

UNIVERSITATEA “BABEȘ-BOLYAI” CLUJ-NAPOCA
FACULTATEA DE FIZICĂ
SPECIALIZAREA FIZICĂ TEHNOLOGICĂ

LUCRARE DE LICENȚĂ

Coordonator științific

Lect. dr. Ioan Botiz

Lect. dr. Răzvan Hirian

Absolvent

Alin-Antonio Buștihan

[2023]

UNIVERSITATEA “BABEȘ-BOLYAI” CLUJ-NAPOCA

FACULTATEA DE FIZICĂ

SPECIALIZAREA FIZICĂ TEHNOLOGICĂ

LUCRARE DE LICENȚĂ

**STRUCTURI POLIMERICE PRINTATE 3D PENTRU APLICAȚII BAZATE PE
ABSORBȚIA ENERGIEI MECANICE**

Coordonator științific

Lect. dr. Ioan Botiz

Lect. dr. Răzvan Hirian

Absolvent

Alin-Antonio Buștihan

[2023]

Abstract

În această lucrare, este prezentat studiul capacității de absorbție a energiei mecanice în cazul a patru tipuri de structuri (de tip fagure de miere), în funcție de proprietățile fizice ale poliuretanului termoplastic (TPU) din care au fost produse. Capitolul de introducere în temă argumentează motivul pentru care a fost ales acest tip de structură și materialul din care este produsă, astfel încât structurile să fie eficiente în ceea ce privește absorbția energiei mecanice și în același timp să fie reutilizabile. Capitolul intitulat Metode și metodologie prezintă pe larg modul de funcționare a unei imprimante 3D, parametrii specifici, testele de rupere și compresie, modul de producție, proprietățile materialului utilizat și parametrii în funcție de care putem caracteriza structurile obținute. Capitolul Rezultate conține rezultatele originale obținute și analizate de noi. Astfel, în primă fază prezentăm modul în care (urmele de) apă influențează filamentul de TPU 85A. Mai departe vedem cum testele de rupere efectuate pe probele standard ASTM-D628-10 Type V au arătat că temperatura optimă de printare este de 215 °C. În final, comprimarea structurilor și caracterizarea acestora prin intermediul parametrilor precum SEA (energia specifică absorbită) sau eficiența absorbției energiei a arătat că structurile cu orificii hexagonale sunt mai puțin costisitoare și mai eficiente decât cele cu orificii circulare. Rezultatele mai bune au fost obținute în cazul structurii cu orificii hexagonale, realizată din TPU 95A și a structurii rotite cu orificii hexagonale, realizată din TPU 85A. În final, în Cap. Concluzii, arătăm ca două dintre structurile optime printate 3D de noi prezintă o eficiență în absorbția energiei mecanice mai bună (de 47% și respectiv de 46% obținute la comprimarea până la 80% din grosimea structurilor), în comparație cu structuri realizate în alte studii (45% obținută la comprimarea până la 70% din grosimea structurilor). Chiar dacă în cadrul acestui proiect, care a fost derulat de la zero, aceasta eficiență nu este semnificativ mai mare, din punct de vedere a reutilizării, structurile prezintă un potențial ridicat pentru aplicații bazate pe absorbția energiei mecanice.

Cuprins

1. Introducere	5
2. Metode si metodologie	8
2.1. Imprimare 3D	8
2.2. Parametrii pentru printare	10
2.3. Procedura de modelare 3D	11
2.4. Teste mecanice	12
2.4.1. Test de rupere	12
2.4.2. Test de compresie.....	13
2.5. Materiale.....	14
2.6. Modele pentru absorbtie	17
2.7. Parametrii specifici pentru absorbtia energiei mecanice	18
3. Rezultate	21
3.1. Testarea temperaturii optime pentru printarea modelelor finale.....	22
3.2. Compresia structurilor de absorbtie.....	27

1. Introducere

Elementele naturale au oferit mereu un punct de pornire în producția de structuri celulare utilizate pentru diferite aplicații. Structurile celulare pentru absorbția șocului mecanic sunt un astfel de exemplu, poate una dintre cele mai interesante structuri macroscopice observate în natură este cea a unui fagure de miere. Dezvoltarea imprimantelor 3D a permis transpunerea mai ușoară a modelelor 3D virtuale sub forma unor structuri fizice. Varietatea materialelor utilizate pentru printarea 3D oferă o gamă largă de aplicații ale acestora. Metodele convenționale de producție a structurilor de absorbție sunt realizate în general prin injectarea unui material într-o matriță. Acest tip de metodă presupune ca pereții probei să fie complet umpluți, greutatea fiind mai mare decât în cazul probelor realizate prin imprimare 3D [1]. Prețul pentru producerea matrițelor utilizate este unul mare, astfel aceasta metodă este rentabilă doar în cazul producției în masă. Imprimarea 3D ne permite să modificăm structura pereților unei probe pentru ca greutatea acesteia să fie redusă, dar proprietățile să rămână comparabile. În cazul unui autovehicul ce funcționează pe bază de arderea a combustibilului, înlocuirea structurilor convenționale presupune o scădere în greutate a acestuia, mai departe aceasta este tradusă într-un consum mai mic, ceea ce presupune un volum redus al noxelor eliberate în atmosferă [2]. Imprimarea 3D oferă un mod de producție eficient al probelor deoarece permite modificarea rapidă a dimensiunilor structurilor cu un cost redus și o pierdere minimă de material în timpul producției. Studiul nostru se bazează pe investigarea unor proprietăți ale structurilor pentru absorbția energiei mecanice produse utilizând imprimarea 3D.

Energia mecanică ce apare în urma unui compresii poate să fie absorbită în mai multe moduri, acestea diferă în funcție de natura materialului din care este produsă structura sau forma acesteia. În cazul structurilor metalice absorbția energiei este realizată prin deformarea plastică a acestora [3]. Alte tipuri de structuri absorb energia prin comprimarea progresivă a structurii [4], acest lucru se întâmplă în general cazul structurilor polimerice sau a materialelor compozite. Aceste metode de absorbție presupun în general distrugerea completă a structurii pentru absorbția eficientă. În ultimii ani acest subiect a prezentat interes pentru cercetători, astfel au apărut rezultate remarcabile în absorbția energiei [5], aceștia au realizat o structură de absorbție inspirată de structura existentă în interiorul unei carapace de broască țestoasă. Au existat structuri ce imită forme de tip origami [6], care se împătură în momentul în care sunt comprimate, precum și structuri ce au utilizat ca inspirație microstructura lemnului de plută [7]. În cazul nostru am utilizat structura celulară a unui fagure de miere. Am ales să utilizăm două tipuri de celule de bază, una prezintă un orificiu central circular, iar cea de-a doua prezintă orificiul central hexagonal. Am decis să utilizăm pentru primul studiu de acest tip o structură sub formă de fagure de miere deoarece modul de printare și de

caracterizare acesteia este mai facilă. Ne dorim să realizăm patru tipuri de structuri de absorbție inspirate după forma unui fagure de miere, am ales astfel două structuri de bază, una prezintă orificii circulare, iar cealaltă prezintă orificii hexagonale. Pentru a aduce o îmbunătățire acestor structuri, am ales să realizăm alte două probe ce au planul superior rotit față de planul inferior cu 30° . Această idee a apărut în urma parcurgerii mai multor articole, precum [8], unde au fost testate mai multe variații ale acestui unghi de rotație, iar varianta de 30° a prezentat cele mai bune rezultate. Aceste rezultate au fost comparabile cu cele ale structurilor fără unghi de rotație, însă acest studiu a avut la bază un material metalic (Ti_6Al_4V). Am considerat că rezultatele pot să difere în cazul printării 3D utilizând un material polimeric. Avantajul structurilor sub formă de fagure de miere este multiplicitatea celulelor de bază, în cazul probelor realizate pentru studiul nostru am utilizat 55 de celule de bază.

Structurile produse și caracterizate de noi trebuie să aibă ca rezultat final o absorbție eficientă a energiei de șoc, fără ca structura să fie distrusă. Deoarece structura este reutilizabilă, în timp, cantitatea de material utilizat în producție este redusă. Structurile ce absorb șocul prin autodistrugere sunt înlocuite după absorbție, asta presupune nouă cantitate de material utilizat. Acest aspect face ca structura noastră să fie mai prietenoasă cu mediul înconjurător prin reducerea cantității de material polimeric utilizat.

Pentru ca structura să fie una reutilizabilă, materialul utilizat trebuie să fie unul elastic, cu capacitatea de a reveni la forma inițială. Imprimanta utilizată de noi este de tip FFF (fused filament fabrication), aceasta presupune utilizarea unui material polimeric sub formă de filament. Există o gamă largă de filamente utilizate pe piață. După consultarea literaturii de specialitate [9] ce dezbate o serie de moduri de printare și materialele specifice acestora moduri, am ales să utilizăm poliuretan termoplast (TPU). TPU este un material elastic [10] ce prezintă o gamă largă de variante, diferite din punct de vedere a durității materialului. Datorită elasticității, structurile realizate din acest material revin la forma inițială [11]. Pentru studiul nostru am ales să utilizăm trei tipuri de TPU pentru a vedea ce diferențe prezintă din punct de vedere al absorbției energiei în cazul în care din aceste materiale este produs același tip de structură.

În funcție de modul în care sunt stocate sau printate, filamentele polimerice pot produce rezultate diferite [12]. Ne referim la modul în care filamentele absorb apa dacă acestea sunt stocate în mediul ambiant și parametrii specifici pentru printarea materialului, setați din programul de tip slicer. Pentru testarea modului ideal de printare pentru TPU, am realizat probe standard ASTM-D628-10 Type V la diferite temperaturi de extrudare pentru a vedea care dintre acestea este cea mai avantajoasă în cazul aplicației noastre. Pentru a testa capacitățile probelor standard am ales să utilizăm un test de rupere ISO 527-1. După stabilirea temperaturii de printare în cazul celor trei

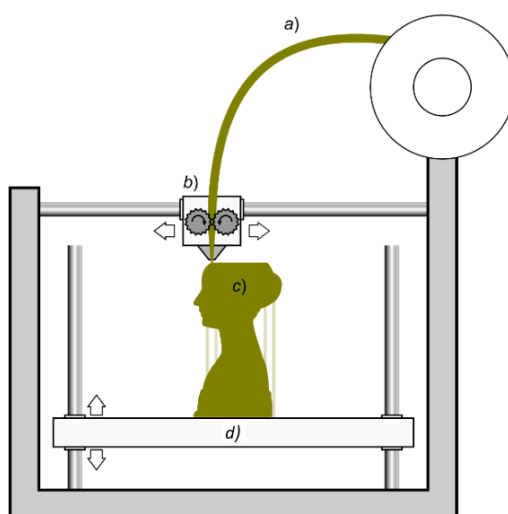
tipuri de filamente, am printat cele 4 tipuri de structuri. Acestea au fost supuse testului de compresie ce presupune plasarea probelor între două plăci metalice omogene, perfect drepte și comprimarea structurilor. Structurile au fost comprimate de trei ori pentru a putea observa modul în care acestea se comportă în cazul reutilizării.

