, obținându-se o deviație standard a acestora de 17,18 MPa. Cu toate acestea, epruveta cu 4 laturi (cub) se evidențiază cu cel mai mare E (725,45 MPa). La polul opus, epruveta prismatica cu 7 laturi prezintă cea mai mică valoare a modului (674,65 MPa). Se obține, astfel, o diferență procentuală de 7% între cele două valori extreme ale lui E .

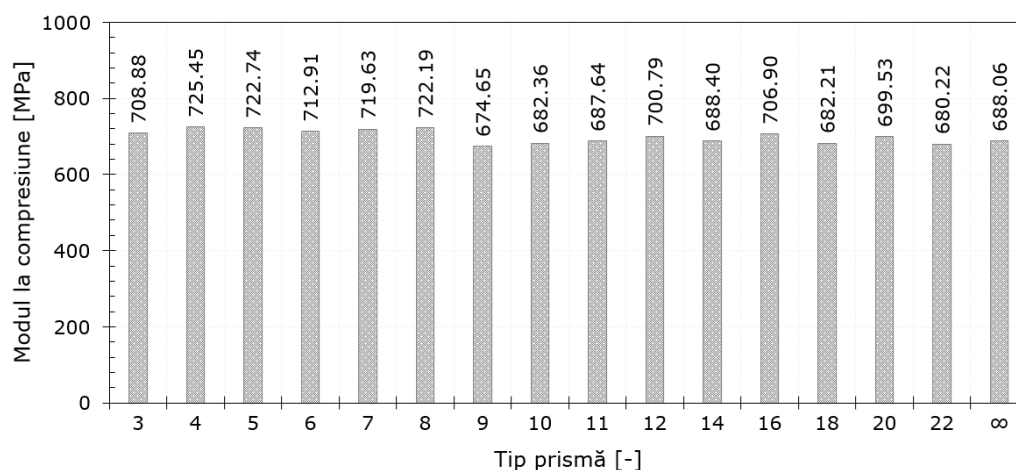


Fig. 3.51. Variația modului de elasticitate la compresiune al epruvetelor din PLA printate. Efectul formei epruvetelor

În funcție de natura tensiunii studiate, proprietățile de rezistență diferă considerabil (Figura 3.52).

3.6. Efectul formei epruvetelor 143

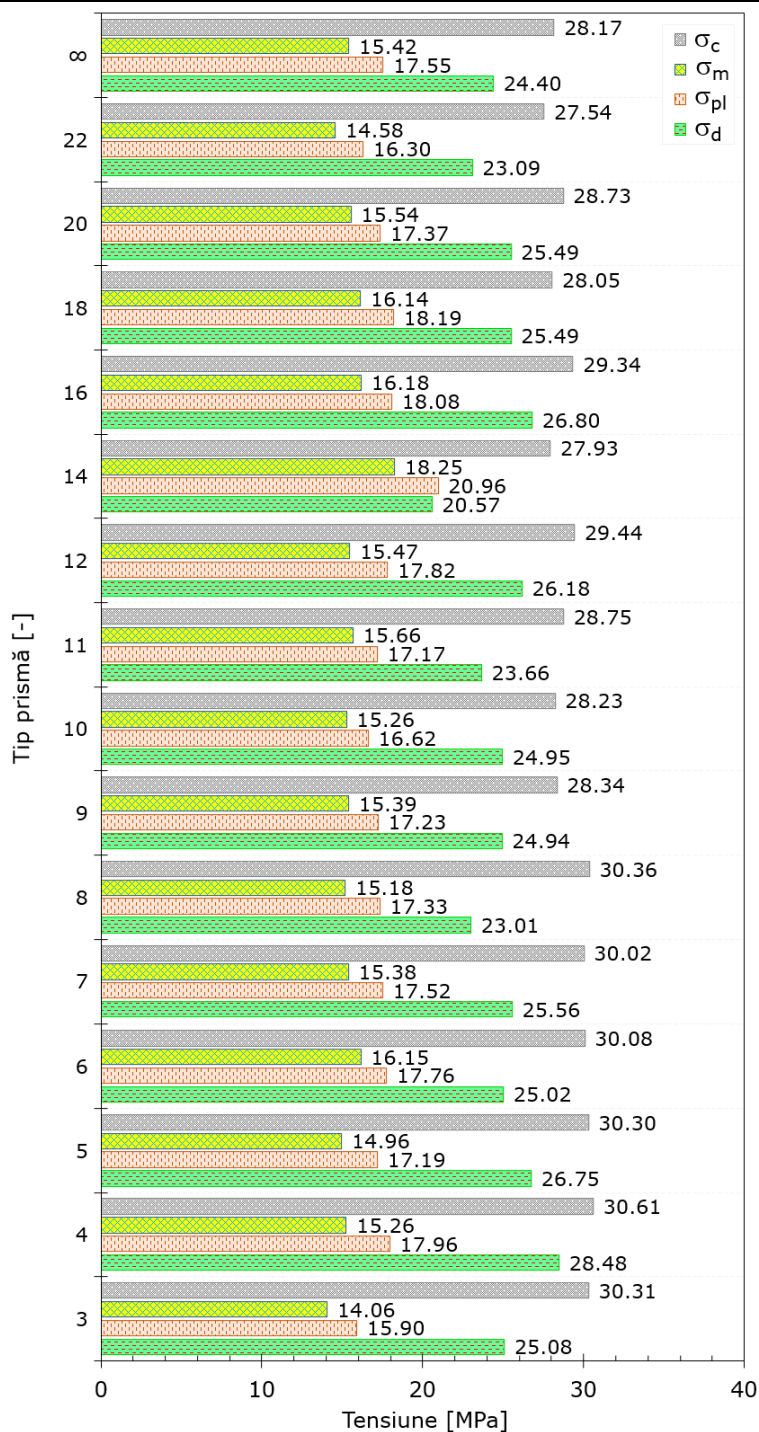


Fig. 3.52. Variația proprietăților de rezistență a epruvetelor din PLA printate. Efectul formei epruvetelor

144 Comportamentul la compresiune

Cele mai mari valori ale tensiunilor sunt obținute de către rezistența la compresiune (σ_c), urmată în ordine de tensiunea la densificare (σ_d), tensiunea de platou (σ_{pi}) și tensiunea minimă (σ_m).

Epruveta cubică prezintă cele mai mari valori ale rezistenței la compresiune (30,61 MPa), urmată îndeaproape de epruvetele cu 8 (30,36 MPa), 3 (30,31 MPa) și cele cu 5 (30,30 MPa) laturi. Acestea, împreună cu epruvetele cu 6 și 7 laturi, sunt singurele care prezintă rezistențe cu valori peste 30 MPa. Cea mai mică valoare a rezistenței la compresiune, de 27,54 MPa, este identificată în dreptul epruvetei prismatice cu 22 de laturi. Deviația standard a rezistenței la compresiune, obținută pentru toate cele 16 forme de epruvete, este de 1,04 MPa.

Diferența procentuală între valorile maxime (28,48 MPa pentru epruveta cu 4 laturi) și minime (20,57 MPa pentru epruveta cu 14 laturi) ale tensiunii la densificare este de 27,8%. În acest caz, între epruvetele investigate, se obține o deviație standard a valorilor de 1,82 MPa.

Tensiunea de platou și tensiunea minimă prezintă valorile extreme pentru epruvetele cu 14 (maxime) și cele cu 3 (minime) laturi. Astfel, ambele tensiuni prezintă diferențe de aproximativ 23% între valorile extreme. Marea majoritate a tensiunilor de platou se găsesc în intervalul 17-18 MPa, iar tensiunile minime în intervalul 14,5-15,5 MPa.

Figura 3.53 prezintă variația deformațiilor caracteristice la compresiune în funcție de forma epruvetelor printate. Deformațiile corespunzătoare rezistenței la compresiune sunt foarte apropiate pentru toate cele 16 tipuri de epruvete, obținându-se deviații standard de doar 0,16%. Acest aspect evidențiază suprapunerea aproape totală a curbelor tensiune-deformație în zona liniar-elastică (vezi Figura 3.49). Totuși, se poate nota că epruveta prismatică cu 9 laturi prezintă cea mai mare valoare a deformației corespunzătoare rezistenței la compresiune (6,06%), iar cea cu 18 laturi cea mai mică valoare a deformației (5,42%).

Diferențe mult mai mari se obțin în ceea ce privește deformația la densificare. În acest caz, cea mai mare deformație este înregistrată de către epruveta cu 4 laturi (68,04%), valoare de 1,4 ori mai mare decât cea minimă (epruveta cu 14 laturi).

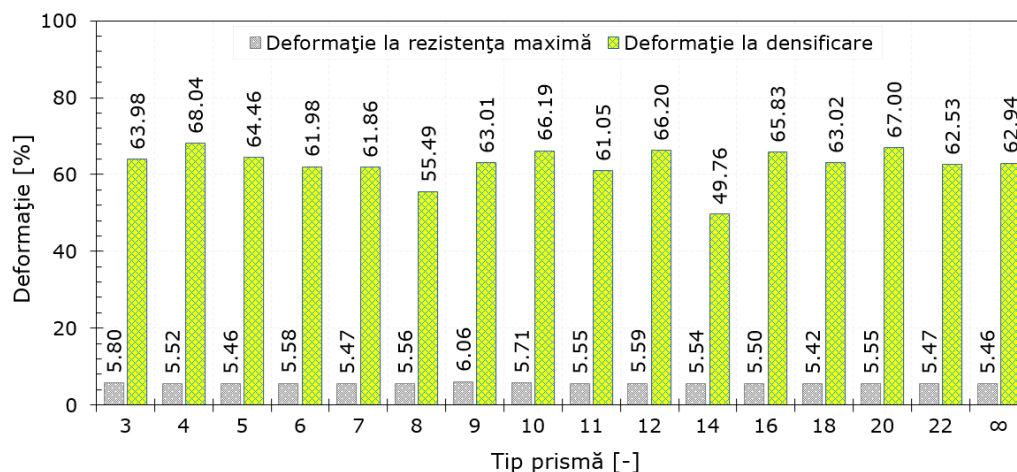


Fig. 3.53. Variația deformațiilor la rezistența maximă și la densificare ale epruvetelor din PLA printate. Efectul formei epruvetelor

Figura 3.54 prezintă variația lungimii platoului la compresiune în funcție de forma epruvetelor testate. Epruveta prismatică patrulateră prezintă cel mai extins platou (62,53%). Epruveta cu 4 laturi este urmată de epruvetele cu 20 (61,45%), 12 (60,61%), 10 (60,48%) și 16 (60,34%) laturi - de fapt, singurele epruvete care prezintă valori ale lungimii platoului de peste 60%. La polul opus, epruveta prismatică cu 14 laturi evidențiază cea mai mică extindere a platoului, și anume 44,23%. Majoritatea rezultatelor se găsesc în intervalul 56-59%.

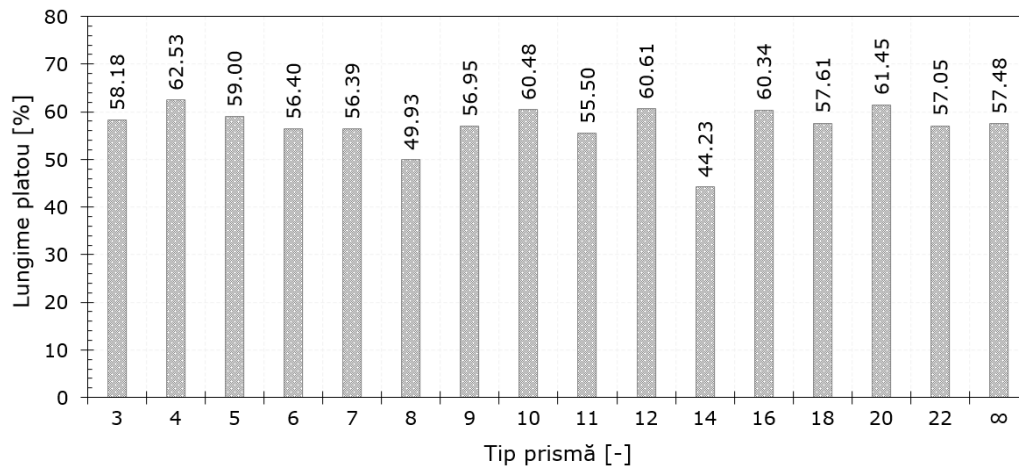


Fig. 3.54. Variația lungimii platoului la compresiune al epruvetelor din PLA printate. Efectul formei epruvetelor

Variația amplitudinii tensiunii în funcție de forma epruvetelor este prezentată în Figura 3.55. Cele mai multe rezultate sunt grupate în intervalul 12,5-15,5 MPa. Rezultatele extreme se obțin pentru prisma triunghiulară (16,25 MPa), respectiv pentru epruveta cu 14 laturi (9,68 MPa). Între cele două valori se obține o diferență procentuală de 67,8% în favoarea epruvetei prismatice triunghiulare. Prisma patrulateră prezintă a doua valoare a amplitudinii tensiunii, de 15,35MPa.

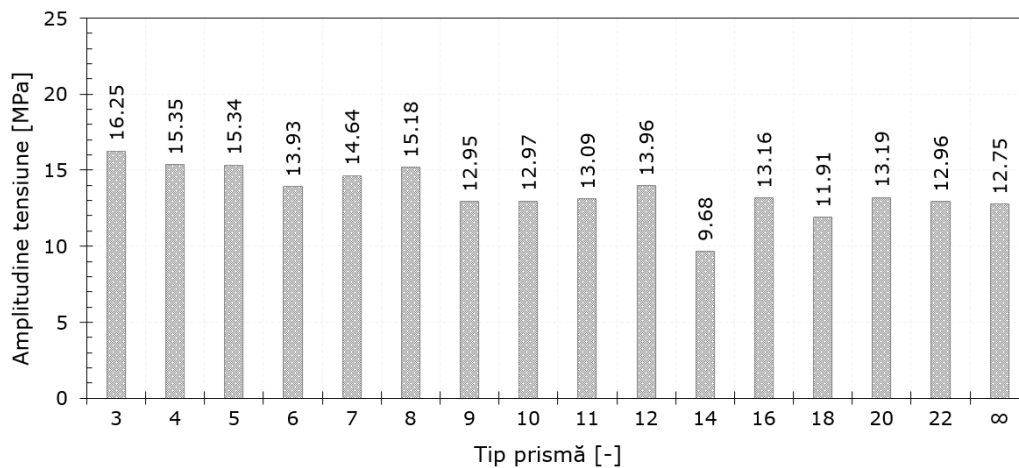


Fig. 3.55. Variația amplitudinii tensiunii pentru epruvetele din PLA printate. Efectul formei epruvetelor

146 Comportamentul la compresiune

Figura 3.56 prezintă efectul formei epruvetelor asupra curbelor energie de absorbție-deformație la compresiune. În zona linear elastică (A), toate curbele se suprapun, diferența majoră observându-se în a doua parte a regiunii platoului (B). Aceasta diferență se majorează odată cu intrarea epruvetelor în zona densificării (C). Regiunile A, B și C sunt corespundente regiunilor prezentate în Figura 3.49.

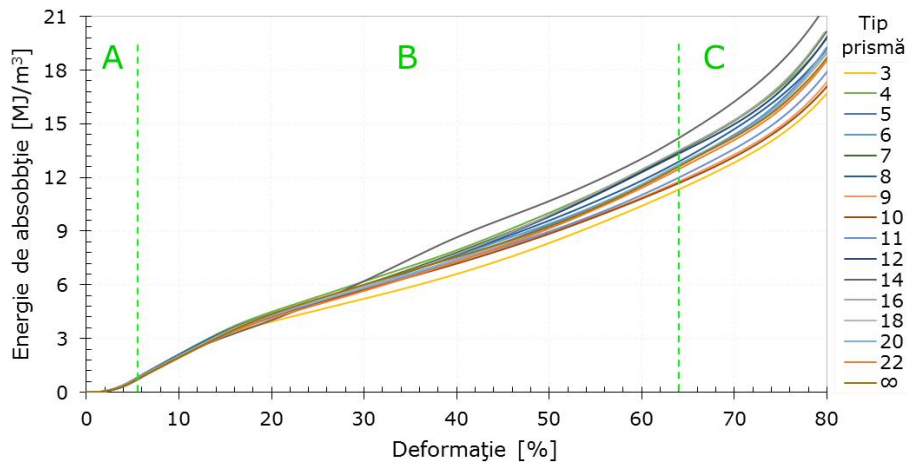


Fig. 3.56. Curbele energie de absorbție-deformație la compresiune ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM. Efectul formei epruvetelor

În urma prelucrării datelor experimentale din Figura 3.56 s-a obținut că prisma patrulateră absoarbe cea mai mare cantitate de energie (14,06 MJ/m³). Astfel, Figura 3.57 prezintă variația energiei de absorbție la densificare pentru diferite forme ale epruvetelor. Valori apropiate ale energiei absorbite pe durata testului de compresiune sunt identificate, de asemenea, în dreptul epruvetelor cu 16 (13,98 MJ/m³), 12 (13,97 MJ/m³) și 20 (13,85 MJ/m³) laturi. Între energiile absorbite de primele patru configurații se obține o abatere procentuală de doar 1,5%. Cele mai mici valori, singurele sub 11 MJ/m³, sunt obținute în dreptul epruvetelor cu 14 (10,69 MJ/m³) și 8 (10,97 MJ/m³) laturi.

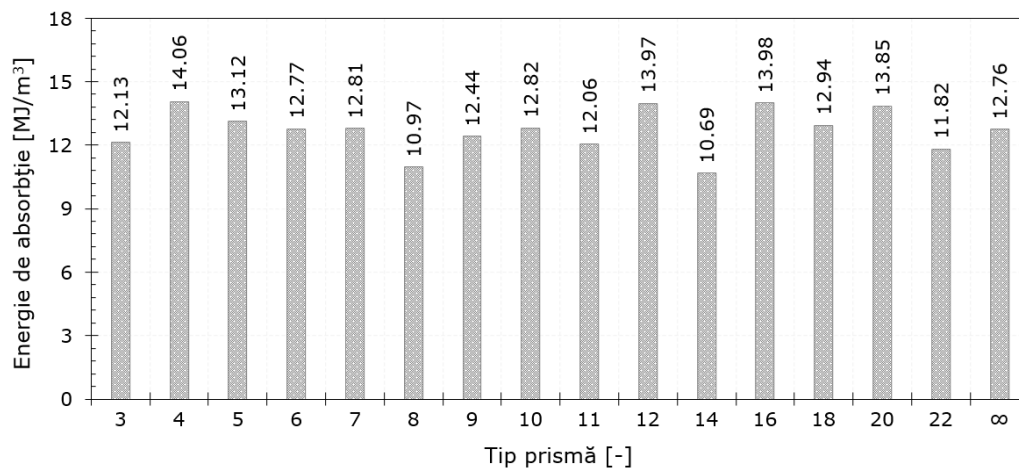


Fig. 3.57. Variația energiei de absorbție la densificare cu forma epruvetelor

Variația eficienței energetice la densificare cu forma epruvetelor este prezentată în Figura 3.58. Cea mai mare eficiență s-a obținut pentru epruveta prismatică cu 20 laturi (54,37%), iar cea mai mică pentru cea cu 8 laturi (47,69%). Majoritatea valorilor eficienței sunt peste 50%.

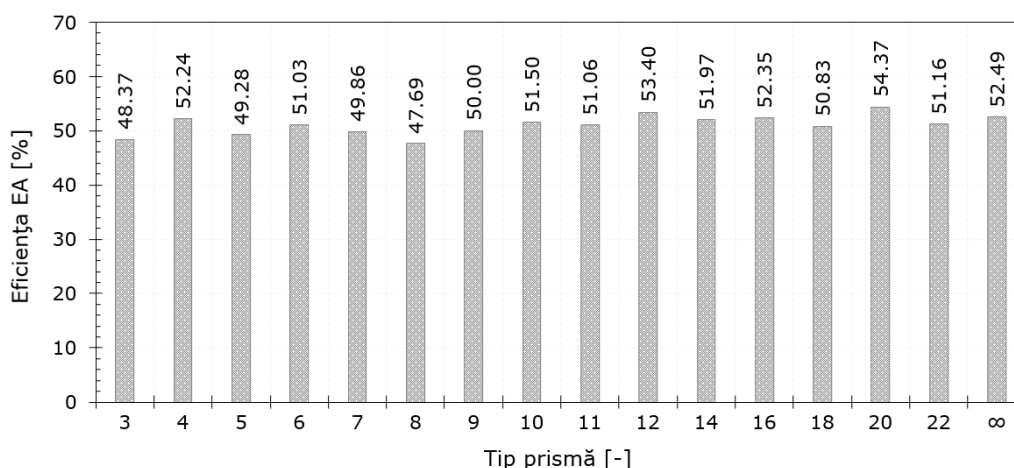


Fig. 3.58. Variația eficienței energetice la densificare cu forma epruvetelor

Analizând valorile proprietăților fizice (erori relative de înălțime și masă, timp de printare) și mecanice (proprietăți elastice și de rezistență, performanțe de absorbție a energiei) s-a constatat că, în comparație cu toate celelalte geometrii investigate, **epruveta prismatică patrulateră** prezintă următoarele avantaje:

- cele mai mici erori relative de înălțime (0,05%);
- cele mai mici erori relative de masă (5,85%);
- un timp de printare mediu (78 min);
- cel mai mare modul de elasticitate la compresiune (725,45 MPa);
- cea mai mare rezistență la compresiune (30,61 MPa);
- cea mai mare tensiune la densificare (28,48 MPa);
- cea mai mare deformație la densificare (68,04%);
- cea mai mare lungime a platoului (62,53%);
- absoarbe cea mai mare cantitate de energie (14,06 MJ/m³).

Așadar, per ansamblu, studiul de optimizare prezentat în Capitolul 3 scoate în evidență parametrii optimi care trebuie utilizați pentru a obține proprietăți maxime ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM, și anume:

- densitatea de umplere: **30%** (vezi Secțiunea 3.4.3);
- modelul de umplere: **STAR** (vezi Secțiunea 3.5.3);
- geometria epruvetei: **CUB** (vezi Secțiunea 3.6).

4. COMPORTAMENUL LA RUPERE FRAGILĂ

4.1. Noțiuni generale

Proprietățile mecanice ale structurilor FDM depind de materialul din care sunt fabricate, modul de prelucrare și detaliile de geometrie ale acestora. De exemplu, studiile au arătat că densitatea de umplere [295], orientarea construcției [12, 205, 296-301], grosimea stratului [297, 299], lățimea rasterului [297, 299], spațiul de aer [297, 299, 301, 302] și temperatura de printare [302, 303] afectează toate proprietățile mecanice ale pieselor din ABS printate 3D și contribuie la comportamentul ortotrop al materialului. Multe dintre aceste studii s-au concentrat pe proprietățile de tracțiune [12, 295-301, 304], deși au fost raportate și comportamente la încovoiere [303], torsiune [301] și compresiune [277, 305].

Creșterea remarcabilă a numărului pieselor fabricate aditiv în componentele primare și secundare ale diferitelor industrii, i-a determinat pe autori să studieze comportamentul la rupere a unei astfel de construcții. În aplicațiile din viața reală, structurile inginerești nu sunt doar supuse la întindere, dar suferă și sarcini de torsiune și forfecare, care induc implicit o rupere în mod mixt (de exemplu, I/II, I/III, II/III, I/II/III). În general, fenomenul în modul mixt este destul de complex, în special pentru componentele printate strat cu strat. Un număr semnificativ de metode experimentale și diferite configurații ale epruvetelor au fost dezvoltate și utilizate pentru a măsura proprietățile la rupere în modul mixt (rezistența la rupere, mecanismele de creștere a fisurilor etc.) ale diferitelor materiale inginerești [306-313].

Chiar dacă este disponibilă o varietate mare de geometrii de epruvete, doar puține studii au investigat proprietățile de rupere ale pieselor printate 3D. Ruperea în modul I între liniile de sudură cu un singur raster de ABS a fost investigată utilizând epruvete de tracțiune cu creștătură de margine [314]. Autorii au demonstrat că temperaturile crescute de printare și timpii de recoacere au dus la creșterea performanței la rupere.

Pentru a studia ruperea și oboseala în modul I, Blattmeier și colab. [315] au printat 12 epruvete compacte de tracțiune, cu orientări variate ale rasterului în raport cu vârful fisurii, din Nylon sinterizat cu laser, complet dens. Autorii au confirmat natura ortotropă a ruperii, demonstrând că împiedicarea creșterii fisurilor a fost îmbunătățită atunci când orientarea rasterului a fost perpendiculară pe vârful fisurii inițiale. Într-un alt studiu, epruvetele compacte de tracțiune din PLA cu orientări variate ale rasterului, înainte de vârful fisurii, au fost utilizate pentru a studia ruperea în modul I [316]. Autorii au identificat comportamente similare cu cele raportate de Blattmeier și colab. [315].

Ameri și colab. [317] au folosit epruvete din cinci materiale ABS diferite, printate prin tehnologia FDM pentru a sublinia posibilitățile de a scădea cantitatea de anizotropie și volumul golului, precum și influența acestora asupra comportamentului

la rupere în modul mixt. Epruvetele au fost supuse testului de încovoiere simetrică în trei puncte, iar forța de rupere și unghiurile de inițiere a fisurilor au fost asociate cu prezența găurilor deschise în interiorul epruvetelor.

Efectul orientării printării asupra comportamentului la rupere în modul mixt I/II al epruvetelor din policarbonat, fabricate prin tehnologia FDM, a fost abordat de Bahrami și colab. [223]. Rezultatele tenacității la rupere în funcție de direcțiile stratului au fost extrase utilizând forța de rupere și comparate cu diverse criterii teoretice de rupere.

Song și colab. [318] au fabricat epruvete din PLA turnate prin injecție și printate 3D într-o singură direcție. Ei au ajuns la concluzia că epruvetele printate prin FDM au crescut tenacitatea la rupere. În plus, comportamentul mecanic ortotrop a fost observat în diferite direcții de printare.

Brugo și colab. [319] au raportat efectul direcției de printare asupra inițierii fisurii și a mecanismului de rupere al pieselor din poliamidă printate prin SLS. Ei au ajuns la concluzia că tenacitatea la rupere a epruvetelor, pe care toate straturile conțin o porțiune a fisurii, este mult mai mare decât a probelor a căror straturi sunt paralele cu planul fisurii.

Nurizada și Kirane [320] au implementat metoda efectului de scară și au demonstrat că anizotropia indusă în piesele printate 3D, prin FDM, afectează rezistența, zona procesului de rupere (fracture process zone-FPZ) și tenacitatea la rupere a structurii.

Hart și colab. [321] au încălzit izotermic epruvete cu o creștătură laterală (Single Edge Notched Bend-SENB) din ABS fabricate aditiv. Datorită îndepărtării golurilor, autorii au obținut că tenacitatea la rupere în modul I pur crescut cu aproximativ 2700%, în comparație cu probele netratate.

Epruvete din ABS și ABS armat cu fibră de carbon au fost atât printate 3D, cât și turnate prin presare la cald de către Young și colab. [322]. Rezultatele lor au arătat că procesul FDM scade considerabil tenacitatea la rupere în modul I a epruvetelor SENB.

Hart și Wetzel [323] au descoperit că tenacitatea la rupere interlaminară (între straturi) a pieselor FDM, imprimate 3D, este cu un ordin mai mică decât tenacitatea la rupere translaminară (prin straturi).

Zhang și colab. [324] au printat 3D compozite de alumină/sticlă și au investigat efectul orientării de printare a probei asupra microstructurii, porozității și proprietăților mecanice. Ei au arătat că probele sinterizate, orientate paralel cu direcția capului de printare, prezintă o rezistență la rupere semnificativ mai mare decât cele printate în celelalte două orientări.

4.2. Scopul investigațiilor

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

În acest sens, Capitolul 4 este dedicat influenței a patru parametri de proces (grosimea stratului, grosimea epruvetelor, direcția de printare și tipul de imprimantă) asupra comportamentului la rupere (în modul I și II pur de încărcare) al epruvetelor din PLA fabricate prin tehnologia FDM. Pentru determinarea proprietăților de rupere (tenacitatea la rupere, energia de rupere și modul de propagare a fisurii în modurile I și II de rupere) s-a utilizat epruveta cu o creștătură laterală SENB. Configurația SENB este una dintre cele mai populare modele din literatură pentru determinarea comportamentului la rupere în modurile I și II a materialelor fragile. Astfel, pentru obținerea modului I s-a realizat o încărcare simetrică a epruvetei, pe când modul II de rupere a fost obținut printr-o încărcare asimetrică [325].

4.3. Materiale și metode

4.3.1. Materiale

Pentru obținerea epruvetelor s-a utilizat filamentul Pusament PLA (producător PRUSA) de două diametre diferite (1,75 și 2,85 mm).

Avantajele, aplicațiile și caracteristicile tehnice ale filamentului folosit sunt prezentate în detaliu în Secțiunea 2.3.1.

4.3.2. Proiectarea și fabricarea epruvetelor

Testele pentru determinarea tenacității la rupere s-au efectuat pe epruvete cu creștătură laterală (Single Edge Notched Bending-SENB). Forma și dimensiunile epruvetelor SENB folosite este prezentată în Figura 4.1, cu dimensiuni conform Ref. [326], care reglementează încercarea de mecanica ruperii a materialelor plastice.

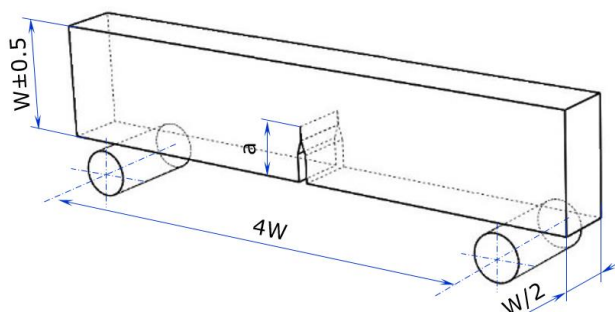


Fig. 4.1. Geometria și dimensiunile epruvetei SENB printate 3D

Pentru a compara tenacitatea la rupere a pieselor FDM în stare de fabricație și în cazul în care fisura este introdusă ulterior în epruvetă, au fost luate în considerare două seturi diferite de epruvete SENB.

La primul tip, creștătura a fost introdusă în modelul CAD care a fost folosit pentru fabricarea prin FDM. În acest caz, geometria creștăturii a fost introdusă pe toată grosimea, iar cei doi pereți exteriori înconjoară zona creștăturii precum și restul circumferinței (Figura 4.2a).

În cel de-al doilea tip de epruvete, au fost fabricate epruvete paralelipedice cu aceleași dimensiuni globale ca și epruvetele SENB, iar geometria creștăturii a fost introdusă prin frezare cu ajutorul unei freze disc de 0,6 mm grosime (vezi Figura

4.2b). În timpul procesului de frezare, lichidul de răcire a fost utilizat în mod continuu pentru a preveni încălzirea excesivă a epruvetei, în vederea reducerii modificării prin topire și pentru a preveni recristalizarea în zona creștăturii [213].

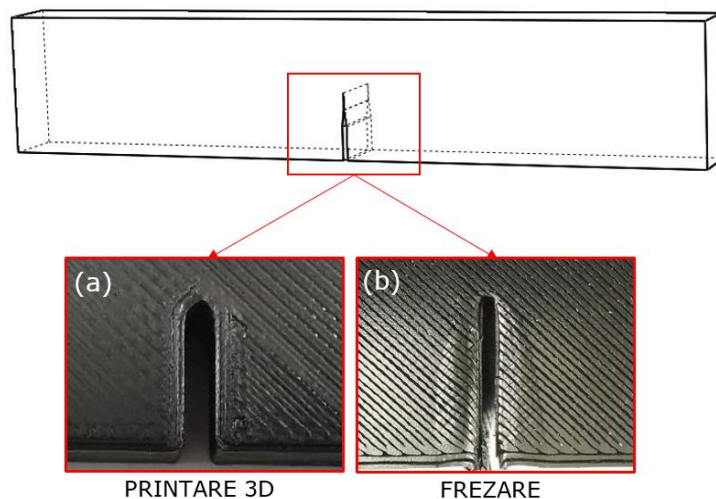


Fig. 4.2. Obținerea creștăturilor epruvetei SENB din PLA

Investigarea microscopică a vârfului creștăturii arată forme și dimensiuni similare, atât pentru creștătura imprimată, cât și pentru cea frezată, singura diferență constând în conturul continuu prezent la varianta imprimată, în timp ce pentru cea frezată filamentele depuse în zona creștăturii sunt tăiate.

Epruvetele utilizate pentru testare au prezentat două culori de filament:

- negru (probe SENB cu grosimea de 10 mm);
- gri (probe SENB cu grosimea de 6 mm).

Epruvetele supuse testării au fost fabricate prin tehnologia FDM, folosind două imprimante diferite:

- imprimanta Prusa® i3 MK3;
- imprimanta WN400 3D Platform®.

Codurile G pentru procesul FDM au fost generate cu ajutorul slicer-ului Ultimaker® Cura 4.2.1, care este compatibil cu ambele imprimante adoptate; acesta permite obținerea mai multor epruvete similare pentru compararea rezultatelor.

Parametrii procesului de fabricare a epruvetelor sunt prezentați în Tabelul 4.1.

Tabelul 4.1. Parametrii de proces ai celor două imprimante pentru fabricarea epruvetelor

Parametru de proces	Tip imprimantă	
	Prusa® i3 MK3	3D Platform® WN400
Diametrul duzei	0.4 mm	1 mm
Densitatea de umplere	100%	
Temperatura duzei	220°C	
Temperatura patului	60°C	
Unghiul rasterului	+45°/-45°	
Direcția de printare	Plat, printat în grosime	
Grosimea stratului	0.15 mm	0.40 mm

152 Coportamentul la rupere fragilă

După cum au raportat Dawoud și colab. [221], unghiul raster de $+45^\circ/-45^\circ$ pentru piesele FDM poate duce la o rezistență mecanică și rupere mai mare; prin urmare, în cercetarea curentă, această orientare raster a fost aleasă pentru fabricarea epruvetelor.

O densitate nominală de umplere de 100% a fost definită pentru toate probele de testare pentru a se apropia cât mai mult de materialul continuu.

Pentru a evalua efectul unghiului de printare (unghiul în plan pe platforma de printare), au fost luate în considerare diferite unghiuri de construcție egale cu 0° , 45° și 90° (vezi Figura 4.3).

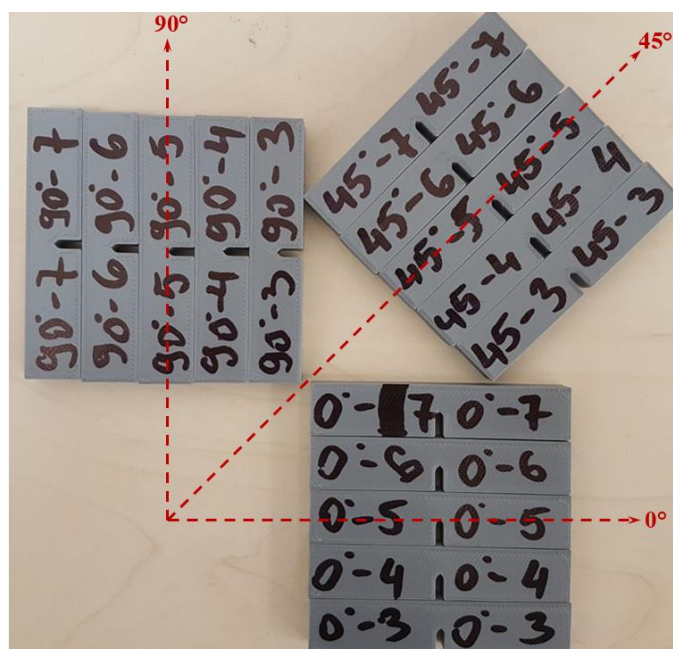


Fig 4.3. Epruvetele SENB printate pe cele trei direcții de încărcare (0° , 45° și 90°)

4.3.3. Programul experimental

Testele de mecanica ruperii au fost efectuate la temperatura camerei pe o mașină hidraulică Walter+bay de 10 kN. Figura 4.4 prezintă poziționarea epruvetei SENB în dispozitivul de încovoiere în patru puncte al mașinii de testare. Testele s-au realizat în controlul deplasării cu o viteză a traversei mobile de 2 mm/min.