2. Metode si metodologie

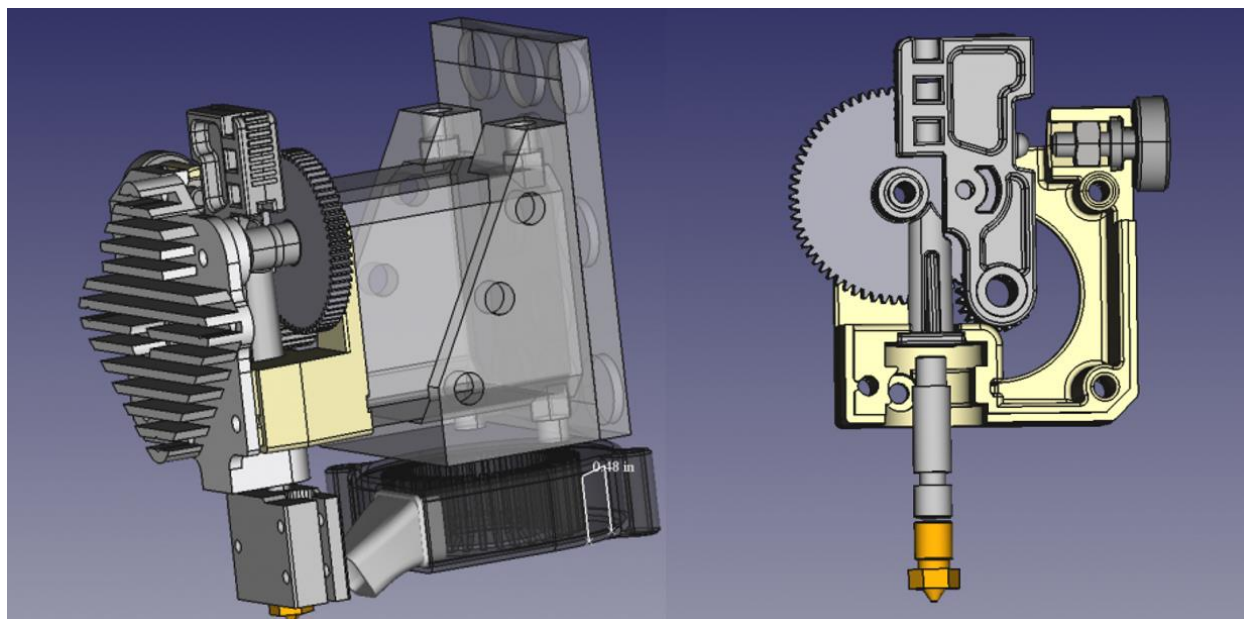
2.1. Imprimare 3D

Metoda utilizată în procesul de producție a probelor este printarea 3D utilizând o imprimantă de tip FFF (Fused filament fabrication), cunoscută și sub denumirea de FDM (Fused deposition modeling). Acest tip de imprimantă se bazează pe printarea prin extrudare la o anumită temperatură a unui filament polimeric. Această metodă este cea mai răspândită, datorită prețului redus al consumabilelor, timpul de printare este unul accesibil, iar modul de utilizare este ușor de înțeles.

Imprimantele 3D de tip FFF utilizează un material termoplastic sub formă de filament (fig. 2.1 a), în cazul nostru cu diametrul de 1.75 mm. Acest filament este încălzit până la temperatura de topire, iar mai apoi este direcționat de vârful extruderului pe suprafața de lucru pentru a produce modelul dorit strat cu strat. Numim extruder (fig. 2.1 b) întreg ansamblul de componente unde filamentul este încălzit și turnat. Extruderul poate să se miște pe un plan XY, utilizând două motoare pas cu pas, pentru a crea o secțiune din model. Același tip de motor se utilizează și pentru axa Z care este modificată prin mișcare în jos a întregului plan de printare. Prin coborârea planului și turnarea unui alt strat se realizează analog întreg modelul dorit. Suprafața planului de printare (fig. 2.1 d) poate să fie fabricată din materiale plastice sau metalice, în cazul nostru utilizăm o suprafață din PEI (polieterimidă). Vom numi pat suprafața pe care depunem modelul, iar vârful extruderului cap. Patul poate să aibă o temperatură setată în timpul printării, în funcție de tipul de material utilizat, de obicei acest lucru este specificat de către producător. Anumite materiale pot să fuzioneze cu suprafața patului, ceea ce le face greu de înlăturat și produce defecte de suprafață. În astfel de cazuri utilizăm un strat intermediar, solubil în apă. De exemplu, în cazul nostru am utilizat un adeziv pe bază de PVA (alcool polivinil).



Figură 2.1 Schema de funcționare a unui imprimante de tip FFF [13]



Figură 2.2 Schema tehnică a exteriorului (stânga) și interiorului (dreapta) extruderului Titan Aero 1.75mm [14]

Extruderul utilizat de noi este Titan Aero, acesta este prezentat în figura 2.2, partea stângă. În figura 2.2 dreapta, sunt prezentate componentele din care este alcătuit extruderul. Astfel avem în partea exterioară un motor pas cu pas utilizat pentru rotirea unei roți dințate ce alimentează cu filament zona de încălzire. Filamentul este direcționat către zona de încălzire printr-o zona de ghidaj ce prezintă un reglaj pentru strângerea filamentului. Reglajul este vizibil în figura 2.2 dreapta și este realizat din următoarele componente: tubul pentru direcționare (aflat în partea de jos a roții dințate), componenta de strângere a filamentului (aceasta se află între șurubul de reglaj și roata dințată), și șurubul de reglaj prin intermediul căruia tensionăm filamentul. Pentru a menține zona superioară a extruderului rece, peste aceasta din urmă este amplasat un radiator. Acesta din urmă este conectat și cu partea de sus a HeatBreak-ului astfel încât filamentul să nu fie topit prematur. Radiatorul este răcit de către un ventilator aflat în contact. Filamentul trece mai departe în zona de încălzire ce este înglobată într-un HeaterBlock din aluminiu ce prezintă orificiile specifice pentru senzorul de temperatură și încălzitor. HeaterBlock este un componentă ce menține temperatura constantă în timpul printării și conectează încălzitorul cu elementele de printare constituite din HeatBreak și duză, care la rândul lor sunt înfiletate în orificiul principală a HeaterBlock-ului. Un al doilea ventilator asigură răcirea materialului extrudat, după ce acesta este depus pe suprafața patului. În figura 2.2, în partea dreaptă, sunt ilustrate componentele din interiorul extruderului. Observăm astfel în partea superioară roata dințată ce alimentează cu filament și sistemul de strângere. În partea de jos, cu gri, este HeatBreak-ul, reprezentat de un tub fabricat dintr-un material rezistent la diferențe de temperatură și care prezintă pe exterior un filet ce face legătura dintre radiator și HeatBlock. Ultima componentă, reprezentată cu auriu este duza (vârful) care în cazul nostru are un diametru al orificiului de extrudare de 0.4 mm.

Există o gamă largă de imprimante 3D de acest tip, însă principiul de funcționare este asemănător în majoritatea cazurilor. Probele noastre au fost realizate utilizând o imprimantă Modix BIG60 care se diferențiază prin dimensiunile permise pentru printare (XYZ: 600 x 600 x 660 mm), fiind una dintre cele la mari existente în momentul de față pe piață .

2.2. Parametrii pentru printare

Figura 2.3 prezintă o parte din parametrii specifici unei probe printate 3D [15]. Parametrii ce intervin și pot modifica rezultatul final din punct de vedere al aspectului și al proprietăților fizice sunt:

Layer thickness [mm] : este grosimea fiecărui strat printat, pasul de deplasarea pe axa Z

Contour line width [mm]: este grosimea liniilor ce realizează conturul probei, aceasta este, de obicei, dimensiunea orificiului duzei (0.4mm)

Contout/wall thickness [mm]: este grosimea pereților probei, aceasta poate să fie formată din mai multe linii unite între ele

Infill density [%] : este procentajul de umplere a interiorului probelor, acesta influențează parametrii precum raster gap, raster angle și raster width

Raster gap [mm]: este zona goală dintre straturile printate 3D

Raster angle [°]: este unghiul de printare a straturilor interioare, acesta se modifică în funcție de modelul ales pentru infill (ex. grid, lines, zig-zag, etc.)

Raster width [mm]: este grosimea liniilor printate în interiorul probei, aceasta este, de obicei, dimensiunea orificiului duzei (0.4 mm)

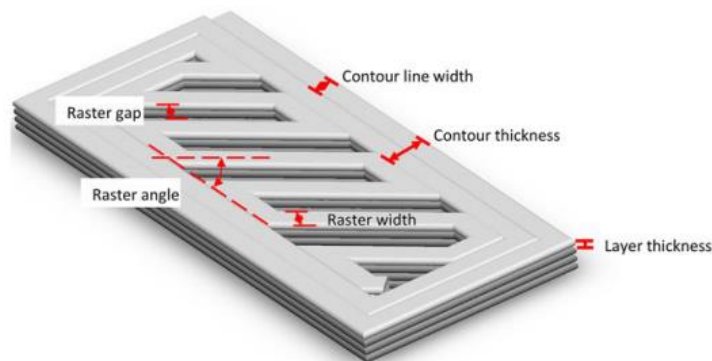
Print speed [mm/s]: este viteza de deplasare a extruderului în timpul printării, aceasta diferă în funcție de materialul utilizat

Printing temperature [°C]: este temperatura de printare, fiecare material are o plajă de temperaturi pentru printare, aceasta diferă în funcție de aplicație

Bed temperature [°C]: este temperatura la care este încălzită suprafața de printare, aceasta temperatură asigură un contact ferm între pat și probă

Tensionarea filamentului [abs]: este tensiunea de strângere a filamentului în zona de tracționare pentru ca roata dințată să nu alunece, dar nici să nu deformeze filamentul, aceasta diferă în funcție

de filament și este setată experimental prin strângerea sau deschiderea unui șurub până când fluxul de material este cel dorit.