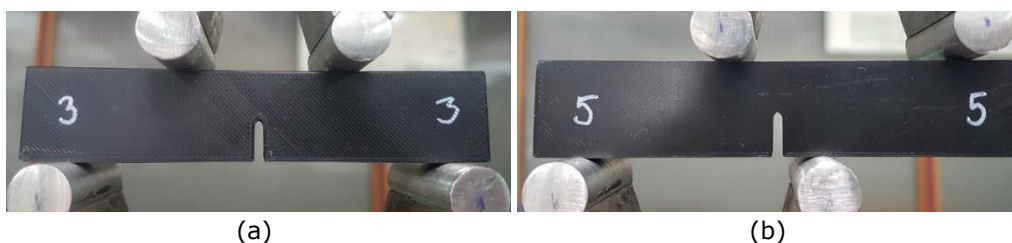


Fig. 4.4. Poziționarea epruvetei SENB pe dispozitivul de fixare al masinii Walter+bay de 10 kN: modul I (a) și modul II (b) de încărcare

4.3.4. Definirea proprietăților

Tenacitatea la rupere în modul I, K_{IC} , a fost determinată utilizând o configurație de încărcare în patru puncte simetrică (Symmetric Four Point Bending-SFPB) (Figura 4.5a), în timp ce pentru tenacitatea la rupere în modul II, K_{IIC} , au fost luate în considerare epruvete încărcate asimetric la încovoiere în patru puncte (Asymmetric Four Point Bending-AFPB) (Figura 4.5b).

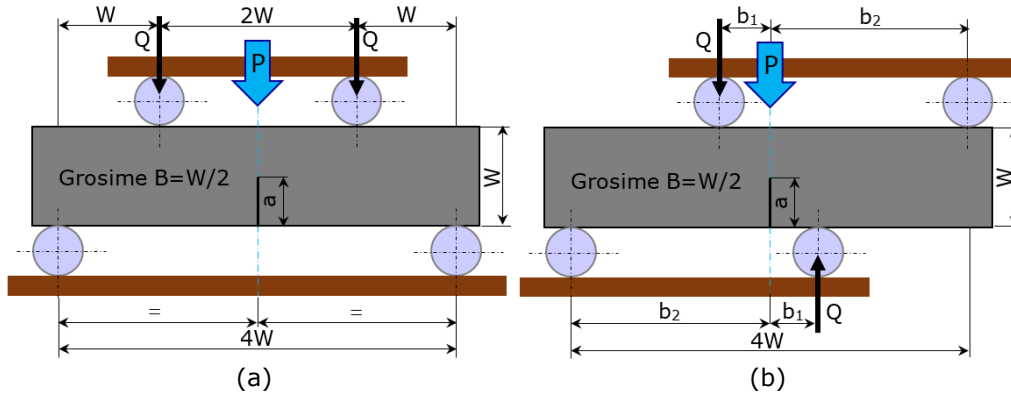


Fig. 4.5. Configurația de testare a epruvetelor pentru modul I-SFPB (a) și modul II-ASFB (b)

Valorile K_{IC} și K_{IIC} au fost determinate folosind forța maximă, P_{max} , înregistrată în timpul testelor de încovoiere, conform ecuațiilor (4.1) și (4.4) [326, 327]:

-Pentru modul I de încărcare (SFPB):

$$K_{IC} = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f_I \left(\frac{a}{W} \right) \quad (4.1)$$

unde tensiunea normală:

$$\sigma = \frac{3 P_{max}}{B W} \quad (4.2)$$

iar factorul de intensitate a tensiunii pentru modul I de încărcare este:

$$f_I \left(\frac{a}{W} \right) = 1.122 - 1.121 \left(\frac{a}{W} \right) + 3.74 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 3.873 \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 19.05 \left(\frac{a}{W} \right)^4 + 22.55 \left(\frac{a}{W} \right)^5 \quad (4.3)$$

-Pentru modul II de încărcare (ASFB):

$$K_{IIC} = \tau \sqrt{\pi a} \cdot f_{II} \left(\frac{a}{W} \right) \quad (4.4)$$

unde tensiunea tangențială:

$$\tau = \frac{Q}{B W} \quad (4.5)$$

$$Q = P_{max} \frac{b_2 - b_1}{b_2 + b_1} \quad (4.6)$$

iar factorul de intensitate a tensiunii pentru modul II de încărcare este:

$$f_{II} \left(\frac{a}{W} \right) = -0.2915 + 6.3229 \left(\frac{a}{W} \right) - 9.12 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 6.057 \left(\frac{a}{W} \right)^3 \quad (4.7)$$

Pentru fiecare set de parametri de fabricație și configurație de încărcare, au fost testate cinci epruvete.

4.4. Rezultate obținute

Curbele forță-deplasare obținute pe epruvetele SENB, atât pentru încărcările în patru puncte simetrice, cât și pentru cele asimetrice, sunt reprezentate grafic în Figura 4.6.

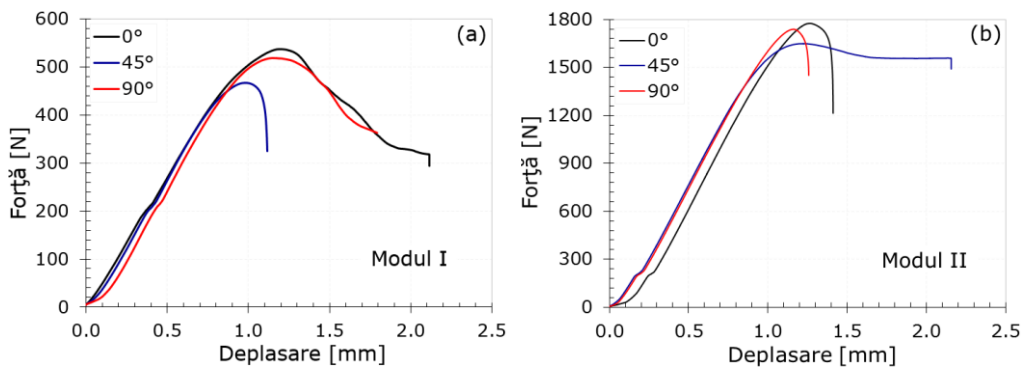


Fig. 4.6. Curbele forță-deplasare pentru încărcarea simetrică (a) și asimetrică (b)

Rezultatele tenacității la rupere pentru modul I și modul II de încărcare, pentru diferite direcții de printare, sunt prezentate în Figura 4.7.

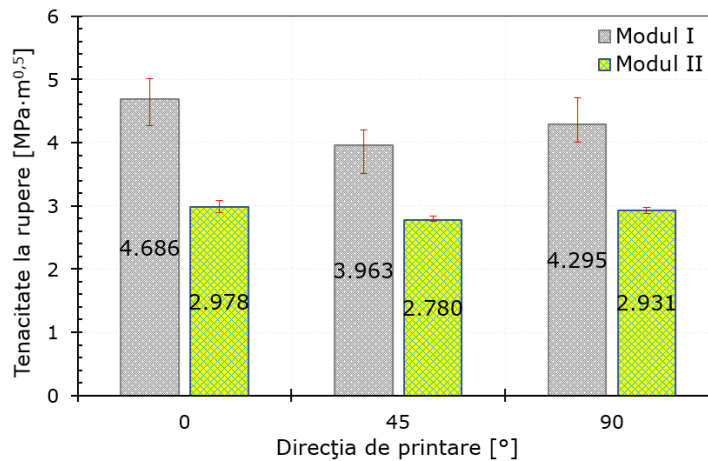


Fig. 4.7. Influența orientării epruvetei asupra tenacității la rupere (K_{IC} și K_{IIC})

Din Figura 4.7 se poate observa că pentru ambele moduri, valorile tenacității la rupere sunt mai mari pentru orientarea de 0° ($4,686 MPa \cdot m^{0.5}$ pentru modul I și $2,978 MPa \cdot m^{0.5}$ pentru modul II), urmate de cele la 90° ($4,295 MPa \cdot m^{0.5}$ pentru modul I și $2,931 MPa \cdot m^{0.5}$ pentru modul II), iar valorile inferioare corespund orientării de 45° ($3,963 MPa \cdot m^{0.5}$ pentru modul I și $2,780 MPa \cdot m^{0.5}$ pentru modul II).

Figura 4.8 prezintă curbele energie de rupere-deplasare pentru încărcarea simetrică și asimetrică a epruvetelor din PLA. Aceeași tendință a putut fi observată și în cazul energiei de rupere pentru încărcarea epruvetelor în modul I (Figura 4.7a), comportamentele extreme înregistrându-se pentru direcțiile de 0 și 45°.

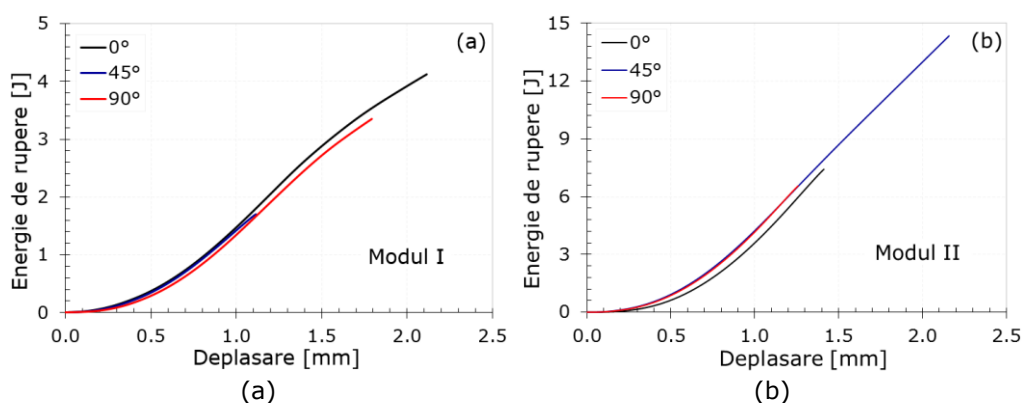


Fig. 4.8. Curbele energie de rupere-deplasare pentru încărcarea simetrică (a) și asimetrică (b)

Contrar celor prezentate la încărcarea simetrică, modul II de încărcare a evidențiat cea mai mare energie de rupere pentru direcția de 45° (Figura 4.8b). Acest lucru ar putea fi explicat prin influența unghiului raster asupra deformației plastice din jurul vârfului fisurii.

Tabelele 4.2 și 4.3 prezintă valorile tenacității la rupere pentru modul I și II de rupere, pentru toate probele SENB testate.

Tabelul 4.2. Rezultatele tenacității la rupere pentru Modul I. Influența direcției de printare

Direcție printare	Număr probă	Inălțime probă	Grosime probă	Lungime fisură	Forța maximă	Tenacitatea la rupere
[°]	[-]	W [mm]	B [mm]	a [mm]	F_{max} [N]	K_{IC} [MPa·m ^{0.5}]
0	1	12,17	6,01	6,09	444,36	4,682
	2	12,13	6,06	6,07	536,83	4,520
	3	12,12	6,02	6,06	581,81	4,934
	4	12,12	5,98	6,06	587,66	5,017
	5	12,09	5,96	6,05	498,19	4,272
45	6	12,07	6,06	6,04	497,91	4,203
	7	12,12	6,05	6,06	497,77	4,200
	8	12,04	6,04	6,02	698,92	3,959
	9	12,12	6,06	6,06	416,58	3,509
	10	12,12	6,05	6,06	466,85	3,939
90	11	12,08	5,99	6,04	551,73	4,710
	12	12,08	5,97	6,04	459,13	4,291
	13	12,09	5,97	6,05	518,41	4,438
	14	12,07	6,03	6,04	474,84	4,028
	15	12,09	6,02	6,05	471,34	4,002

156 Coportamentul la rupere fragilă

Tabelul 4.3. Rezultatele tenacității la rupere pentru Modul II. Influența direcției de printare

Direcție printare	Număr probă	Inălțime probă	Grosime probă	Lungime fisură	Forța maximă	Tenacitatea la rupere
[°]	[-]	W [mm]	B [mm]	a [mm]	F_{max} [N]	K_{IIc} [MPa·m ^{0.5}]
0	1	12,09	6,01	6,05	1697,84	2,892
	2	12,09	6,01	6,05	1700,34	2,896
	3	12,11	6,01	6,06	1810,14	3,081
	4	12,05	6,00	6,03	1746,41	2,984
	5	12,05	6,00	6,03	1775,67	3,034
45	6	12,11	6,06	6,06	1685,25	2,844
	7	12,09	6,08	6,05	1643,06	2,766
	8	12,07	6,06	6,04	1628,85	2,754
	9	12,11	6,09	6,06	1638,20	2,751
	10	12,09	6,06	6,05	1648,93	2,785
90	11	12,07	6,07	6,04	1738,64	2,935
	12	12,08	6,04	6,04	1699,64	2,882
	13	12,05	6,06	6,03	1709,45	2,892
	14	12,06	6,04	6,03	1756,00	2,980
	15	12,07	6,06	6,04	1754,30	2,966

Figurile 4.9 și 4.10 prezintă direcția de propagare a fisurii pentru fiecare mod și direcție de încărcare. Indiferent de tipul încărcării, ruperea se inițiază din vârful creștăturii.

Pentru orientările de 0° (Figura 4.9a) și 90° (Figura 4.9c), corespunzătoare încărcării în modul I, fisura se inițiază de-a lungul creștăturii pentru primele două straturi de printare (pereții exteriori), apoi se propagă la 45° după unghiul raster.

Pentru modul I de încărcare și orientarea la 45° (Figura 4.9b), fisura se inițiază și se propagă de-a lungul liniei bisectoarei creștăturii.

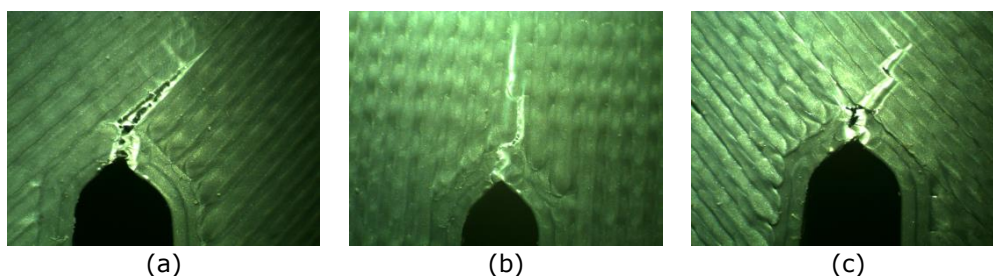


Fig. 4.9. Direcțiile de propagare ale fisurilor pentru modul I: 0° (a), 45° (b) și 90° (c)

Încărcarea în modul II arată o inițiere înclinată a fisurii, urmată de o propagare de-a lungul unghiului raster.

O zonă a procesului de rupere (fracture process zone-FPZ) mai mare a putut fi observată pentru modul II și orientarea de 45° (Figura 4.10b), ceea ce ar putea explica valoarea mai mare a energiei de rupere pentru acest caz.

Planele de rupere ale epruvetelor SENB, observate pentru diferite moduri de încărcare (modul I și modul II) și diferite orientări de creștere (0, 45 și 90°) sunt prezentate în Figurile 11 și 12.

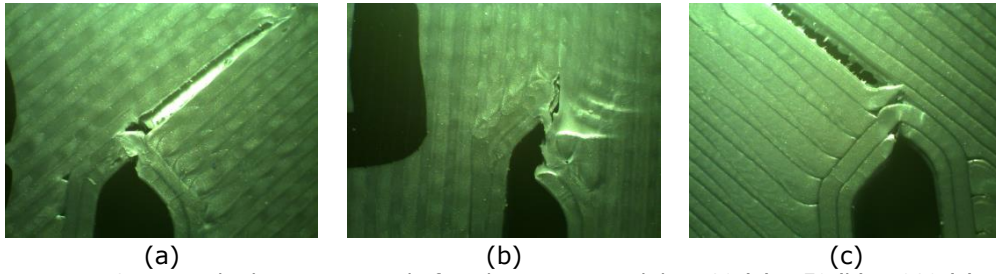


Fig. 4.10. Direcțiile de propagare ale fisurilor pentru modul II: 0° (a), 45° (b) și 90° (c)

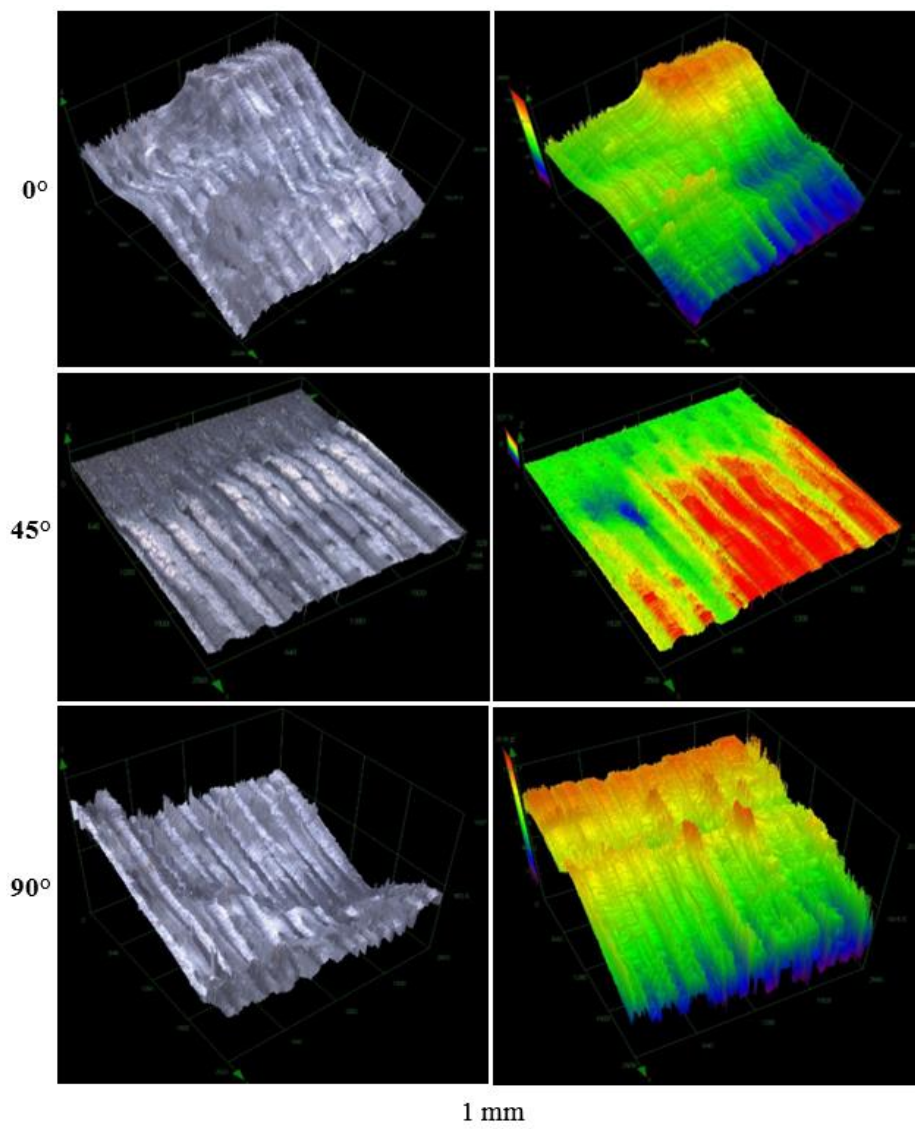


Fig. 4.11. Planele de rupere ale epruvetelor SENB pentru modul I de încărcare

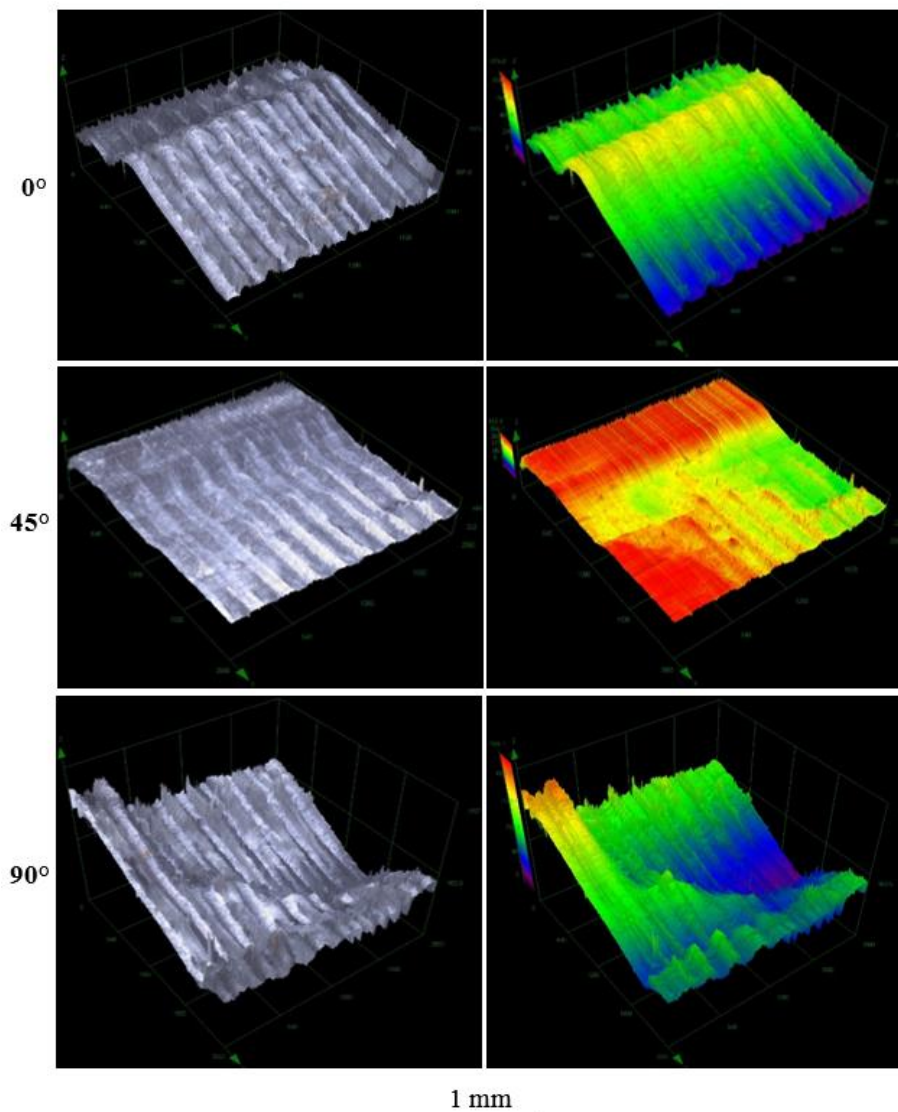


Fig. 4.12. Planele de rupere ale epruvetelor SENB pentru modul II de încărcare

Se poate observa că suprafețele de rupere ale epruvetelor evidențiază profile diferite în funcție de parametrii menționați mai sus. Cele mai plate suprafețe de rupere sunt obținute pentru direcția de printare la 45°, iar celelalte două direcții (0° și 90°) prezintă profile optice 3D destul de neregulate. De fapt, aceste profile optice întăresc forma direcțiilor de propagare ale fisurilor obținute la nivel macroscopic (vezi Figurile 4.9 și 4.10).

Tabelele 4.4 și 4.5 prezintă rezultatele experimentale pentru modul I și modul II de rupere, luând în considerare următorii parametri de fabricație:

- două imprimante (Prusa și 3D Platform);
- două grosimi ale stratului de printare (0,15 și 0,40 mm);

- două grosimi diferite ale epruvetelor (6 și 10 mm);
- două metode de introducere a creștăturii (prin printare 3D și prin frezare).

Tabelul 4.4. Rezultatele medii ale tenacității la rupere pentru modul I de încărcare

Nr.	Parametrii de fabricație					K_{IC} , [MPa·m ^{0,5}]	
	Tip imprimantă	Obținere creștătură	Grosime strat, t [mm]	Grosime probă, h [mm]	Direcție printare [°]	Media	Deviația standard
1	3D Platform	Printare 3D	0,40	10	0	6,54	0,030
2	3D Platform	Frezare	0,40	10	0	5,77	0,399
3	Prusa	Printare 3D	0,15	10	0	4,07	0,202
4	Prusa	Frezare	0,15	10	0	4,25	0,290
5	Prusa	Printare 3D	0,15	6	0	4,69	0,350

Cea mai mare valoare a K_{IC} a fost obținută pentru epruvetele cu creștătură printată 3D și cu grosimea de 10 mm (6,54 MPa·m^{0,5}), urmate de epruvetele cu creștătură frezată (5,77 MPa·m^{0,5}).

Tenacitatea la rupere în modul I a epruvetelor obținute pe imprimanta 3D Platform (grosimea stratului de 0,4 mm) sunt mai mari decât cele obținute pe imprimanta Prusa (grosimea stratului de 0,15 mm). Aceeași tendință a fost observată pentru tenacitatea la rupere în modul II de rupere (Tabelul 4.5).

Valori aproape similare ale K_{IIC} (2,98 și 3 MPa·m^{0,5}) au fost obținute pe epruvetele fabricate pe imprimanta Prusa cu creștătură printată 3D pentru diferite grosimi (6 și 10 mm).

Cea mai mică valoare a tenacității la rupere în modul II de încărcare, K_{IIC} , a fost obținută pentru epruvetele SENB obținute pe imprimanta Prusa, cu creștătură frezată (2,43 MPa·m^{0,5}).

Tabelul 4.5. Rezultatele medii ale tenacității la rupere pentru modul II de încărcare

Nr.	Parametrii de fabricație					K_{IIC} , [MPa·m ^{0,5}]	
	Tip imprimantă	Obținere creștătură	Grosime strat, t [mm]	Grosime probă, h [mm]	Direcție printare [°]	Media	Deviația standard
1	3D Platform	Printare 3D	0,40	10	0	3,58	0,030
2	3D Platform	Frezare	0,40	10	0	3,38	0,399
3	Prusa	Printare 3D	0,15	10	0	3,00	0,201
4	Prusa	Frezare	0,15	10	0	2,43	0,290
5	Prusa	Printare 3D	0,15	6	0	2,98	0,083

Rezultatele prezentate în Tabelele 4.4 și 4.5, reprezintă valoarea medie a celor cinci epruvete testate. Din rezultatele raportate în tabelele menționate anterior, reiese faptul că epruvetele cu o grosime mai mică prezintă o tenacitate la rupere mai mare. De asemenea, din cauza locurilor mai numeroase de creștere a tensiunii induse de straturile imprimate alternante, utilizarea unui strat mai subțire implică o reducere a tenacității la rupere.

Figura 4.13 prezintă influența parametrilor de rupere (tipul imprimantei, grosimea epruvetei, grosimea stratului, modul de obținere a creștăturii) asupra

raportului dintre tenacitatea la rupere în modul II și modul I. Se poate observa că raportul K_{IIC}/K_{IC} variază între 0,55 – 0,59 pentru imprimanta 3D Platform și, respectiv, între 0,57 – 0,74 pentru imprimanta Prusa.

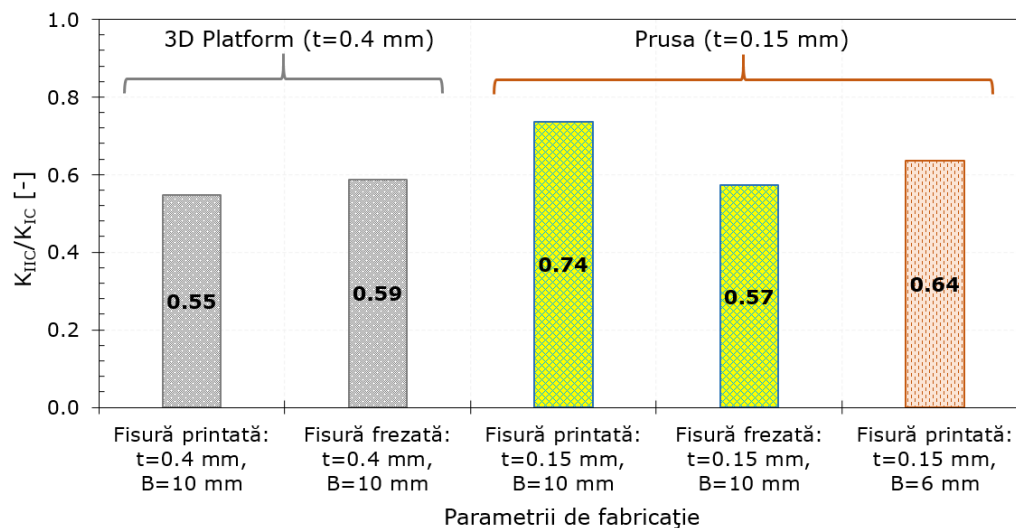


Fig. 4.13. Variația raportului K_{IIC}/K_{IC} (tenacitatea la rupere în modul II și modul I) funcție de parametrii de rupere investigați

4.5. Analiza rezultatelor

Conform rezultatelor experimentale, tenacitatea la rupere a epruvetelor printate cu orientări diferite este puternic dependentă de parametrii de fabricație. În acest scenariu, probele printate cu orientarea de 45° se caracterizează printr-o valoare K_{IC} mai scăzută, în timp ce valori mai mari au fost obținute pentru epruvetele printate cu orientări de 0° și 90° . Acest comportament poate fi explicat prin înțelegerea clară a efectului unghiului dintre creștătura epruvetelor și liniile raster. Acest unghi este egal cu $\pm 45^\circ$, $0^\circ/90^\circ$ și $\pm 45^\circ$ pentru epruvetele SENB printate cu orientări de construcție de 0° , 45° și 90° . Având în vedere modul I de încărcare pentru orientări de 0° și 90° , dacă fisura încearcă să se propage de-a lungul liniei bisectoare, ar trebui să rupă două seturi de fibre înclinate cu unghiuri de $\pm 45^\circ$. Pe de altă parte, dacă fisura se propagă pe direcția de 45° , există un singur set de fibre (jumătate din numărul de fibre rezistente) care împiedică creșterea fisurii. Acesta poate fi motivul propagării fisurilor la 45° pentru epruvetele printate la 0° și 90° și, respectiv, la 0° pentru epruvetele printate la 45° (vezi Figurile 4.9 și 4.10).

Deși epruvetele SENB sunt încărcate în modul I, prezența rasterelor înclinate în epruvetele de 0° și 90° face ca traseul fisurii să nu urmeze același drum ca într-un material izotrop. În acest caz, fisura tinde să se propage de-a lungul liniei bisectoarei creștăturii, dar este forțată să urmeze rasterul de 45° . Datorită condiției locale de încărcare în mod mixt înainte de vârful fisurii, este de așteptat apariția unei cantități mai mari de deformare plastică. Acest efect are ca rezultat o capacitate portantă mai mare și, de asemenea, o deplasare mai mare până la rupere.

În ceea ce privește epruvetele printate cu orientarea de 45° , cu unghiul de $0^\circ/90^\circ$ între raster și creștătură, propagarea fisurii are loc de-a lungul câmpului de tensiuni indus simetric în epruvete. În acest caz, rezistența la creșterea fisurii este mai mică și se poate observa că ruperea are loc la încărcări mai mici. De asemenea, epruvetele prezintă o deplasare mai mică la rupere (vezi Figura 4.6).

În ceea ce privește starea de încărcare în modul II, diferența majoră în cazurile testate este deplasarea la cedare/rupere, în timp ce K_{IIC} a prezentat variații mai mici între diferitele cazuri. Conform criteriului tensiunii tangențiale maxime (Maximum Tangential Stress-MTS), unghiul de inițiere a fisurii pentru un material izotrop este de aproximativ $70,5^\circ$ [328]. Folosind același argument ca și în cazul modului I de încărcare, în probele în care unghiul dintre tensiunea tangențială maximă și unghiurile raster este mai mic, se așteaptă ca rezistența la fisurare să fie mai mică. Luând în considerare un unghi de $70,5^\circ$ pentru tensiunea tangențială maximă, acest unghi ar fi egal cu $19,5^\circ$ pentru epruvetele printate la 45° și $25,5^\circ$ pentru cele printate la 0° și 90° , rezultând astfel o valoare K_{IIC} puțin mai mică pentru epruvetele obținute la 45° .

Prezența pereților exteriori ai epruvetei este foarte importantă atunci când vine vorba de îmbunătățirea proprietăților mecanice. Indiferent de modul de încărcare (I sau II), pentru ca fisura să se dezvolte/propage în interiorul epruvetei, aceasta trebuie să rupă acești pereți. Atunci când creștătura este creată prin frezare, nu există pereți exteriori ai epruvetei în regiunea creștăturii. Aceasta înseamnă că bariera este îndepărtată, făcând ca fisura să se inițieze și, ulterior, să se propage mai ușor sub un nivel de încărcare mai scăzut. Acest lucru a dus la valori mai mici ale tenacității la rupere pentru probele frezate (vezi Tabelele 4.4 și 4.5). Un aspect important pentru creștăturile frezate este abaterea standard mai mare pentru tenacitatea la rupere observată la aceste epruvete. Prezența peretelui exterior uniform este un element care face ca epruvetele să fie aproape în aceeași stare exterioară. Așadar, prin îndepărtarea aceluși perete, orice factor poate fi amplificat și, eventual, defectele mari din epruveta și schimbările de temperatură din timpul frezării pot fi responsabile pentru o împrăștiere uriașă a proprietăților măsurate.

Privind suprafețele de rupere (Figurile 4.11 și 4.12), se poate observa o tendință clară a cedării fibrei; se poate aprecia că fibrele au fost elementele portante din epruvete. În acest scenariu, având fibre mai mari pentru același volum al epruvetelor, poate îmbunătăți capacitatea portantă a elementului. Propagarea ruperii și fisurii se prezintă ca un proces gradual pas cu pas. Așadar, dacă în fiecare pas trebuie ruptă o fibră mai groasă pentru ca fisura să se propage, ar fi necesară o sarcină aplicată mai mare, ceea ce are ca rezultat o tenacitate la rupere mai mare. Cealaltă explicație posibilă poate fi cristalizarea care are loc în timpul și după procesul de printare. În funcție de viteza de printare, înălțimea stratului și alți parametri, istoricul de căldură poate fi diferit în piesele FDM. În cazul în care căldura medie indusă (căldura reziduală) în părțile mai mari este mai mare, aceasta ar putea duce la proprietăți mecanice mai mari și o mai bună aderență a straturilor.

Pentru o prezentare generală a interacțiunii dintre proprietățile mecanice și de rupere ale componentelor PLA, o diagramă a proprietăților materialului – desenată conform [329] – este reprezentată în Figura 4.14. Figura menționată prezintă relația tenacitate la rupere-rezistență la tracțiune, împreună cu cele două curbe de proiectare definite ca $M_2 = K_{IC}/\sigma_f$ și $M_3 = K_{IC}^2/\sigma_f$.

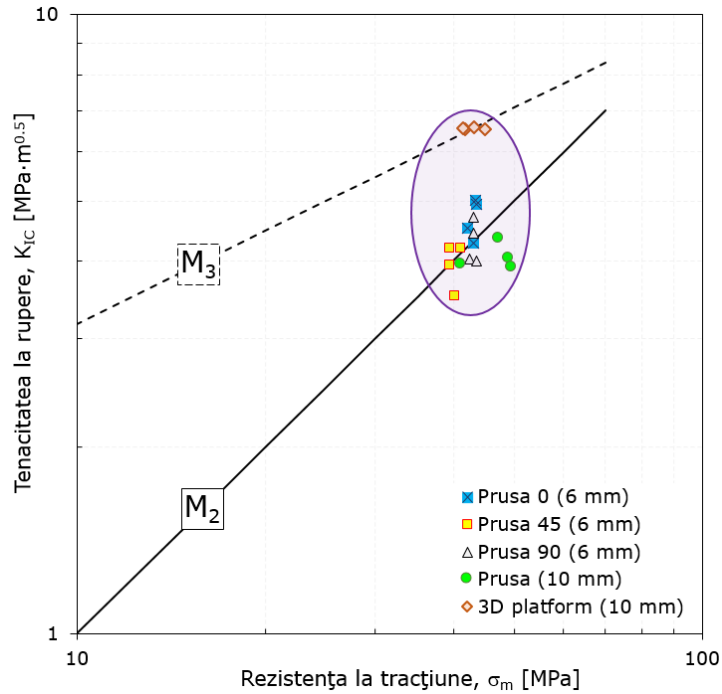


Fig. 4.14. Diagrama de proiectare pentru materialul PLA. Tenacitatea la rupere în modul I funcție de rezistența la tracțiune. Sunt ilustrate liniile de proiectare pentru M_2 (linie continuă) și M_3 (linie punctată)

Rezultatele obținute pe imprimanta 3D Platform se potrivesc bine cu ecuația M_3 (linie punctată) pentru $M_3 = 1 \text{ MPa}\cdot\text{m}$, în timp ce, în acord cu ecuația M_2 (linie continuă), pentru $M_2 = 0,1 \text{ m}^{0.5}$, sunt cele de la imprimanta Prusa. Aceste corelații sunt influențate și de parametrii de printare, cum ar fi diferite dimensiuni ale duzelor și grosimi ale straturilor.