Figură 2.3 Parametrii specifici pentru ai unei probe printate 3D, imagine preluată din [15]

2.3. Procedura de modelare 3D

Pentru realizarea modelelor polimerice 3D am utilizat în primă fază softul SOLIDWorks 2020, care este un soft de tip CAE (Computer-aided engineering) ce permite proiectarea și asamblarea modelelor 3D. În primă fază, modelele au fost realizate sub formă de componente care mai apoi au fost asamblate pentru a crea structuri de dimensiuni comparabile. Aceste modele au fost salvate mai apoi sub forma unor fișiere de tip .STL, deoarece programul de tip slicer poate să le citească doar în acest fel.

Modul de funcționarea a imprimantei 3D și a aparatelor de tip CNC (Computer numerical control) este bazat pe un limbaj numit G-code (pentru a transforma modelul realizat de noi în coordonate numerice, utilizăm un program de tip slicer). Acest program ne secționează proba în straturi ce au o grosime setată de noi și realizează un set de coordonate pentru fiecare strat în parte. Combinând seturile de coordonate pentru fiecare strat se realizează G-code-ul final. Prin intermediul programului de tip slicer sunt setați toți parametrii de printare specifici unui anumit tip de material. G-code-ul pentru probele noastre a fost realizat utilizând programul de tip slicer Cura 5.3.0.

Imprimanta 3D Modix Big 60 utilizează o placă de bază Duet 2 WiFi, acesta comunica cu computerul prin intermediul rețelei locale de internet. Ea are o interfață online pentru încărcarea G-code-urilor și vizualizarea în timp real a proceselor oferind astfel o aproximare a timpului în care proba este realizată (această aproximare se face în funcție de timpul real petrecut pentru printarea unui strat).

2.4. Teste mecanice

2.4.1. Test de rupere

Realizăm un test de rupere pentru a studia forța și elongația maximă la care proba cedează. Testul utilizat de noi este ISO 527-1, acesta presupune prinderea probei între doi cleși dințaiți, speciali pentru materiale plastice și tracționarea probei cu o viteză prestabilită până când aceasta cedează, acest test este reprezentat în figura 2.5. Aparatul ce realizează acest tip de test este Mecmesin MultiTest 5-i, ce poate să tracționeze sau comprime o probă cu până la 5 kN. Am utilizat ca model de test standardul ASTM-D628-10 Type V, acesta este reprezentat în figura 2.6.

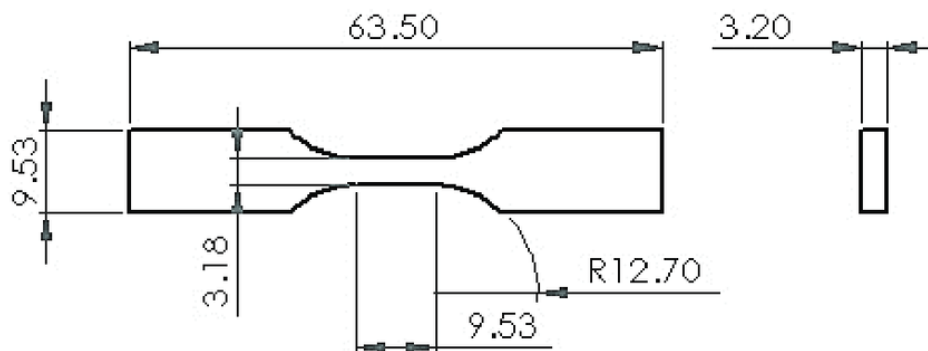
Scopul testului, în cazul nostru, a fost să observăm forța și elongația maximă a mai multor probe printate la diferite temperaturi pentru a stabili care este temperatura optimă de printare pentru ca straturile să adere cât mai bine. Pentru vizualizarea în timp real a datelor oferite de aparatul de test, utilizăm softul Emperor.

```
MESSAGE "Test Running"  
RUN @ -10 mm/min until load = -2500.0N, or break% = 90%  
CLEAR MESSAGE  
MESSAGE "End of Test Run"
```

Figură 2.4 Linii programare utilizate pentru testul de rupere



Figură 2.5 Probă supusa unui test de rupere



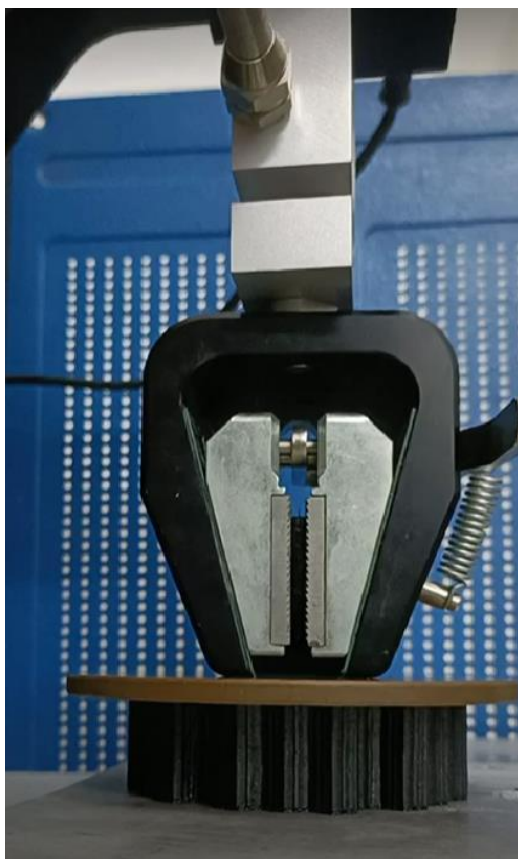
Figură 2.6 Dimensiunile probei standard ASTM-D628-10 Type V

2.4.2. Test de compresie

Realizăm un test de compresie pentru a studia parametrii specifici pentru absorbția de energie. Acești parametrii sunt extrași din curba de compresie. Testul presupune amplasarea unei probei între două plăci metalice perfect drepte, una dintre ele fiind fixă iar cealaltă este împinsă de către brațul aparatului. Componenta este amplasată central față de direcția de apăsare, iar placa este omogenă. Considerăm astfel că forța de apăsare este distribuită uniform pe suprafața de contact a probei. Pentru realizarea testului utilizăm același aparat, Mecmesin MultiTest 5-i, diferența dintre teste este dată de semnul deplasării. Acest lucru este realizat prin modificarea codului de test în programul Emperor (Force). Mentionăm că în ambele cazuri (fig. 2.4 și fig. 2.5) deplasarea este realizată cu 10 mm/minut. În cazul deplasării brațului în sus, semnul este (-), acesta reprezintă testul de rupere. În cazul deplasării brațului în jos, semnul este (+), acesta reprezentând testul de compresie.

```
MESSAGE "Test Running"
RUN @ 10 mm/min until load = 1000.0N, or position from tared zero = 19.00mm, or break% = 90%
CLEAR MESSAGE
MESSAGE "End of Test Run"
```

Figură 2.7 Linii programare utilizate pentru testul de rupere



Figură 2.8 Probă supusa unui test de compresie

2.5. Materiale

Studiul nostru dorește să aibă ca rezultat informații despre energia mecanică absorbită de structurile sub formă de fagure de miere, utilizând un material cu capacitatea de a reveni la forma inițială. Acest lucru ar permite structurilor propuse în această lucrare să fie reutilizabilă, în comparație cu majoritatea produselor existente deja pe piață și care absorb energia prin distrugerea structurii ceea ce duce implicit la distrugerea completă a produsului. Pentru a avea o structură reutilizabilă trebuie să alegem un material potrivit, dar care să poată fi printat utilizând imprimanta 3D disponibilă. Un candidat ideal pentru aceste cerințe poate să fie un polimer termoplastice sub formă de filament flexibil sau semi-flexibil.

Conform literaturii [11], TPU (poliuretan termoplastice) este un material ce prezintă proprietăți bune în absorbția energiei mecanice. Fiind un material flexibil, acesta poate să fie supus unei serii de teste, comparativ cu alte materiale ce sunt distruse complet după un singur test de compresie.

TPU [10] este un tip de polimer realizat prin sintetizarea de butadiol, policaprolactină și diferiți izocianati. În cazul materialelor în zona de duritate mai mică, precum 80A, acest compus izocianat este MDI (difenilmetan-4,4-diizocianat), iar pentru durități mai mari, precum 95A, este utilizat TODI (3,3-dimetil-4,4-bifenil diizocianat). Pentru o înțelegere mai clară, TPU este un copolimer

segmentat liniar ce are la bază două tipuri de segmente, HS (segmentul dur al polimerului) și SS (segmentul moale al polimerului). Segmentul de tip HS este format din diizocianat, acei MDI sau TODI, împreună cu butadiol. Segmentele de tip SS sunt realizate din lanțuri lungi de polieter sau poliester. Un segment moale este prins între două segmente dure. Acestea din urmă sunt puncte de legătură multifuncționale, iar rolul lor este să ranforseze structura, în timp ce segmentele moi formează o matrice de elastomer care este responsabilă de proprietățile elastice ale materialului.

Prețul de achiziție pentru TPU este unul avantajos, în cazul unei probe printate utilizând TPU 95A, prețul în medie, pentru o probă ce cântărește 20 g este de 4.26 lei. Pentru aceeași probă, utilizând TPU 85A, prețul este de 8 lei, iar pentru TPU 70A, prețul este de 8.36 lei. Dacă traducem aceste informații în suprafață acoperită cu acest tip de structuri, pentru a acoperii 1 m² sunt necesare aproximativ 246 de structuri ce generează un cost de 1048 lei în cazul TPU 95A, 1968 lei în cazul TPU 85A și 2056 lei pentru TPU 70A.

Am ales să utilizăm trei tipuri de TPU pentru a observa cum se comporta același tip de structură în funcție de duritatea materialului. Ca material de pornire am ales TPU 95A, deoarece acesta este cel mai utilizat material de acest tip de pe piață, astfel există multe surse de informare în legătură cu modul de printare, acesta fiind un material relativ ușor de printat utilizând caracteristicile imprimantei noastre 3D. Pentru celelalte două materiale am dorit să testăm o duritate mai scăzută, astfel am ales un decalaj aproximativ egal în scala durității. Am utilizat TPU 85A și TPU 70A. Ultimul a fost ales pentru a vedea cum se comportă un material din partea de jos a scalei de duritate a TPU. Filamentele utilizate sunt de la trei producători diferiți, astfel am utilizat Polymaker PolyFlex TPU-95A, NinjaTek NinjaFlex 85A și Recreus FilaFlex 70A.