5. COMPORTAMENTUL LA IMPACT

5.1. Noțiuni generale

Datorită simplității testelor, majoritatea studiilor din literatură se concentrează pe comportamentul static al componentelor printate 3D (vezi Capitolele 1-4). Cu toate acestea, există unele studii care investighează și comportamentul la impact al materialelor fabricate aditiv. Având în vedere că testele de impact măsoară cantitatea de energie absorbită înainte de cedare, acestea sunt necesare pentru înțelegerea mecanismelor de rupere unui material.

Cea mai comună metodă de testare la impact a materialelor pe bază de polimeri este *testul IZOD* [330, 331]. Patterson și colab. [332] au determinat comportamentul la impact al diferitelor materiale polimerice FDM complet dense (PLA standard, ABS, PLA de înaltă temperatură, HIPS, policarbonat, nailon, PETG, Al-PLA, lemn-PLA și CF-PLA), utilizând testul IZOD. Rezultatele lor au arătat că unghiul rasterului și orientarea printării au fost principalii factori în determinarea proprietăților la impact, în special pentru materialele PETG, PC și nailon.

Rezistența la impact a pieselor ABS printate prin FDM a fost raportată de Raut și colab. [333], folosind echipamente de testare IZOD, conform standardului ASTM D 256 [330]. Autorii au folosit tehnica de optimizare bazată pe metodologia Taguchi, pentru a identifica configurația optimă de printare. După analizarea rezultatelor, au obținut cea mai mare valoare a rezistenței la impact pentru următorii parametri optimi: densitatea de umplere (40%), orientarea printării (pe muchie) și modelul de umplere (Rectilinear).

Benwood și colab. [334] au investigat influența a diversi parametri (temperatura patului, temperatura de topire, recoacerea și unghiul raster) asupra rezistenței la impact a probelor pe bază de PLA, utilizând testul IZOD. Autorii au obținut că temperatura patului (48,3%) și recoacerea (76%) influențează semnificativ rezistența la impact, în timp ce temperatura de topire (9,2%) și unghiul raster (12,9%) au un efect scăzut. Cele mai mari rezistențe la impact se obțin pentru valori mari ale temperaturii patului (105°C) și temperaturii de topire (230°C), respectiv pentru orientarea raster de 45/45°. Wang și colab. [335] au observat, de asemenea, în studiul lor, că o creștere a cristalinității PLA (o cantitate mare de cristale PLA induse în timpul procesului FDM) corespunde unei rezistențe ridicate la impact. Rezistența la impact a probelor PLA printate 3D la o temperatură mai mare a patului (160°C) a fost cu până la 114% mai ridicată decât piesele PLA turnate prin injecție.

Pavan și colab. [336] au determinat comportamentul la impact al filamentului compozit din PLA armat cu 12% Cu. În acest sens, efectele temperaturii duzei (190, 210 și 230°C), ale temperaturii patului (50, 60 și 70°C) și ale înălțimii stratului (0,1, 0,14 și 0,18 mm) asupra rezistenței la impact au fost studiate de autori folosind testul IZOD. Dintre toți cei trei parametri, temperatura duzei a arătat cea mai mare influență asupra proprietăților la impact (crește rezistența și reduce ductilitatea). Cea mai mare valoare a rezistenței la impact, de 29,6 J/m, a fost obținută pentru combinarea

164 Comportamentul la impact

parametrilor: temperatura duzei de 230°C, temperatura patului de 50°C și înălțimea stratului de 0,18 mm.

Un alt test pentru evaluarea proprietăților de impact ale pieselor printate 3D este *testul Charpy* [331]. Efectul diferiților parametri de proces asupra comportamentului la impact al pieselor ABS printate 3D a fost investigat de Fahad și colab. [285], utilizând testul Charpy. Pentru a determina rezistența la impact, autorii au folosit diferite valori pentru grosimea stratului (0,254 și 0,330 mm), orientarea printării (XY și XZ) și densitatea de umplere (scăzută, ridicată și 100%). Rezultatele lor au arătat că grosimea mare a stratului și densitatea mare au dus la valori mai mari ale rezistenței la impact. Orientarea XZ a arătat valori mai bune de rezistență la impact la toate grosimile de strat și densitățile de umplere.

Un alt studiu a fost făcut de către de Vries și colab. [337]. Ei au folosit testul de impact Charpy și au determinat rezistența la impact a policarbonatului (PC) pe probe printate și lustruite. Aceștia au observat că rezistența la impact este influențată de parametrii de printare, scăzând de la 32 la 6 kJ/m² pe măsură ce înălțimea stratului crește de la 0,2 la 1,8 mm. De asemenea, autorii au raportat că epruvetele printate și lustruite prezintă o rezistență la impact mult mai mare în comparație cu cele printate.

Proprietățile la impact ale poliamidei sinterizate cu laser (PA2200), în funcție de orientarea printării, au fost studiate de Galatanu și colab. [338]. Autorii au raportat că rezistența la impact și energia de impact sunt influențate de orientarea epruvetelor. De asemenea, au observat că poziționarea orizontală a probelor prezintă o ductilitate mai mare datorită elasticității planului stratului.

De asemenea, proprietățile dinamice ale materialelor pe bază de polimeri pot fi determinate utilizând *teste de impact cu viteză redusă* (Low Velocity Impact-LVI, pe aparat tip Drop Tower) și *teste de impact de mare viteză* (High Velocity Impact-HVI pe aparat tip Split Hopkinson Pressure Bar-SHPB). În acest sens, efectul înălțimii stratului (0,1; 0,2 și 0,3 mm), al densității de umplere (25 și 50%) și al modelului de umplere (rectilinear, concentric and octagonal) asupra proprietăților dinamice ale componentelor cilindrice din PLA a fost examinat de Tsouknidas și colab. [29]. S-a observat o dependență puternică a densității de umplere asupra proprietăților la impact ale componentelor, în timp ce înălțimea stratului și modelul de umplere prezintă un efect neglijabil. Cu toate acestea, modelul rectilinear, o înălțime a stratului de 0,1 mm și o densitate de umplere de 25% au fost identificați ca parametri optimi ai procesului.

Priyanka și colab. [340] au investigat răspunsul dinamic la compresiune al epruvetelor PLA printate folosind tehnica SHPB. Autorii au descoperit că, odată cu creșterea ratei de deformare de la 200 s⁻¹ la 1800 s⁻¹, rezistența la compresiune la impact crește. Ei au mai obținut că orientarea de printare 0° prezintă cele mai mari valori de rezistență, în comparație cu orientările epruvetelor la 45° și 90°.

Comportamentul la compresiune cu o viteză mare de deformare al epruvetelor Tough-PLA și ABS, printate 3D, a fost studiat de Bouteldja și colab. [341]. Rezultatele lor au indicat că rezistența la impact crește odată cu creșterea ratei de deformare, indicând o sensibilitate a materialelor investigate la efectul ratei de deformare. Comparativ cu comportamentul static, cel dinamic, efectuat pe aparat SHPB, duce la valori mai mari de rezistență cu peste 78% pentru ABS și 124% pentru Tough-PLA. De asemenea, autorii au observat că modelul de umplere (00° și circular) nu

influențează semnificativ rezultatele proprietăților investigate (se obțin diferențe de doar 6% pentru ABS și 10,4% pentru Tough-PLA, ambele în favoarea modelului circular).

Efectul densității de umplere (20, 50 și 100%) asupra comportamentului dinamic al pieselor compozite din PolyEtherKetoneKetone (CF-PEKK) armate cu fibră de carbon (CF-Carbon Fiber) a fost investigat de Nachtane și colab. [342]. Rezultatele obținute pe un aparat SHPB au arătat că densitățile de umplere de 20% și 50% au fost mai rentabile în comparație cu probele solide (densitatea de umplere de 100%). În plus, autorii au remarcat că rezistența la impact a probelor printate 3D a scăzut, în timp ce deformația lor a crescut pe măsură ce densitatea de umplere a scăzut.

5.2. Scopul investigațiilor

După cum s-a menționat anterior, literatura de specialitate raportează unele studii privind comportamentul de impact al epruvetelor printate 3D. Cu toate acestea, studiile se concentrează fie pe diferite configurații de testare (IZOD [332-336], Charpy [285, 337, 338], Drop Tower [339], SHPB [340-342]), fie pe diferite materiale (ABS, PEEK, TPE, PC, PETG, HIPS) sau tehnologii AM (FDM, SLS, DLP). Prin urmare, investigațiile actuale raportează *primele rezultate* privind comportamentul la impact simplu și multiplu al probelor PLA printate prin tehnologia FDM.

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

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

5.3. Materiale și metode

5.3.1. Materiale

Filamentul PLA constituie materialul utilizat pentru printarea 3D a epruvetelor investigate. Avantajele, aplicațiile și caracteristicile tehnice ale acestuia sunt prezentate în detaliu în Secțiunea 2.3.1.

5.3.2. Proiectarea și fabricarea epruvetelor

Noțiunile fundamentale legate de modelarea, procesarea și fabricarea epruvetelor din PLA sunt prezentate în Secțiunea 3.3.2. În Figura 5.1 este prezentată geometria și parametrii geometrici ai epruvetelor utilizate pentru investigarea comportamentului la impact.

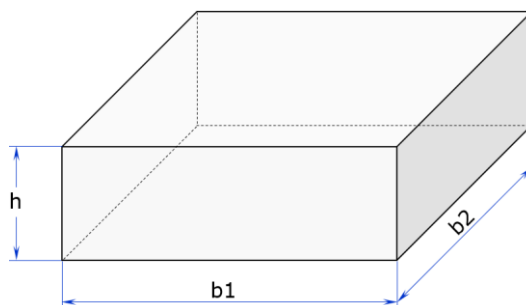


Fig. 5.1. Forma și parametrii geometrici ai epruvetelor de impact

Figura 5.2 prezintă o imagine de ansamblu a epruvetelor printate 3D, împreună cu procesul de fabricație al acestora.



Fig. 5.2. Epruvetele printate 3D utilizate pentru testele de impact: imagine de ansamblu (a) și procesul de fabricație (b)

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

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

5.3.3. Analiza dimensională

Aspecte generale legate de analiza dimensională a epruvetelor din PLA sunt prezentate în detaliu în Secțiunea 3.3.3.

5.3.4. Programul experimental

Programul experimental a constat în efectuarea unor teste de impact cu viteză redusă (LVI-Low Velocity Impact) pe epruvete din PLA printate prin tehnologia FDM. Testele de impact au fost efectuate cu un aparat de testare Ceast Fractovis Plus, echipat cu un sistem de eliminare a impacturilor multiple (Figura 5.3a). Energia de impact poate fi variată prin ajustarea masei elementului de lovire (impactorului) și a înălțimii căderii. Mașina de testare este prevăzută cu un sistem cu arc, care se

activează automat atunci când înălțimea de cădere este insuficientă pentru a obține energia potențială dorită. Figura 5.3b prezintă configurarea testului de impact.

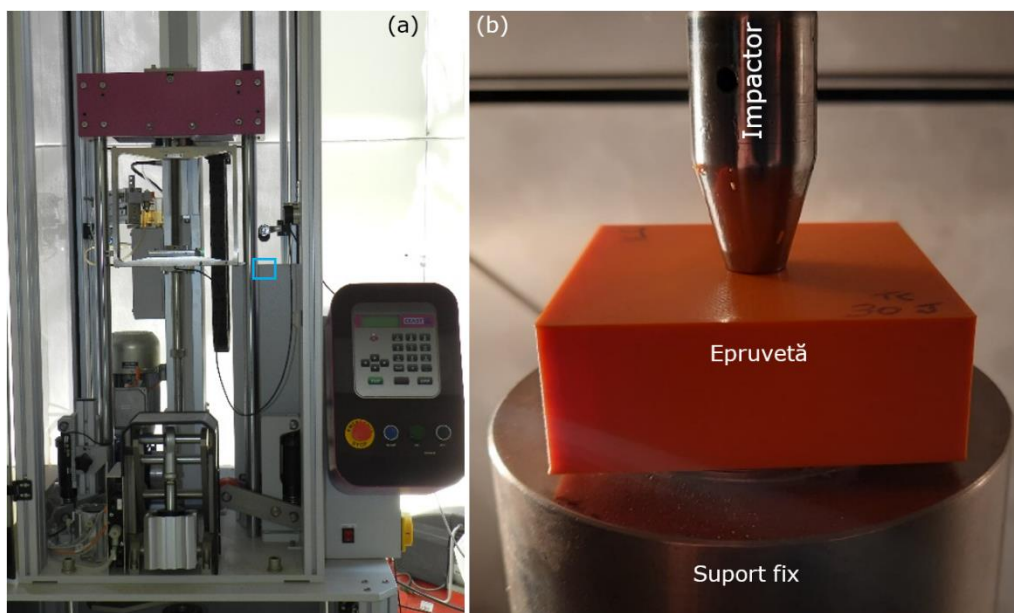


Fig. 5.3. Configurația experimentală: aparat de testare Ceast Fractovis Plus (a) și epruveta testată (b)

Pentru evaluarea experimentală a epruvetelor din PLA la impact s-au utilizat trei forme constructive de impactori, și anume:

- impactor cu cap emisferic $\varnothing 10$ (notat H10, Hemispherical $\varnothing 10$);
- impactor cu cap emisferic $\varnothing 20$ (notat H20, Hemispherical $\varnothing 20$);
- impactor cu cap trunchi de con (notat TC, Truncated conical).

Tabelul 5.1 prezintă caracteristicile generale ale celor trei tipuri de impactori utilizați în cadrul programului experimental. Elementul de lovire (impactorul) utilizat pentru teste respectă standardul ASTM D5628-10 [343], cu parametrii geometrici indicați în Tabelul 5.1, și lovește epruvetele în punctul central (vezi Figura 5.3b). Rezultatele critice evaluate au fost capacitatea de absorbție a energiei, integritatea structurii și revenirea impactorului.

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

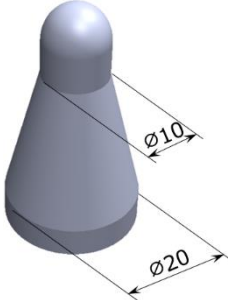
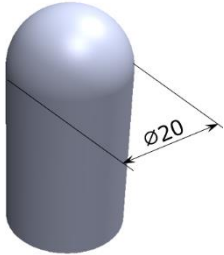
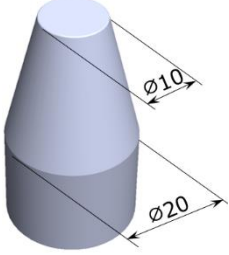
A doua fază a avut ca scop evaluarea răspunsului la impacturi multiple ale energiei în creștere, pentru fiecare formă de indenter. Prin urmare, s-au efectuat teste de impact repetat începând cu o energie de 5 J și crescând-o până la 20 J, cu un pas de 5 J pentru fiecare tip de indenter.

În final, epruvetele au fost supuse unei analize radiografice pentru identificarea modurilor de cedare. Analiza a fost efectuată atât în funcție de tipul

168 Comportamentul la impact

impactorului, cât și în funcție de energia de impact utilizată. Inspectia radiografică este procesul de evaluare a materialului folosind tehnologia cu raze X sau cu raze gamma. Este una dintre cele mai amănunțite metode de testare nedistructivă care este utilizată pentru a evalua componente pentru semne de defecte care ar putea interfera cu funcționalitatea.

Tabelul 5.1. Caracteristicile impactorilor utilizați în programul experimental

Denumire impactor (abreviere)	Formă (și dimensiuni în [mm])	Masă de impact [kg]
cap emisferic Ø10 (H10)		7,46
cap emisferic Ø20 (H20)		7,50
cap trunchi de con (TC)		7,45

5.3.5. Definirea proprietăților

Testarea la impact cu viteză redusă (LVI) este un tip de testare mecanică utilizată pentru a determina comportamentul la impact al materialelor. LVI se efectuează prin eliberarea unei greutate (cu o geometrie cunoscută) pe centrul unei epruvete, cu o viteză predeterminată. Energia de impact este apoi măsurată, iar rezultatele sunt utilizate pentru a evalua capacitatea materialului de a rezista la impact. În urma încercării LVI se obțin date precum: forța (F), deplasarea (δ), viteza

(v), timpul (t) și altele. În studiul de față, comportamentul la impact al epruvetelor printate 3D a fost evaluat pe baza următoarelor proprietăți:

- forța maximă (F_{\max}): cea mai mare valoare a forței observată în curba forță-deplasare. Se exprimă în N sau kN.
- absorbția totală de energie (TEA-Total Energy Absorbtion): reprezintă aria de sub curba forță-deplasare rezultată în urma testului de impact. TEA se exprima în J sau kJ. Energia totală absorbită poate fi redată sub forma ecuației (5.1):

$$TEA = \int_0^{\delta} P dx \quad (5.1)$$

- absorbția specifică de energie (SEA-Specific Energy Absorbtion): energia absorbită pe masa probei (m). Absorbția specifică a energiei este crucială pentru proiectarea pieselor care necesită reducerea greutateii, cum ar fi vehiculele terestre sau aeriene. SEA se exprimă în J/g sau kJ/kg. Absorbția specifică a energiei poate fi redată sub forma relației (5.2):

$$SEA = \frac{\int_0^{\delta} P dx}{m} = \frac{TEA}{m} \quad (5.2)$$

5.4. Analiza rezultatelor

Această secțiune prezintă rezultatele proprietăților fizice, la impact simplu și impact multiplu ale epruvetelor din PLA printate 3D.

5.4.1. Evaluarea proprietăților fizice

Evaluarea proprietăților fizice s-a realizat pe media a 44 epruvete (vezi Figura 5.2a). Tabelul 5.2 prezintă valorile proprietăților fizice și ale erorilor relative aferente acestora.

Tabelul 5.2. Proprietățile fizice și erorile acestora privind epruvetele testate la impact

Nr. proba	h [mm]	b1 [mm]	b2 [mm]	EPD-h [%]	EPD-b1 [%]	EPD-b2 [%]	m_t [g]	m_m [g]	ERM [%]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	22,59	60,00	59,92	0,40	0,00	0,13	41,49	37,486	9,65
2	22,57	60,02	59,94	0,31	0,03	0,10		37,592	9,40
3	22,53	59,99	59,92	0,13	0,02	0,13		37,624	9,32
4	22,56	60,01	60,02	0,27	0,02	0,03		37,465	9,70
5	22,58	60,03	59,95	0,36	0,05	0,08		37,637	9,29
6	22,56	59,98	59,90	0,27	0,03	0,17		37,578	9,43
7	22,57	60,00	59,97	0,31	0,00	0,05		37,487	9,65
8	22,56	60,01	59,91	0,27	0,02	0,15		37,634	9,29
9	22,57	60,01	59,91	0,31	0,02	0,15		37,583	9,42
10	22,58	59,99	59,91	0,36	0,02	0,15		37,681	9,18
11	22,58	60,06	59,98	0,36	0,10	0,03		39,253	5,39
12	22,54	60,02	59,91	0,18	0,03	0,15		37,692	9,15

Tabelul 5.2. (Continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13	22,61	60,06	59,96	0,49	0,10	0,07	41,49	39,267	5,36
14	22,59	60,06	59,93	0,40	0,10	0,12		37,687	9,17
15	22,57	60,02	59,98	0,31	0,03	0,03		38,452	7,32
16	22,51	59,97	59,94	0,04	0,05	0,10		38,534	7,12
17	22,56	59,98	59,99	0,27	0,03	0,02		38,570	7,04
18	22,58	59,98	59,95	0,36	0,03	0,08		38,443	7,34
19	22,57	60,02	59,93	0,31	0,03	0,12		38,600	6,97
20	22,55	60,01	59,95	0,22	0,02	0,08		38,652	6,84
21	22,58	60,05	59,93	0,36	0,08	0,12		38,600	6,97
22	22,56	60,02	59,95	0,27	0,03	0,08		39,388	5,07
23	22,58	60,05	59,97	0,36	0,08	0,05		39,293	5,30
24	22,57	60,04	59,97	0,31	0,07	0,05		37,597	9,38
25	22,58	59,98	59,92	0,36	0,03	0,13		37,589	9,40
26	22,58	60,01	60,00	0,36	0,02	0,00		39,380	5,09
27	22,54	60,03	59,94	0,18	0,05	0,10		39,364	5,12
28	22,55	60,03	59,98	0,22	0,05	0,03		39,404	5,03
29	22,55	60,05	59,94	0,22	0,08	0,10		39,387	5,07
30	22,61	60,08	60,01	0,49	0,13	0,02		39,285	5,31
31	22,61	60,03	59,98	0,49	0,05	0,03		39,296	5,29
32	22,56	60,04	59,99	0,27	0,07	0,02		39,36	5,13
33	22,58	59,97	59,97	0,36	0,05	0,05		37,599	9,38
34	22,57	59,96	59,90	0,31	0,07	0,17		37,665	9,22
35	22,56	60,02	59,93	0,27	0,03	0,12		38,641	6,87
36	22,59	60,05	59,96	0,40	0,08	0,07		39,359	5,14
37	22,57	60,05	59,96	0,31	0,08	0,07		39,376	5,10
38	22,58	60,08	59,97	0,36	0,13	0,05		39,381	5,08
39	22,59	60,08	59,96	0,40	0,13	0,07		39,353	5,15
40	22,62	60,03	59,94	0,53	0,05	0,10		38,457	7,31
41	22,59	60,00	59,95	0,40	0,00	0,08		39,335	5,19
42	22,56	60,00	59,95	0,27	0,00	0,08		39,301	5,28
43	22,62	60,06	60,01	0,53	0,10	0,02		39,277	5,33
44	22,53	60,04	59,95	0,13	0,07	0,08		37,619	9,33

Evaluarea dimensională a ținut cont de cei trei parametri geometrici (înălțimea h , lățimea b_1 și lățimea b_2) ai epruvetelor (vezi Figura 5.1). Eroarea procentuală dimensională (EPD) s-a determinat pe baza ecuației (2.1), folosind valorile nominale și reale ale epruvetelor printate 3D. Cea mai mare EPD a fost înregistrată de înălțimea epruvetelor ($EPD-h=0,32\%$), în timp ce valori aproape

similare (EPD-b1=0,05% și EPD-b2=0,08%) au fost înregistrate pentru lățimile epruvetelor.

Eroarea relativă de masă (ERM) s-a determinat pe baza ecuației (3.7), folosind masa teoretică (m_t) și cea măsurată (m_m) a epruvetelor. Astfel, datorită valorilor mult mai reduse ale m_m (38,51 g) față de m_t (41,49 g), s-a obținut o valoare a ERM de 7,19%.

Pentru printarea unei epruvete cu dimensiunile prezentate în Figura 5.1 (și Tabelul 5.1) și parametrii de proces enumerați în Tabelul 3.1 este necesar un timp de printare de 169 minute. Astfel, în total, pentru printarea prin tehnologia FDM a celor 44 de epruvete din PLA a fost necesar un timp printare de 7436 minute (123,93 ore).

5.4.2. Evaluarea proprietăților la impact simplu

Figura 5.4 prezintă curbele forță-deplasare la solicitarea de impact simplu pentru cele trei tipuri de impactori (H10, H20 și TC). Pentru fiecare impactor s-a investigat efectul energiei de impact (E_i) asupra principalelor proprietăți investigate.

Curbele forță-deplasare rezultate în urma testelor cu impactorul H10 prezintă cel mai asemănător tipar (vezi Figura 5.4a), singura diferență semnificativă înregistrându-se în amplitudinea deplasărilor.

Inițial, forțele maxime înregistrate cresc pentru primele două energii de la 1650,39 N (20 J) la 1673,80 N (30 J), după care descresc la o valoare de 1626,98 N pentru o energie de 40 J. Astfel, între valorile extreme ale forțelor se obține o diferență procentuală sub 3%. Abaterea standard între valorile obținute este de 23,41 N.

Absorbția totală de energie (TEA) și absorbția specifică de energie (SEA) pentru impactorul H10 cresc liniar, conform ecuațiilor (5.3) și (5.4), odată cu creșterea energiei de impact. Deviația standard a rezultatelor este de 9,08 J (TEA) și 0,24 J/g (SEA). În acest caz, energiile TEA și SEA prezintă diferențe procentuale maxime între valorile extreme de aproximativ 46%.

$$TEA_{H10} = 0,9058 \cdot E_i - 2,8590, \text{ cu } R^2 = 0,9957 \quad (5.3)$$

$$SEA_{H10} = 0,0242 \cdot E_i - 0,0752, \text{ cu } R^2 = 0,9966 \quad (5.4)$$

Deplasările (δ), rezultate în urma testelor de impact pentru H10, cresc odată cu creșterea energiei de impact de la valoarea de 18,04 mm (20 J) la valoarea de 34,30 mm (40 J). Între cele două se găsește deplasarea de 26,53 mm, corespunzătoare unei energii de impact de 30 J. Variația deplasării cu energia de impact este una liniară și dată de relația (5.5).

$$\delta_{H10} = 0,7995 \cdot E_i + 2,215, \text{ cu } R^2 = 0,9987 \quad (5.5)$$

Curbele forță-deplasare obținute pentru impactorul H20 prezintă diferențe notabile atât în ceea ce privește forma curbelor cât și în ceea ce privește amplitudinea proprietăților (vezi Figura 5.4b). Asemenea impactorului H10, și în acest caz forțele maxime cresc inițial, de la valoarea de 4190,35 N pentru $E_i=20$ J la valoarea de 4324,95 N pentru $E_i=30$ J, după care prezintă o variație descendentă până la 3967,96 N (40 J). În acest caz, atât deviația standard (180,29 N), cât și diferența procentuală între valorile extreme (8,3%) prezintă valori mult mai mari comparativ cu cea a impactorului H10.

TEA și SEA pentru impactorul H20 cresc liniar odată cu creșterea E_i , conform ecuațiilor (5.6) și (5.7). Creșterea între valorile extreme a energiei absorbite este de 55,83% pentru TEA, respectiv 55,79% pentru SEA. Deviația standard a rezultatelor este apropiată de cea rezultată pentru impactorul H10.

$$TEA_{H20} = 1,1132 \cdot E_i + 4,8998, \text{ cu } R^2 = 0,9985 \quad (5.6)$$

$$SEA_{H20} = 0,0296 \cdot E_i + 0,1286, \text{ cu } R^2 = 0,9988 \quad (5.7)$$

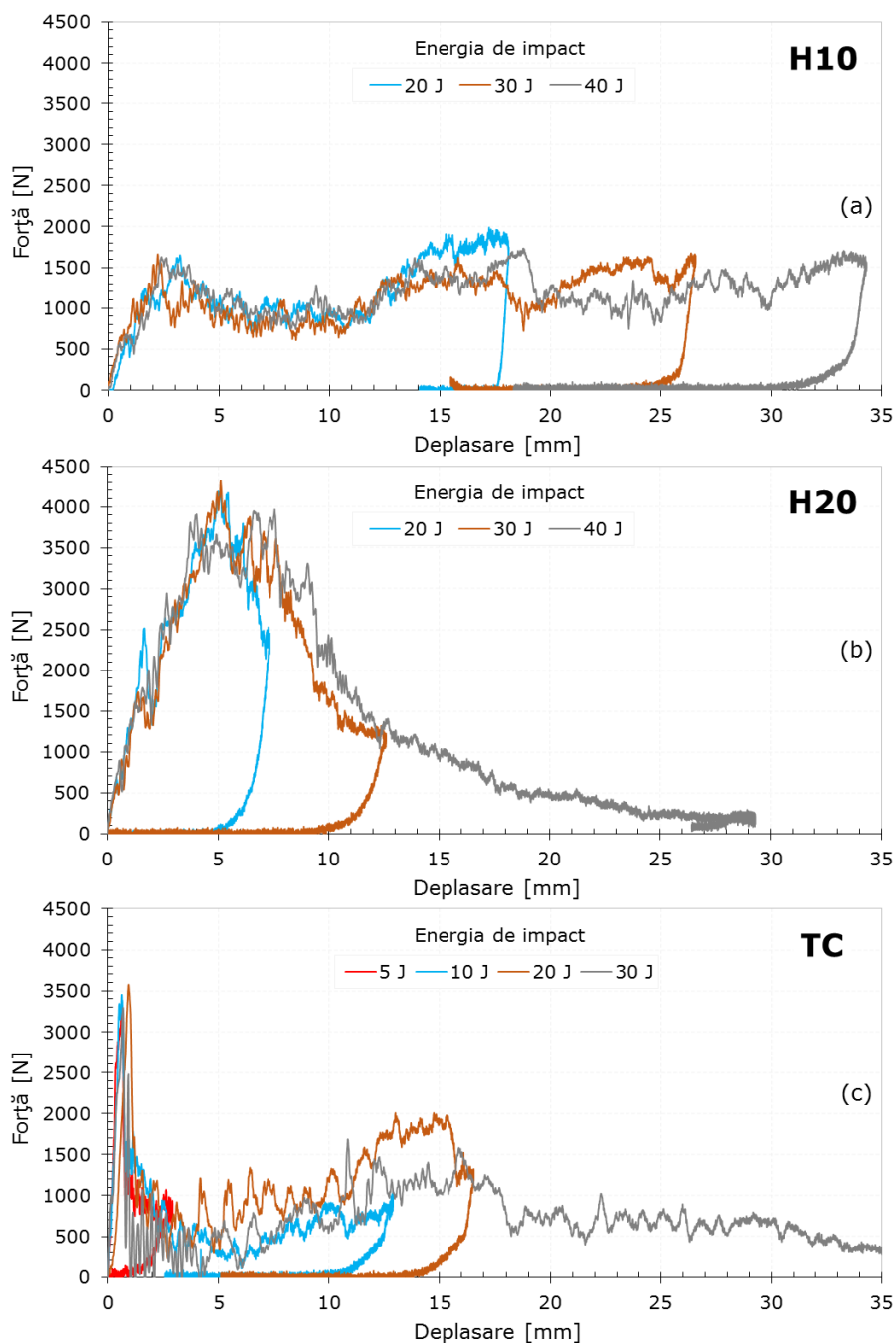


Fig. 5.4. Curbele forță-deplasare la solicitarea de impact simplu pentru tipurile de impactor H10 (a), H20 (b) și TC (c)

5.4. Analiza rezultatelor 173

Deplasările rezultate în urma utilizării impactorului H20 prezintă valorile 7,23 mm (20 J), 12,31 mm (30 J) și 29,25 mm (40 J). În acest caz, δ prezintă o creștere polinomială cu E_i , dată de ecuația (5.8).

$$\delta_{H20} = 0,0593 \cdot E_i^2 - 2,457 \cdot E_i + 32,6500, \text{ cu } R^2 = 1 \quad (5.8)$$

Cele mai mari diferențe între caracteristicile mecanice ale epruvetelor testate (vezi Figura 5.4c) sunt evidențiate de către impactorul TC. Comparativ cu impactorii precedenți H10 și H20 (unde s-au utilizat energiile de impact de 20, 30 și 40 J), pentru impactorul TC a fost necesară utilizarea unor energii mai joase (5, 10, 15 și 20 J). Aceste valori au fost dictate de ruperea mai rapidă și pronunțată a epruvetelor testate datorită geometriei impactorului (vezi Tabelul 5.1). Primele trei niveluri de încărcare (5, 10 și 20 J) au prezentat o creștere aproximativ liniară a forței maxime cu energia de impact (de la 3341,74 N pentru 5 J la 3575,84 N pentru 20 J), după care, asemenea impactorilor H10 și H20, forța a scăzut considerabil până la valoarea de 3294,93 N (30 J). Deviațiile standard (117,10 N) și diferențele procentuale între valorile extreme ale forțelor (7,9%) sunt apropiate impactorului H20.






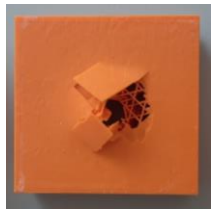
Valorile TEA și SEA pentru impactorul TC cresc polinomial, conform ecuațiilor (5.9) și (5.10), odată cu creșterea E_i . TEA prezintă deviații standard de 13,06 J, iar SEA de 0,35 J/g a rezultatelor obținute. Ambele energii investigate (TEA și SEA) prezintă diferențe procentuale între valorile extreme de peste 91,4%.

$$TEA_{TC} = 0,0816 \cdot E_i^2 - 0,0589 \cdot E_i + 0,9617, \text{ cu } R^2 = 0,9999 \quad (5.9)$$

$$SEA_{TC} = 0,0022 \cdot E_i^2 - 0,0010 \cdot E_i + 0,0238, \text{ cu } R^2 = 0,9999 \quad (5.10)$$

În Tabelele 5.3-5 este prezentată o vedere de ansamblu a epruvetelor din PLA rezultate în urma testelor de impact. Pentru o înțelegere mai ușoară a mecanismelor de deformare/cedare, Tabelele 5.3-5 prezintă atât o imagine a zonei de impact/contact (superioară), cât și una a zonei de așezare (inferioară) a epruvetelor.

Tabelul 5.3. Epruvetele testate cu impactorul H10 la diferite energii de impact



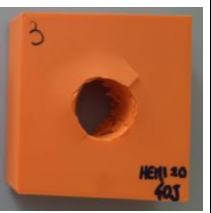



Zona analizată	Energia de impact		
	20 J	30 J	40 J
De impact			
De așezare			

Se poate observa că, indiferent de tipul impactorului (H10, H20 sau TC), la energii de impact joase (5-20 J) epruvetele prezintă o perforare a zonei de contact și

174 Comportamentul la impact

o densificare zonală a miezului (structurii STAR). Odată cu creșterea energiei de impact spre valori superioare (20-40 J), toate epruvetele prezintă o perforare atât a fețelor cât și a miezului.

Tabelul 5.4. Epruvetele testate cu impactorul H20 la diferite energii de impact

Zona analizată	Energia de impact		
	20 J	30 J	40 J
De impact			
De așezare			

Tabelul 5.5. Epruvetele testate cu impactorul TC la diferite energii de impact




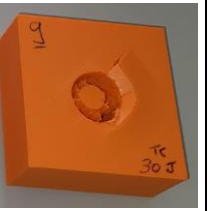


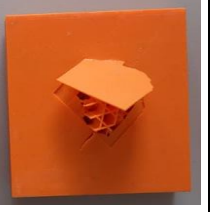
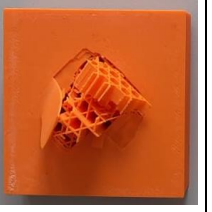
Zona analizată	Energia de impact			
	5 J	10 J	20 J	30 J
De impact				
De așezare				

Figura 5.5 prezintă curbele viteză-timp la solicitarea de impact simplu pentru cele trei tipuri de impactori (H10, H20 și TC). Se poate observa că atenuarea vitezei la energii joase de impact este mai rapidă decât cea la energii ridicate. Atenuarea vitezei este strâns legată de mecanismele de deformare și cedare ale epruvetelor în timpul impactului (vezi Tabelele 5.3-5).

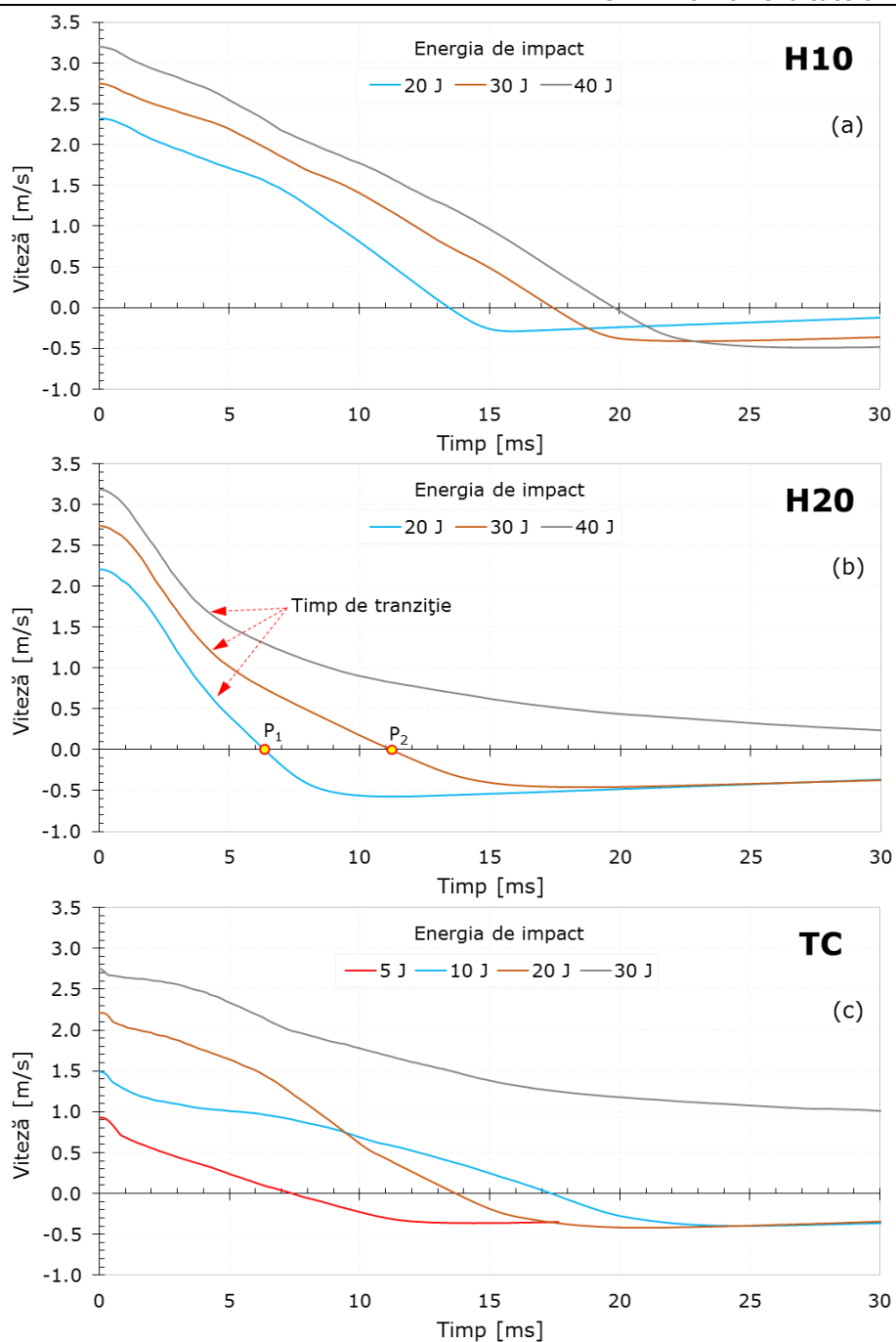


Fig. 5.5. Curbele viteză-timp la solicitarea de impact simplu pentru tipurile de impactor H10 (a), H20 (b) și TC (c)

Pentru impactorul H20 curbele de viteză scad de la valoarea inițială ($t = 0$ ms) până în momentul în care impactorul atinge epruveta ($t \cong 4,5$ ms), Figura 5.5b.

176 Comportamentul la impact

După atingerea epruvetei are loc deformarea acesteia, acest aspect fiind vizibil prin modificarea pantei curbelor viteză-timp. Timpul corespunzător acestui punct se numește timp de tranziție și este afișat cu săgeată roșie punctată în Figura 5.5b. După acest punct, scăderea curbelor este mai mică, ceea ce indică faptul că lungimea impactorului trece lent prin grosimea epruvetei (a se vedea curba pentru $E_i=40$ J din Figura 5.5b și epruvetele testate din ultima coloană a Tabelului 5.4). S-a constatat că pentru epruvetele testate cu vitezele de impact de 20 și 30 J, curba timp-viteză scade rapid de la nivelul de viteză inițial ($t = 0$ ms) și coboară sub zero ($t=6,43$ ms pentru 20 J și $t=11,23$ ms pentru 30 J). După aceste puncte de zero (P_1 și P_2), viteza impactorului devine negativă, ceea ce înseamnă că impactorul începe să revină (iese din epruveta testată). Revenirea impactorului nu poate fi observat în detaliu în curba forță-deplasare, de aceea este important să se deseneze graficul vitezei impactorului pentru o mai bună înțelegere a comportamentului la impact al epruvetelor printate 3D. Odată cu creșterea energiei de impact, timpul de tranziție al epruvetelor testate scade. Desigur, comentarii asemănătoare pot fi formulate și pentru celelalte două impactoare (H10 și TC).

Figura 5.6 prezintă o comparație a curbelor forță-deplasare și viteză-timp pentru impactorii investigați. Având în vedere că doar energiile de impact de 20 și 30 J sunt comune, comparația este posibilă numai pentru aceste energii.

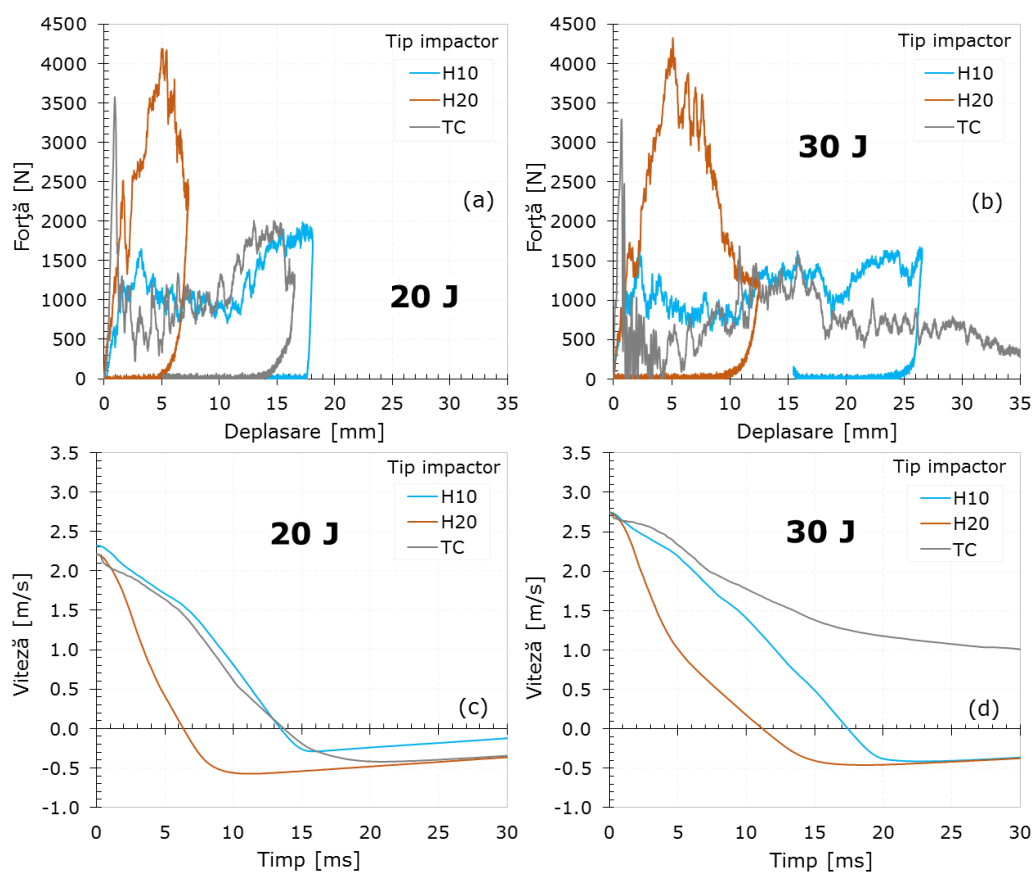


Fig. 5.6. Comparație a curbelor forță-deplasare (a, b) și viteză-timp (c, d) la solicitarea de impact simplu. Efectul formei impactorului

Pentru ambele energii de impact (20 și 30 J), cea mai mare forță este obținută de către impactorul H20 (4190,35 N pentru 20 J și 4324,95 N pentru 30 J), urmat în ordine de impactorul TC (3575,84 N pentru 20 J și 3294,93 N pentru 30 J) și impactorul H10 (1650,39 N pentru 20 J și 1673,80 N pentru 30 J). Astfel, diferențele procentuale între valorile extreme ale forțelor maxime sunt găsite în jurul valorii de 61%, mai exact 60,6% pentru $E_i=20$ J și 61,3% pentru $E_i=30$ J.

Absorbția specifică de energie SEA la o energie de impact de 20 J este maximă pentru impactorul H10 (0,57 J/g), iar minimă pentru H20 (0,47 J/g). Pentru $E_i=30$ J, valorile maxime ale SEA sunt observate în dreptul impactorului TC (0,87 J/g), iar cele minime în dreptul H20 (0,75 J/g). Diferența între valorile extreme pentru cele două energii de impact este de 17,3% pentru 20 J și 1,8% pentru 30 J.

Absorbția totală de energie TEA urmează același tipar ca și SEA, evidențiind valorile maxime pentru impactorii H10 (21,32 J pentru $E_i=20$ J) și TC (32,55 J pentru $E_i=30$ J), iar cele minime pentru H20 (17,62 J pentru $E_i=20$ J) și H20 (27,99 J pentru $E_i=30$ J). În acest caz, diferențele procentuale maxime între valorile extreme sunt aproape identice cu cele ale SEA, 17,4% pentru 20 J și 14,0% pentru 30 J.

Din analiza curbelor viteză-timp se poate concluziona, cu ușurință (viteza scade sub zero după un anumit interval de timp), că pentru $E_i=20$ J (Figura 5.6c) epruvetele nu sunt perforate de către nici unul dintre cei trei impactori. În ceea ce privește epruvetele testate cu $E_i=30$ J (vezi Figura 5.6d), se poate observa că doar impactorul TC perforază epruveta (singura curbă la care viteza nu coboară sub zero).

5.4.3. Evaluarea proprietăților la impact multiplu

S-au efectuat, de asemenea, și teste de impact multiplu pe epruvetele printate 3D. În acest caz, pentru fiecare tip de impactor (H10, H20 și TC) s-au utilizat patru energii de impact. Astfel, o epruvetă a fost testată inițial cu o energie de impact de 5 J, după care i s-a aplicat o $E_i=10$ J, urmată de 15 J și în cele din urmă 20 J. Raspunsul mecanic la patru teste de impact, evidențiat prin curbele forță-deplasare și viteză-timp, este prezentat în Figurile 5.7 și 5.8. Curbele experimentale au fost obținute prin teste de impact cu viteză redusă.

Energiile de impact au fost alese astfel încât în urma testelor efectuate să se poată extrage datele necesare pentru fiecare tip de impactor. Chiar și așa, pentru impactorul H20 (vezi Figurile 5.7b și 5.8b), nu s-au putut obține decât datele pentru primele două niveluri de energii de impact (5 și 10 J). Figura 5.8 arată că doar impactorul TC a reușit să perforze epruveta testată, și doar în urma impactului 4 (20 J). Pentru toate celelalte cazuri, epruvetele nu au fost perforate.

Tabelul 5.6 centralizează rezultatele obținute în urma testelor de impact multiplu în funcție de tipul impactorului. Impactorii H10 și H20 au prezentat cele mai mari valori ale forțelor pentru al doilea impact (10 J), în timp ce impactorul TC evidențiază forțele maxime pentru impactul cu numărul 3 (15 J).

Valorile maxime ale TEA și SEA variază în funcție de tipul impactorului utilizat. Astfel, energiile maxime pentru impactorul H10 sunt obținute în cazul $E_i=20$ J (impact 4). Energia de impact de 15 J (impact 3) prezintă valorile maxime pentru impactorul TC, în timp ce impactorul H20 arată energiile maxime pentru $E_i=10$ J (impact 2).

Comparația celor trei impactori este posibilă doar pentru 5 J (impact 1) și 10 J (impact 2). Pentru nivelurile de 15 J (impact 3) și 20 J (impact 4), impactorul H20 nu oferă rezultate. Astfel, comparând impactorii între ei (pentru 5 și 10 J), se observă că valorile maxime ale F_{max} sunt oferite de către impactorul H20. În acest caz, impactorul H20 prezintă valori ale forțelor maxime cu 10,6% (impact 1) și 21,5% (impact 2) mai mari decât impactorul TC, respectiv cu 57,2% (impact 1) și 43,5% (impact 2) mai mari decât impactorul H10.

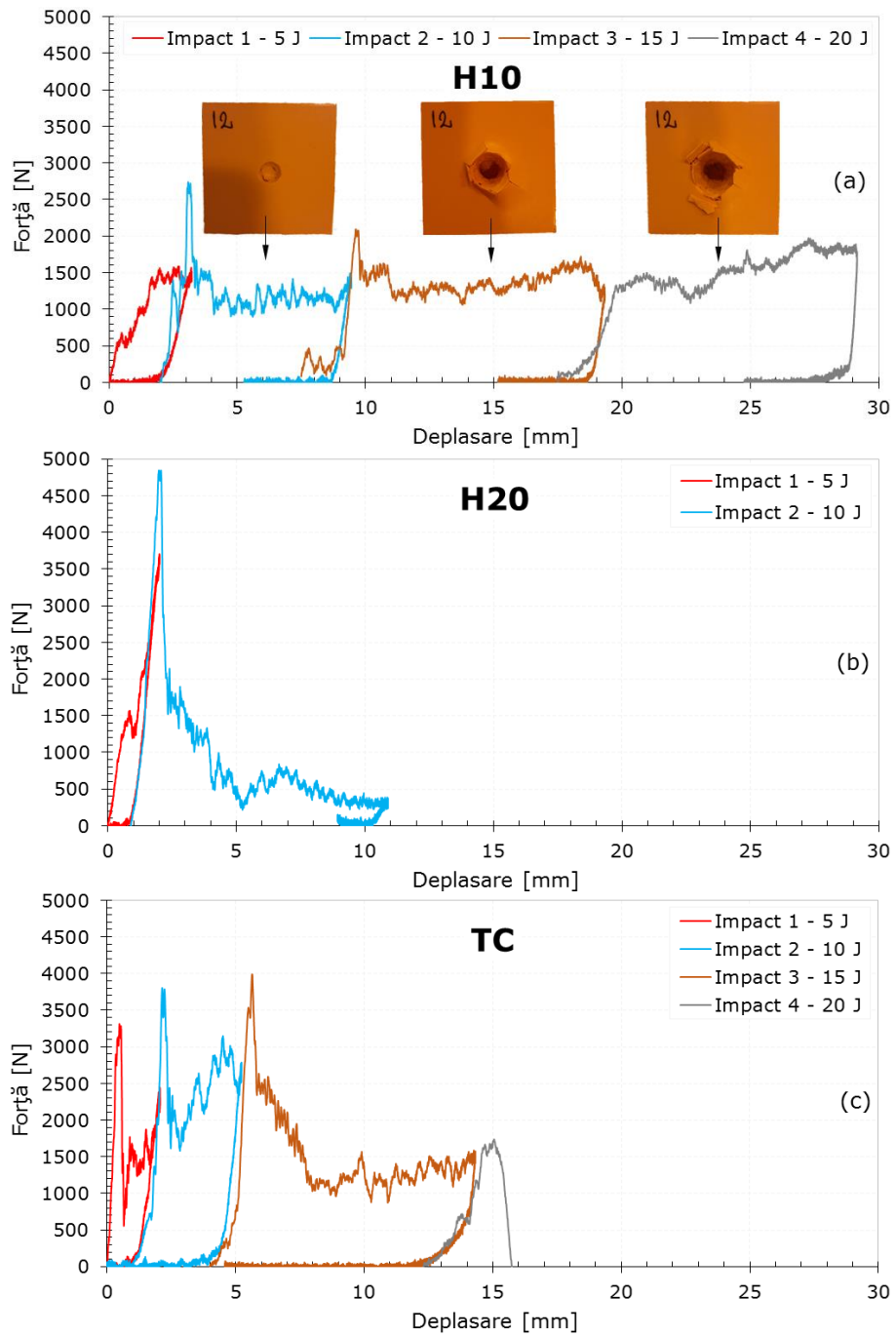


Fig. 5.7. Curbele forță-deplasare la solicitarea de impact multiplu pentru tipurile de impactor H10 (a), H20 (b) și TC (c)

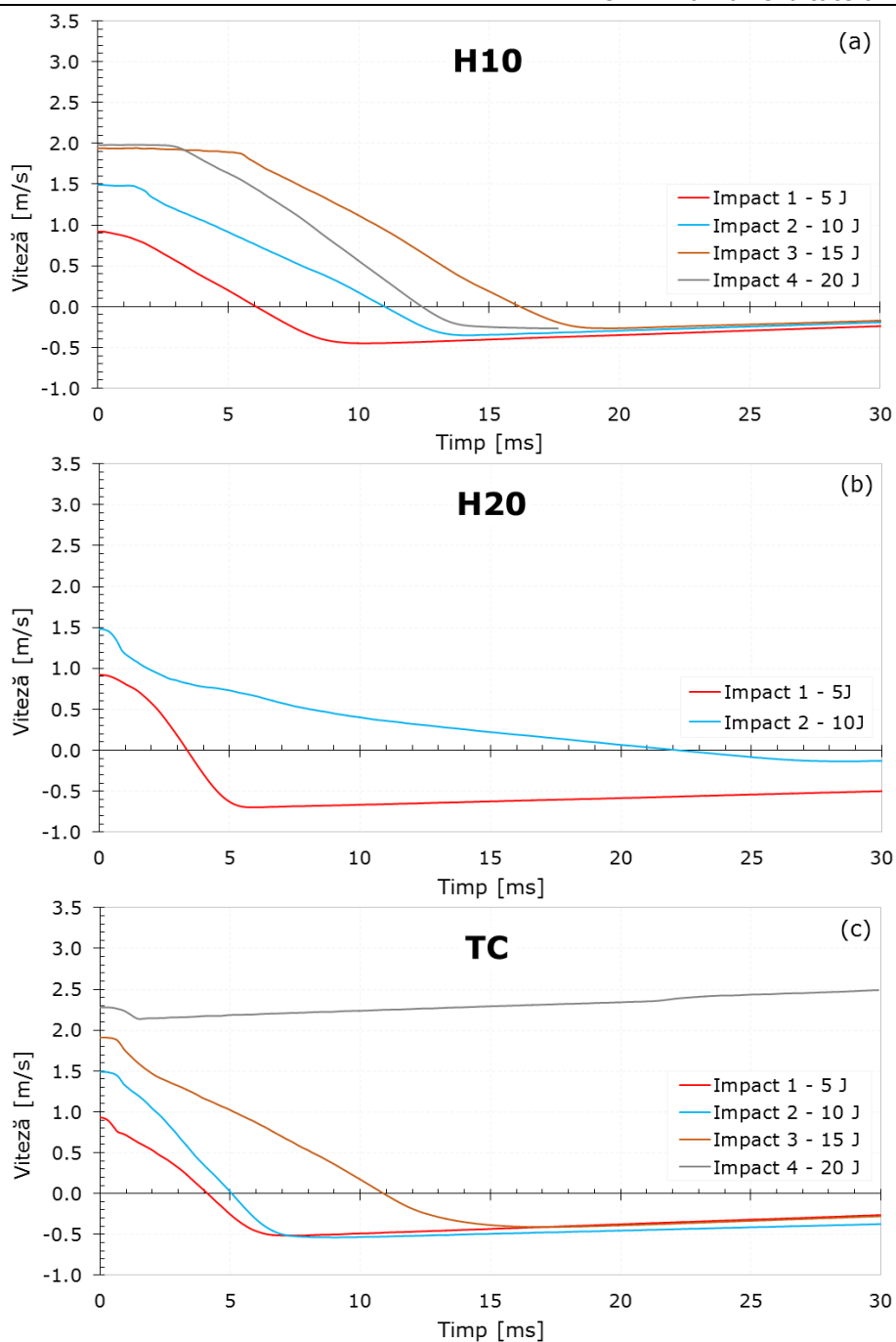


Fig. 5.8. Curbele viteză-timp la solicitarea de impact multiplu pentru tipurile de impactor H10 (a), H20 (b) și TC (c)

De cealaltă parte, valorile maxime pentru TEA sunt obținute în cazul impactorilor H10 (impact 1) și H20 (impact 2), Tabelul 5.6. În cazul impactului 1 (5

180 Comportamentul la impact

J), SEA prezintă valori maxime pentru impactorul H10 (0,07 J/g), în timp ce pentru impactul 2 (10 J), impactorii H10 și H20 prezintă valori egale și maxime (0,22 J/g).

Tabelul 5.6. Proprietățile epruvetelor din PLA la impact multiplu

Valoare impact	Tip impactor	F_{max} [N]	TEA [J]	SEA [J/g]
Impact 1 – 5 J	H10	1586,01	2,57	0,07
	H20	3704,60	1,35	0,03
	TC	3312,48	2,28	0,06
Impact 2 – 10 J	H10	2738,94	8,14	0,22
	H20	4845,82	8,56	0,22
	TC	3804,09	7,56	0,19
Impact 3 – 15 J	H10	2095,17	15,00	0,40
	H20	-	-	-
	TC	3991,37	13,71	0,35
Impact 4 – 20 J	H10	1972,27	15,45	0,41
	H20	-	-	-
	TC	1738,18	2,22	0,06

Figura 5.9 prezintă o imagine radiografică laterală și frontală a unei epruvete din PLA. Imaginea prezintă epruveta înaintea testului de impact.

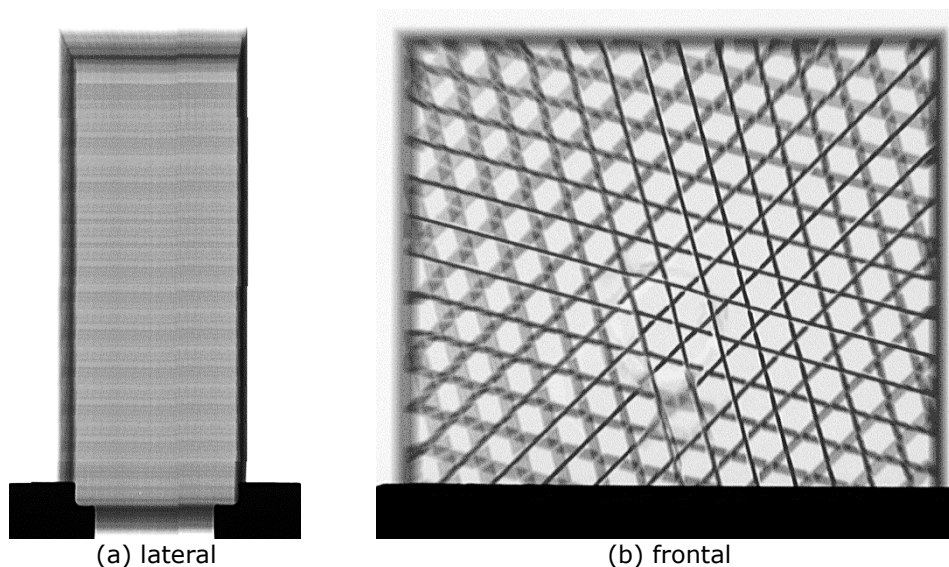


Figura 5.9. Imaginea laterală (a) și frontală (b) a unei epruvete din PLA supuse unei inspecții radiografice

În Figura 5.10 sunt prezentate imagini radiografice ale epruvetelor testate în funcție de tipul impactorului (H10, H20 și TC) și energia de impact (5, 20 și 30 J). Aceste imagini întăresc comentariile elaborate cu privire la curbele viteză-timp. Imaginile radiografice prezintă o vedere detaliată a modurilor de cedare ale epruvetelor testate.

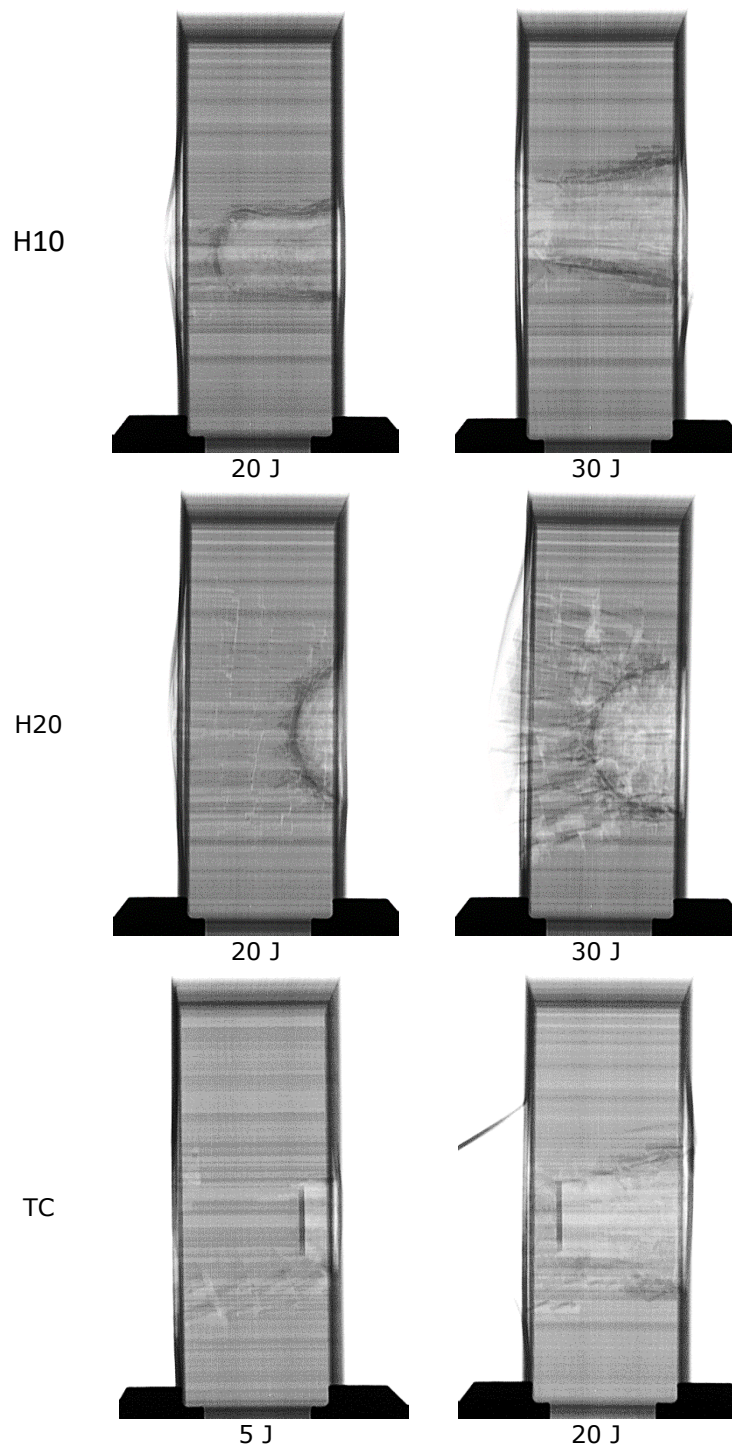


Fig. 5.10. Imagini radiografice ale epruvetelor testate funcție de tipul impactorului

6. COMPORTAMENTUL LA OBOSEALĂ

6.1. Noțiuni generale

Elementele de rezistență printate 3D supuse la încărcări repetate se pot rupe prematur în timpul funcționării la valori ale tensiunilor mult mai mici decât rezistența la rupere corespunzătoare solicitării cvasi-stactice. Scăderea rezistenței componentelor supuse încărcărilor sau deformațiilor, care se repetă de un număr mare sau foarte mare de ori, se numește *oboseală*. Acest mod de rupere, produs de formarea uneia sau mai multor fisuri sub acțiunea unor solicitări repetate, poartă numele de *rupere prin oboseală*. Durata de viață a unei piese se apreciază de obicei prin numărul de cicluri de solicitare, N , până la ruperea finală.

În general, răspunsul materialului la solicitarea de oboseală poate să apară în următoarele două moduri:

- oboseală în domeniul durabilităților mici (low cycle fatigue - LCF), denumită și oboseală oligociclică;
- oboseală în domeniul durabilităților mari (high cycle fatigue - HCF), considerată că apare la un număr mai mare de 10^5 cicluri de solicitare.

Înțelegerea comportamentului la oboseală și a mecanismelor sale de cedare este necesară pentru evaluarea materialelor ingineresti în diverse aplicații, pentru a determina durabilitatea și fiabilitatea lor pe termen lung [344]. Este esențial să se analizeze comportamentul la oboseală al componentelor printate 3D datorită utilizării lor sporite în aplicații precum avioanele de pasageri și automobile, în care asigurarea siguranței vieții umane este crucială. Testele de oboseală sunt efectuate în condiții repetate de încărcare și descărcare supuse tracțiunii, compresiunii, încovoierii, torsiunii sau unei combinații a acestora [345].

În printarea 3D a polimerilor, procesul FDM și-a demonstrat capacitatea de a produce polimeri cu rezultate comparabile cu procesele de fabricație convenționale. Totuși, formarea de goluri și imperfecțiuni în polimerii printați este inevitabilă, ceea ce ar putea duce la defecțiuni premature sub încărcare. În plus, datele de oboseală pentru polimerii fabricați aditiv sunt împrăștiate, ceea ce îngreunează și mai mult analiza, din cauza defectelor de fabricație și a incertitudinii în procesul de prototipare rapidă [346]. Cu toate acestea, cele mai multe rezultate la oboseală se găsesc pentru materiale precum ABS [298, 347-35], PA [356, 357], PC [358, 359], PETG [360] și PEI [361].

Desigur, există și echipe de cercetători care au raportat comportamentul la oboseală al componentelor din PLA printate. Spre exemplu, Ezech și Susmel [362] au investigat influența orientării epruvetelor pe patul de printare (0 , 30 și 45°) asupra rezistenței la oboseală a materialului PLA fabricat prin tehnologia FDM. Pe durata testului de oboseală, autorii au identificat trei mecanisme distincte de cedare, și anume: fisurarea filamentului, dezlipirea stratului și dezlipirea filamentului. Ei au observat că raportul de împrăștiere al limitei de oboseală, la diferite unghiuri de

fabricație, s-a dovedit a fi minim, prin urmare au afirmat că direcția de fabricație în proiectarea componentelor PLA ar putea fi neglijată.

Într-un alt studiu, Ezech și Susmel [363] au raportat similitudinea comportamentelor la oboseală ale PLA fabricate în mod convențional și ale PLA fabricate prin FDM. În plus, autorii au descoperit că materialul PLA printat la o densitate de umplere mai mică de 100% se comportă ca un material cu creștături, ceea ce a contribuit la reducerea rezistenței la oboseală a materialului PLA printat.

Jerez-Mesa și colab. [364] au investigat impactul parametrilor de printare FDM asupra rezistenței la oboseală a materialului PLA. Epruvetele printate au evidențiat diferite înălțimi ale straturilor (0,1; 0,2 și 0,3 mm), diferite diametre ale duzei (0,3; 0,4 și 0,5 mm), diferite densități de umplere (25, 50 și 75%) și diferite viteze de printare (25, 30, și 35 mm/min). Din analiza rezistenței la oboseală în raport cu parametrii de printare investigați, autorii au ajuns la concluzia că densitatea de umplere, diametrul duzei și înălțimea stratului au afectat cel mai mult durata de viață la oboseală a materialului PLA. Gomez-Gras și colab. [365] au efectuat un test de oboseală la încovoiere rotativă pe material PLA printat prin FDM. Ei au raportat densitatea de umplere ca factor care influențează cel mai mult durata de viață la oboseală a componentelor din PLA, urmată de înălțimea stratului. În ambele investigații [364, 365], durata de viață maximă la oboseală a fost atinsă cu o densitate de umplere de 75%, un diametru al duzei de 0,5 mm și o înălțime a stratului de 0,3 mm. Autorii Referințelor [364, 365] sugerează să se urmeze același interval de densitate de umplere, diametrul duzei și înălțimea stratului pentru a obține o durată de viață mai bună la oboseală în materialul PLA; cu toate acestea, ei au raportat că limita de anduranță variază.

Afrose și colab. [366] au printat prin FDM epruvete din PLA după trei orientări diferite (0, 45 și 90°) și le-au evaluat la oboseală prin teste de tipul tracțiune - tracțiune. Autorii au raportat că epruvetele printate la orientarea de 45° au arătat o durată de viață crescută la oboseală, comparativ cu celelalte două direcții de printare. În plus, ei au observat că aceeași orientare a avut o energie de deformare mai mare până la rupere. Într-un studiu separat, Letcher și Waytashek [367] au raportat că materialul PLA printat la o orientare raster de 45° a avut limita maximă de rezistență la oboseală, în timp ce limita minimă a fost observată pentru materialul printat la o orientare de 90°. Pe de altă parte, Arbeiter și colab. [368] au raportat că epruvetele din PLA printate la orientarea de 0°/90° au avut o durată de viață la oboseală mai bună comparativ cu cele printate la 0 și 90°. Cu toate acestea, ei au menționat că orientarea epruvetelor nu influențează în mod semnificativ caracteristicile ruperii prin oboseală ale materialelor printate prin tehnologia FDM. Acest lucru a fost verificat de către autori prin valori aproape identice pentru toate orientările fibrelor (0, 90 și 0°/90°), în ceea ce privește inițierea și propagarea fisurilor și curbele de cedare. Rezultatele Referințelor [366–368] arată că durata de viață la oboseală și caracteristicile de cedare nu au fost anticipate a fi similare la toate orientările rasterului.

6.2. Scopul investigațiilor

Studiile de oboseală din literatură, efectuate asupra componentelor din PLA printate prin tehnologia FDM, se bazează în marea lor majoritate pe condiții de

încărcare tracțiune - tracțiune. Astfel, cercetătorii au utilizat epruvete tipice testelor de tracțiune. Scopul investigațiilor curente este de a determina comportamentul la oboseală al epruvetelor din PLA prin efectuarea unor teste de oboseală de tipul *compresiune - compresiune*. În acest sens, se vor folosi epruvete cubice și se vor determina caracteristicile tipice la oboseală precum limita de viață și mecanismele de cedare. Parametrii de proces ai epruvetelor testate sunt obținuți în urma unui amplu proces de optimizare prezentat în detaliu în Capitolul 3.

6.3. Materiale și metode

6.3.1. Materiale

Filamentul PLA constituie materialul utilizat pentru printarea 3D a epruvetelor investigate. Avantajele, aplicațiile și caracteristicile tehnice ale acestuia sunt prezentate în detaliu în Secțiunea 2.3.1.

6.3.2. Proiectarea și fabricarea epruvetelor

Noțiunile fundamentale legate de geometria, modelarea, procesarea și fabricarea epruvetelor sunt prezentate în Secțiunea 3.3.2. Figura 6.1 prezintă o imagine de ansamblu a epruvetelor printate 3D prin tehnologia FDM, împreună cu un detaliu privind structura internă a acestora.



Fig. 6.1. Epruvetele printate 3D utilizate pentru testele de oboseală: imagine de ansamblu (a) și structura internă (b)

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

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

6.3.3. Analiza dimensională

Aspecte legate de analiza dimensională a epruvetelor din PLA sunt prezentate în detaliu în Secțiunea 3.3.3.

6.3.4. Programul experimental

Pentru a determina limita de curgere a epruvetelor printate, au fost efectuate teste preliminare de compresiune cvasi-statică. Testele au fost efectuate pe epruvete cubice din PLA, utilizând mașina universală de testare LBG TC100 de 100 kN (vezi

Figura 3.3). Încercările experimentale au fost efectuate în controlul deplasării, cu o viteză de încărcare de 10 mm/min. Pentru a asigura o reproductibilitate a rezultatelor, testele de compresiune au fost repetate pe un număr de patru epruvete, conform standardelor ASTM D1621-16 [288] și ISO 844:2021 [289].

Ulterior, pentru determinarea rezistenței la oboseală, au fost efectuate teste de oboseală în compresie ciclică. Testele experimentale au fost realizate pe o mașină hidraulică universală de testare a materialelor Instron 8501 (Figura 6.2a), conform standardului ASTM D7791-17 [369]. Mașina este echipată cu o celulă de forță de 200 kN capacitate pentru încărcare statică și 100 kN pentru dinamică (ciclică).