Proprietățile fizice ale structurilor au fost clasificate în funcție de scala Mohs astfel:

Tabel 2.1 Datele tehnice oferite de producător pentru TPU

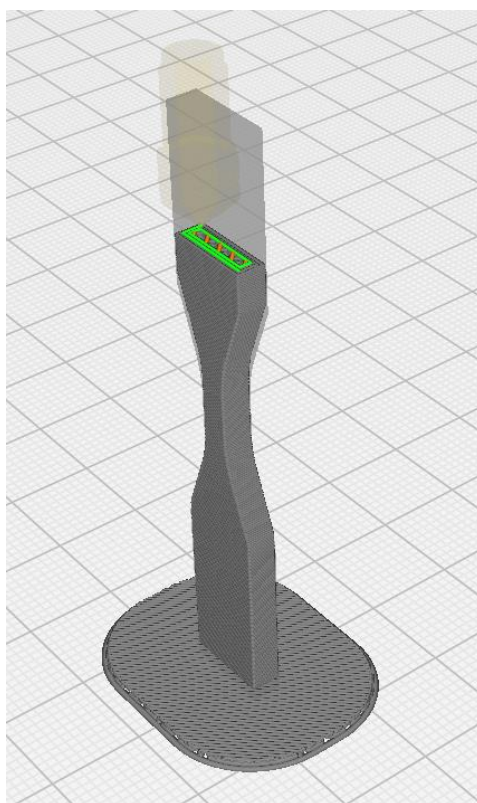
Material	Modul Young [MPa]	Elongația de rupere [%]	Tensiunea de rupere [MPa]	Densitatea [g/cm³]	Temperatura de topire indicate [°C]
TPU 95A	67±2	700	37.9±1.6	1,22	220 - 235
TPU 85A	12	660	26	1,19	225 - 235
TPU 70A	32	900	45	1,08	215 - 235

Informații din tabelul 2.1 au fost preluate de pe siteurile producătorilor [16],[17],[18].

Duritatea materialelor depinde de densitatea acestora, observăm astfel că densitatea pentru TPU 70A este cea mai mică, urmată de TPU 85A și TPU 95A.

Datele indicate în tabel sunt caracteristice pentru filamentele din TPU. Aceste date nu sunt în concordanță cu proprietățile structurilor, deoarece printarea structurilor se realizează strat cu strat, și astfel intervine o proprietate importantă legată de aderarea straturilor. Aceasta caracteristica depinde de o serie de parametri, dintre care cel mai important este temperatura de topire a filamentului (pentru testarea acestui parametru am ales să considerăm temperatura indicată de producător pur orientativă).

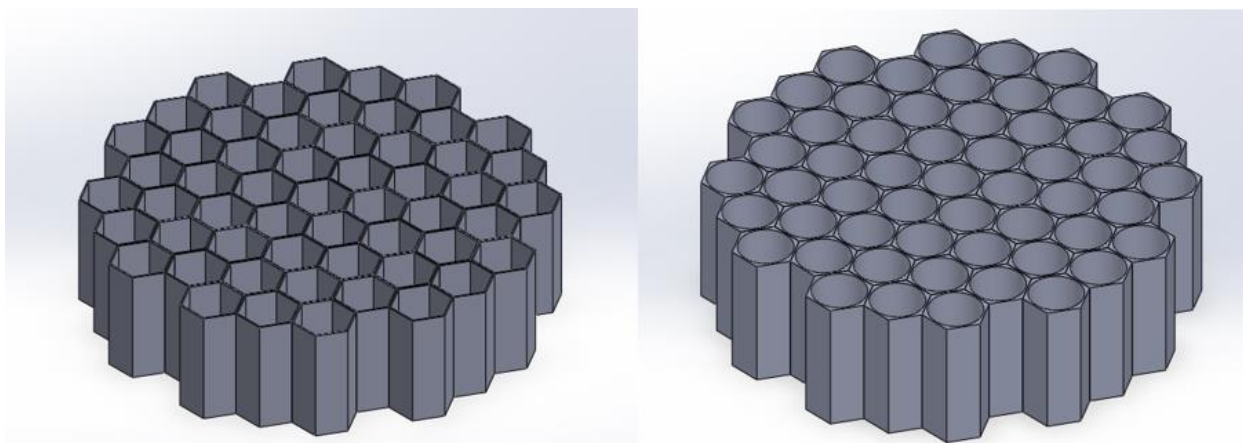
Am ales patru temperaturi diferite care să acopere plaja de valori ale temperaturii de printare, cu o diferență de 5 °C între ele, începând de la 215 °C. Pentru a evidenția modul de lipire a straturilor am utilizat teste de rupere standard ASTM-D628-10 Type V ilustrat în figura 2.6. Aceste probe au fost printate vertical pentru ca direcția de tracționare să fie perpendiculară pe direcția de printare (observăm o ilustrare mai clară a modului de printare în fig. 2.9). Deoarece probele sunt printate vertical, pentru o susținere mai bună a fost adăugat un suport de tip raft care se poate observa în partea de jos a probei și care mărește suprafața de contact cu patul și face ca proba să fie mai stabilă.



Figură 2.9 Modul de printarea a probelor standard ASTM-D628-10 Type V, astfel încât acestea pot să fie utilizate pentru testarea aderării straturilor

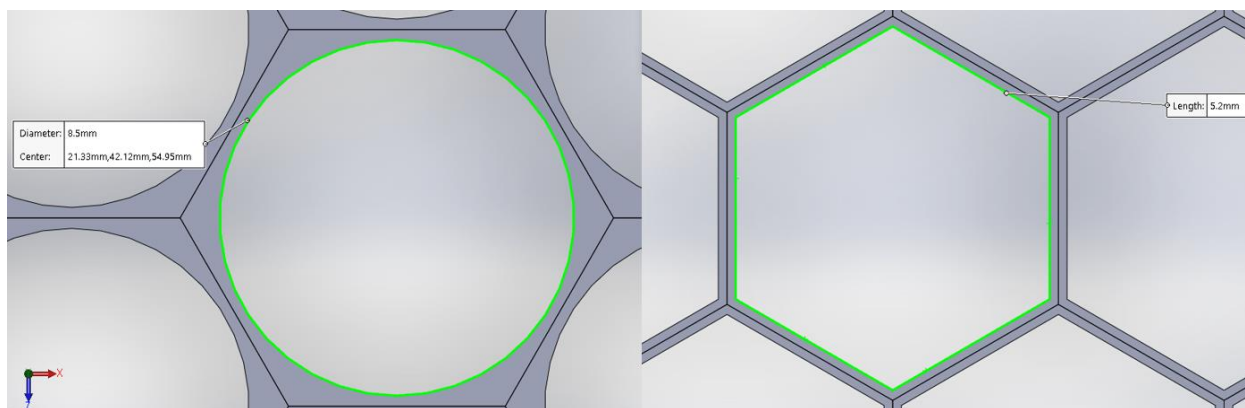
2.6. Modele pentru absorbție

Am ales să urmărim un fir logic al acestei lucrări. Conform diferitelor articole publicate în literatura de specialitate, [9], cele mai întâlnite structuri pentru absorbție sunt cele sub formă de fagure de miere. Astfel, pentru început am ales 4 modele asemănătoare, dar cu o serie de parametrii diferiți, precum forma de umplere sau unghiul de absorbție. Înălțimea probelor este de 25 mm, iar hexagonul din care sunt acestea formate are latura de 5.5 mm în cazul celulelor de bază cu gaură hexagonală și 5.2 mm în cazul celor cu gaură circulară.



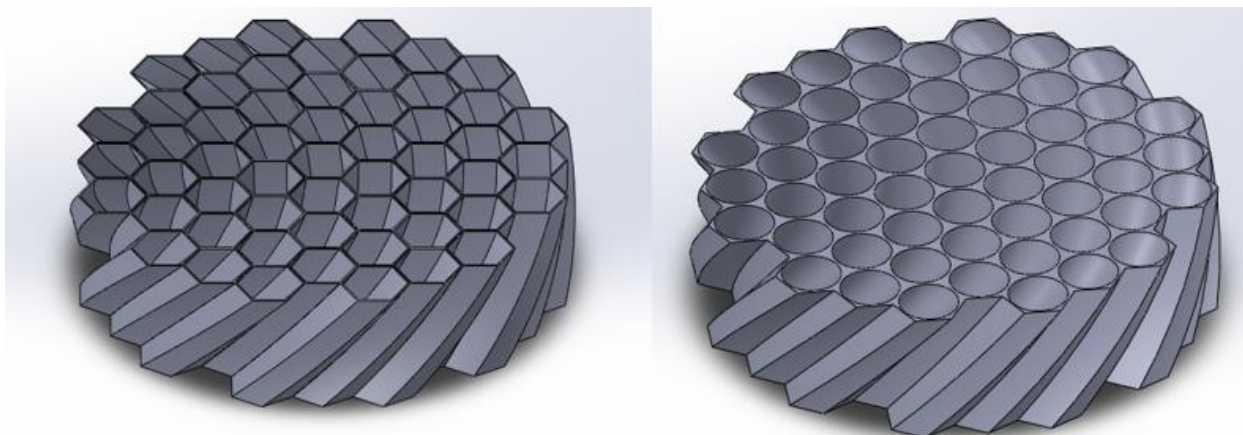
Figură 2.10 Structură de absorbție de tip fagure de miere cu umplere hexagonală (stânga) și umplere circulară (dreapta)

Observăm în figura 2.10 două structuri de bază de tip fagure de miere realizate prin lipirea mai multor celule de bază de formă hexagonală, diferența constă în forma orificiului. Cele din stânga prezintă un orificiu hexagonal, iar cele din dreapta un orificiu circular. Forma acestor orificii dictează caracteristicile geometrice ale structurilor, pereții în cazul hexagonal au o grosime constantă de 0.5 mm, iar în cazul circular au doar în zona de minim 0.5 mm.



Figură 2.11 Celula de bază a structurilor de tip fagure de miere, cerc (stânga) și hexagon (dreapta)

Pentru a aduce o caracteristică în plus structurilor am încercat varianta în care planul superior al structurii este rotit cu 30° față de bază, inspirați de structuri asemănătoare propuse în articole din literatura de specialitate [8].