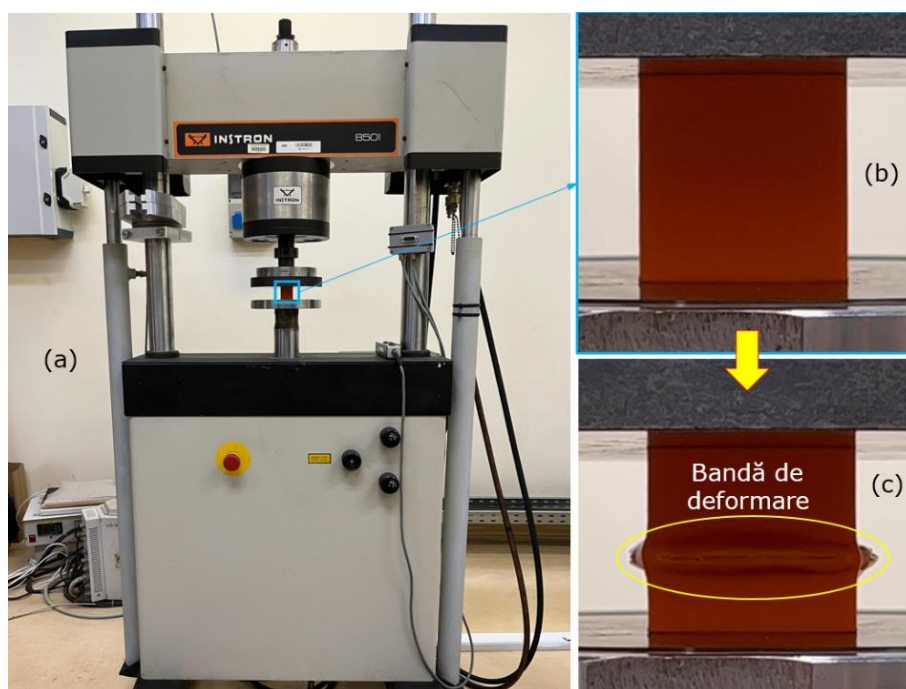


Fig. 6.2. Configurația experimentală: mașina universală Instron 8501 de 100 kN (a), fixarea epruvetei în dispozitivul mașinii de testare (b) și epruveta testată (c)

Testele de oboseală s-au efectuat pe epruvete cubice, în controlul forței, cu o frecvență de 10 Hz. Pentru testare s-a folosit un coeficient de asimetrie R al ciclului de 0,1. Având în vedere faptul că s-au efectuat încercări ciclice de compresiune-compresiune, în controlul forței, epruvetele au fost pur și simplu fixate între cele două suporturi (vezi Figura 6.2b).

Testele au fost oprite la o deplasare maximă de 4 mm, ceea ce corespunde unei deformații la compresiune de aproximativ 13%. Cu toate acestea, toate epruvetele testate au cedat la valori mai mici de 13% ale deformației (vezi Figura 6.2c).

Pentru a putea trasa curba Wöhler, au fost alese cinci niveluri de încărcare (între 0,5 și 0,9 cu pas de 0,1). În total, s-a testat un număr de 15 epruvete (3 epruvete pentru fiecare nivel de încărcare).

6.3.5. Definirea proprietăților

Limita la oboseală sau rezistența la oboseală a unui material este o caracteristică mecanică ce se determină pe cale experimentală. Comportamentul materialelor supuse la solicitări ciclice este analizat pe baza curbelor de durabilitate S-N (unde: S este tensiunea aplicată, iar N reprezintă numărul de cicluri de solicitare până la rupere). Aceste curbe se mai numesc curbe Wöhler și prezintă relația dintre tensiunea maximă și numărul de cicluri la scară logaritmică, la care se realizează ruperea epruvetei solicitate.

Coeфициentul de asimetrie a ciclului R este un parametru important la solicitarea de oboseală cu amplitudine constantă și se determină cu relația (6.1).

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = 0,1 \quad (6.1)$$

unde: σ_{min} și σ_{max} sunt tensiunea minimă, respectiv maximă într-un ciclu de încărcare. Nivelurile de încărcare (caracteristica ciclului) se calculează cu relația (6.2).

$$k = \frac{\sigma_m}{\sigma_c} \quad (6.2)$$

unde σ_m este tensiunea medie pentru un test dat și σ_c este tensiunea de curgere a materialului epruvetei rezultat în urma testului cvasi-static.

6.4. Analiza rezultatelor

Această secțiune prezintă rezultatele preliminare la compresiune cvasi-statică împreună cu cele obținute la testele de oboseală oligociclocă. Se prezintă proprietățile de rezistență, deformațiile aferente acestora și mecanismele de cedare.

6.4.1. Evaluarea proprietăților fizice

Evaluarea proprietăților fizice s-a realizat pe media a 28 epruvete (vezi Figura 6.1a). Tabelul 6.1 prezintă valorile proprietăților fizice și ale erorilor relative aferente acestora.

Pentru evaluarea dimensională s-au utilizat toți cei trei parametri geometrici (înălțimea h, lățimea b1 și lățimea b2) ai epruvetelor (vezi Figura 3.1). Eroarea procentuală dimensională, EPD, s-a determinat pe baza relației (2.1), folosind valorile nominale și reale ale epruvetelor. Toate cele trei dimensiuni ale epruvetelor au prezentat valori ale EPD sub 0,04% (0,04% pentru h, respectiv 0,03% pentru b1 și b2).

Eroarea relativă de masa, ERM, s-a determinat cu relația (3.7), folosind masa teoretică/nominală (m_t) și măsurată/reală (m_m) a epruvetelor printate 3D. În acest caz, comparativ cu EPD, ERM prezintă valori mai mari (6,66%), aspect datorat valorilor mult mai reduse ale m_m (14,1288 g) față de m_t (15,1375).

S-a obținut că timpul necesar pentru printarea 3D a unei epruvete din PLA, supuse testului de oboseală, este de 78 min.

Tabelul 6.1. Proprietățile fizice și erorile acestora privind epruvetele testate la oboseală

Nr. probă	h	b1	b2	EPD-h	EPD-b1	EPD-b2	m_t [g]	m_m [g]	ERM [%]
	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[%]	[%]			
1	29.99	29.99	29.97	0.03	0.03	0.10	15,1375	14.157	6.48
2	30.03	29.98	30.01	0.10	0.07	0.03		14.109	6.79
3	30.00	30.01	30.01	0.00	0.03	0.03		14.132	6.64
4	29.98	30.02	30.01	0.07	0.07	0.03		14.146	6.55
5	30.00	30.01	30.01	0.00	0.03	0.03		14.131	6.65
6	29.99	30.02	30.02	0.03	0.07	0.07		14.149	6.53
7	30.00	30.01	29.99	0.00	0.03	0.03		14.153	6.50
8	30.00	30.01	30.01	0.00	0.03	0.03		14.125	6.69
9	30.01	30.00	30.01	0.03	0.00	0.03		14.149	6.53
10	29.94	29.99	30.01	0.20	0.03	0.03		14.110	6.79
11	30.01	30.00	30.01	0.03	0.00	0.03		14.116	6.75
12	30.01	30.00	30.00	0.03	0.00	0.00		14.146	6.55
13	30.01	30.01	30.00	0.03	0.03	0.00		14.129	6.66
14	30.00	30.01	29.98	0.00	0.03	0.07		14.147	6.54
15	30.02	29.98	30.00	0.07	0.07	0.00		14.105	6.82
16	30.01	30.00	30.00	0.03	0.00	0.00		14.117	6.74
17	30.00	29.99	30.00	0.00	0.03	0.00		14.167	6.41
18	30.01	29.98	29.99	0.03	0.07	0.03		14.123	6.70
19	29.97	30.01	30.02	0.10	0.03	0.07		14.130	6.66
20	30.01	30.01	30.00	0.03	0.03	0.00		14.119	6.73
21	30.01	30.00	29.99	0.03	0.00	0.03		14.169	6.40
22	29.97	30.00	30.00	0.10	0.00	0.00		14.116	6.75
23	30.00	30.00	30.01	0.00	0.00	0.03		14.156	6.48
24	30.00	30.00	30.00	0.00	0.00	0.00		14.140	6.59
25	30.00	30.00	30.00	0.00	0.00	0.00		14.116	6.75
26	30.00	30.02	29.99	0.00	0.07	0.03		14.106	6.81
27	29.99	30.01	29.99	0.03	0.03	0.03		14.112	6.77
28	30.03	30.01	30.03	0.10	0.03	0.10		14.080	6.99

6.4.2. Evaluarea proprietăților cvasi-stactice

Curbele tensiune-deformație la compresiune cvasi-statică, pentru cele patru epruvete investigate, sunt prezentate în Figura 6.3. Se poate observa că epruvetele prezintă un comportament specific materialelor celulare, curba tensiune-deformație fiind definită de cele trei regiuni caracteristice: o regiune liniar-elastică, o regiune de platou și o regiune de densificare (vezi Capitolul 3). În zona de interes (la deformații sub 13%), curbele prezintă un comportament similar. Așadar, se poate concluziona că se obține o bună repetabilitate a rezultatelor.

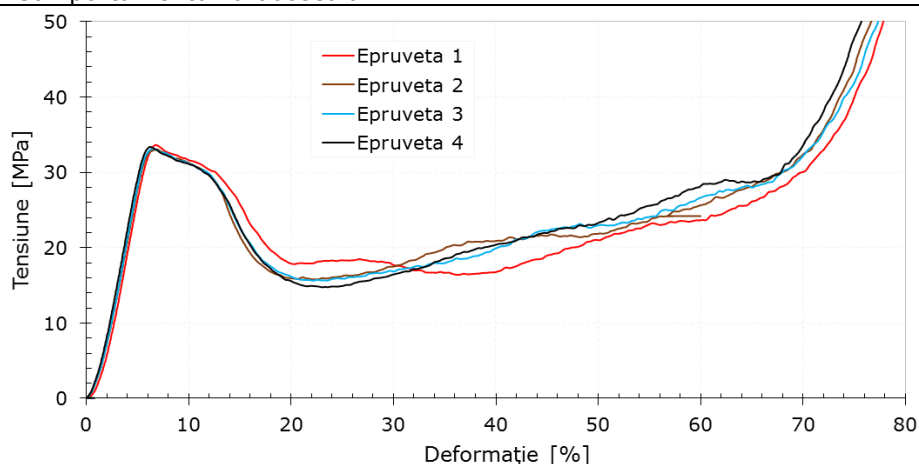


Fig. 6.3. Curbele tensiune-deformație la compresiune cvasi-statică

Cu ajutorul curbelor caracteristice la compresiune s-au determinat principalele caracteristici mecanice ale celor patru epruvete. Astfel, Tabelul 6.2 sintetizează proprietățile de interes în cazul testelor de oboseală.

Tabelul 6.2. Principalele proprietăți mecanice la compresiune cvasi-statică

Număr epruvetă [-]	Modulul la compresiune E [MPa]	Tensiunea de curgere σ_c [MPa]	Deformația la curgere ε_c [%]
Epruveta 1	723.25	33.63	6.78
Epruveta 2	695.29	33.05	6.88
Epruveta 3	734.30	33.12	6.50
Epruveta 4	736.74	33.38	6.24
Media	722.40	33.30	6.60
Deviația standard	19.00	0.27	0.29

Rezultatele obținute evidențiază un modul la compresiune de 722,4 MPa, respectiv valori de 33,3 MPa (tensiunea de curgere) și 6,6% (deformația la curgere) aferente limitei de curgere. Valorile tensiunii de curgere vor fi utilizate în ecuația (6.2) în vederea determinării nivelurilor de încărcare.

6.4.3. Evaluarea proprietăților la oboseală

Figurile 6.4 și 6.5 prezintă variația forței și deplasării cu numărul de cicluri până la rupere pentru diferite niveluri de încărcare. Din aceste figuri, scăderea bruscă a forței sau creșterea bruscă a deplasării determină numărul de cicluri până la rupere pentru un anumit nivel de încărcare.

Epruveta s-a încărcat cu forța F_1 până la rupere și s-a notat numărul de cicluri N_i ($i=1, \dots, 5$). Epruvetele încărcate cu forțe mai mari se rup la un număr mai mic de cicluri. Astfel, la o forță F_1 aplicată, numărul de cicluri de solicitare până la rupere este N_1 , la forța F_2 corespunde N_2 , la F_3 corespunde N_3 , etc.

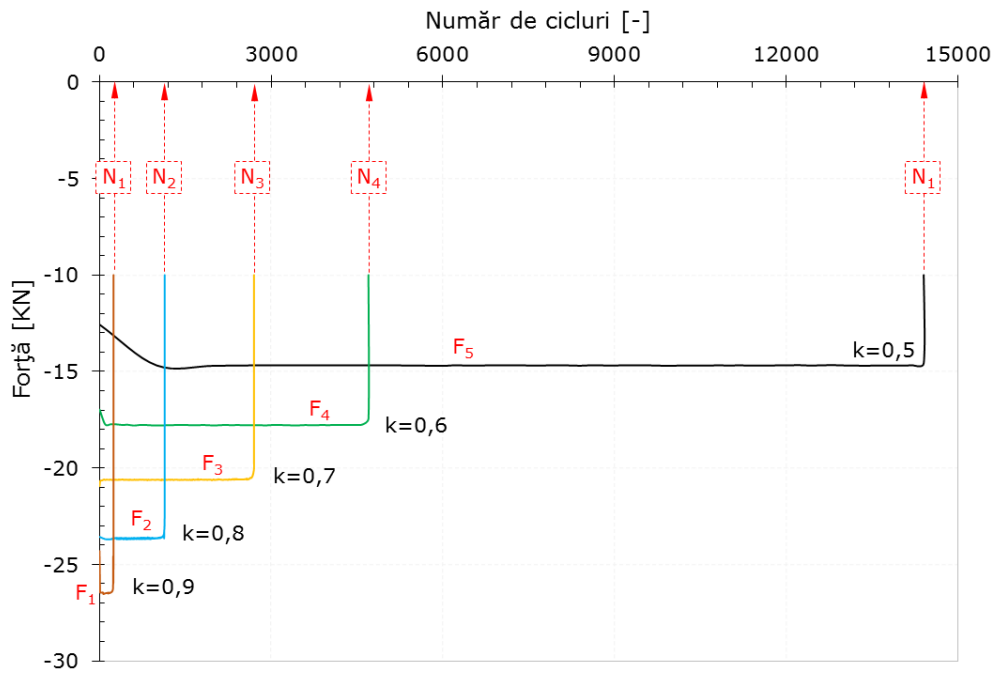


Fig. 6.4. Variația forță-număr de cicluri pentru diferite niveluri de încărcare

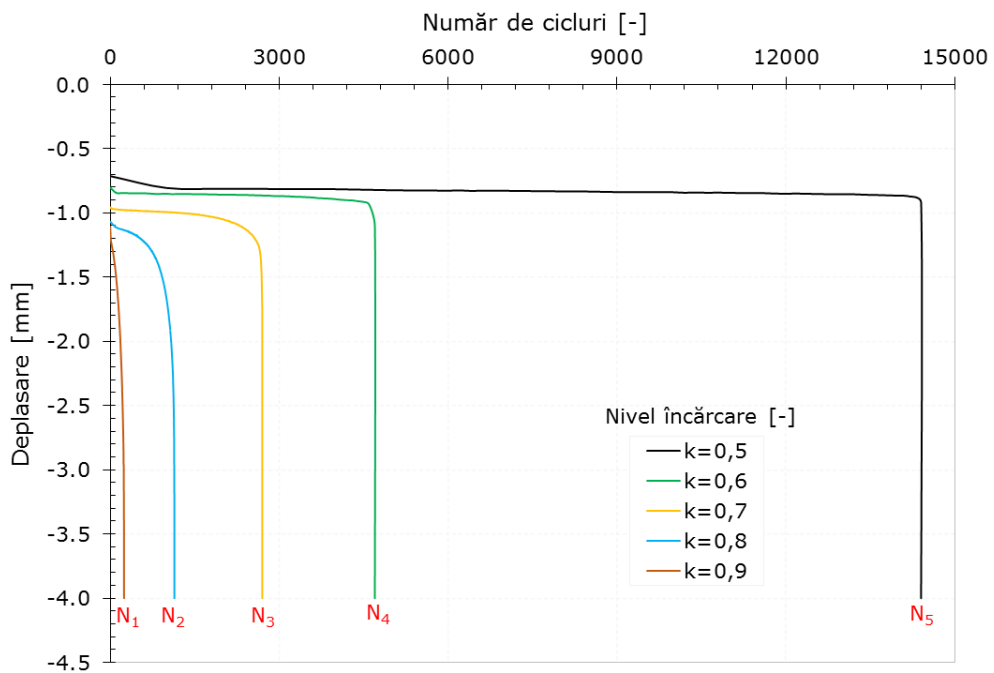


Fig. 6.5. Variația deplasare-număr de cicluri pentru diferite niveluri de încărcare

Tabelul 6.3 prezintă rezultatele obținute în urma testelor de oboseală în funcție de nivelurile de încărcare aplicate.

Tabelul 6.3. Rezultatele obținute la oboseală în funcție de nivelul de încărcare

Nivelul de încărcare, k [-]	Forța aplicată, F [kN]	Deplasarea la rupere, δ_r [mm]	Numărul de cicluri până la rupere, N_i [-]
0,9	26,9	3,76	325,3
0,8	24,0	3,13	844,0
0,7	20,9	2,06	2377,0
0,6	18,0	1,62	4655,3
0,5	12,0	1,23	13101,0

În Figura 6.6 este prezentată variația deformației la rupere (ε_r) în funcție de numărul de cicluri până la rupere (N_i). În domeniul de încărcării ales (26,9-12 kN), deformația la rupere ε_r scade de peste 3 ori, mai exact cu 67,3%. Scăderea este dată de către o lege de putere, identificată sub forma ecuației (6.3).

$$\varepsilon_r = 81,791 \cdot N^{-0,317}, \text{ cu } R^2 = 0,9885 \quad (6.3)$$

Ecuția (6.3) prezintă un coeficient de determinare R^2 apropiat de 1, acest aspect evidențiind precizia predictibilității deformației la rupere ε_r în intervalul de cicluri la rupere 0-14 000.

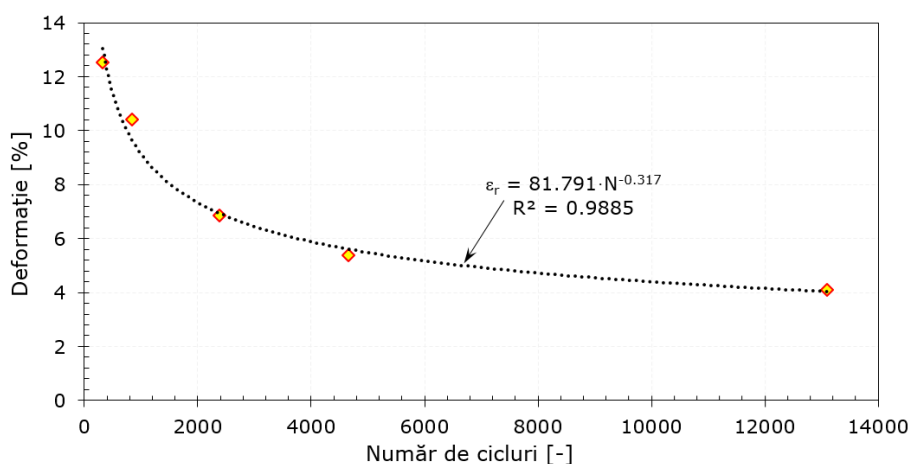


Fig. 6.6. Variația deformației la rupere cu numărul de cicluri pentru diferite niveluri de încărcare

Utilizând secțiunea transversală a epruvetelor testate (produsul dintre dimensiunile b_1 și b_2 , vezi Figura 3.1), forțele aplicate au fost convertite în valori de tensiune. S-au obținut astfel tensiuni σ_i asociate forțelor F_i . În final, perechile de puncte (σ_i , N_i) s-au înregistrat într-o diagramă $\sigma_{\max} = f(N)$, Figura 6.7. Această diagramă este cunoscută sub numele de curba Wöhler.

Curba obținută face parte din domeniul durabilităților mici. Pe diagrama este prezentată mediana curbei, împreună cu limita de încredere superioară și inferioară

(95%). Se poate observa că la cicluri joase ($<10^3$) rezultate sunt mai împrăștiate, iar odată cu creșterea N acestea sunt mai grupate.

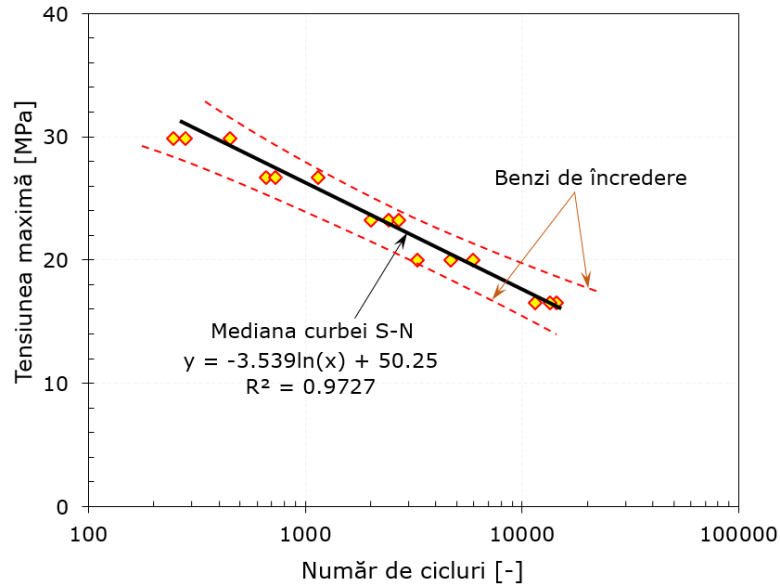


Fig. 6.7. Curba Wöhler pentru epruvetele din PLA printate prin tehnologia FDM

În urma efectuării testelor de oboseală oligociclică, ruperea epruvetelor s-a produs brusc. S-a observat că apariția unei benzi de deformare pe toată lățimea epruvetelor, normală pe direcția de încărcare, a dus la creșterea deformării. Astfel, apariția benzii orizontale a fost identificată ca fiind principalul mecanism de cedare al epruvetelor solicitate la oboseală (vezi Figura 6.2c).

7. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE. DIRECȚII NOI DE CERCETARE

7.1. Concluzii

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

Capitolul 1 sintetizează stadiul actual privind printarea 3D, accentul punându-se pe procesul FDM. Se pot concluziona următoarele aspecte:

- se prezintă noțiuni generale cu privire la prototiparea rapidă (§1.1) și schema reprezentativă a procesului de fabricație aditivă (vezi Figura 1.1).
- sunt clasificate pe categorii și subcategorii (Figura 1.2), respectiv descrise principalele tehnologii de fabricație aditivă (§1.2.1-7). Se prezintă procesul de bază (Figurile 1.3-1.8), principiul de funcționare și domeniile de aplicabilitate specifice fiecărei tehnologii.
- este prezentat în detaliu procesul FDM prin evidențierea parametrilor de proces (§1.3.2), materialelor utilizate pentru fildament (§1.3.3), proprietăților (§1.3.4) și aplicațiilor (§1.3.5) componentelor FDM, respectiv avantajele și dezavantajele procesului FDM (§1.3.6).

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

❖ *Acuratețea dimensională*

- s-a obținut că variația parametrilor DU, MU și OP influențează acuratețea dimensională a epruvetelor, erorile de lățime fiind mai mari decât erorile de grosime (vezi Figura 2.7).
- epruvetele printate la 45° au cele mai mici erori de grosime, cele mai mari fiind obținute la 0° (pentru densitatea de umplere de 70%) (Figura 2.8a) și 90° (pentru densitatea de umplere de 100%) (Figura 2.8b). Dimpotrivă, erorile de lățime sunt minime la 0° și maxime la 45° pentru ambele densități de umplere.
- s-a observat că prin modificarea parametrilor GS, VP, TD și NSE dimensiunea grosimii epruvetelor este mai afectată decât dimensiunea lățimii. Cele mai mari

erori de grosime ajung până la 11,08% (Figura 2.9b), însă cele de lăţime nu depăşesc pragul de 3,1% (Figura 2.9d).

- s-a constatat că, indiferent de parametrul investigat (GS, VP, TD și NSE), erorile de grosime sunt cele mai dispersate (până la $\pm 3,93\%$ diferență pentru VP, Figura 2.9b), în timp ce erorile de lăţime arată doar o ușoară discrepanță în cazul NSE ($\pm 1,20\%$ diferență, Figura 2.9d).

❖ **Filamentul din PLA**

- curbele tensiune-deformație și energie de absorbție-deformație ale filamenului din PLA se suprapun în mare măsură, ceea ce indică o repetabilitate ridicată a rezultatelor. Cele mai mici abateri standard, de 0,35%, se întâlnesc în cazul rezistenței la tracțiune, iar cele mai mari în cazul alungirii la rupere (1,75%).
- datele obținute pentru filamentul din PLA (Tabelul 2.3 și Figura 2.11) sunt destul de diferite de cele furnizate de producător (Tabelul 2.1). Rezistența la tracțiune obținută experimental este cu 14,25% mai mică decât cea asigurată de producător, în timp ce alungirea la rupere este cu aproximativ 78,1% mai mică.

❖ **Efectul modelului de umplere (MU)**

- cea mai mare cantitate de energie până la rupere este absorbită de modelul de umplere Honeycomb-HC (vezi Figura 2.13 și Tabelul 2.4). În comparație cu modelele Grid (GR) și Triangular (TR), epruvetele fabricate cu model HC absorb până la 33% (pentru DU=40%) și 46% (pentru DU=70%) mai multă energie.
- cele mai bune valori ale rezistenței la tracțiune se obțin în cazul modelului TR, urmat în ordine de modelele HC și GR. La o DU scăzută (40%), modelele TR și HC conduc la epruvete cu o rezistență la tracțiune de peste 29 MPa; în timp ce, modelul GR prezintă o valoare de numai 26,58 MPa. Odată cu creșterea DU la 70%, toate cele trei MU au o rezistență la tracțiune aproape similară (sub 1% diferență).

❖ **Efectul densității de umplere (DU)**

- odată cu creșterea DU de la 40 → 100%, se obține o creștere a pantei curbelor tensiune-deformație și energie de absorbție-deformație (vezi Figura 2.16). Astfel, creșterea DU are ca rezultat o creștere atât a rezistenței, cât și a rigidității epruvetelor.
- indiferent de tipul MU, cea mai mare creștere a rezistenței la tracțiune, de 39%, se găsește între DU de 70 și 100%. Între 40 și 70%, creșterea rezistenței la tracțiune este mai mică, în special pentru modelele HC și TR (doar 8%), în timp ce pentru modelul GR se obține o creștere cu 16,7%. Rezistența la tracțiune măsurată, pentru DU=100%, este de 52,46 MPa (vezi Figura 2.17).

❖ **Efectul orientării printării (OP)**

- s-a remarcat că, indiferent de OP (0, 45 sau 90°), comportamentul la tracțiune al epruvetelor este cvasi-fragil, cu o ușoară zonă de așezare premergătoare zonei liniar-elastice (vezi Figura 2.19).
- epruvetele cu OP de 0° și 90° absorb aceeași energie până la rupere (0,6 MJ/m³ pentru DU=70% și 1,2 MJ/m³ pentru DU=100%), în timp ce epruvetele cu OP de 45° absorb cu aproximativ 20% mai puțină energie de rupere pentru o DU de 70% (vezi Tabelul 2.5).

194 Concluzii și contribuții personale. Direcții noi de cercetare

- epruveta printată la 0° este cea mai rezistentă (32,22 MPa pentru DU=70% și 52,46 MPa pentru DU=100%), urmată de epruveta printată la 90° (31,67 MPa pentru DU=70% și 51,25 MPa pentru DU=100%). În schimb, epruveta cu OP la 45° a prezentat o rezistență la tracțiune de numai 30,77 MPa pentru DU=70% și 47,35 MPa pentru DU=100% (vezi Figura 2.20).
- tensiunea la rupere pentru DU=70% are valori aproximativ egale pentru toate cele trei OP, cu diferențe maxime de numai 4,8% între ele. Pe de altă parte, diferențele dintre orientările de 0/90° și OP de 45° sunt mult mai mari, de aproximativ 15,6%.

❖ **Efectul grosimii stratului (GS)**

- s-a obținut că atât nivelul tensiunilor, cât și absorbția de energie sunt influențate de GS de printare (vezi Figura 2.21). Deformația corespunzătoare rezistenței la tracțiune și alungirea la rupere cresc odată cu creșterea GS.
- proprietățile de rezistență (rezistența la tracțiune și tensiunea la rupere) și energia de rupere variază liniar cu GS. S-a constatat că odată cu creșterea GS de la 0,1 la 0,2 mm (vezi Figura 2.22), rezistența la tracțiune a epruvetelor crește cu 20,58%, de la 25,59 MPa la 32,22 MPa. Creșteri similare, de 22,80% și 34,54%, au fost observate și pentru tensiunea la rupere și energia de rupere.

❖ **Efectul vitezei de printare (VP)**

- comportarea mecanică la tracțiune a epruvetelor este influențată de VP, iar deformațiile caracteristice ale acestora cresc odată cu creșterea VP de la 20 la 60 mm/s (vezi Tabelul 2.7).
- creșterea VP induce o scădere a timpului de fabricație a epruvetelor, dar înrăutățește proprietățile la tracțiune. S-a constatat că o VP mai mare (60 mm/s) duce la o scădere a rezistenței la tracțiune cu 5,44% (de la 33,97 la 32,22 MPa). Scăderi aproape identice (5,68 și 5,93%) au fost obținute pentru tensiunea la rupere și energia de rupere (Figura 2.24).

❖ **Efectul temperaturii duzei (TD)**

- proprietățile la tracțiune cresc odată cu creșterea TD de la 210 → 220°C (vezi Figura 2.26). Cea mai mare creștere procentuală se obține pentru tensiunea la rupere (16,21%), urmată în ordine de rezistența la tracțiune (15,29%) și energia de rupere (11,8%). Proprietățile de rezistență au evidențiat cea mai mare creștere de la 200 la 210°C (12,3% pentru rezistența la tracțiune și 14,3% pentru tensiunea la rupere), în timp ce energia de rupere de la 210 la 220°C (6,6%).
- creșterea proprietăților la tracțiune cu creșterea TD este una polinomială pentru proprietățile de rezistență, respectiv una liniară pentru energia de rupere.

❖ **Efectul numărului de straturi exterioare (NSE)**

- tensiunile, deformațiile și energiile sunt influențate de NSE și cresc liniar odată cu creșterea acestuia (vezi Figura 2.29 și Tabelul 2.9).
- creșterea NSE de la 1 la 3, conduce la o creștere a proprietăților de rezistență cu peste 25%, în timp ce energia de rupere prezintă o creștere mult mai semnificativă (de 42,8% - vezi Tabelul 2.9).

❖ **Procesul de optimizare**

- procesul de optimizare a evidențiat faptul că nivelurile ideale ale celor 7 parametri de proces considerați sunt: MU (TR), DU (100%), OP (0°), GS (0,2 mm), VP (20 mm/s), TD (220°C) și NSE (3). Epruvetele optimizate au prezentat caracteristici mecanice net superioare celor inițiale (vezi Figura 2.33 și Tabelul 2.10). Cea mai mare creștere a rezistenței la tracțiune, de 12,9%, s-a obținut pentru OP de 45°, urmată de orientările de 90° (4.2%) și 0° (0.8%). Tensiunea la rupere arată o creștere doar pentru OP de 45° (15,5%), în timp ce pentru orientările de 0 și 90° se obțin scăderi de 7,1%, respectiv 1,0%. În ceea ce privește energia de rupere, aceasta prezintă creșteri de peste 10% pentru toate OP, cu un maxim la orientarea de 90° (17,5%).
- parametrii de proces optimizați afectează, uneori pozitiv, alteori negativ, acuratețea dimensională a epruvetelor printate. Erorile relative de grosime sunt mai mari în cazul probelor optimizate. Au fost înregistrate creșteri dimensionale de până la 1,86 ori mai mari (de la 3% la 5,58%, Figura 2.34b) decât în cazul epruvetelor printate inițial. Pe de altă parte, erorile de lățime ale epruvetelor optimizate prezintă valori foarte mici față de cele inițiale. În cazul lățimii epruvetelor, erorile relative au fost reduse de până la 37 de ori (de la 3,7% la 0,1%, Figura 2.34b).
- parametrii procesului cu cea mai mare influență asupra rezistenței la tracțiune sunt DU (43,41%) și NSE (25,73%), la polul opus aflându-se MU cu doar 0,99%. DU a arătat o creștere procentuală a deformației corespunzătoare rezistenței la tracțiune de 27,49%, în timp ce GS de 22,94%. S-au observat valori mai mici ale creșterii procentuale a deformațiilor pentru VP (6,52%) și MU (9,52%). Cele mai mari creșteri ale energiei de rupere au fost înregistrate de DU (59,95%) și MU (46,56%), în timp ce VP și TD au înregistrat creșteri de 5,59% și 11,80%.
- valorile inițiale și optimizate ale rezistenței la tracțiune pentru PLA obținute prin tehnologia FDM sunt în bună concordanță cu cele raportate în literatura de specialitate pentru același material. În majoritatea cazurilor, în special rezultatele optimizate, acestea sunt net superioare celor din literatură. Mai mult, rezultatele obținute se încadrează în limitele celor injectate, cu o preponderență în regiunea mijlocie-superioară (vezi Figura 2.36).

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

❖ **Efectul densității de umplere (DU)**

În acest sens s-au investigat 10 DU, și anume: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 și 100% (vezi Figura 3.7).

- epruvetele printate au prezentat o precizie dimensională foarte ridicată, obținându-se erori maxime de 0,14%. Totuși, nu au existat epruvete care să prezinte eroarea zero pentru cele trei dimensiuni investigate, cea mai mică eroare înregistrată fiind de 0,01%. Pentru toate DU (10-100%), erorile geometrice

196 Concluzii și contribuții personale. Direcții noi de cercetare

prezintă diferențe semnificative, cu excepția densității de 70% unde se obțin valori identice (0,03%).

- masele teoretice și măsurate ale epruvetelor printate cresc liniar odată cu creșterea DU (vezi Figura 3.10). Ambele mase prezintă o creștere aproximativ identică (~69,6%) cu creșterea DU. Cea mai mare diferență între cele două mase este găsită pentru DU=90% (6,12%), iar cea mai mică pentru DU=20% (3,96%) (vezi Figura 3.11).
- între epruvetele printate cu o DU de 10% și cele cu 100% se înregistrează o creștere liniară a timpului de printare cu 54,6% (vezi Figura 3.12). Cea mai mică creștere a timpului de printare, de 2,3%, este obținută între densitățile 70 și 80%, iar cea mai mare de la 30 la 40% (14,8%).
- comportamentul la compresiune al epruvetelor din PLA este unul asemănător materialelor celulare, distingându-se trei regiuni caracteristice: regiunea liniar-elastică (cea mai scurtă și este definită de comportamentul elastic al materialului), regiunea de platou (cea mai extinsă și este definită de mecanismele de cedare care au loc la nivel celular) și regiunea de densificare (definită de compactarea celulelor epruvetei), vezi Figura 3.13.
- s-a observat că la DU joase (10%) epruvetele de deformează mai pronunțat (se aplatizează mai tare), pe când la DU mari, acestea prezintă o înălțime mai mare în urma testului de compresiune (vezi Figura 3.14).
- modulul de elasticitate la compresiune crește liniar odată cu creșterea densității de umplere (vezi Figura 3.15). Diferența procentuală între valorile extreme este de 66,1%. Cea mai mare creștere a modulului la compresiune, de 29,7%, s-a obținut între densitățile 10-20%. Un aspect interesant este legat de faptul că DU de 100% prezintă valori mai mici ale modulului comparativ cu DU de 90%. În acest caz, scăderea procentuală este de 2,4%.
- toate proprietățile de rezistență cresc liniar cu creșterea DU a epruvetelor printate (vezi Figura 3.16). Astfel, rezistența la compresiune crește semnificativ (80,7%) între DU 10-90%, după care scade ușor de la 90 la 100% (2,2%). Cea mai mare creștere a rezistenței la compresiune, de 40%, se regăsește între DU 10-20%, iar cea mai mică (10,3%) între DU 40-50% (vezi Figura 3.16a). Toate celelalte tensiuni prezintă variații similare și cresc cu peste 90% între DU extreme (10-100%), și anume: 95,5% (tensiunea minimă- Figura 3.16b), 93,8% (tensiunea de platou-Figura 3.16c), respectiv 90,0% (tensiunea la densificare-Figura 3.16d). Între primele două DU (10-20%) se obține cea mai mare creștere procentuală pentru toate tensiunile (59,5%- tensiunea minimă, 58,3%- tensiunea de platou și 38,7%- tensiunea la densificare).
- deformațiile la compresiune variază liniar cu DU, cu observația că deformația corespunzătoare rezistenței la compresiune crește (46,2%), în timp ce deformația la densificare scade (33,2%) odată cu creșterea DU (vezi Figura 3.17).
- epruvetele cu DU scăzută (10%) prezintă cea mai mare lungime a platoului, aceasta scăzând liniar, cu peste 50%, odată cu creșterea DU la 100% (vezi Figura 3.18).
- s-a obținut că DU de 90% evidențiază cea mai mare valoare pentru amplitudinea tensiunii (21,50 MPa), în timp ce cea mai mică amplitudine (3,42 MPa) este găsită în dreptul DU=100% (vezi Figura 3.19). Diferența procentuală între cele două valori ale amplitudinii tensiunii este de 84,1%.

- DU influențează semnificativ performanțele energiei de absorbție, panta curbelor crescând semnificativ odată cu creșterea DU (vezi Figura 3.20). S-a observat că zona de platou absoarbe cea mai mare cantitate de energie (peste 70% din energia totală), urmată de zona de densificare, în timp ce zona liniar-elastică absoarbe o cantitate nesemnificativă de energie.
- energia absorbită la densificare, de către epruvete în timpul testelor de compresiune, crește liniar odată cu creșterea DU (vezi Figura 3.21). Diferența de energie absorbită între cea mai mică (10%) și cea mai mare (100%) DU este de peste 88%.
- cea mai mare eficiență energetică la densificare (52,46%) este identificată pentru DU=30%, iar cea mai mică (40,26%) pentru DU=100% (vezi Figura 3.22).
- din analiza diagramelor energiei de absorbție s-a obținut că DU ideală este cea de 30%. Această densitate este optimă deoarece absoarbe aceeași cantitate prescrisă de energie (12 MJ/m^3) la cea mai mică valoare a tensiunii de vârf (23,57 MPa), respectiv la o deformație de 58,92%, valoare apropiată cu deformația la densificare (64,06%).

❖ **Efectul modelului de umplere (MU)**

În acest scop, s-au analizat 17 MU, și anume: Hilbert Curve (HBC), Gyroid (GYR), Grid (GR), Cubic (CUB), Concentric (CON), Honeycomb (HC), Triangles (TR), 3D Honeycomb (3HC), Stars (STR), Archimedean Chords (ARH), Octagram Spiral (OCT), Lightning (LGT), Support Cubic (SUC), Adaptive Cubic (ADC), Line (LIN), Aligned Rectilinear (ALR) și Rectilinear (REC), vezi Figura 3.27.

- exceptând modelele LGT, STR și TR, toate celelalte MU prezintă erorile de înălțime mai mici sau cel mult egale cu erorile de lățime. Cele mai mari erori de înălțime le prezintă modelul LGT (0,08%), iar cele mai mici modelele REC și CON (0,01%). Erorile de lățime cele mai mari, de 0,14%, sunt evidențiate de către modelul GR, în timp ce singurul MU care prezintă erorile 0% este modelul TR (vezi Figura 3.29).
- indiferent de MU analizat, masa teoretică este mai mare decât masa măsurată a epruvetelor. Modelul GR prezintă cea mai mică diferență între masa teoretică și cea măsurată, în timp ce diferența majoră este înregistrată de modelul REC. Cea mai scăzută masă este identificată în dreptul modelului LGT (7,07 g), iar ce mai mare este obținută de către modelul HC (16,50 g). S-a observat că majoritatea MU prezintă mase cuprinse între 15,1-15,6 g (vezi Figura 3.30). Erori relative de masă extreme s-au obținut pentru modelele GR (4,55%) și REC (6,96%). Majoritatea erorilor sunt grupate în două intervale majore, și anume: 4,5-5,1% și 6,5-6,7% (vezi Figura 3.31).
- cel mai favorabil timp de printare (62,75 min) este obținut de către epruvetele fabricate cu modelul de umplere LGT, urmat foarte îndeaproape de modelul SUC (65,50 min). Modelele HC și LGT prezintă cei mai mari timpi de printare (129,25 și 124,00 min), vezi Figura 3.32.
- majoritatea MU prezintă o deformare plastică pronunțată cu o regiune de platou extinsă. Cu toate acestea, s-au identificat două MU (LGT și SUC) care prezintă o rupere fragilă, ruperea având loc imediat după atingerea tensiunii maxime la compresiune (vezi Figura 3.33).

198 Concluzii și contribuții personale. Direcții noi de cercetare

- modelele HBC (745,35 MPa) și STR (722,40 MPa) evidențiază singurele valori ale modulului la compresiune de peste 700 MPa, în timp ce modelele LGT (261,43 MPa) și SUC (325,97 MPa) prezintă cele mai mici valori, vezi Figura 3.35.
- s-a observat că doar patru DU (HBC, STR, GR și TR) dau valori ale rezistenței la compresiune peste 30 MPa, marea majoritate a valorilor grupându-se în intervalul 20-25 MPa. Cele mai mici valori ale rezistenței la compresiune sunt înregistrate de către modelele LGT (7,53 MPa) și SUC (10 MPa), vezi Figura 3.36.
- cea mai mare valoare a tensiunii minime este de 24,38 MPa dată de modelul HC, iar cea mai mică, de 2 MPa, este identificată în dreptul modelului CON (se exclud cele două cazuri LGT și SUC care prezintă o rupere fragilă și au tensiunea minimă 0), vezi Figura 3.36.
- modelul HC prezintă tensiunea de platou de aproximativ 32 MPa, cu peste 38% mai mare decât MU următor (GR). Pentru modelele LGT și SUC, datorită formei curbei tensiune-deformație, nu a fost posibilă determinarea tensiunii de platou.
- diferențele între deformațiile caracteristice la compresiune sunt de peste 84%. Modelul 3HC (7,16%) înregistrează singura deformație la rezistența maximă peste 7%, în timp ce doar două MU (SUC-3,96% și LGT-3,64%) prezintă valori sub 4%. Deformația la densificare prezintă valorile extreme pentru modelele ADC (68,35%) și CON (27,37%), vezi Figura 3.37.
- modelul de umplere ADC evidențiază cea mai lungă regiune de platou (62,92%), pe când modelul CON este caracterizat de cea mai scurtă regiune (23,18%). Modelele LGT și SUC au o lungime a platoului egală cu 0 deoarece pe durata testului acestea nu ajung în regiunea de densificare, vezi Figura 3.37.
- modelul de umplere HBC prezintă cea mai mare amplitudine a tensiunii (28,35 MPa), fiind urmat, la o diferență procentuală destul de mare (37,7%), de modelul STR (17,65 MPa). Cea mai mică amplitudine o prezintă modelul 3HC (3,01 MPa), vezi Figura 3.39.
- datorită ariei extinse de sub curbele tensiune-deformație (vezi Figura 3.33), modelul HC absoarbe cea mai mare cantitate de energie până la densificare (17,90 MJ/m³), acesta fiind urmat de modelul STR (14,51 MJ/m³). Valorile minime ale energiei sunt absorbite de către modelele LGT (0,14 MJ/m³) și SUC (0,28 MJ/m³), vezi Figura 3.41.
- cea mai mare eficiență energetică este identificată în dreptul modelelor CON (67,84%) și HBC (60,78%), acestea fiind singurele care prezintă valori peste 60%. Modelele LGT (17,05%) și SUC (30,71%) prezintă valorile minime ale eficienței. Marea majoritate a MU investigate prezintă eficiențe energetice în domeniul procentual 45-57%, vezi Figura 3.42.
- pentru identificarea corectă a MU optim s-a parcurs un amplu proces de optimizare. Astfel, pe baza rezultatului final dat de către Matricea Decizională, modelul de umplere STR prezintă modelul optim care satisface cel mai bine criteriile de evaluare (proprietățile) propuse. Opțiunea cea mai nefavorabilă se identifică cu modelul LGT, vezi Tabelul 3.7.

❖ **Efectul formei epruvetelor**

S-au investigat 16 geometrii de epruvete, și anume: prisme cu 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22 și ∞ laturi (vezi Figura 3.43).

- cele mai mari erori de înălțime s-au înregistrat pentru epruvetele prismatice cu 9 laturi (0,27%), iar cele mai mici pentru cele cu 4 laturi (0,05%), vezi Figura 3.45.
- masa teoretică maximă se identifică în dreptul prisme triunghiulare (15,68 g), în timp ce prisma patrulateră evidențiază cea mai mare masă măsurată (14,31 g). De partea cealaltă, masele minime (14,70 g-masa teoretică și 13,52 g-masa măsurată) se găsesc în dreptul prisme cu 22 de laturi (vezi Figura 3.46). Prisma patrulateră prezintă cea mai mică diferență procentuală între masa teoretică și masa măsurată (5,85%), în timp ce diferența majoră este înregistrată de prisma cu 9 laturi (9,02%), vezi Figura 3.47.
- majoritatea epruvetelor au prezentat un timp de printare de 75 sau 76 minute. Cel mai mare timp de printare este obținut de către epruvetele prismatice triunghiulare (83 minute), iar cel mai favorabil este găsit în dreptul prisme hexagonale (72 minute), vezi Figura 3.48.
- s-a observat că pe regiunea liniar-elastică curbele tensiune-deformație se suprapun, diferențele majore între comportamentele la compresiune fiind evidențiate de către sfârșitul regiunii de platou și începutul regiunii de densificare, vezi Figura 3.49.
- valorile modulului la compresiune sunt destul de apropiate, obținându-se o deviație standard a acestora de 17,18 MPa. Cu toate acestea, epruveta cu 4 laturi (cub) se evidențiază cu cel mai mare modul (725,45 MPa), în timp ce epruveta prismatică cu 7 laturi prezintă cea mai mică valoare (674,65 MPa), vezi Figura 3.51.
- epruveta cubică prezintă cele mai mari valori ale rezistenței la compresiune (30,61 MPa), urmată îndeaproape de epruvetele cu 8 (30,36 MPa), 3 (30,31 MPa) și cele cu 5 (30,30 MPa) laturi. Cea mai mică valoare, de 27,54 MPa, este identificată în dreptul epruvetei prismatice cu 22 de laturi, vezi Figura 3.52.
- tensiunea de platou și tensiunea minimă prezintă valorile extreme pentru epruvetele cu 14 (maxime) și cele cu 3 (minime) laturi. Marea majoritate a tensiunilor de platou se găsesc în intervalul 17-18 MPa, iar tensiunile minime în intervalul 14,5-15,5 MPa. Ambele tensiuni prezintă diferențe de aproximativ 23% între valorile extreme, vezi Figura 3.52.
- s-a obținut că diferența procentuală între valorile maxime (28,48 MPa pentru epruveta cu 4 laturi) și minime (20,57 MPa pentru epruveta cu 14 laturi) ale tensiunii la densificare este de 27,8%, vezi Figura 3.52.
- deformațiile la rezistența maximă sunt foarte apropiate pentru toate geometriile, obținându-se deviații standard de doar 0,16% între acestea. Totuși, epruveta prismatică cu 9 laturi prezintă cea mai mare valoare a deformației (6,06%), iar cea cu 18 laturi cea mai mică valoare (5,42%). Diferențe mult mai mari se obțin în ceea ce privește deformația la densificare. În acest caz, cea mai mare deformație este înregistrată de către epruveta cu 4 laturi (68,04%), valoare de 1,4 ori mai mare decât cea minimă (epruveta cu 14 laturi), vezi Figura 3.53.
- s-a observat că epruveta prismatică patrulateră prezintă cel mai extins platou (62,53%), fiind urmată de epruvetele cu 20 (61,45%), 12 (60,61%), 10 (60,48%) și 16 (60,34%) laturi. La polul opus, epruveta prismatică cu 14 laturi evidențiază cea mai mică extindere a platoului, și anume 44,23%. Majoritatea rezultatelor se găsesc în intervalul 56-59%, Figura 3.54.

200 Concluzii și contribuții personale. Direcții noi de cercetare

- cele mai multe rezultate ale amplitudinii tensiunii sunt grupate în intervalul 12,5-15,5 MPa. Rezultatele extreme se obțin pentru prisma triunghiulară (16,25 MPa), respectiv pentru epruveta cu 14 laturi (9,68 MPa), vezi Figura 3.55.
- s-a obținut că prisma patrulateră absoarbe cea mai mare cantitate de energie (14,06 MJ/m³). Cele mai mici valori sunt obținute în dreptul epruvetelor cu 14 (10,69 MJ/m³) și 8 (10,97 MJ/m³) laturi, vezi Figura 3.57.
- cea mai mare eficiență s-a obținut pentru epruveta prismatică cu 20 laturi (54,37%), iar cea mai mică pentru cea cu 8 laturi (47,69%). Majoritatea valorilor eficienței sunt peste 50%, vezi Figura 3.58.
- din analiza proprietăților fizice (erori relative de înălțime și masă, timp de printare) și mecanice (proprietăți elastice și de rezistență, performanțe de absorbție a energiei) s-a constatat că, în comparație cu toate celelalte geometrii investigate, epruveta prismatică patrulateră prezintă cele mai multe avantaje.
- studiul de optimizare prezentat în Capitolul 3 scoate în evidență parametrii optimi care trebuie utilizați pentru a obține proprietăți maxime ale epruvetelor din PLA printate prin tehnologia FDM, și anume: densitatea de umplere: 30%, modelul de umplere: STAR și geometria epruvetei: CUB.

Capitolul 4 este dedicat influenței parametrilor de proces (grosimea stratului, grosimea epruvetelor, direcția de printare, tipul creștăturii și tipul de imprimantă) asupra comportamentului la rupere (în modul I și II pur de încărcare) al epruvetelor din PLA fabricate prin tehnologia FDM. Pentru determinarea proprietăților de rupere (tenacitatea la rupere, energia de rupere și modul de propagare a fisurii în modurile I și II de rupere) s-a utilizat epruveta cu o creștătură laterală (vezi Figura 4.2). Astfel, pentru obținerea modului I s-a realizat o încărcare simetrică a epruvetei, pe când modul II de rupere a fost obținut printr-o încărcare asimetrică (vezi Figura 4.5). Se pot trage următoarele concluzii:

- s-a obținut că pentru ambele moduri de încărcare, valorile tenacității la rupere sunt mai mari pentru orientarea de 0° (4,686 MPa·m^{0,5} pentru modul I și 2,978 MPa·m^{0,5} pentru modul II), urmate de cele la 90° (4,295 MPa·m^{0,5} pentru modul I și 2,931 MPa·m^{0,5} pentru modul II), iar valorile inferioare corespund orientării de 45° (3,963 MPa·m^{0,5} pentru modul I și 2,780 MPa·m^{0,5} pentru modul II), vezi Figura 4.7.
- în cazul încărcării epruvetelor în modul I (încărcare simetrică), valori extreme ale energiei de rupere s-au înregistrat pentru direcțiile de 0 și 45°. Contrar, modul II de încărcare (asimetrică) a evidențiat cea mai mare energie de rupere pentru direcția de 45° (vezi Figura 4.8).
- s-a observat că, indiferent de tipul încărcării (modul I sau II), ruperea s-a inițiat din vârful creștăturii. Pentru orientările de 0 și 90°, corespunzătoare încărcării simetrice, fisura se inițiază de-a lungul creștăturii pentru primele două straturi de printare (pereții exteriori), apoi se propagă la 45° după unghiul raster. Pentru modul I de încărcare și orientarea la 45°, fisura se inițiază și se propagă de-a lungul liniei bisectoarei creștăturii (vezi Figura 4.9). Încărcarea asimetrică arată o inițiere înclinată a fisurii, urmată de o propagare de-a lungul unghiului raster (vezi Figura 4.10). O zonă a procesului de rupere mai mare a putut fi observată pentru modul II și orientarea de 45° (Figura 4.10b), ceea ce ar putea explica valoarea mai mare a energiei de rupere pentru acest caz.

- s-a obținut că suprafețele de rupere ale epruvetelor printate evidențiază profile 3D diferite în funcție de direcția de printare. Cele mai plate suprafețe de rupere sunt obținute la 45°, iar celelalte două direcții (0 și 90°) prezintă profile optice destul de neregulate, vezi Figurile 4.11 și 4.12.
- cea mai mare valoare a tenacității la rupere în modul I (K_{IC}) a fost obținută pentru epruvetele cu creștătură printată 3D și cu grosimea de 10 mm (6,54 MPa·m^{0,5}), urmate de epruvetele cu creștătură frezată (5,77 MPa·m^{0,5}), vezi Tabelul 4.4.
- epruvetele printate pe imprimanta 3D Platform dau valori ale K_{IC} mai mari decât cele obținute pe imprimanta Prusa (vezi Tabelul 4.4). Aceeași tendință a fost observată pentru tenacitatea la rupere în modul II de rupere (K_{IIC}), vezi Tabelul 4.5.
- valori aproape similare ale K_{IIC} (2,98 și 3 MPa·m^{0,5}) au fost obținute pe epruvetele fabricate pe imprimanta Prusa cu creștătură printată 3D pentru diferite grosimi (6 și 10 mm), vezi Tabelul 4.5.
- cea mai mică valoare a K_{IIC} a fost obținută pentru epruvetele obținute pe imprimanta Prusa, cu creștătură frezată (2,43 MPa·m^{0,5}), vezi Tabelul 4.5.
- raportul K_{IIC}/K_{IC} variază între 0,55 – 0,59 pentru imprimanta 3D Platform și, respectiv, între 0,57 – 0,74 pentru imprimanta Prusa, vezi Figura 4.13.
- rezultatele obținute pe imprimanta 3D Platform se potrivesc cu ecuația M_3 (pentru $M_3 = 1$ MPa·m), în timp ce, în acord cu ecuația M_2 (pentru $M_2 = 0,1$ m^{0,5}) sunt cele de la imprimanta Prusa, vezi Figura 4.14.

Capitolul 5 se concentrează pe comportamentul la impact simplu și impact multiplu al probelor din PLA printate prin tehnologia FDM. Pentru evaluarea proprietăților la impact (absorbția totală de energie, absorbție specifică de energie și forțele maxime suportate de epruvete) s-au folosit trei tipuri de impactori (trunchi de con-TC, emisferic cu diametrul de 10 mm-H10 și emisferic cu diametrul de 20 mm-H20), precum și diferite energii de impact ($E_i=5, 10, 20, 30$ și 40 J). În urma investigațiilor se pot trage următoarele concluzii:

- cea mai mare eroare procentuală dimensională a fost înregistrată de înălțimea epruvetelor (0,32%), în timp ce valori aproape similare (0,05% și 0,08%) au fost înregistrate pentru lățimile epruvetelor.
- datorită valorilor mult mai reduse ale masei măsurate (38,51 g) față de masa teoretică (41,49 g), s-a obținut o valoare a erorii relative de masă de 7,19%.
- s-a obținut că pentru printarea unei epruvete de impact (60 mm × 60 mm × 25,5 mm) este necesar un timp de printare de 169 minute.

❖ **Impact simplu**

- s-a observat că, indiferent de tipul impactorului, forțele maxime înregistrate cresc pentru primele energii de impact, după care descresc în cazul ultimei energii.
- absorbția totală de energie și absorbția specifică de energie pentru impactorii H10 și H20 cresc liniar odată cu creșterea energiei de impact, în timp ce impactorul TC prezintă o variație polinomială a celor două energii.
- cea mai mare forță la impact este obținută de către impactorul H20 (4190,35 N pentru 20 J și 4324,95 N pentru 30 J), urmat în ordine de impactorul TC (3575,84 N pentru 20 J și 3294,93 N pentru 30 J) și impactorul H10 (1650,39 N pentru 20 J și 1673,80 N pentru 30 J), vezi Figura 5.6a,b.

202 Concluzii și contribuții personale. Direcții noi de cercetare

- absorbția specifică de energie la o energie de impact de 20 J este maximă pentru impactorul H10 (0,57 J/g), iar minimă pentru H20 (0,47 J/g). Pentru o energie de impact de 30 J, valorile maxime ale absorbției specifice de energie sunt observate în dreptul impactorului TC (0,87 J/g), iar cele minime în dreptul H20 (0,75 J/g).
- absorbția totală de energie urmează același tipar ca și absorbția specifică de energie, evidențiind valorile maxime pentru impactorii H10 (21,32 J pentru $E_i=20$ J) și TC (32,55 J pentru $E_i=30$ J), iar cele minime pentru H20 (17,62 J pentru $E_i=20$ J) și H20 (27,99 J pentru $E_i=30$ J).
- din analiza curbelor viteză-timp se poate concluziona că pentru $E_i=20$ J (Figura 5.6c) epruvetele nu sunt perforate de către nici unul dintre cei trei impactori. În ceea ce privește epruvetele testate cu $E_i=30$ J (vezi Figura 5.6d), se poate observa că doar impactorul TC perforază epruveta (singura curbă la care viteza nu coboară sub zero).
- s-a observat că, indiferent de tipul impactorului, la energii de impact joase epruvetele prezintă o perforare a zonei de contact și o densificare zonală a miezului. Odată cu creșterea energiei de impact spre valori superioare, epruvetele prezintă o perforare atât a fețelor cât și a miezului, vezi Tabelele 5.3-5.5 și Figura 5.10.

❖ **Impact multiplu**

- s-a obținut că valorile maxime ale forțelor sunt oferite de către impactorul H20. În acest caz, impactorul H20 prezintă valori ale forțelor maxime cu 10,6% (impact 1) și 21,5% (impact 2) mai mari decât impactorul TC, respectiv cu 57,2% (impact 1) și 43,5% (impact 2) mai mari decât impactorul H10, vezi Tabelul 5.6.
- valorile maxime pentru absorbția totală de energie sunt obținute în cazul impactorilor H10 (impact 1) și H20 (impact 2), vezi Tabelul 5.6.
- în cazul impactului 1 (5 J), absorbția specifică de energie prezintă valori maxime pentru impactorul H10 (0,07 J/g), în timp ce pentru impactul 2 (10 J), impactorii H10 și H20 prezintă valori egale și maxime (0,22 J/g), vezi Tabelul 5.6.

Capitolul 6 are ca obiectiv determinarea comportamentului la oboseală al epruvetelor din PLA prin efectuarea unor teste de oboseală de tipul *compresiune - compresiune*. Principalele concluzii se pot enunța astfel:

- toate cele trei dimensiuni ale epruvetelor (înălțimea h , lățimea b_1 și lățimea b_2) au prezentat valori ale erorii procentuale dimensionale sub 0,04% (0,04% pentru h , respectiv 0,03% pentru b_1 și b_2), vezi Tabelul 6.1.
- eroarea relativă de masă este de 6,66%, aspect datorat valorilor mult mai reduse ale masei măsurate (14,1288 g) față de cea teoretică (15,1375).
- s-a obținut că timpul necesar pentru printarea 3D a unei epruvete din PLA, supuse testului de oboseală, este de 78 min.
- proprietățile cvasi-stactice preliminare evidențiază un modul la compresiune de 722,4 MPa, respectiv valori de 33,3 MPa (tensiunea de curgere) și 6,6% (deformația la curgere) aferente limitei de curgere, vezi Tabelul 6.2.
- scăderea bruscă a forței sau creșterea accentuată a deplasării a determinat numărul de cicluri până la rupere pentru un anumit nivel de încărcare (vezi Figurile 6.4 și 6.5, și Tabelul 6.3).

- în domeniul de încărcări ales (26,9-12 kN), deformația la rupere scade, după o lege de putere, de peste 3 ori (67,3%) odată cu creșterea numărului de cicluri până la rupere (vezi Figura 6.6).
- cu datele obținute (tensiunile aplicate și numărul de cicluri până la rupere) s-a trasat curba de durabilitate Wöhler împreună cu limitele de încredere (95%), vezi Figura 6.67.
- s-a observat că la cicluri joase ($<10^3$) rezultate sunt mai împrăștiate, iar odată cu creșterea numărului de cicluri acestea sunt mai grupate (vezi Figura 6.7).
- în urma efectuării testelor de oboseală oligociclică, ruperea epruvetelor s-a produs brusc prin apariția unei benzi de deformare pe toată lățimea epruvetelor (vezi Figura 6.2c).

7.2. Contribuții personale

Principalele contribuții personale, asociate fiecărui capitol al tezei de doctorat, sunt următoarele:

❖ **Capitolul 1**

- Elaborarea unui amplu studiu bibliografic privind prototiparea rapidă (§1.1), tehnologiile de fabricație aditivă (§1.2), precum și caracteristicile definiției (parametrii de proces, materialele pentru filament, proprietățile, domeniile de utilizare, avantajele și dezavantajele) ale componentelor obținute cu ajutorul procesului de modelare prin depunere fuzionată (§1.3).

❖ **Capitolul 2**

- Întocmirea unei sinteze documentare asupra stadiului actual al cercetărilor științifice privind comportamentul la tracțiune al componentelor printare 3D (§2.1 și §2.4.3.1-7).
- Conceperea și realizarea unui studiu de optimizare la tracțiune privind efectul a șapte parametri de proces (modelul de umplere, densitatea de umplere, orientarea printării, grosimea stratului, viteza de printare, temperatura duzei și numărul de straturi exterioare) asupra principalelor proprietăți la tracțiune (acuratețea dimensională, tensiunile și deformațiile caracteristice, energia de rupere) ale componentelor printate 3D (§2.2).
- Printarea a peste 100 de epruvete din PLA, prin tehnologia FDM, pentru evaluarea comportamentului la tracțiune (§2.3.2).
- Evaluarea dimensională a epruvetelor printate și testate la tracțiune (§2.4.1 și §2.4.4).
- Evaluarea proprietăților filamentului din PLA și compararea proprietăților acestuia cu proprietățile furnizate de producător (§2.4.2).
- Evaluarea proprietăților epruvetelor din PLA printate 3D în funcție de parametrul de proces investigat și identificarea celui optim (§2.4.3.1-7).
- Propunerea unor ecuații în baza cărora se corelează proprietățile la tracțiune în funcție de cei șapte parametri de proces investigați (§2.4.3.1-7).
- Prezentarea unei diagrame privind influența procentuală a celor șapte parametri de proces investigați asupra rezistenței la tracțiune, deformației corespunzătoare rezistenței la tracțiune și energiei de rupere.

- Realizarea unor comparații ale rezultatelor obținute la tracțiune (inițiale și optimizate) cu cele raportate în literatura de specialitate (§2.5).

❖ **Capitolul 3**

- Întocmirea unei sinteze documentare asupra stadiului actual al cercetărilor științifice privind comportamentul la compresiune al componentelor printare 3D (§3.1).
- Conceperea și realizarea unui studiu de optimizare la compresiune privind efectul principalilor parametri de proces (densitatea de umplere, modelul de umplere și geometria epruvetelor) asupra proprietăților fizice și mecanice (acuratețea dimensională și de masă, timpul de printare, proprietățile elastice și de rezistență, deformațiile caracteristice și performanțele de absorbție a energiei) ale componentelor din PLA fabricate prin tehnologia FDM (§3.2).
- Printarea a peste 200 de epruvete din PLA, prin tehnologia FDM, pentru evaluarea comportamentului la compresiune (§3.3.2).
- Evaluarea proprietăților fizice ale epruvetelor testate la compresiune (§3.4.1, §3.5.1 și §3.6.1).
- Identificarea regiunilor caracteristice ale curbelor tensiune-deformație la compresiune: regiunea liniar elastică, regiunea de platou și regiunea de densificare (§3.4.2, §3.5.2 și §3.6.2).
- Integrarea în premieră, în cadrul componentelor printate 3D, a diagramelor de absorbție a energiei (asociate materialelor celulare - în special spumelor polimerice), în vederea identificării densității de umplere optime (§3.4).
- Aplicarea în premieră, în cadrul componentelor printate 3D, a Matricei Decizionale (Matricea Pugh sau Analiza Grid), pentru identificarea corectă a modelului de umplere optim al epruvetelor (§3.5).
- Realizarea unui studiu experimental, pe baza proprietăților fizice și mecanice, privind alegerea geometriei ideale a epruvetelor, în vederea obținerii proprietăților maxime la compresiune (§3.6).
- Propunerea unor ecuații în baza cărora se corelează proprietățile mecanice în funcție de cei trei parametri de proces investigați (densitatea de umplere, modelul de umplere și geometria epruvetelor), (§3.4.2, §3.5.2 și §3.6.2).

❖ **Capitolul 4**

- Întocmirea unei sinteze documentare asupra stadiului actual al cercetărilor științifice privind comportamentul la rupere fragilă al componentelor printare 3D (§4.1).
- Printarea a peste 80 de epruvete din PLA, prin tehnologia FDM, pentru evaluarea comportamentului la rupere fragilă (§4.3.2).
- Determinarea proprietăților de mecanica ruperii, pe epruvete paralelipipedice cu o creștătură laterală, prin teste de încovoiere în patru puncte simetrice (modul I) și asimetrice (modul II), (§4.4).
- Prezentarea direcțiilor de inițiere și propagare a fisurilor, împreună cu profilele 3D ale suprafețelor de rupere ale epruvetelor, în funcție de tipul încărcării (modul I și II) și direcția de printare (0, 45 și 90°), (§4.4).

- Determinarea variației raportului K_{IIc}/K_{IC} (tenacitatea la rupere în modul II și modul I) în funcție de parametrii de rupere investigați (grosimea stratului, grosimea epruvetelor, direcția de printare, tipul creștăturii și tipul imprimantei), (§4.4).
- Prezentarea interacțiunii dintre proprietățile mecanice (rezistența la tracțiune) și de rupere (tenacitatea la rupere) ale componentelor din PLA într-o diagramă de proiectare a proprietăților (§4.5).

❖ **Capitolul 5**

- Întocmirea unei sinteze documentare asupra stadiului actual al cercetărilor științifice privind comportamentul la impact al componentelor printare 3D (§5.1).
- Determinarea comportamentului la impact simplu (§5.4.2) și impact multiplu (§5.4.3) al epruvetelor din PLA printate 3D, utilizând diferite tipuri de impactori (emisferic cu diametrul de 10 mm, emisferic cu diametrul de 20 mm și trunchi de con), precum și diferite energii de impact (5, 10, 15, 20, 30 și 40 J).
- Printarea a peste 50 de epruvete din PLA, prin tehnologia FDM, pentru evaluarea comportamentului la impact (§5.3.2).
- Evaluarea proprietăților fizice ale epruvetelor testate la impact (§5.4.1).
- Raportarea în premieră a proprietăților de absorbție a energiei (absorbția totală de energie și absorbție specifică de energie) și integritate a structurii (încărcările maxime suportate de epruvete) pentru teste de impact cu viteză redusă.
- Propunerea unor ecuații în baza cărora se corelează absorbția totală de energie, absorbție specifică de energie și deplasările în funcție de energia de impact.
- Realizarea unor comparații, la impact simplu și impact multiplu, a curbelor forță-deplasare și viteză-timp, pentru cei trei impactori investigați.
- Prezentarea mecanismului de cedare, prin imagini macroscopice și radiografice ale epruvetelor testate, în funcție de tipul impactorului și energia utilizată.

❖ **Capitolul 6**

- Întocmirea unei sinteze documentare asupra stadiului actual al cercetărilor științifice privind comportamentul la oboseală al componentelor printare 3D (§6.1).
- Printarea a peste 30 de epruvete din PLA, prin tehnologia FDM, pentru evaluarea comportamentului la oboseală (§6.3.2).
- Evaluarea proprietăților fizice ale epruvetelor testate la oboseală (§6.4.1).
- Determinarea nivelurilor de încărcare a epruvetelor la oboseală pe baza testelor cvasi-stactice de compresiune (§6.4.2).
- Primele rezultate privind comportamentul la oboseală al probelor din PLA prin efectuarea unor teste ciclice de tipul compresiune - compresiune (§6.4.3).
- Determinarea numărului de cicluri până la rupere în funcție de nivelul de încărcare aplicat epruvetei (§6.4.3).
- Prezentarea variației deformației la rupere cu numărul de cicluri pentru diferite niveluri de încărcare și a ecuației de prezicere a acesteia (§6.4.3).
- Trasarea curbei de durabilitate Wöhler împreună cu limitele de încredere (§6.4.3).
- Identificarea modului de deformare al epruvetelor pe durata testelor de oboseală (§6.4.3).

7.3. Direcții noi de cercetare

Având în vedere vasta problematică a componentelor obținute prin prototipare rapidă, autorul a identificat o serie de noi direcții de cercetare. Mai jos, se amintesc doar câteva dintre acestea:

- Investigarea efectului a noi parametri (temperatură, anizotropie, de scară, viteză de încărcare, îmbătrânire, recoacere, etc.) asupra comportamentului mecanic al componentelor printate 3D. Pentru aceste investigații se vor utiliza parametrii de proces optimizați în Capitolele 2 și 3.
- Utilizarea de noi configurații de epruvete și încărcări în vederea determinării proprietăților de mecanica ruperii în modurile mixte I+II, I+III, II+III și I+II+III.
- Determinarea comportamentului la impact al componentelor printate 3D utilizând teste de impact de mare viteză (aparatură de tipul Split Hopkinson Pressure Bar).
- Efectuarea de noi teste de oboseală de tipul compresiune-compresiune la cicluri medii și înalte, precum și extinderea testelor ciclice pe alte geometrii de epruvete și configurații de testare (tracțiune, încovoiere, răsucire).
- Extinderea studiului în vederea determinării comportamentului experimental la încovoiere al componentelor printate 3D și al structurilor de tip sandwich cu miez celular printat.
- Utilizarea de filament PLA ranforsat (fibră de sticlă, fibră de carbon, grafen, etc.), printarea de epruvete (tracțiune, compresiune, etc.) cu parametrii optimi din studiul curent, testarea epruvetelor și compararea rezultatelor cu cele obținute în cercetarea curentă.
- Fabricarea de epruvete din alte materiale polimerice (ABS, PETG, PEEK, etc.), testarea acestora (tracțiune, compresiune, etc.) și compararea rezultatelor cu cele din cercetarea curentă.
- Realizarea de analize numerice (Abaqus, Ansys, etc.) și statistice (ANOVA, Taguchi L9, etc.) în vederea determinării parametrilor optimi pentru proprietăți maxime.
- Realizarea unor analize microstructurale ale epruvetelor testate și efectuarea unor corelații între acestea și proprietățile mecanice ale componentelor printate 3D.