Figură 2.12 Structură de absorbție de tip fagure de miere cu umplere hexagonală (stânga) și umplere circulară (dreapta), rotit la un unghi de 30°

Astfel în figura 2.12 ce prezintă structurile sub formă de fagure de miere rotite, cea din stânga este realizată din celule de bază hexagonale, iar cea din dreapta din celule de bază circulare. Înălțimea în cazul acestor structuri nu variază, aceasta este tot de 25 mm, însă o serie de structuri nu sunt compatibile între ele (formele de bază de pot interconecta între ele).

2.7. Parametrii specifici pentru absorbția energiei mecanice

Eficiența structurilor utilizate pentru absorbție este caracterizată printr-o serie de parametri, o parte din aceștia au fost cuprinși în articolul [9]. Pentru cazul nostru putem să definim o serie din aceștia, precum:

Energia absorbită

Aceasta este energia pe care structura reușește să o absoarbă și este definită ca fiind aria de sub graficul compresiei până în zona de densificare [19]. Acest grafic este o reprezentare a stresului în funcție de sarcină, astfel aceasta are formula:

$$E_{abs} = \int_0^{\varepsilon_D} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (1)$$

unde ε_D reprezintă sarcina înainte de zona de densificare și este calculată prin intersecția graficului cu o dreaptă cu valoarea constantă, egală cu valoarea stresului pentru vârful maxim înainte de zona liniară.

Energia specifică de absorbție

Este definită ca fiind energia absorbită pe unitate de masă [20], acest parametru prezintă capacitatea structurii de a înmagazina energia într-o unitate de masă:

$$SEA = \frac{E_{abs}}{m} \quad (2)$$

Unde m reprezintă masa structurii.

Stresul specific platoului liniar

Acesta este definit [21] ca fiind integrala stresului rezultat între vârful maxim inițial și zona de densificare. Această mărime ne arată caracteristica zonei liniare, astfel, cu cât zona liniară este mai lungă și mai stabilă, modelul nostru are o capacitate de absorbție a energiei mai bună.

$$\sigma_p = \frac{\int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\varepsilon_d - \varepsilon_0} \quad (3)$$

Aici, ε_d reprezintă sarcina înainte de zona de densificare, iar ε_0 reprezintă sarcina în punctul unde vârful inițial al stresului este maxim.

Forța medie pentru compresie

Aceasta este definită ca fiind raportul dintre energia absorbită de structură în cazul în care aceasta este calculată în funcție de forță și distanța pe care se realizează compresia [22]. Această compresie este relevantă doar până în punctul de densificare, notat cu d_s .

$$F_m = \frac{1}{d_s} \int_0^{d_s} F(x) dx \quad (4)$$

În cazul în care discutăm despre stresul mediu ce apare în urma compresiei, ecuația ia forma:

$$\sigma_m = \frac{1}{\varepsilon_d} \int_0^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (5)$$

unde ε_d este sarcina în punctul de densificare.

Eficiența sarcinii de comprimare

Această mărime este definită ca fiind raportul dintre stresul mediu și valoarea maximă a stresului, specifică vârfului maxim din prima porțiune a curbei de compresie. Valoarea stresului mediu se calculează prin împărțirea energiei absorbite la valoarea sarcinii pe care acesta a fost absorbită, aceasta fiind egală cu valoarea punctului de densificare [23].

$$CLE = \frac{\sigma_m}{\sigma_v} \quad (6)$$

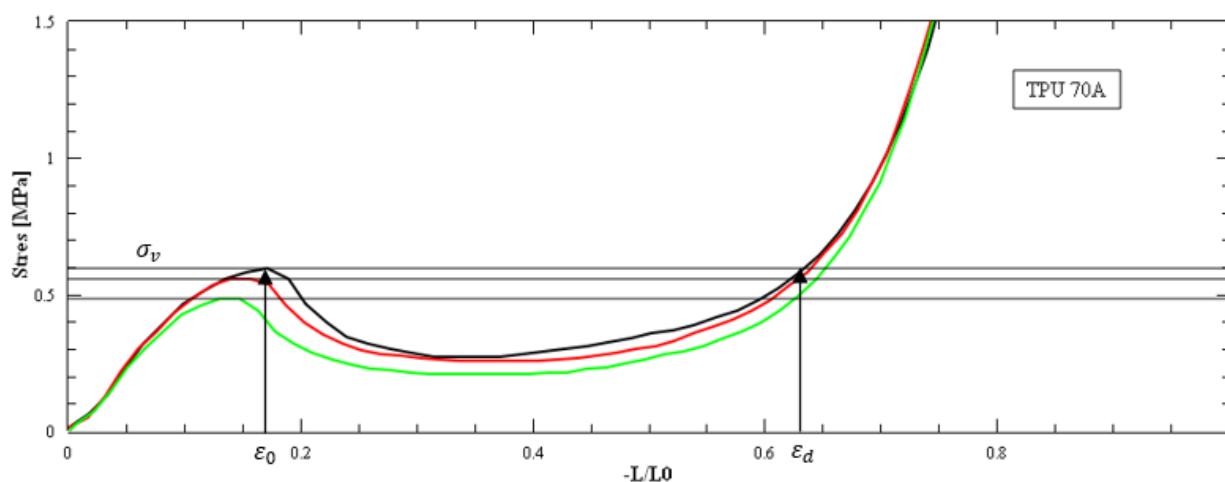
unde σ_m este stresul mediu, iar σ_v este stresul specific vârfului maxim.

Eficiența energiei de absorbție (randamentul)

Această mărime este utilizată pentru comparația structurilor de absorbție, aceasta fiind definită ca raportul dintre energia absorbită de structura până în punctul de densificare pe energia teoretică maximă absorbită [24]. Energia maximă este definită ca aria de sub curba formată de valoarea constantă a stresului, de la $L/L_0 = 0$ la $L/L_0 = 1$. Aceasta arie are forma unui dreptunghi cu lungimea de 1 și lățimea σ_v (valoarea maximă a stresului pentru vârful înainte de zona liniară).

$$\eta_{abs} = \frac{E_{abs}}{\sigma_v \cdot 1} \quad (7)$$

Aici, E_{abs} este energia absorbită, iar σ_v este stresul specific vârfului maxim.



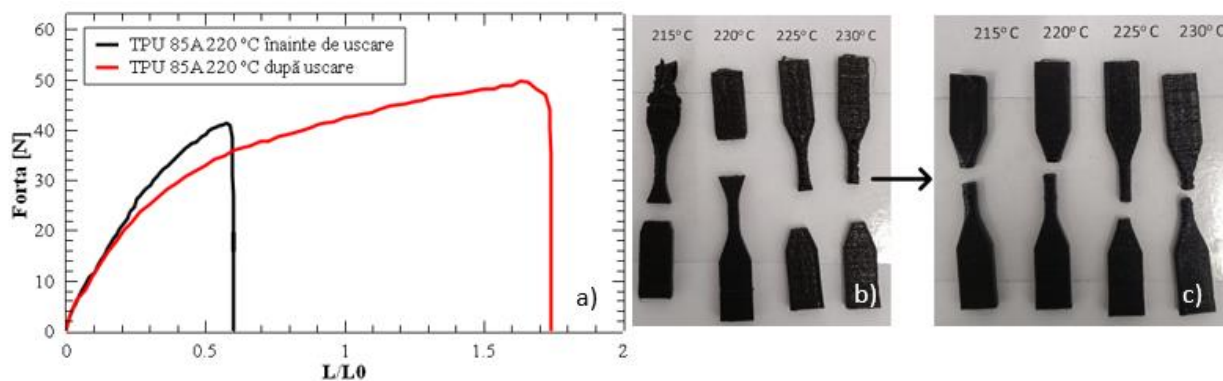
Figură 2.13 Curba de absorbție a unei structuri din TPU 70A, utilizată pentru vizualizarea parametrilor σ_v , ϵ_d și ϵ_0

3. Rezultate

Prima parte a studiului reprezintă optimizarea imprimantei 3D pentru printarea filamentului de TPU 95A, acest lucru presupune setarea parametrilor în programul de tip slicer, tensionarea oprimă a filamentului prin rotirea șurubului specific de pe extruder și setarea temperaturii patului de printare. Parametrii generali sunt setați prin alegerea materialului din program, o parte dintre producătorii mai mari regăsindu-se în variantele de seturi de date din program. O altă variantă în cazul TPU 85A și 70A a fost să descărcăm setul de parametrii de pe site-ul producătorului.

În urma testelor inițiale pentru materiale am ales o temperatură de 50 °C pentru pat în cazul tuturor probelor, iar pentru o printare mai uniformă am ales să setăm flow-ul la 120% și infill-ul probelor pentru testele de rupere la 30%,. Menționăm ca viteza de printare pentru pereți și infill a fost setată la aceeași valoare pentru a diminua cât mai mult vibrațiile create în urma scăderii vitezei. Astfel viteza a fost de 30 mm/s, iar pentru pereți am setat wall line count de 3, asta însemnând că pereții vor avea o grosime echivalentă cu de trei ori diametrul orificiului duzei de extrudare.

Modelul ASTM-D628-10 Type V a fost ales deoarece acesta are o înălțime mai mică, iar vibrațiile ce pot apărea sunt mult mai mici (inițial am folosit ASTM-D628-10 Type IV, însă în cazul TPU 85A și TPU 70A acestea nu au putut să fie printate utilizând un singur extruder pentru simplul motiv că după prima jumătate a probei, aceasta începe să se miște după direcția extruderului deoarece rămâne ușor lipită de acesta). O soluție în acest caz a fost să utilizăm al doilea extruder pentru a printa un suport dintr-un material mai dur, noi am ales PVA deoarece acesta este solubil în apă. Fiindcă modul de printare pentru PVA a lăsat de dorit deoarece acesta nu avea o lipire suficient de bună cu patul și mai apoi cu TPU, au apărut multe reziduri de printare care influențau negativ forma probei. Astfel ca, după aceste încercări, am ales să utilizăm o probă standard de dimensiuni mai mici, prezentate în figura 2.6 , care poate să printată vertical utilizând un singur extruder, iar printarea este constantă.



Figură 3.1 Curba de rupere pentru probele de TPU 85A printate la 220 °C înainte și după uscarea filamentului (a), și probele de TPU 85A înainte (b) și după uscarea filamentului (c)

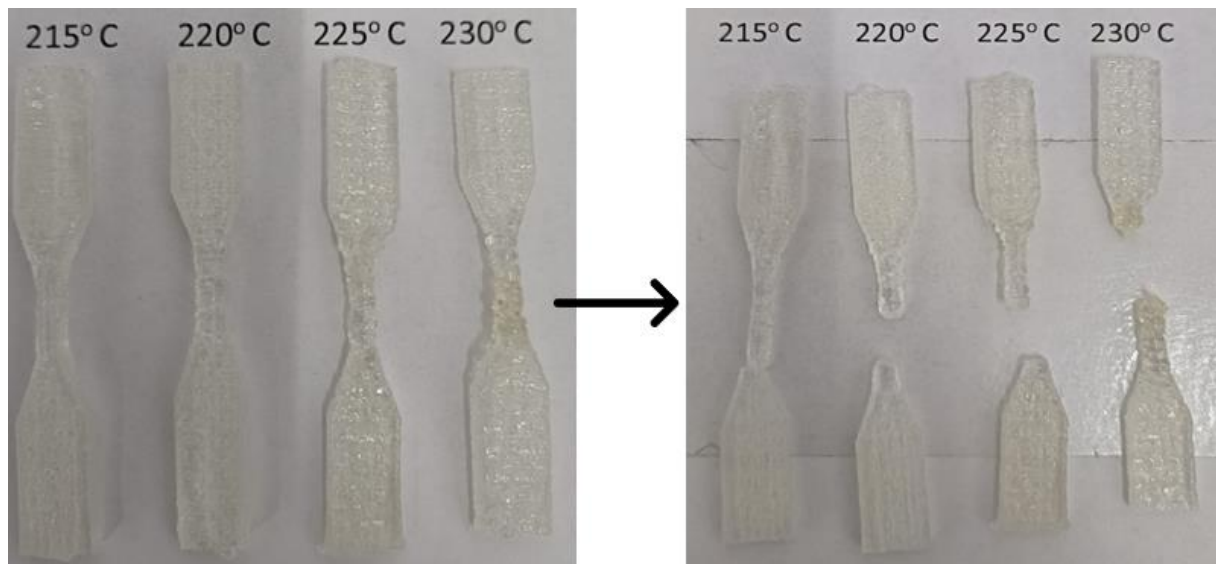
În cazul materialului TPU 85A, în momentul în care probele au fost supuse testului de rupere, rezultatele au fost unele neașteptate. Probele se rupeau foarte repede, la forțe foarte mici, iar acest lucru se întâmpla deoarece straturile printate prezentau mici goluri și ruperea se producea exact în acele goluri. Acest gen de goluri este întâlnit în cazul în care în zona respectivă a fost apă (prezența apei apare atunci când filamentul este transportat sau stocat în condiții ambientale; în general acestea sunt stocate în pungi vidate ce prezintă silica, un material ce asigură absorbția apei din pachet). TPU 85A a fost singurul material ce a sosit nevidat, fiind doar ambalat în carton. Așadar, în acest caz nu excludem posibilitatea ca TPU 85A să fi absorbit umiditate.

Pentru rezolvarea acestei probleme am ales să uscam filamentul, astfel acesta a fost plasat în etuvă la temperatura de 45 °C pentru 36 de ore. Observăm în figura 3.1 a curbele de rupere în cazul probelor printate la temperatura de 220 °C. Aici, cu negru este reprezentată proba produsă din filamentul de TPU 85A înainte de uscare, iar cu roșu după uscare. Observăm că elongația probei produsă din filament înainte de uscare este semnificativ mai mică decât în cazul de după uscare. În cazul probelor neuscate, elongația rezultată este de 60% comparativ cu una de 175% pentru probele uscate. Forța de rupere crește în cazul filamentului uscat, însă nu atât de mult. Avem astfel înainte de rupere o forță de 50 N în cazul filamentului uscat, iar pentru cel umed forța de rupere este de aproximativ 40 N. Observăm și prin inspecție vizuală că probele posibil umede au o zonă de rupere neașteptată (fig. 3.1 b), acestea se rup în zona de prindere, chiar dacă aceasta este mai groasă. Pentru trasarea curbelor finale, pentru a vedea care dintre temperaturi este cea optimă, probele din prima serie, cea înainte de uscare au fost neglijate.

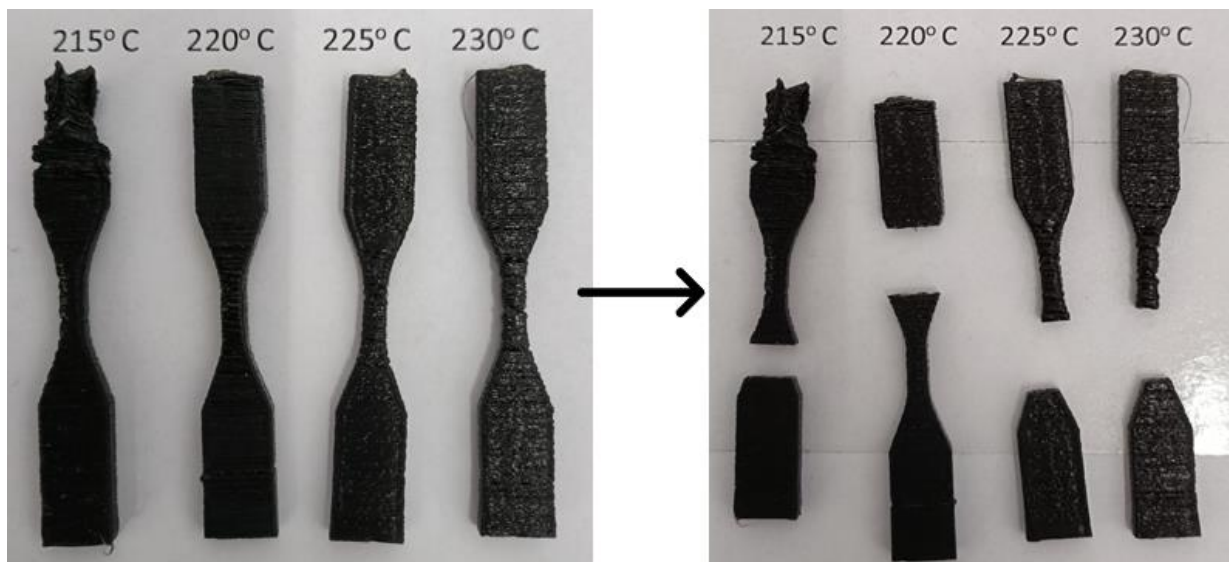
3.1. Testarea temperaturii optime pentru printarea modelelor finale

Probele printate vertical prin intermediul imprimantei 3D au fost testate mai apoi utilizând testul de rupere cu parametrii indicați în paragraful 2.4.1. Observăm în imaginile următoare probele înainte și după test (fig. 3.2 – fig. 3.4).

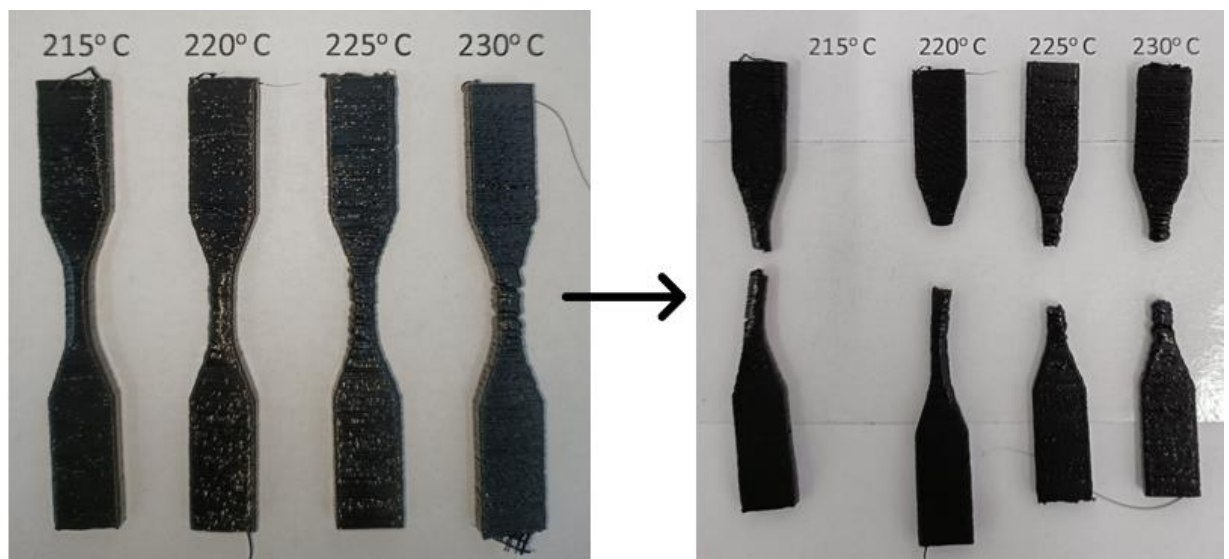
Pentru probelor de TPU 70A prin inspecție vizuală sesizăm o degradare a polimerului în cazul în care acesta este adus la o temperatură prea mare, exemplul relevant este proba printată la 230 °C, aceasta prezintă o culoare mai închisă în zona de rupere. Acest lucru este sesizabil și în graficul curbei de rupere (fig. 3.5) care în zona de maxim a forței prezintă o rupere graduală, diferite de orice alt caz.