BIBLIOGRAFIE

- [1] W.E. Frazier, Metal Additive Manufacturing: A Review, *J. Mater. Eng. Perform.* 23 (2014) 1917-1928.
- [2] T. Pereira, J.V. Kennedy, J. Potgieter, A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job, *Procedia Manuf.* 30 (2019) 11-18.
- [3] S.H. Huang, P. Liu, A. Mokasdar, L. Hou, Additive manufacturing and its societal impact: A literature review, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 67 (2012) 1191-1181.
- [4] A. Mitchell, U. Lafont, M. Hołyńska, C. Semprimoschnig, Additive manufacturing – A review of 4D printing and future applications, *Addit. Manuf.* 24 (2018) 606-626.
- [5] M. Vaezi, H. Seitz, S. Yang, A review on 3D micro-additive manufacturing technologies, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 67 (2012) 1721-1754.
- [6] R.B. Kristiawan, F. Imaduddin, D. Ariawan, Z. Arifin, A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters, *Open Eng.* 11 (2021) 639-649.
- [7] C. Xia, Z. Pan, J. Polden, H. Li, Y. Xu, S. Chen, Y. Zhang, A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system, *J. Manuf. Syst.* 57 (2020) 31-45.
- [8] M. Pagac, J. Hajnys, Q.P. Ma, L. Jancar, J. Jansa, P. Stefek, J. Mesicek, A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing, *Polymers* 13 (2021) 598.
- [9] P. Jain, A.M. Kuthe, Feasibility study of manufacturing using rapid prototyping: FDM approach, *Procedia Eng.* (2013) 4–11.
- [10] N. Nkomo, J. Gwamuri, N. Roselyn, S. Ndebele, L. Nkiwane, N.Z. Nkomo, N.R. Sibanda, L.C. Nkiwane, A Study of Applications of 3D Printing Technology and Potential Applications in the Plastic Thermoforming Industry, 2017.
- [11] E. Cuan-Urquizo, E. Barocio, V. Tejada-Ortigoza, R.B. Pipes, C.A. Rodriguez, A. Roman-Flores, Characterization of the mechanical properties of FFF structures and materials: a review on the experimental, computational and theoretical approaches, *Materials* 16 (2019) 895.
- [12] J.C. Riddick, M.A. Haile, R. Von Wahlde, D.P. Cole, O. Bamiduro, T.E. Johnson, Fractographic analysis of tensile failure of acrylonitrile-butadiene-styrene fabricated by fused deposition modeling, *Addit. Manuf.* 11 (2016) 49–59.
- [13] A.A. Ansari, M. Kamil, Effect of print speed and extrusion temperature on properties of 3D printed PLA using fused deposition modeling process, *Mater. Today Proc.* (2021) 5462–5468.
- [14] T.C. Yang, C.H. Yeh, Morphology and mechanical properties of 3D printed wood fiber/polylactic acid composite parts using fused deposition modeling (FDM): the effects of printing speed, *Polymers* 12 (2020) 1334.
- [15] A. Alafaghani, A. Qattawi, Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method, *J. Manuf. Process.* 36 (2018) 164–174.
- [16] R. Rezaei, M.R. Karamooz Ravari, M. Badrossamay, M. Kadkhodaei, Mechanical characterization and finite element modeling of polylactic acid BCC-Z cellular

208 Bibliografie

- lattice structures fabricated by fused deposition modeling, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 231 (2017) 1995–2004.
- [17] B.I. Oladapo, S.O. Ismail, T.D. Afolalu, D.B. Olawade, M. Zahedi, Review on 3D printing: fight against COVID-19, *Mater. Chem. Phys.* 258 (2021), 123943.
- [18] R. Tino, R. Moore, S. Antoline, P. Ravi, N. Wake, C.N. Ionita, J.M. Morris, S.J. Decker, A. Sheikh, F.J. Rybicki, L.L. Chepelev, COVID-19 and the role of 3D printing in medicine, *3D Print. Med.* 61 (2020) 1–8.
- [19] M. Goswami, A.K. Yadav, și colab., Facile development of graphene-based air filters mounted on 3D printed mask for COVID-19, *J. Sci. Adv. Mater. Devices* (2021).
- [20] C. Hu, W.N.J. Hau, W. Chen, Q.H. Qin, The fabrication of long carbon fiber reinforced polylactic acid composites via fused deposition modelling: experimental analysis and machine learning, *J. Compos. Mater.* 55 (2021) 1459–1472.
- [21] J.A. Taborda-Ríos, O. López-Botello, P. Zambrano-Robledo, L.A. Reyes-Osorio, C. Garza, Mechanical characterisation of a bamboo fibre/polylactic acid composite produced by fused deposition modelling, *J. Reinf. Plast. Compos.* 39 (2020) 932–944.
- [22] J.G. Díaz-Rodríguez, A.D. Pertúz-Comas, O.A. González-Estrada, Mechanical properties for long fibre reinforced fused deposition manufactured composites, *Compos. Part B Eng.* 211 (2021), 108657.
- [23] X. Zhang, W. Fan, T. Liu, Fused deposition modeling 3D printing of polyamidebased composites and its applications, *Compos. Commun.* 21 (2020) 100413.
- [24] M.N. Ahmad, M.K. Wahid, și colab., Mechanical characteristics of oil palm fiber reinforced thermoplastics as filament for fused deposition modeling (FDM), *Adv. Manuf.* 8 (2020) 72–81.
- [25] A.D. Pertuz, S. Díaz-Cardona, O.A. González-Estrada, Static and fatigue behavior of continuous fibre reinforced thermoplastic composites manufactured by fused deposition modelling technique, *Int. J. Fatigue* 130 (2020) 105275.
- [26] V. Tambrallimath, R. Keshavamurthy, P.G. Koppad, D. Sethuram, Mechanical characterization of PC-ABS reinforced with CNT nanocomposites developed by fused deposition modelling, *J. Phys. Conf. Ser.* (2020), <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1455/1/012003>.
- [27] H. Wu, L. Liu, Y. Cai, P. Qian, C. Zhang, B. Li, A novel gradient graphene composite with broadband microwave absorption fabricated by fused deposition modelling, *Mater. Technol.* (2020), <https://doi.org/10.1080/10667857.2020.1837487>.
- [28] L. Yang, Y. Chen, M. Wang, S. Shi, J. Jing, Fused deposition modeling 3D printing of novel poly(vinyl alcohol)/graphene nanocomposite with enhanced mechanical and electromagnetic interference shielding properties, *Ind. Eng. Chem. Res.* 59 (2020) 8066–8077.
- [29] K. Subannajui, Electronic tongue and cyclic voltammetric sensors based on carbon nanotube/polylactic composites fabricated by fused deposition modelling 3D printing, *Mater. Sci. Eng. C* 117 (2020) 111319.
- [30] X. Zhang, J. Wang, T. Liu, 3D printing of polycaprolactone-based composites with diversely tunable mechanical gradients via multi-material fused deposition modeling, *Compos. Commun.* 23 (2021), 100600.
- [31] S. Dinesh Kumar, K. Venkadeshwaran, M.K. Aravindan, Fused deposition modelling of PLA reinforced with cellulose nanocrystals, *Mater. Today Proc.* (2020) 868–875.

- [32] H. Adibi, M.R. Hashemi, Experimental study on tensile strength of copper microparticles filled polymer composites printed by fused deposition modelling process, *Rapid Prototyp. J.* (2021), <https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2020-0199>.
- [33] A. Georgopoulou, T. Sebastian, F. Clemens, Thermoplastic elastomer composite filaments for strain sensing applications extruded with a fused deposition modelling 3D printer, *Flex. Print. Electron.* 5 (2020) 35002.
- [34] N.A. Conzelmann, L. Gorjan, F. Sarraf, L.D. Poulidakos, M.N. Partl, C.R. Müller, F.J. Clemens, Manufacturing complex Al₂O₃ ceramic structures using consumergrade fused deposition modelling printers, *Rapid Prototyp. J.* 26 (2020) 1035–1048.
- [35] M. Padole, S. Gharde, B. Kandasubramanian, Three-dimensional printing of molluscan shell inspired architectures via fused deposition modeling, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28 (2020) 46356–46366.
- [36] Q. He, J. Jiang, X. Yang, L. Zhang, Z. Zhou, Y. Zhong, Z. Shen, Additive manufacturing of dense zirconia ceramics by fused deposition modeling via screw extrusion, *J. Eur. Ceram. Soc.* 41 (2021) 1033–1040.
- [37] H.J. Aida, R. Nadlene, M.T. Mastura, L. Yusriah, D. Sivakumar, R.A. Ilyas, Natural fibre filament for fused deposition modelling (FDM): a review, *Int. J. Sustain. Eng.* (2021) 1–21.
- [38] R. Abidnejad, A. Ranta, K. Ojha, A. Karakoc, M. Rafiee, A. Karakoç, J. Paltakari, Exploring the Possibilities of Fdm Filaments Comprising Natural Fiber-Reinforced Biocomposites for Additive Manufacturing, <https://doi.org/10.3934/matersci.2021032>.
- [39] A. Kovalcik, J. Smilek, și colab., Properties and structure of poly(3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate) filaments for fused deposition modelling, *Int. J. Biol. Macromol.* 183 (2021) 880–889.
- [40] S. Guessasma, S. Belhabib, H. Nouri, Thermal cycling, microstructure and tensile performance of PLA-PHA polymer printed using fused deposition modelling technique, *Rapid Prototyp. J.* 26 (2020) 122–133.
- [41] H. Jing, H. He, H. Liu, B. Huang, C. Zhang, Study on properties of polylactic acid/lemongrass fiber biocomposites prepared by fused deposition modeling, *Polym. Compos.* 42 (2021) 973–986.
- [42] Y.Q. Zhao, J.H. Yang, și colab., Polycaprolactone/polysaccharide functional composites for low-temperature fused deposition modelling, *Bioact. Mater.* 5 (2020) 185–191.
- [43] G. Jiang, T. Yang, J. Xu, D. Tao, C. Luo, C. Wang, Q. Dong, Y. Wang, Investigation into hydroxypropyl-methylcellulose-reinforced polylactide composites for fused deposition modelling, *Ind. Crop. Prod.* 146 (2020) 112174.
- [44] J. Bru, M. Leite, A.R. Ribeiro, L. Reis, A.M. Deus, M. Fátima Vaz, Bioinspired structures for core sandwich composites produced by fused deposition modelling, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.* 234 (2020) 379–393.
- [45] N. Sakthivel, J. Bramsch, P. Voung, I. Swink, S. Averick, H.D. Vora, Investigation of 3D-printed PLA–stainless-steel polymeric composite through fused deposition modelling-based additive manufacturing process for biomedical applications, *Med. Devices Sens.* 3 (2020) e10080.
- [46] M.Y. Chen, J. Skewes, M.A. Woodruff, P. Dasgupta, N.J. Rukin, Multi-colour extrusion fused deposition modelling: a low-cost 3D printing method for anatomical prostate cancer models, *Sci. Rep.* 10 (2020) 1–5.

210 Bibliografie

- [47] C.P. Hsu, C.S. Lin, C.H. Fan, N.Y. Chiang, C.W. Tsai, C.M. Chang, I.L. Liu, Geometric accuracy of an acrylonitrile butadiene styrene canine tibia model fabricated using fused deposition modelling and the effects of hydrogen peroxide gas plasma sterilisation, *BMC Vet. Res.* 16 (2020) 1–8.
- [48] L. Lo Russo, E. Lo Muzio, G. Troiano, A. Salamini, K. Zhurakivska, L. Guida, Accuracy of trial complete dentures fabricated by using fused deposition modeling 3-dimensional printing: an in vitro study, *J. Prosthet. Dent.* (2021), <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.07.021>.
- [49] K. Shi, J.P. Slavage, M. Maniruzzaman, A. Nokhodchi, Role of release modifiers to modulate drug release from fused deposition modelling (FDM) 3D printed tablets, *Int. J. Pharm.* 597 (2021) 120315.
- [50] G.G. Pereira, S. Figueiredo, A.I. Fernandes, J.F. Pinto, Polymer selection for hotmelt extrusion coupled to fused deposition modelling in pharmaceuticals, *Pharmaceutics* 12 (2020) 1–63.
- [51] N.K. Martin, J. Domínguez-Robles, și colab., Fused deposition modelling for the development of drug loaded cardiovascular prosthesis, *Int. J. Pharm.* 595 (2021) 120243.
- [52] J. dos Santos, M. Deon, G.S. da Silva, R.C.R. Beck, Multiple variable effects in the customisation of fused deposition modelling 3D-printed medicines: a design of experiments (DoE) approach, *Int. J. Pharm.* 597 (2021) 120331.
- [53] J.R. Cerda, T. Arifi, și colab., Personalised 3d printed medicines: optimising material properties for successful passive diffusion loading of filaments for fused deposition modelling of solid dosage forms, *Pharmaceutics* 12 (2020) 345.
- [54] M. Fanous, S. Gold, S. Muller, S. Hirsch, J. Ogorka, G. Imanidis, Simplification of fused deposition modeling 3D-printing paradigm: feasibility of 1-step direct powder printing for immediate release dosage form production, *Int. J. Pharm.* 578 (2020) 119124.
- [55] M.I.M. Sargini, S.H. Masood, S. Palanisamy, E. Jayamani, A. Kapoor, Additive manufacturing of an automotive brake pedal by metal fused deposition modelling, *Mater. Today Proc.* (2021) 4601–4605.
- [56] F. Sartipi, K. Palaskar, A. Ergin, U. Rajakaruna, Viable construction technology for habitation on Mars: fused deposition modelling, *J. Constr. Mater.* 1 (2020) 1–7.
- [57] M.A.B. Helú, L. Liu, Fused deposition modeling (FDM) based 3D printing of microelectrodes and multi-electrode probes, *Electrochim. Acta* 365 (2021) 137279.
- [58] J. Jaxel, M. Guggenberger, și colab., Unbreakable and customizable dipping chambers for TLC and HPTLC manufactured by fused deposition modelling, *Talanta* 217 (2020) 121072.
- [59] C. Prakash, P. Senthil, T. Sathies, Fused deposition modeling fabricated PLA dielectric substrate for microstrip patch antenna, *Mater. Today Proc.* (2020) 533–537.
- [60] M. Li, J. Jiang, B. Hu, W. Zhai, Fused deposition modeling of hierarchical porous polyetherimide assisted by an in-situ CO₂ foaming technology, *Compos. Sci. Technol.* 200 (2020) 108454.
- [61] F. Lupone, E. Padovano, A. Veca, L. Franceschetti, C. Badini, Innovative processing route combining fused deposition modelling and laser writing for the manufacturing of multifunctional polyamide/carbon fiber composites, *Mater. Des.* 193 (2020) 108869.

- [62] M. Aberoumand, D. Rahmatabadi, A. Aminzadeh, M. Moradi. 4D Printing by Fused Deposition Modeling (FDM), Springer, Cham (2021) 377–402.
- [63] J. Carrell, G. Gruss, E. Gomez, Four-dimensional printing using fused-deposition modeling: a review, *Rapid Prototyp. J.* 26 (2020) 855–869.
- [64] I.S. Nezhad, M. Golzar, A. Behraves, Comprehensive Study on Shape Shifting Behaviors of Thermally Activated Hinges in FDM-based 4D Printing, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-791407/v1>.
- [65] A. Chalgham, A. Ehrmann, I. Wickenkamp, Mechanical properties of FDM printed PLA parts before and after thermal treatment, *Polymer* 13 (2021) 1239.
- [66] Q. Chen, L. Han, J. Ren, L. Rong, P. Cao, R.C. Advincula, 4D printing via an unconventional fused deposition modeling route to high-performance thermosets, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 12 (2020) 50052–50060.
- [67] M. Mehrpouya, H. Vahabi, S. Janbaz, A. Darafsheh, T.R. Mazur, S. Ramakrishna, 4D printing of shape memory polylactic acid (PLA), *Polymers* 230 (2021), 124080.
- [68] D. Popescu, A. Zapciu, și colab., FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review, *Polym. Test.* 69 (2018) 157–166.
- [69] H. Li, T. Wang, Z. Yu, The quantitative research of interaction between key parameters and the effects on mechanical property in FDM, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2017 (2017) 1–15.
- [70] A.K. Sood, R.K. Ohdar, S.S. Mahapatra, Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts, *Mater. Des.* 31 (2010) 287–295.
- [71] I. Durgun, R. Ertan, Experimental investigation of fdm process for improvement of mechanical properties and production cost, *Rapid Prototyp. J.* 20 (2014) 228–235.
- [72] J.F. Rodriguez, J.P. Thomas, J.E. Renaud, Design of fused-deposition abs components for stiffness and strength, *J. Mech. Des.* 125 (2003) 545–551.
- [73] M. Raju, M.K. Gupta, N. Bhanot, V.S. Sharma, A hybrid pso–bfo evolutionary algorithm for optimization of fused deposition modelling process parameters. *J. Intell. Manuf.* 30 (2019) 2743–2758.
- [74] K.M. Ashtankar, A.M. Kuthe, B.S. Rathour, Effect of build orientation on mechanical properties of rapid prototyping (fused deposition modelling) made acrylonitrile butadiene styrene (abs) parts. In *Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, San Diego, CA, USA, 15–21 November 2013*.
- [75] S.K. Panda, S. Padhee, și colab., Optimization of fused deposition modelling (fdm) process parameters using bacterial foraging technique, *Intell. Inf. Manag.* 1 (2009) 89–97.
- [76] J. Chacón, M. Caminero, și colab., Additive manufacturing of pla structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection, *Mater. Des.* 124 (2017) 143–157.
- [77] A. Alafaghani, A. Qattawi, și colab., Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: A design-for-manufacturing approach, *Procedia Manuf.* 10 (2017) 791–803.
- [78] M. Uddin, M. Sidek, și colab., Evaluating mechanical properties and failure mechanisms of fused deposition modeling acrylonitrile butadiene styrene parts, *J. Manuf. Sci. Eng.* 139 (2017) 081018.

212 Bibliografie

- [79] O. Es-Said, J. Foyos, și colab., Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples, *Mater. Manuf. Process.* 15 (2000) 107–122.
- [80] A. Rodríguez-Panes, J. Claver, A. Camacho, The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of pla and abs pieces manufactured by fdm: A comparative analysis, *Materials* 11 (2018) 1333.
- [81] M. Somireddy, D.A. De Moraes, A. Czekanski, Flexural behavior of fdm parts: Experimental, analytical and numerical study. In *Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX, USA, 7–9 August 2017.
- [82] M. Vaezi, C.K. Chua, Effects of layer thickness and binder saturation level parameters on 3d printing process, *J. Adv. Manuf. Technol.* 53 (2011) 275–284.
- [83] S.R. Rajpurohit, H.K. Dave, Analysis of tensile strength of a fused filament fabricated pla part using an open-source 3d printer, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 101 (2019) 1525–1536.
- [84] A.A. D’Amico, A. Debaie, A.M. Peterson, Effect of layer thickness on irreversible thermal expansion and interlayer strength in fused deposition modeling, *Rapid Prototyp. J.* 23 (2017) 943–953.
- [85] A.W. Gebisa, H.G. Lemu, Investigating effects of fused-deposition modeling (FDM) processing parameters on flexural properties of ultem 9085 using designed experiment, *Materials* 11 (2018) 500.
- [86] A.W. Gebisa, H.G. Lemu, Influence of 3d printing fdm process parameters on tensile property of ultem 9085, *Procedia Manuf.* 30 (2019) 331–338.
- [87] O.A. Mohamed, S.H. Masood, și colab., Effect of process parameters on dynamic mechanical performance of fdm pc/abs printed parts through design of experiment, *J. Mater. Eng. Perform.* 25 (2016) 2922–2935.
- [88] W. Wu, P. Geng, și colab., Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3d-printed peek and a comparative mechanical study between peek and abs. *Materials* 8 (2015) 5834–5846.
- [89] X. Deng, Z. Zeng, și colab., Mechanical properties optimization of poly-ether-ether-ketone via fused deposition modeling. *Materials* 11 (2018) 216.
- [90] A. Elkholy, R. Kempers, Investigation into the influence of fused deposition modeling (FDM) process parameters on the thermal properties of 3d-printed parts. In *Proceedings of the 2018 Canadian Society for Mechanical Engineering (CSME) International Congress*, Toronto, ON, Canada, 27–30 May 2018.
- [91] S.R. Rajpurohit, H.K. Dave, Flexural strength of fused filament fabricated (FFF) pla parts on an open-source 3d printer, *Adv. Manuf.* 6 (2018) 430–441.
- [92] O.S. Carneiro, A.F. Silva, R. Gomes, Fused deposition modeling with polypropylene. *Mater. Des.* 83 (2015) 768–776.
- [93] K.L. Alvarez, R.F. Lagos, M. Aizpun, Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled abs parts. *Ing. Investig.* 36 (2016) 110–116.
- [94] Y.Y. Aw, C.K. Yeoh, și colab., Effect of printing parameters on tensile, dynamic mechanical, and thermoelectric properties of fdm 3d printed cabs/zno composites. *Materials* 11 (2018) 466.
- [95] M. Fernandez-Vicente, W. Calle, S. Ferrandiz, A. Conejero, Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing, *3D Print. Addit. Manuf.* 3 (2016) 183–192.
- [96] G. Gomez-Gras, R. Jerez-Mesa, și colab., Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens. *Mater. Des.* 140 (2018) 278–285.

- [97] F. Ning, W. Cong, și colab., Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling, *Compos. Part B Eng.* 80 (2015) 369–378.
- [98] H. Li, T. Wang, J. Sun, Z. Yu, The effect of process parameters in fused deposition modelling on bonding degree and mechanical properties, *Rapid Prototyp. J.* 24 (2018) 80–92.
- [99] M. Faes, E. Ferraris, D. Moens, Influence of inter-layer cooling time on the quasi-static properties of abs components produced via fused deposition modelling, *Procedia Cirp.* 42 (2016) 748–753.
- [100] Y. Zhang, K. Chou, A parametric study of part distortions in fused deposition modelling using three-dimensional finite element analysis, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* 222 (2008) 959–968.
- [101] C. Kung, H.C. Kuan, C.F. Kuan, Evaluation of tensile strength of 3d printed objects with fdm process on rewrap platform. In *Proceedings of the 2018 1st IEEE International Conference on Knowledge Innovation and Invention (ICKII)*, Jeju, Korea, 23–27 July 2018.
- [102] S. Mahmood, A.J. Qureshi, K.L. Goh, D. Talamona, Tensile strength of partially filled fff printed parts: Experimental results, *Rapid Prototyp. J.* 23 (2017) 122–128.
- [103] N. Aliheidari, R. Tripuraneni, și colab., Fracture resistance measurement of fused deposition modeling 3d printed polymers, *Polym. Test.* 60 (2017) 94–101.
- [104] A.M.E. Arefin, N.R. Khatri, N. Kulkarni, P.F. Egan, Polymer 3D printing review: materials, process, and design strategies for medical applications, *Polymers* 13 (2021) 1499.
- [105] D. Khorsandi, A. Fahimipour, și colab., 3D and 4D printing in dentistry and maxillofacial surgery: printing techniques, materials, and applications, *Acta Biomater.* 122 (2021) 26–49.
- [106] E. Sirjani, P.J. Cragg, M.K. Dymond, Glass transition temperatures, melting temperatures, water contact angles and dimensional precision of simple fused deposition model 3D prints and 3D printed channels constructed from a range of commercially available filaments, *Chem. Data Collect.* 22 (2019), 100244.
- [107] T.-M. Wang, J.-T. Xi, Y. Jin, A model research for prototype warp deformation in the FDM process, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 3311 (2006) 1087–1096.
- [108] K. Medhavi, S. Abhishek, A comprehensive study on 3D printing, *MIT Int. J. Mech. Eng.* 6 (2016) 63–69.
- [109] R. Auras, Poly(lactic acid), in: *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, John Wiley & Sons, Inc., 2010, <https://doi.org/10.1002/0471440264.pst275>.
- [110] J. Aspler, A. Kingsland, și colab., *3D Printing – A Review of Technologies, Markets and Opportunities for the Forest Industry*, 2016.
- [111] F. Zuluaga, Algunas aplicaciones del 'ácido poli-L-l'actico, *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Exactas Fís. Nat.* 37 (2013).
- [112] J. Muñoz, M. Pumera, 3D-printed biosensors for electrochemical and optical applications, *TrAC Trends Anal. Chem.* 128 (2020), 115933.
- [113] X. Li, R. Cui, L. Sun, și colab., 3D-printed biopolymers for tissue engineering application, *Int. J. Polym. Sci.* 2014 (2014), <https://doi.org/10.1155/2014/829145>.
- [114] E. Fornells, E. Murray, și colab., Integrated 3D printed heaters for microfluidic applications: ammonium analysis within environmental water, *Anal. Chim. Acta* 1098 (2020) 94–101.

214 Bibliografie

- [115] S. Guessasma, S. Belhabib, H. Nouri, Microstructure, thermal and mechanical behavior of 3D printed acrylonitrile styrene acrylate, *Macromol. Mater. Eng.* 304 (2019) 1800793.
- [116] J. Pakkanen, D. Manfredi, și colab., About the use of recycled or biodegradable filaments for sustainability of 3D printing: state of the art and research opportunities. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH (2017) 776–785.
- [117] S. Muta, M. Ikeda, și colab., Chairside fabrication of provisional crowns on FDM 3D-printed PVA model, *J. Prosthodont. Res.* 64 (2020) 401–407.
- [118] F. Fazal, F.J. Diaz Sanchez, și colab., A modified 3D printer as a hybrid bioprinting-electrospinning system for use in vascular tissue engineering applications, *Med. Eng. Phys.* 94 (2021) 52–60.
- [119] X. Yu, T. Zhang, Y. Li, 3D printing and bioprinting nerve conduits for neural tissue engineering, *Polymers* (2020) 1637.
- [120] X. Hu, H. Kang, Y. Li, Y. Geng, R. Wang, L. Zhang, Preparation, morphology and superior performances of biobased thermoplastic elastomer by in situ dynamical vulcanization for 3D-printed materials, *Polymer* 108 (2017) 11–20.
- [121] M. Korger, J. Bergschneider, și colab., Possible applications of 3D printing technology on textile substrates, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* (2016), <https://doi.org/10.1088/1757-899X/141/1/012011>.
- [122] Y. Mogan, R. Periyasamy, Thermoplastic elastomer infill pattern impact on mechanical properties 3D printed customized orthotic insole, *ARPN J. Eng. Appl. Sci.* 11 (2016).
- [123] G. Cicala, G. Ognibene, și colab., Comparison of Ultem 9085 used in fused deposition modelling (FDM) with polyetherimide blends, *Materials* 11 (2018) 285.
- [124] Y. Geng, H. He, H. Liu, H. Jing, Preparation of polycarbonate/poly(lactic acid) with improved printability and processability for fused deposition modeling, *Polym. Adv. Technol.* 31 (2020) 2848–2862.
- [125] A. Davis, J.H. Golden, Stability of polycarbonate, *J. Macromol. Sci. Part C* 3 (1969) 49–68.
- [126] N. Capolla, A. Beauregard, D. Vincent, Holographic notch filters recorded on DCG-coated glass and polycarbonate substrates. *Photopolymers and Applications in Holography, Optical Data Storage, Optical Sensors, and Interconnects*, 1994, 259.
- [127] S.L. Messimer, A.E. Patterson, și colab., Characterization and processing behavior of heated aluminum-polycarbonate composite build plates for the FDM additive manufacturing process, *J. Manuf. Mater. Process.* 2 (2018) 12.
- [128] M. Revilla-Le´on, M. Ozcan, Additive manufacturing technologies used for processing polymers: current status and potential application in prosthetic dentistry, *J. Prosthodont.* 28 (2019) 146–158.
- [129] A.S. Alaboodi, S. Sivasankaran, Experimental design and investigation on the mechanical behavior of novel 3D printed biocompatibility polycarbonate scaffolds for medical applications, *J. Manuf. Process.* 35 (2018) 479–491.
- [130] M. ´A. Caminero, J.M. Chac ´on, și colab., Additive manufacturing of PLA-based composites using fused filament fabrication: effect of graphene nanoplatelet reinforcement on mechanical properties, dimensional accuracy and texture, *Polymers* 11 (2019), <https://doi.org/10.3390/polym11050799>.
- [131] ´A. Serrano-Aroca, S. Deb, Synthesis of irregular graphene oxide tubes using green chemistry and their potential use as reinforcement materials for biomedical applications, *PLOS One* 12 (2017) e0185235.

- [132] B. Salesa, M. Llorens-G´amez, ´A. Serrano-Aroca, Study of 1D and 2D carbon nanomaterial in alginate films, *Nanomaterials* 10 (2020), <https://doi.org/10.3390/nano10020206>.
- [133] B. Frígols, M. Martí, și colab., Graphene oxide in zinc alginate films: antibacterial activity, cytotoxicity, zinc release, water sorption/diffusion, wettability and opacity, *PLOS One* 14 (2019), <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212819>.
- [134] ´A. Serrano-Aroca, K. Takayama, și colab., Carbon-based nanomaterials: promising antiviral agents to combat COVID-19 in the microbial-resistant era, *ACS Nano* 15 (2021) 8069–8086.
- [135] E. Restrepo, M. Restrepo, Synergy between 3D models and tissue engineering to optimize sinus lift, implant placement and immediate loading in partially edentulous patients, *Int. J. Oral Implantol. Clin. Res.* (2013), <https://doi.org/10.5005/JP-Journals-10012-1090>.
- [136] D. Ponnamma, Y. Yin, și colab., Recent progress and multifunctional applications of 3D printed graphene nanocomposites, *Compos. Part B Eng.* 204 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108493>.
- [137] K. Prashantha, F. Roger, Multifunctional properties of 3D printed poly(lactic acid)/graphene nanocomposites by fused deposition modeling, *J. Macromol. Sci. Part A Pure Appl. Chem.* 54 (2017) 24–29.
- [138] P.C. Sherrell, C. Mattevi, Mesoscale design of multifunctional 3D graphene networks, *Mater. Today* 19 (2016) 428–436.
- [139] C.V. Subbarao, Y. Srinivasa Reddy, V. Inturi, M. Indra Reddy, Dynamic mechanical analysis of 3D printed PETG material, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 1057 (2021) 012031.
- [140] M. Kovacova, J. Kozakovicova, și colab., Novel hybrid PETG composites for 3D printing, *Appl. Sci.* 10 (2020) 3062.
- [141] E.G. Gordeev, E.S. Degtyareva, și colab., Analysis of 3D Printing Possibilities for the Development of Practical Applications in Synthetic Organic Chemistry, 2016.
- [142] M. Haffner, A. Quinn, și colab., Optimization of 3D print material for the recreation of patient-specific temporal bone models, *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.* 127 (2018) 338–343.
- [143] A.J. Capel, R.P. Rimington, și colab., 3D printing for chemical, pharmaceutical and biological applications, *Nat. Rev. Chem.* 2 (2018) 422–436.
- [144] D.F. Redaelli, V. Abbate, și colab., 3D printing orthopedic scoliosis braces: a test comparing FDM with thermoforming, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 111 (2020) 1707–1720.
- [145] Z. Liu, G. Wang, Y. Huo, W. Zhao, Research on precise control of 3D print nozzle temperature in PEEK material, *AIP Conf. Proc.* (2017), <https://doi.org/10.1063/1.5005278>.
- [146] P. Wang, B. Zou, și colab., Effects of printing parameters of fused deposition modeling on mechanical properties, surface quality, and microstructure of PEEK, *J. Mater. Process. Technol.* 271 (2019) 62–74.
- [147] S. Wickramasinghe, T. Do, P. Tran, FDM-based 3D printing of polymer and associated composite: a review on mechanical properties, defects and treatments, *Polymers* 12 (2020) 1–42.
- [148] R. Singh, S. Singh, Development of nylon based FDM filament for rapid tooling application, *J. Inst. Eng. Ser. C* 95 (2014) 103–108.
- [149] K.S. Boparai, R. Singh, H. Singh, Experimental investigations for development of Nylon6-Al-Al₂O₃ alternative FDM filament, *Rapid Prototyp. J.* 22 (2016) 217–224.

216 Bibliografie

- [150] Matthew J. Richardson, Hao Wu, Travis J. Wilcox, Melisa Broaddous, Peter C. Lin, Mourad Krifa, Joseph H. Koo, Flame retardant nylon 6 nanocomposites for fused deposition modeling (FDM) applications, *FDM Nanocomposited*, 2017.
- [151] J.K. Kim, K. Pal. Recent Advances in the Processing of Wood-Plastic Composites, 2011, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-14877-4>.
- [152] M. Kariz, M. Sernek, M. Obucina, M.K. Kuzman, Effect of wood content in FDM filament on properties of 3D printed parts, *Mater. Today Commun.* 14 (2018) 135–140.
- [153] Y. Tao, H. Wang, și colab., Development and application of wood flourfilled polylactic acid composite filament for 3D printing, *Materials* 10 (2017) 339.
- [154] M. Koller, Biodegradable and biocompatible polyhydroxy-alkanoates (PHA): auspicious microbial macromolecules for pharmaceutical and therapeutic applications, *Molecules* 23 (2018), <https://doi.org/10.3390/molecules23020362>.
- [155] A. Kovalcik, L. Sangroniz, și colab., Properties of scaffolds prepared by fused deposition modeling of poly(hydroxyalkanoates), *Int. J. Biol. Macromol.* 161 (2020) 364–376.
- [156] A.L. Rivera-Briso, A. Serrano-Aroca, Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate): enhancement strategies for advanced applications, *Polymers* 10 (2018) 732.
- [157] A.L. Rivera-Briso, F.L. Aachmann, V. Moreno-Manzano, A. Serrano-Aroca, Graphene oxide nanosheets versus carbon nanofibers: enhancement of physical and biological properties of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) films for biomedical applications, *Int. J. Biol. Macromol.* 143 (2020) 1000–1008.
- [158] R.P. Rimington, A.J. Capel, S.D.R. Christie, M.P. Lewis, Biocompatible 3D printed polymers: via fused deposition modelling direct C2C12 cellular phenotype in vitro, *Lab Chip* 17 (2017) 2982–2993.
- [159] R. Kumar, R. Singh, I. Farina, On the 3D printing of recycled ABS, PLA and HIPS thermoplastics for structural applications, *PSU Res. Rev.* 2 (2018) 115–137.
- [160] J. Madamesila, P. McGeachy, J.E. Villarreal Barajas, R. Khan, Characterizing 3D printing in the fabrication of variable density phantoms for quality assurance of radiotherapy, *Phys. Med.* 32 (2016) 242–247.
- [161] J. Scoggin, T.A. Murray, Novel uses of 3D printing for in vitro biomedical research, in: *Proceedings of the 32nd Southern Biomedical Engineering Conference SBEC 2016*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016, 29–30.
- [162] L. Dai, T. Cheng, și colab., 3D printing using plant-derived cellulose and its derivatives: a review, *Carbohydr. Polym.* 203 (2019) 71–86.
- [163] Q. Wang, J. Sun, și colab., 3D printing with cellulose materials, *Cellulose* 25 (2018) 4275–4301.
- [164] M.A. Cuiffo, J. Snyder, și colab., Impact of the fused deposition (FDM) printing process on polylactic acid (PLA) chemistry and structure, *Appl. Sci.* 7 (2017) 579.
- [165] E.V. Diederichs, M.C. Picard, și colab., Strategy to improve printability of renewable resource-based engineering plastic tailored for FDM applications, *ACS Omega* 4 (2019) 20297–20307.
- [166] M. Alhijjaj, P. Belton, S. Qi, An investigation into the use of polymer blends to improve the printability of and regulate drug release from pharmaceutical solid dispersions prepared via fused deposition modeling (FDM) 3D printing, *Eur. J. Pharm. Biopharm.* 108 (2016) 111–125.

- [167] M. Bertolino, D. Battagazzore, R. Arrigo, A. Frache, Designing 3D printable polypropylene: material and process optimisation through rheology, *Addit. Manuf.* 40 (2021) 101944.
- [168] B. Wittbrodt, J.M. Pearce, The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components, *Addit. Manuf.* 8 (2015) 110–116.
- [169] I. Campbell, O. Diegel, și colab., *Wohlers Report 2018: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report*; Wohlers Associates: Fort Collins, CO, USA, 2018.
- [170] J.C. Najmon, S. Raeisi, A. Tovar, Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry In *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands (2019) 7–31.
- [171] E. Negis, A short history and applications of 3D printing technologies in Turkey. In *Proceedings of the US-TURKEY Workshop on Rapid Technologies*, Istanbul, Turkey, 24–25 September 2009.
- [172] M.S. Bayar, Z. Aziz, Rapid prototyping and its role in supporting architectural design process, *J. Archit. Eng.* 24 (2018) 05018003.
- [173] H. Klippstein, A. Diaz De Cerio Sanchez, și colab., Fused deposition modeling for unmanned aerial vehicles (UAVs): A review, *Adv. Eng. Mater.* 20 (2018) 1700552.
- [174] J. Hiemenz, *Additive Manufacturing Trends in Aerospace; White Paper Stratasy*; Eden Prairie, MN, USA, 2014; 1–11.
- [175] D. Bourell, B. Stucker, și colab., Design and manufacture of a Formula SAE intake system using fused deposition modeling and fiber-reinforced composite materials, *Rapid Prototyp. J.* 16 (2010) 174–179.
- [176] T.C. Okwuosa, D. Stefaniak, și colab., A lower temperature FDM 3D printing for the manufacture of patient-specific immediate release tablets, *Pharm. Res.* 33 (2016) 2704–2712.
- [177] E.L. Melgoza, G. Vallicrosa, și colab., Rapid tooling using 3D printing system for manufacturing of customized tracheal stent, *Rapid Prototyp. J.* 20 (2014) 2–12.
- [178] J. Domanski, K. Skalski, R. Grygoruk, A. Mróz, Rapid prototyping in the intervertebral implant design process, *Rapid Prototyp. J.* 21 (2015) 735–746.
- [179] W.Y. Yeong, C.K. Chua, K.F. Leong, M. Chandrasekaran, Rapid prototyping in tissue engineering: Challenges and potential, *Trends Biotechnol.* 22 (2004) 643–652.
- [180] S.M. Peltola, F.P. Melchels, și colab., A review of rapid prototyping techniques for tissue engineering purposes, *Ann. Med.* 40 (2008) 268–280.
- [181] B.S. Kim, D.J. Mooney, Development of biocompatible synthetic extracellular matrices for tissue engineering, *Trends Biotechnol.* 16 (1998) 224–230.
- [182] D.W. Hutmacher, M. Sittinger, M.V. Risbud, Scaffold-based tissue engineering: Rationale for computer-aided design and solid free-form fabrication systems, *Trends Biotechnol.* 22 (2004) 354–362.
- [183] J. Korpela, A. Kokkari, și colab., Biodegradable and bioactive porous scaffold structures prepared using fused deposition modeling, *J. Biomed. Mater. Res. Part B Appl. Biomater.* 101 (2013) 610–619.
- [184] C.X.F. Lam; X. Mo, S.H. Teoh, D. Hutmacher, Scaffold development using 3D printing with a starch-based polymer, *Mater. Sci. Eng. C* 20 (2002) 49–56.
- [185] C. Lee, C. Chua, C. Cheah, L. Tan, C. Feng, Rapid investment casting: Direct and indirect approaches via fused deposition modelling, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 23 (2004) 93–101.