Figură 3.2 Probele de rupere pentru TPU 70A înainte (stânga) și după rupere (dreapta)

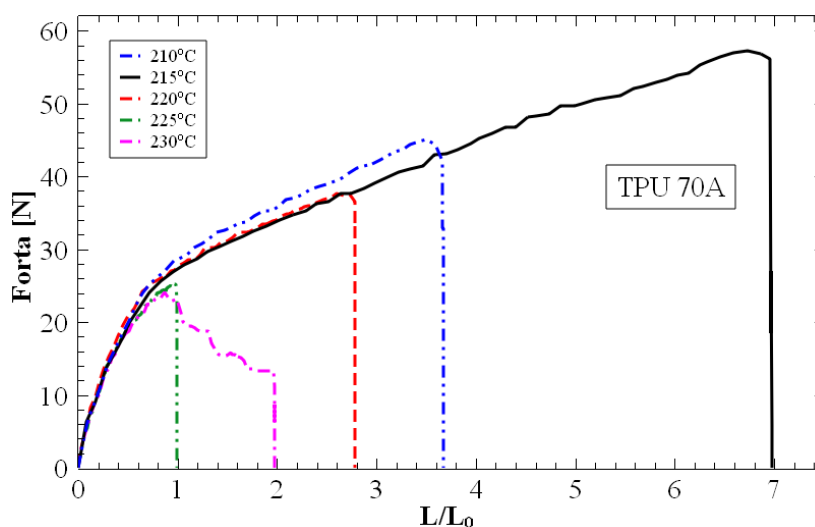


Figură 3.3 Probele de rupere pentru TPU 85A înainte (stânga) și după rupere (dreapta)

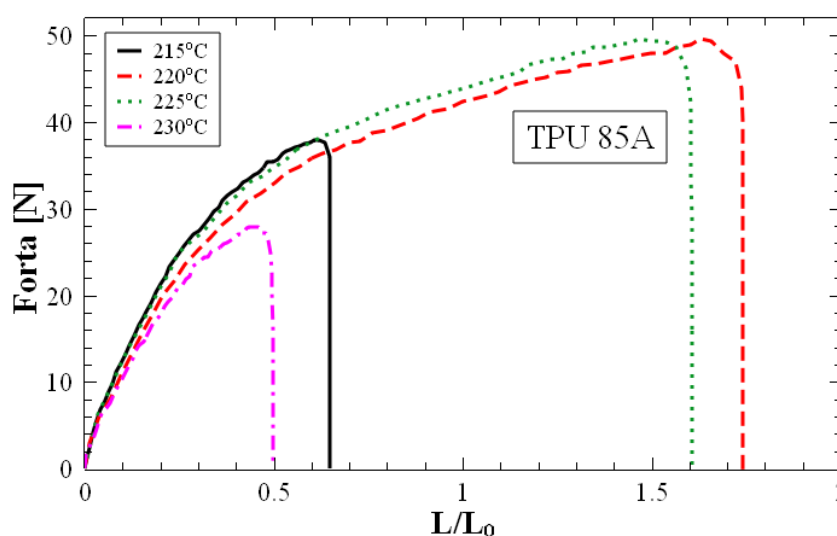


Figură 3.4 Probele de rupere pentru TPU 95A înainte (stânga) și după rupere (dreapta)

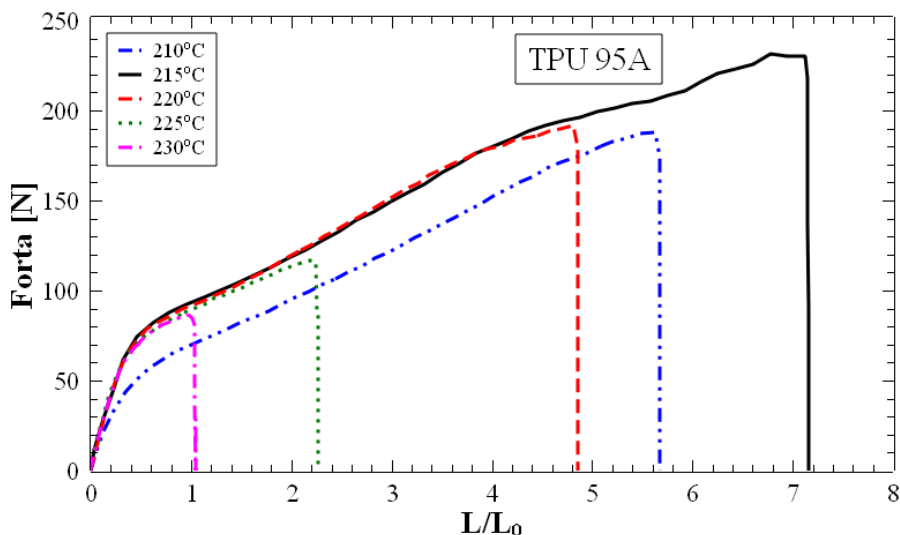
Probele prezentate pentru TPU 85A sunt cele printate inițial, datele din grafic aparțin probelor din setul al doilea, acestea se regăsesc în figura 3.1 c. În urma testelor de rupere pentru cele patru probe inițiale, în cazul TPU 70A și TPU 95A, maximul pentru forță și elongație era atribuit valorii de printare la 215°C. Această valoare este prima temperatură aleasă pentru printare (din acest motiv, nu știm dacă pentru temperaturi mai mici, forța de rupere și elongația sunt și mai mari). Pentru a vedea dacă aceasta rămâne varianta optimă, am ales să printăm încă o probă standard pentru aceste două materiale la temperatura de 210°C. Rezultatele sunt prezente în figura 3.5 și figura 3.7 (curba albastră). Observăm că proba printată la o temperatură mai scăzută nu a dat rezultate mai bune, astfel că valoarea favorabilă a temperaturii de printare rămâne 215°C.



Figură 3.5 Forța de rupere dintre straturi pentru eșantioane standard ASTM Type V din TPU 70A, obținute prin printare 3D la temperaturi de la 210 °C până la 230°C



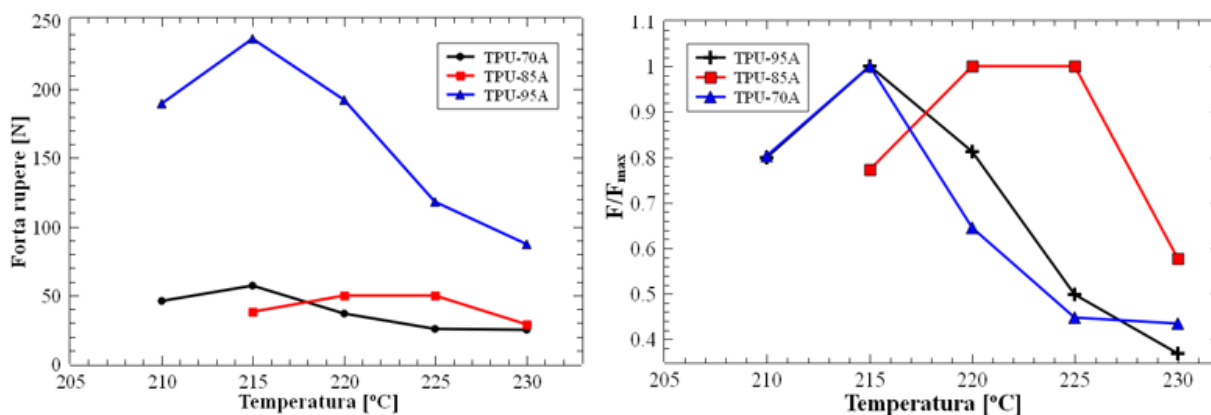
Figură 3.6 Forța de rupere dintre straturi pentru eșantioane standard ASTM Type V din TPU 85A, obținute prin printare 3D la temperaturi de la 215 °C până la 230°C



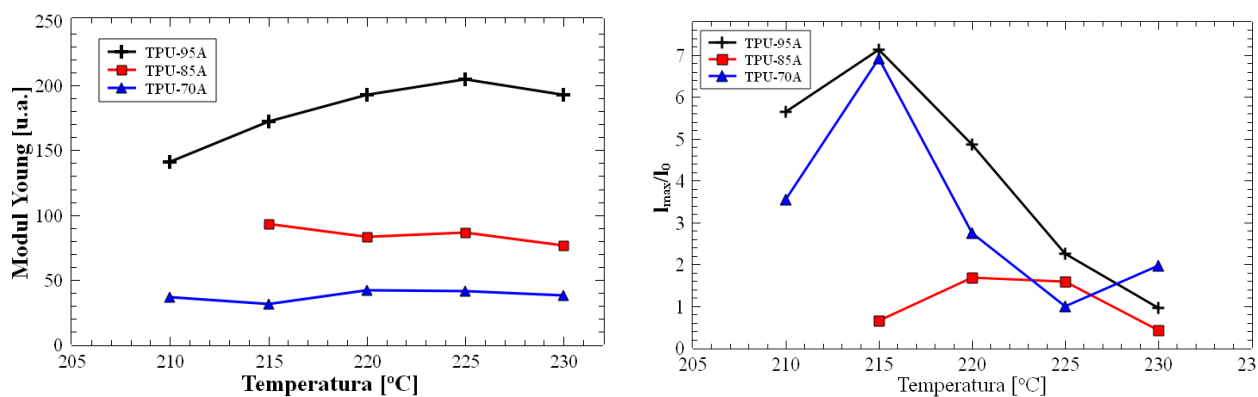
Figură 3.7 Forța de rupere dintre straturi pentru eșantioane standard ASTM Type V din TPU 95A, obținute prin printare 3D la temperaturi de la 210 °C până la 230°C

Informațiile extrase din curbele pentru ruperea structurilor au fost elaborate sub forma unor grafice ce prezintă valorile importante după care am ales temperatura finală de printare.

Primul set de grafice (fig. 3.8) prezintă forța de rupere maximă în cazul tuturor structurilor. În partea stângă observăm o comparație a forței maxime de rupere pentru toate tipurile de material, însă această reprezentare nu evidențiază destul de bine valoarea maximă pentru fiecare material. Pentru a evidenția forța maximă pentru fiecare material, am ales să împărțim valoarea forței maxime pentru fiecare temperatură la valoarea forței maxime de rupere pentru un material. Astfel observăm în figura 3.8 partea dreaptă, că pentru materialele TPU 70A și TPU 95A valoarea maximă pentru forța de rupere se regăsește la probele printate la 215 °C. În cazul materialului TPU 85A, acesta are două valori foarte apropiate în cazul probelor printate la temperatura de 220 °C și 225 °C, aceste valori ale forței fiind comparative cu valoarea maximă în cazul TPU 70A.



Figură 3.8 Forța maximă de rupere (dreapta) și forța normalizată (stânga) a probelor standard ASTM Type V din TPU 95A, TPU 85A și TPU 70A pentru temperaturi între 210°C și 230°C (dreapta) și



Figură 3.9 Modulul Young (stânga) și procentul de elongație (dreapta) a probelor standard ASTM Type V din TPU 95A, TPU 85A și TPU 70A pentru temperaturi între 210°C și 230°C

Curbele de rupere ne oferă informații despre modulul Young, acestea sunt prezentate în figura 3.9 în partea stânga. În cazul nostru, acesta este măsurat în unități arbitrare, deoarece toate probele au avut aceeași dimensiune, astfel ele sunt considerate comparabile. Observăm că valorile pentru TPU 70A și TPU 85A se mențin aproximativ constante în funcție de temperatura de printare, apare o diferență doar în cazul TPU 95A. În acest caz, pentru temperatura de printare de 215°C, valoarea modulului Young este cu 15% mai mică decât valoarea maximă a acestuia.