218 Bibliografie

- [186] C. Petropolis, D. Kozan, L. Sigurdson, Accuracy of medical models made by consumer-grade fused deposition modelling printers, *Plast. Surg.* 23 (2015) 91–94.
- [187] D. Bourell, B. Stucker, și colab., Fused deposition modeling of patient-specific polymethylmethacrylate implants, *Rapid Prototyp. J.* 16 (2010) 164–173.
- [188] R. Van Noort, The future of dental devices is digital, *Dent. Mater.* 28 (2012) 3–12.
- [189] N. Xu, X. Ye, și colab., 3D artificial bones for bone repair prepared by computed tomographyguided fused deposition modeling for bone repair, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 6 (2014) 14952–14963.
- [190] M. Šljivic, M. Stanojevic și colab., Implementation of FEM and rapid prototyping in maxillofacial surgery, *FME Trans.* 44 (2016) 422–429.
- [191] A. Melocchi, F. Parietti, și colab., Hot-melt extruded filaments based on pharmaceutical grade polymers for 3D printing by fused deposition modeling. *Int. J. Pharm.* 509 (2016) 255–263.
- [192] B. Zhang, B. Seong, V. Nguyen, D. Byun, 3D printing of high-resolution PLA-based structures by hybrid electrohydrodynamic and fused deposition modeling techniques, *J. Micromech. Microeng.* 26 (2016) 025015.
- [193] E. Soriano-Heras, F. Blaya-Haro, C. Molino, J.M. de Agustín del Burgo, Rapid prototyping prosthetic hand acting by a low-cost shape-memory-alloy actuator, *J. Artif. Organs* 21 (2018) 238–246.
- [194] M. Juneja, N. Thakur, și colab., Accuracy in dental surgical guide fabrication using different 3-D printing techniques, *Addit. Manuf.* 22 (2018) 243–255.
- [195] V.N. Chougule, A.V. Mulay, B.B. Ahuja, Methodologies for development of patient specific bone models from human body CT scans, *J. Inst. Eng. Ser. C* 99 (2018) 413–418.
- [196] A. Colpani, A. Fiorentino, E. Ceretti, In 3D printing for health & wealth: Fabrication of custom-made medical devices through additive manufacturing. In *AIP Conference Proceedings*; AIP Publishing LLC: Melville, NY, USA, 2018.
- [197] C.E. Corcione, E. Palumbo, și colab., Fused Deposition Modeling (FDM): An innovative technique aimed at reusing Lecce stone waste for industrial design and building applications, *Constr. Build. Mater.* 158 (2018) 276–284.
- [198] R. García-García, M.A. González-Palacios, Method for the geometric modeling and rapid prototyping of involute bevel gears, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 98 (2018) 645–656.
- [199] E. Pei, J. Shen, J. Watling, Direct 3D printing of polymers onto textiles: Experimental studies and applications, *Rapid Prototyp. J.* 21 (2015) 556–571.
- [200] H. Brooks, M. Lupeanu, T. Abram, Production of personalized lithophane lighting products using AM. In *DAAAM International Scientific Book*; DAAAM International: Vienna, Austria, 2012; Volume 11.
- [201] M.D. Monzon, N. Diaz, și colab., Advantages of fused deposition modeling for making electrically conductive plastic patterns. In *Proceedings of the 2010 International Conference on Manufacturing Automation*, Hong Kong, China, 13–15 December 2010; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2010.
- [202] O. Diegel, S. Singamneni, B. Huang, I. Gibson, Curved layer fused deposition modeling in conductive polymer additive manufacturing. In *Advanced Materials Research*; Trans Tech Publications: Zurich, Switzerland, 2011.
- [203] O. Diegel, S. Singamneni, B. Huang, I. Gibson, Getting rid of the wires: Curved layer fused deposition modeling in conductive polymer additive manufacturing. In *Key Engineering Materials*; Trans Tech Publications: Zurich, Switzerland, 2011; pp. 662–667.

- [204] T. Kozior, C. Kundera, Evaluation of the influence of parameters of FDM technology on the selected mechanical properties of models, *Procedia Engineering* 192 (2017) 463-468.
- [205] C. Vălean, L. Marşavina, M. Mărghitaş, E. Linul, J. Razavi, F. Berto, Effect of manufacturing parameters on tensile properties of FDM printed specimens, *Procedia Structural Integrity*, 26 (2020) 313–320.
- [206] A. Szust, G. Adamski, Using thermal annealing and salt remelting to increase tensile properties of 3D FDM prints, *Engineering Failure Analysis* 132 (2022) 105932.
- [207] Y. Zhao, Y. Chen, Y. Zhou, Novel mechanical models of tensile strength and elastic property of FDM AM PLA materials: Experimental and theoretical analyses, *Materials & Design* 181 (2019) 108089.
- [208] T. Yao, J. Ye, Z. Deng, K. Zhang, Y. Ma, H. Ouyang, Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: Experimental and theoretical analyses, *Composites Part B: Engineering* 188 (2020) 107894.
- [209] M. Hikmat, S. Rostam, Y.M. Ahmed, Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology, *Results in Engineering* 11 (2021) 100264.
- [210] N.A. Fountas, P. Kostazos, H. Pavlidis, V. Antoniou, D.E. Manolakos, N.M. Vaxevanidis, Experimental investigation and statistical modelling for assessing the tensile properties of FDM fabricated parts, *Procedia Structural Integrity* 26 (2020) 139-146.
- [211] A.W. Gebisa, H.G. Lemu, Influence of 3D Printing FDM Process Parameters on Tensile Property of ULTEM 9085, *Procedia Manufacturing* 30 (2019) 331-338.
- [212] J.M. Chacón, M.A. Caminero, E. García-Plaza, P.J. Núñez, Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection, *Materials & Design* 124 (2017) 143-157.
- [213] L. Marşavina, C. Vălean, M. Mărghitaş, E. Linul, S.M.J Razavi, F. Berto, R. Brighenti, Effect of the manufacturing parameters on the tensile and fracture properties of FDM 3D-printed PLA specimens, *Engineering Fracture Mechanics* 274 (2022) 108766.
- [214] J. Singh, K.K. Goyal, R. Kumar, Effect of filling percentage and raster style on tensile behavior of FDM produced PLA parts at different build orientation, *Materials Today: Proceedings* 63 (2022) 433-439.
- [215] M.T. Biroş, D. Ledenyak, M. Ando, Effect of FDM infill patterns on mechanical properties, *Polymer Testing* 113 (2022) 107654.
- [216] L. Le, M.A. Rabsatt, H. Eisazadeh, M. Torabizadeh, Reducing print time while minimizing loss in mechanical properties in consumer FDM parts, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* 5(2) (2022) 197-212.
- [217] V.D.P. Rao, P. Rajiv, V.N. Geethika, Effect of fused deposition modelling (FDM) process parameters on tensile strength of carbon fibre PLA, *Materials Today: Proceedings* 18 (2019) 2012-2018.
- [218] J. Maloch, E. Hnátková, M. Žaludek, P. Krátký, Effect of processing parameters on mechanical properties of 3D printed samples, In *Materials Science Forum* 919 (2018) 230-235.
- [219] S.H. Masood, Intelligent rapid prototyping with fused deposition modelling, *Rapid Prototyping J* 2(1) (1996) 24-33.
- [220] M.R. Ayatollahi, A. Nabavi-Kivi, B. Bahrami, et al., The influence of in-plane raster angle on tensile and fracture strengths of 3D-printed PLA specimens, *Eng Fract Mech* 237 (2020) 107225.

220 Bibliografie

- [221] M. Dawoud, I. Taha, S.J. Ebeid, Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques, *Journal of Manufacturing Processes* 21 (2016) 39-45.
- [222] O.A. Mohamed, S.H. Masood, J.L. Bhowmik, Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects, *Advances in Manufacturing* 3(1) (2015) 42-53.
- [223] B. Bahrami, M.R. Ayatollahi, I. Sedighi, The effect of in-plane layer orientation on mixed-mode I-II fracture behavior of 3D-printed poly-carbonate specimens, *Eng Fract Mech* 231 (2020) 107018.
- [224] M.M. Hanon, R. Marczis, L. Zsidai, Influence of the 3D Printing Process Settings on Tensile Strength of PLA and HT-PLA, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 65(1) (2021) 38-46.
- [225] G. Atakok, M. Kam, H.B. Koc, Tensile, three-point bending and impact strength of 3D printed parts using PLA and recycled PLA filaments: A statistical investigation, *Journal of Materials Research and Technology* 18 (2022) 1542-1554.
- [226] ISO 527-2, *Plastics — Determination of tensile properties — Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics*, 2012.
- [227] R. Arrigo A. Frache, FDM printability of PLA based-materials: the key role of the rheological behavior, *Polymers* 14 (2022) 1754.
- [228] E. Linul, D.A. Serban, L.D. Pirvulescu, *si altii, Rezistenta Materialelor. Lucrari de laborator*, Editura Politehnica, 2019.
- [229] D.K. Rajak, P.H. Wagh, E. Linul, A review on synthetic fibers for polymer matrix composites: performance, failure modes and applications, *Materials* 15 (14) 4790.
- [230] V. Patel, U. Joshi, A. Joshi, et al., Strength Evaluation of Functionalized MWCNT-Reinforced Polymer Nanocomposites Synthesized Using a 3D Mixing Approach, *Materials* 15 (2022) 7263.
- [231] D.I. Stoia, L. Marşavina, E. Linul, Correlations between Process Parameters and Outcome Properties of Laser-Sintered Polyamide, *Polymers* 11 (2019) 1850.
- [232] A. Alafaghani, A. Qattawi, B. Alrawi, A. Guzman, Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach, *Procedia Manufacturing* 10 (2017) 791-803.
- [233] H.K. Dave, N.H. Patadiya, A.R. Prajapati, 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* 235(10) (2021) 1811-1827.
- [234] M.S. Priya, K. Naresh, R. Jayaganthan, R. Velmurugan, A comparative study between in-house 3D printed and injection molded ABS and PLA polymers for low-frequency applications, *Mater. Res. Express* 6 (2019) 085345.
- [235] S.L. Rodríguez-Reyna, C. Mata, J.H. Díaz-Aguilera, H.R. Acevedo-Parra, F. Tapia, Mechanical properties optimization for PLA, ABS and Nylon + CF manufactured by 3D FDM printing, *Materials Today Communications* 33 (2022) 104774.
- [236] V.E. Kuznetsov, A.N. Solonin, O.D. Urzhumtsev, R. Schilling, A.G. Tavitov, Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process, *Polymers* 10 (2018) 313.

- [237] J.J. Laureto, J.M. Pearce, Anisotropic mechanical property variance between ASTM D638-14 type I and type IV fused filament fabricated specimens, *Polym. Test* 68 (2018) 294-301.
- [238] V. Cojocaru, D. Frunzaverde, C.O. Miclosina, G. Marginean, The Influence of the Process Parameters on the Mechanical Properties of PLA Specimens Produced by Fused Filament Fabrication—A Review, *Polymers* 14 (2022) 886.
- [239] H. Vanaei, M. Shirinbayan, M. Deligant, K. Raissi, J. Fitoussi, S. Khelladi, A. Tcharkhtchi, Influence of process parameters on thermal and mechanical properties of polylactic acid fabricated by fused filament fabrication, *Polym. Eng. Sci.* 60 (2020) 1822-1831.
- [240] R.B.D. Pereira, E.B. Pereira, P.R. Oliveira, et al., The effect of printing parameters on the tensile properties of bidirectional PLA structures: a statistical approach, *Prog Addit Manuf* (2022) <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00345-z>.
- [241] S.R. Rajpurohit, H.K. Dave, Tensile Properties Of 3D Printed PLA under unidirectional and bidirectional raster angle: a comparative study, *International Journal of Chemical, Materials and Biomolecular Sciences*: 11.0(1) (2018) <https://doi.org/10.5281/zenodo.1315615>.
- [242] M.M. Hanon, J. Dobos, L. Zsidai, The influence of 3D printing process parameters on the mechanical performance of PLA polymer and its correlation with hardness, *Procedia Manufacturing* 54 (2021) 244-249.
- [243] B.M. Tymrak, M. Kreiger, J.M. Pearce, Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions, *Materials & Design* 58 (2014) 242-246.
- [244] V.E. Kuznetsov, A.N. Solonin, A. Tavitov, O. Urzhumtsev, A. Vakulik, Increasing strength of FFF three-dimensional printed parts by influencing on temperature-related parameters of the process. *Rapid Prototyp. J.* 26 (2020) 107-121.
- [245] S. Farah, D.G. Anderson, R. Langer, Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews* 107 (2016) 367-392.
- [246] S. Deshwal, A. Kumar, D. Chhabra, Exercising hybrid statistical tools GA-RSM, GA-ANN and GA-ANFIS to optimize FDM process parameters for tensile strength improvement, *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 31 (2020) 189-199.
- [247] F. Ning, W. Cong, Y. Hu, H. Wang, Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: effects of process parameters on tensile properties, *Journal of Composites Materials*, 28 (2016) 1-12.
- [248] M.R. Khosravani, F. Berto, M.R. Ayatollahi, et al. Characterization of 3D-printed PLA parts with different raster orientations and printing speeds. *Sci Rep* 12 (2022) 1016.
- [249] K.G.J. Christiyana, U. Chandrasekhar, K. Venkateswarlu, A study on the influence of process parameters on the mechanical properties of 3d printed ABS composite, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 114 (2016) 012109.
- [250] S.N. Mazurchevici, B. Pricop, B. Istrate, A.D. Mazurchevici, V. Carlescu, C. Carausu, D. Nedelcu, Technological Parameters Effects on Mechanical Properties of Biodegradable Materials Using FDM, *Mater. Plast.* 57 (2020) 215-227.
- [251] S. Garzon-Hernandez, D. Garcia-Gonzalez, A. J´erusalem, A. Arias, Design of FDM 3D printed polymers: an experimental-modelling methodology for the prediction of mechanical properties, *Materials and Design* 188 (2020) 108414.

222 Bibliografie

- [252] R.A. Wach, P. Wolszczak, A. Adamus-Włodarczyk, Enhancement of Mechanical Properties of FDM-PLA Parts via Thermal Annealing, *Macromol. Mater. Eng.* 303(9) (2018) 1800169.
- [253] M. Lay, N.L. Najwa Thajudin, Z.A.A. Hamid, A. Rusli, M.K. Abdullah, R.K. Shuib, Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding. *Composites Part B: Engineering* 176 (2019) 107341.
- [254] A. Sola, W.J. Chong, D.P. Simunec, Y. Li, A. Trinchi, I.L. Kyrtzsis, C. Wen, Open challenges in tensile testing of additively manufactured polymers: A literature survey and a case study in fused filament fabrication, *Polymer Testing* 117 (2023) 107859.
- [255] J. Torres, M. Cole, A. Owji, Z. DeMastry, A.P. Gordon, An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments. *Rapid Prototyp. J.* 22 (2016) 387-404.
- [256] M. Behzadnasab, A.A. Yousefi, D. Ebrahimibagha, F. Nasiri, Effects of processing conditions on mechanical properties of PLA printed parts. *Rapid Prototyp. J.* 26 (2020) 381-389.
- [257] A.R. Zekavat, A. Jansson, J. Larsson, L. Pejryd, Investigating the effect of fabrication temperature on mechanical properties of fused deposition modeling parts using X-ray computed tomography, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 100 (2019) 287-296.
- [258] S.H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, P.K. Wright, Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS, *Rapid Prototyping*, 8(4) (2002) 248-257.
- [259] D. Croccolo, M. De Agostinis, G. Olmi, Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of ABS-M30. *Comput. Mater. Sci.* 79 (2013) 506-518.
- [260] A.W. Gebisa, H.G. Lemu, Investigating effects of Fused deposition modeling (FDM) processing parameters on flexural properties of ULTEM 9085 using designed experiment, *Materials* 11(4) (2018) 1-23.
- [261] P.V.K. Sahu, Comparison of Most Suitable 3D Printing Materials, Failure Testing of PLA and ABS and Experimental Testing of PLA by Instron Machine *IJSRD* 5(7) (2017) 760-765.
- [262] D.E. Henton, P. Gruber, J. Lunt, J. Randall, Polylactic Acid Technology Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites 16 (2005) 527-578.
- [263] M.F. Afose, Mechanical and viscoelastic properties of polylactic acid (pla) materials processed through fused deposition modelling (FDM), Thesis and Dissertation, 2016.
- [264] www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=022f6212e6e0415c9f740b3db3d1ae7e&ckck=1 (accesat 24.11.2022).
- [265] A. Pandzic, D. Hodzic, A. Milovanovic, Influence of material color on mechanical properties of PLA material in FDM technology, *Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium, Vienna, 2019.*
- [266] A. Lanzotti, M. Grasso, G. Staiano, M. Martorelli, The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer, *Rapid Prototyping Journal* 21(5) (2015) 604-617.
- [267] A. Milovanovic, A. Sedmak, A. Grbovic, Z. Golubovic, G. Mladenovic, K. Colic, M. Milosevic, Comparative analysis of printing parameters effect on mechanical properties of natural PLA and advanced PLA-X, *Procedia Structural Integrity* 28 (2020) 1963-1968.

- [268] J. Giri, A. Chiwande, Y. Gupta, C. Mahatme, P. Giri, Effect of process parameters on mechanical properties of 3d printed samples using FDM process. *Mater. Today-Proc.* 47 (2021) 5856–5861.
- [269] J. Beniak, P. Krizan, M. Matus, Mechanical properties of biodegradable PLA plastic parts produced by 3D printing, *MM Sci. J.* (2019) 2746–2750.
- [270] M. Montero, S. Roundy, și colab., Material characterization of fused deposition modeling (FDM) ABS by designed experiments, *Soc Manuf Eng* 10 (2001) 1–21.
- [271] S.H. Ahn , M. Montero, și colab., Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS, *Rapid Prototyp J* 8(4) (2002) 248–257.
- [272] T. Letcher, B. Rankouhi, S. Javadpour, Experimental study of mechanical properties of additively manufactured ABS plastic as a function of layer parameters. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, (2015), Nov 13 (Vol. 57359, p. V02AT02A018). American Society of Mechanical Engineers.
- [273] M. Samykano, S.K. Selvamani, și colab., Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters, *Int J Adv Manuf Technol* 102(9) (2019) 2779–2796.
- [274] C. Ziemian, M. Sharma, S. Ziemian, Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modelling, *Mech Eng* 23 (2012) 159–180.
- [275] R. Hernandez, D. Slaughter, D. Whaley, J. Tate, B. Asiabanpour, Analyzing the Tensile, Compressive, and Flexural Properties of 3D Printed ABS P430 Plastic Based on Printing Orientation Using Fused Deposition Modeling. in: *Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (Austin, TX, USA)* (2019) 939–950.
- [276] K.C. Ang, K.F. Leong, C.K. Chua, M. Chandrasekaran, Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in fused deposition modelling-fabricated porous structures, *Rapid Prototyp J* 12(2) (2006) 100–105.
- [277] A.K. Sood, R.K. Ohdar, S.S. Mahapatra, Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement, *J Adv Res* 3(1) (2012) 81–90.
- [278] G. Domínguez-Rodríguez, J.J. Ku-Herrera, A. Hernández-Pérez, An assessment of the effect of printing orientation, density, and filler pattern on the compressive performance of 3D printed ABS structures by fuse deposition, *Int J Adv Manuf Technol* 95(5) (2018) 1685–1695.
- [279] B. Aloyaydi, S. Sivasankaran, A. Mustafa, Investigation of infill-patterns on mechanical response of 3D printed poly-lactic-acid, *Polymer Testing* 87 (2020) 106557.
- [280] B.H. Lee, J. Abdullah, Z.A. Khan, Optimization of Rapid Prototyping Parameters for Production of Flexible ABS Object, *Journal of Materials Processing Technology* 169 (2005) 54–61.
- [281] B. Vasudevarao, D.P. Natarajan, M. Henderson, A. Razdan, Sensitivity of RP Surface Finish to Process Parameter Variation. in: *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Proceedings (Austin, TX, USA)* (2000) 251–258.
- [282] A. Bagsik, V. Schöppner, E. Klemp, FDM Part Quality Manufactured With Ultem* 9085. in: *Proceedings of the 14th International Scientific Conference on Polymeric Materials (Halle, Germany)* (2010) 307–315.
- [283] L. Baich, G. Manogharan, H. Marie, Study of Infill Print Design on Production Cost-Time of 3D Printed ABS Parts, *International Journal of Rapid Manufacturing* 5 (2015) 308–319.

224 Bibliografie

- [284] U.K. Uz Zaman, E. Boesch, și colab., Impact of Fused Deposition Modeling (FDM) Process Parameters on Strength of Built Parts Using Taguchi's Design of Experiments, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 101 (2019) 1215–1226.
- [285] M. Fahad, M. Mujeeb, M.A. Khan, Effect of Process Parameters on the Compressive and Impact Strength of 3D Printed Parts, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering* 47 (2023) 257–265.
- [286] E. Linul, L. Marsavina, T. Voiconi, T. Sadowski, Study of factors influencing the mechanical properties of polyurethane foams under dynamic compression, *Journal of Physics: Conference Series* 451 (1) (2013) 012002.
- [287] E. Linul, O. Khezzadeh, Axial crashworthiness performance of foam-based composite structures under extreme temperature conditions, *Composite Structures* 271 (2021) 114156.
- [288] ASTM D1621-16, Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics, 2016.
- [289] ISO 844:2021, Rigid cellular plastics — Determination of compression properties, 2021.
- [290] E. Linul, Spume metalice și compozite pe bază de spume metalice, Teză de abilitare în domeniul de Doctorat Inginerie Mecanică, 2022.
- [291] E. Linul, Studiul factorilor ce influențează proprietățile mecanice ale spumelor poliuretanică rigide, Teză de doctorat în domeniul Inginerie Mecanică, 2011.
- [292] J. Nicholls, The MCC decision matrix: a tool for applying strategic logic to everyday activity. *Management decision* (1995).
- [293] C.R. Domínguez, I.V. Martínez, și colab., Analysis and evaluation of risks in underground mining using the decision matrix risk-assessment (DMRA) technique, in Guanajuato, Mexico, *Journal of Sustainable Mining* 18(1) (2019) 52-59.
- [294] J.L. Salmerona, F. Smarandacheb, Redesigning Decision Matrix Method with an indeterminacy-based inference process. *Multispace and Multistructure, Neutrosophic Transdisciplinarity (100 Collected Papers of Sciences)* 4 (2010) 151.
- [295] M. Fernandez-Vicente, W. Calle, și colab., Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing, *3D Printing Addit Manuf* 3 (2016) 183–92.
- [296] D.P. Cole, J.C. Riddick și colab., Interfacial mechanical behavior of 3D printed ABS, *J Appl Polym Sci* (2016) 133.
- [297] G.C. Onwubolu, F. Rayegani. Characterization and optimization of mechanical properties of ABS parts manufactured by the fused deposition modelling process, *Int J Manuf Eng* 2014 (2014) 1–13.
- [298] S. Ziemian, M. Okwara, C.W. Ziemian, Tensile and fatigue behavior of layered acrylonitrile butadiene styrene, *Rapid Prototyping J* 21 (2015) 270–8.
- [299] A.K. Sood, R.K. Ohdar, S.S. Mahapatra, Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts, *Mater Des* 31 (2010) 287–95.
- [300] O.S. Es-Said, J. Foyos, și colab., Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples, *Mater Manuf Processes* 15 (2000) 107–22.
- [301] J.F. Rodríguez, J.P. Thomas, J.E. Renaud, Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) fused deposition materials, *Experimental investigation. Rapid Prototyping J* 7 (2001) 148–58.

- [302] J.F. Rodriguez, Modeling the mechanical behavior of fused deposition ABS polymer components. Notre Dame, IN: Aerospace & Mechanical Engineering Department, University of Notre Dame (1999).
- [303] Q. Sun, G.M. Rizvi, și colab., Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments, *Rapid Prototyping J* 14 (2008) 72–80.
- [304] A. Vairis, M. Petousis, și colab., On the strain rate sensitivity of Abs and Abs plus fused deposition modeling parts, *J Mater Engng Perform* 25 (2016) 3558–65.
- [305] G. Percoco, F. Lavecchia, L.M. Galantucci, Compressive properties of FDM rapid prototypes treated with a low cost chemical finishing, *J Appl Sci Eng Technol* 4 (2012) 3838–42.
- [306] M.R.M. Aliha, M.R. Ayatollahi, Geometry effects on fracture behaviour of polymethyl methacrylate, *Mater. Sci. Eng. A* 527 (2010) 526–530.
- [307] S.A. Saed, H.R. Karimi, și colab., Full range I/II fracture behavior of asphalt mixtures containing RAP and rejuvenating agent using two different 3-point bend type configurations, *Constr. Build. Mater.* 314, Part B (2022) 125590.
- [308] M.R.M. Aliha, H.R. Karimi, S.M.N. Ghoreishi, Design and validation of simple bend beam specimen for covering the full range of I+II fracture modes, *Eur. J. Mech. A/Solids* 91 (2022) 104425.
- [309] M.R.M. Aliha, S.S. Mousavi, și colab., Crack initiation angles and propagation paths in polyurethane foams under mixed modes I/II and I/III loading, *Theor. Appl. Fract. Mech.* 101 (2019) 152–161.
- [310] M.R.M. Aliha, F. Berto, și colab., Mixed mode I/II fracture investigation of Perspex based on the averaged strain energy density criterion, *Phys. Mesomech.* 20(2) (2017) 149–156.
- [311] M.R. Ayatollahi, M.R.M. Aliha, Analysis of a new specimen for mixed mode fracture tests on brittle materials, *Eng. Fract. Mech.* 76(11) (2009) 1563–1573.
- [312] A. Bahmani, M.R.M. Aliha, și colab., An extended edge-notched disc bend (ENDB) specimen for mixed-mode I+II fracture assessments, *Int. J. Solids Struct.* 193–194 (2020) 239–250.
- [313] A. Mousavi, M.R.M. Aliha, D.M. Imani, Effects of biocompatible Nanofillers on mixed-mode I and II fracture toughness of PMMA base dentures, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 103 (2019) 103566.
- [314] J.F. Rodriguez, J.P. Thomas, J.E. Renaud, Maximizing the strength of fused-deposition ABS plastic parts, presented at the 10th Solid Free-form Fabrication Symposium Proceedings, Austin, TX (1999).
- [315] M. Blattmeier, G. Witt, și colab., Influence of surface characteristics on fatigue behaviour of laser sintered plastics, *Rapid Prototyping J* 18 (2012) 161–71.
- [316] J. Torres, M. Cole, și colab., An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments, *Rapid Prototyping J* 22 (2016) 387–404.
- [317] B. Ameri, F. Taheri-Behrooz, M.R.M. Aliha, Evaluation of the geometrical discontinuity effect on mixed-mode I/II fracture load of FDM 3D-printed parts, *Theor. Appl. Fract. Mech.* 113 (2021) 102953.
- [318] Y. Song, Y. Li, și colab., Tagarielli, Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA, *Mater Des* 123 (2017) 154–164.
- [319] T. Brugo, R. Palazzetti, și colab., Fracture mechanics of laser sintered cracked polyamide for a new method to induce cracks by additive manufacturing, *Polym Test* 50 (2016) 301–308.

226 Bibliografie

- [320] A. Nurizada, K. Kirane, Induced anisotropy in the fracturing behavior of 3D printed parts analyzed by the size effect method, *Engng Fract Mech* 239 (2020) 107304.
- [321] K.R. Hart, R.M. Dunn, și colab., Increased fracture toughness of additively manufactured amorphous thermoplastics via thermal annealing, *Polymer* 144 (2018) 192-204.
- [322] D. Young, N. Wetmore, M. Czabaj, Interlayer fracture toughness of additively manufactured unreinforced and carbon-fiber-reinforced acrylonitrile butadiene styrene, *Addit Manuf* 22 (2018) 508-515.
- [323] K.R. Hart, E.D. Wetzel, Fracture behavior of additively manufactured acrylonitrile butadiene styrene (ABS) materials, *Eng. Fract. Mech.* 177 (2017) 1-13.
- [324] W. Zhang, R. Melcher, și colab., Three- dimensional printing of complex-shaped alumina/glass composites, *Adv. Eng. Mater.* 11 (12) (2009) 1039-1043.
- [325] C. Vălean, L. Marșavina, M. Mărghitaș, et al., The effect of crack insertion for FDM printed PLA materials on Mode I and Mode II fracture toughness, *Procedia Structural Integrity* 28 (2020) 1134-1139.
- [326] Y. Murakami, *Stress Intensity Factors Handbook*, Pergamon Press, New York (1987).
- [327] E. Linul, L. Marsavina, Prediction of fracture toughness for open cell polyurethane foams by finite element micromechanical analysis, *Iran Polym J* 20(9) (2011) 736-746.
- [328] F. Erdogan, G.C. Sih, On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear, *J Basic Engn* 85 (1963) 519-525.
- [329] M.F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, Fourth Edition, Butterworth – Heinemann, Oxford (2011).
- [330] ASTM D256-23e1, Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics, 2023.
- [331] ISO 180:2023, Plastics - Determination of Izod impact strength, 2023.
- [332] A.E. Patterson, T.R. Pereira, J.T. Allison, S.L. Messimer, IZOD impact properties of full-density FDM polymer materials with respect to raster angle and print orientation, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 235(10) (2021) 1891-1908.
- [333] N.P. Raut, S. Bhosale, A.B. Kolekar, Application of Taguchi methodology in evaluating the IZOD impact strength of FDM 3D printed component, *Materials Today: Proceedings* (2022), <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.144>.
- [334] C. Benwood, A. Anstey, J. Andrzejewski, M. Misra, A.K. Mohanty, Improving the Impact Strength and Heat Resistance of 3D Printed Models: Structure, Property, and Processing Correlations during Fused Deposition Modeling (FDM) of Poly(Lactic Acid), *ACS Omega* 3, 4 (2018) 4400-4411.
- [335] L. Wang, W.M. Gramlich, D.J. Gardner, Improving the impact strength of Poly(lactic acid) (PLA) in fused layer modeling (FLM), *Polymer* 114 (2017) 242-248.
- [336] M.V. Pavan, K. Balamurugan, V. Srinivasadesikan și colab., Impact and Shear Behavior of PLA/12%Cu Reinforced Composite Filament Printed at Different FDM Conditions, *Arab J Sci Eng* 46 (2021) 12709-12720.
- [337] H. de Vries, R. Engelen, E. Janssen, Impact strength of 3D-printed polycarbonate, *FACTA UNIVERSITATIS Series Electronics and Energetics* 33(1) (2020) 105-117.

- [338] D.I. Stoia, S.V. Galatanu, L. Marsavina, Impact properties of laser sintered polyamide, according to building orientation, *J Mech Sci Technol* 37 (2023) 1119–1123.
- [339] A. Tsouknidas, M. Pantazopoulos, I. Katsoulis, D. Fasnakis, S. Maropoulos, N. Michailidis, Impact absorption capacity of 3D-printed components fabricated by fused deposition modelling, *Materials & Design* 102 (2016) 41–44.
- [340] G.T.L. Priyanka, Ch. Saideep, T. Tadepalli, Dynamic Characterization of Additively Manufactured Polylactide (PLA), *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L Journal of Materials Design and Applications* 236(5) (2021) doi.org/10.1177/14644207211065.
- [341] A. Bouteldja, M.A. Louar, L. Hemmouche, L. Gilson, A. Miranda-Vicario, L. Rabet, Experimental investigation of the quasi-static and dynamic compressive behavior of polymer-based 3D-printed lattice structures, *International Journal of Impact Engineering* 180 (2023) 104640.
- [342] M. Nachtane, M. Tarfaoui, Y. Ledoux, S. Khammassi, E. Leneveu, J. Pelleter, Experimental investigation on the dynamic behavior of 3D printed CF-PEKK composite under cyclic uniaxial compression, *Composite Structures* 247 (2020) 112474.
- [343] ASTM D5628-10, Standard Test Method For Impact Resistance Of Flat, Rigid Plastic Specimens By Means Of A Falling Dart (Tup Or Falling Mass), 2010.
- [344] T. Cui, S. Mukherjee și colab., Fatigue of graphene, *Nat Mater* 19 (2020) 405–11.
- [345] C. Bierögel, *Polymer Solids and Polymer Melts—Mechanical and Thermomechanical Properties of Polymers*, Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [346] M. Frascio, M. Avalle, M. Monti. Fatigue strength of plastics components made in additive manufacturing: First experimental results. In: *Procedia Structural Integrity*, Elsevier B.V. (2018) 32–43.
- [347] H. Zhang, L. Cai și colab., Tensile, creep, and fatigue behaviors of 3D-printed acrylonitrile butadiene styrene, *J Mater Eng Perform* 27 (2018) 57–62.
- [348] N.S.F. Jap, G.M. Pearce și colab., The effect of raster orientation on the static and fatigue properties of filament deposited ABS polymer, *Int J Fatigue* 124 (2019) 328–37.
- [349] S. Lampman, *Characterization and failure analysis of plastics*; 2003. https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=RJWiiLJLdxYC&oi=fnd&pg=PA1&ots=L3T-hLHwkR&sig=pXUgPzUDAkN90ny9Ehr_2QZdS54 (accesat 17 August 2023).
- [350] M. Domingo-Espin, J.A. Travieso-Rodriguez și colab., Fatigue performance of ABS specimens obtained by fused filament fabrication, *Materials* 11 (2018) 2521.
- [351] J. Lee, A. Huang, Fatigue analysis of FDM materials, *Rapid Prototyping J* 19 (2013) 291–9.
- [352] T. Corbett, T. Kok și colab., Identification of mechanical and fatigue characteristics of polymers fabricated by additive manufacturing process, *ASPE Spring Topical Meeting* 57 (2014) 186–9.
- [353] M.M. Padzi, M.M. Bazin, W.M:W. Muhamad, In: *Fatigue Characteristics of 3D Printed Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)*. Institute of Physics Publishing; (2017) 012060.
- [354] C.W. Ziemian, R.D. Ziemian, K.V. Haile, Characterization of stiffness degradation caused by fatigue damage of additive manufactured parts, *Mater Des* 109 (2016) 209–18.

228 Bibliografie

- [355] S.B. Mishra, S.S. Mahapatra, An experimental investigation on strain controlled fatigue behaviour of FDM build parts, *Int J Prod Quality Manage* 24 (2018) 323–45.
- [356] S. Terekhina, T. Tarasova și colab., The effect of build orientation on both flexural quasi-static and fatigue behaviours of filament deposited PA6 polymer, *Int J Fatigue* 140 (2020) 105825.
- [357] S. Terekhina, T. Tarasova și colab., On the difference in material structure and fatigue properties of polyamide specimens produced by fused filament fabrication and selective laser sintering, *Int J Adv Manuf Technol* 111 (2020) 93–107.
- [358] J.M. Puigoriol-Forcada, A. Alsina și colab., Flexural fatigue properties of polycarbonate fused-deposition modelling specimens, *Mater Des* 155 (2018) 414–21.
- [358] A.T. Miller, D.L. Safranski și colab., Fatigue of injection molded and 3D printed polycarbonate urethane in solution, *Polymer* 108 (2017) 121–34.
- [360] G. Dolzyk, S. Jung, Tensile and fatigue analysis of 3D-printed polyethylene terephthalate glycol, *J Fail Anal Prev* 19 (2019) 511–8.
- [361] M. Fischer, V. Schoppner, Fatigue behavior of FDM parts manufactured with Ultem 9085, *JOM* 69 (2017) 563–8.
- [362] O.H. Ezeh, L. Susmel, Fatigue strength of additively manufactured polylactide (PLA): effect of raster angle and non-zero mean stresses, *Int J Fatigue* 126 (2019) 319–26.
- [363] O.H. Ezeh, L. Susmel, On the fatigue strength of 3D-printed polylactide (PLA). In: *Procedia Structural Integrity*, Elsevier B.V. (2018) 29–36.
- [364] R. Jerez-Mesa, J.A. Travieso-Rodriguez și colab., Fatigue lifespan study of PLA parts obtained by additive manufacturing, *Procedia Manuf* 13 (2017) 872–9.
- [365] G. Gomez-Gras, R. Jerez-Mesa și colab., Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens, *Mater Des* 140 (2018) 278–85.
- [366] M.F. Afrose, S.H. Masood și colab., Effects of part build orientations on fatigue behaviour of FDM-processed PLA material, *Progr Additive Manuf* 1 (2016) 21–8.
- [367] T. Letcher, M. Waytashek, Material Property Testing of 3D-Printed Specimen in PLA on an Entry-Level 3D Printer Cellular Metamaterials View project Linking an Energy-Based Fatigue Life Prediction to Fracture Mechanics View project. In: *Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, ASME, Montreal, Quebec, Canada (2014).
- [368] F. Arbeiter, M. Spoerk și colab., Fracture mechanical characterization and lifetime estimation of near-homogeneous components produced by fused filament fabrication, *Polym Test* 66 (2018) 105–13.
- [369] ASTM D7791-17, Standard Test Method for Uniaxial Fatigue Properties of Plastics, 2017.