Elongația maximă este prezentată în figura 3.9 partea dreaptă, observăm că în cazul materialelor TPU 70A și TPU 95A, elongația maximă este atribuită temperaturii de printare de 215°C, aceste materiale având o elongație maximă de 7 ori, valoare comparativă cu elongația sugerată de producător pentru filament. Pentru următoarele temperaturi observăm o elongație de 5-5.5 ori în cazul TPU 95A și de doar 3-3.5 ori în cazul TPU 70A. Pentru materialul TPU 85A elongația de 1.5 ori se menține constantă în jurul temperaturilor de printare de 220-225°C.

Datorită rezultatelor prezentate mai sus putem să tragem concluzia că temperatura optimă de printare în cazul materialelor TPU 70A și TPU 95A este de 215°C, în cazul TPU 95A valoarea pentru modulul Young este mai mică, însă elongația și forța de rupere sunt cu mult mai mari față de valorile apropiate. Pentru aplicația noastră sunt mai importante valorile elongației și forței de rupere deoarece acestea prezintă mai clar punctul în care straturile încep să se dezlipească unul de celălalt.

Pentru materialul TPU 85A am ales tot temperatura de 215 °C pentru a ușura procesul de optimizare a printării deoarece utilizăm aceeași parametrii ca și în cazul TPU 70A. Acest material a fost supus unui proces de uscare, după acesta, rezultatele au fost mai bune, însă nu cele așteptate. Acest lucru ne face să credem că valorile maxime nu sunt atribuite unui filament de cea mai bună calitate. De aceea considerăm că varianta alegerii aceeași temperaturi de printare la fel ca în

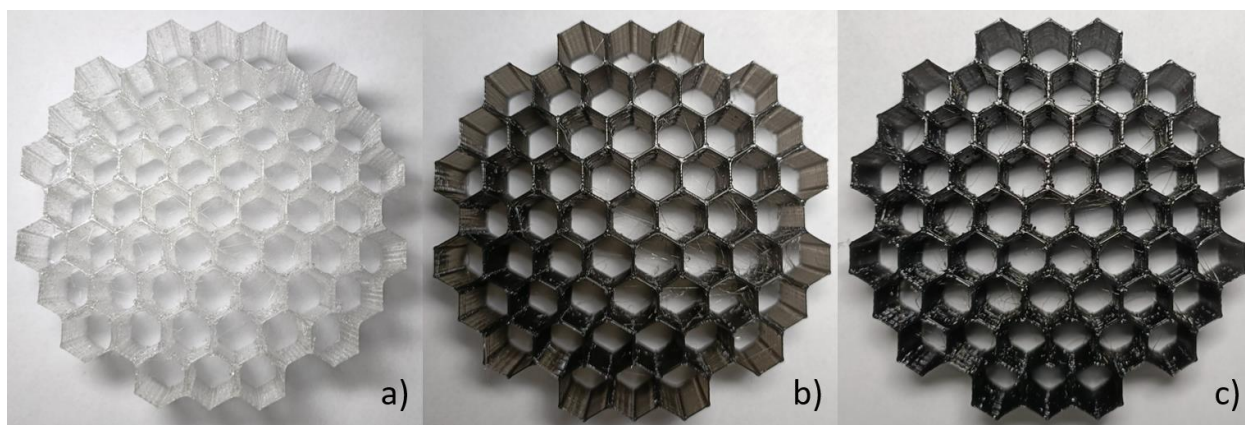
cazurile TPU 70A și TPU 95 este cea mai bună variantă, deoarece materialul este același și este poziționat din punct de vedere a durtății între TPU 70A și TPU 95A.

3.2.Compresia structurilor de absorbție

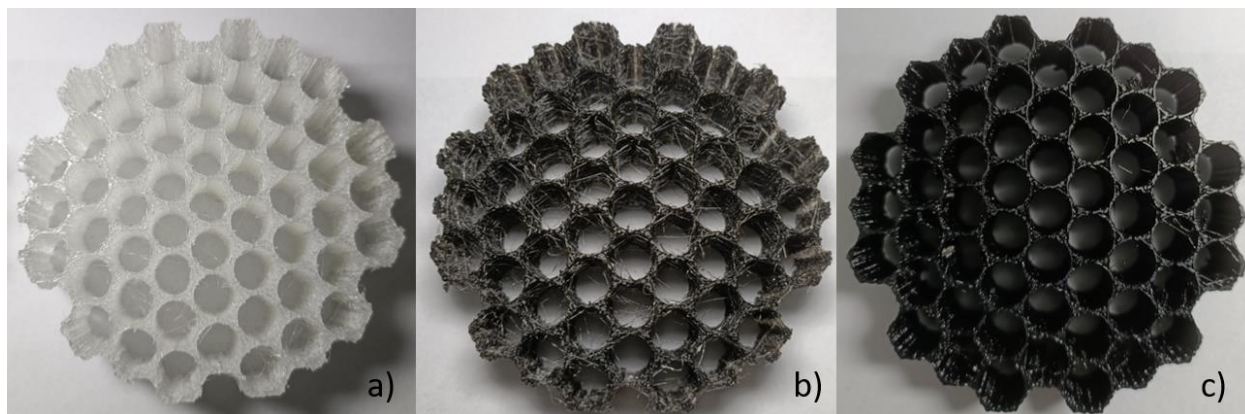
După alegerea temperaturii de 215°C, modelele prezentate în figura 2.10 și figura 2.12 au fost introduse sub formă de fișier .STL în programul de tip slicer care a realizat fișierul G-code. După încărcarea fișierului și printarea probelor, acestea au fost testate utilizând testul de compresie prezentat în capitolul 2.4.2 .

Rezultatele oferite de către aparatul de testare au fost reprezentate sub forma unor curbe de compresie. Pentru fiecare structură de compresie au fost efectuate câte trei măsurători pentru a putea caracteriza proprietatea de reutilizare a probelor. Fiecare probă a fost fotografiată în mai multe poziții pentru a realiza o inspecție vizuală comparativă cu probele finale, imaginile cu fiecare probă înainte de compresie sunt prezentate în figurile 3.10 – 3.13, în fiecare dintre acestea, probele a) sunt cele printate cu TPU 70A, probele b) sunt printate cu TPU 85A, iar c) sunt cele cu TPU 95A.

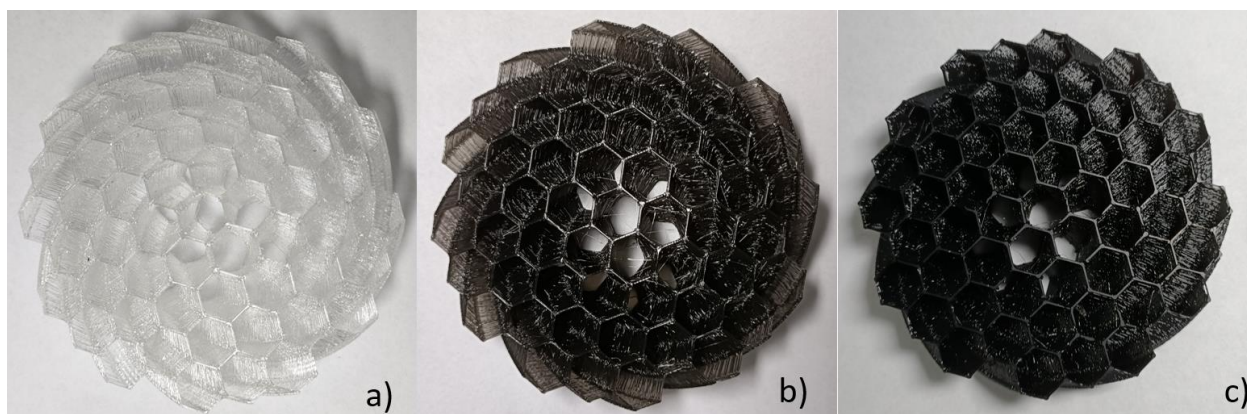
Prin inspecție vizuală putem observa că structurile cu orificii hexagonale arată mult mai bine, acestea prezintă un număr redus de reziduri ce apar în timpul printării datorate deplasării în aer a vârfului extruderului. Un exemplu foarte vizibil este comparația între structurile rotite cu orificii circulare (fig 3.13 b) și hexagonale (fig 3.12 b) produse din TPU 85A.



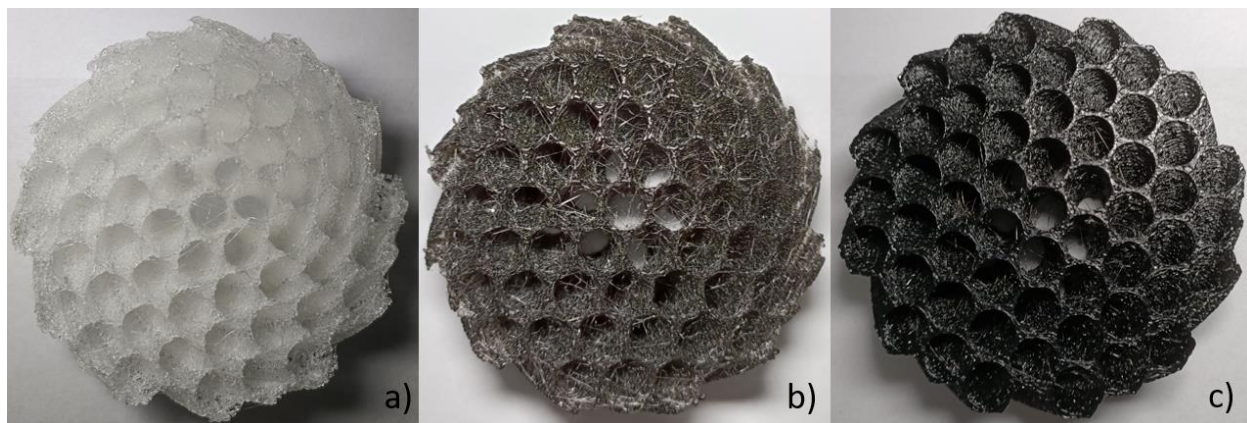
Figură 3.10 Structură de absorbție de tip fagure de miere cu structură interioară hexagonală printate cu materialele a) TPU 70A b) TPU 85A c) TPU 95A



Figură 3.11 Structură de absorbție de tip fagure de miere cu structură interioară circulară printate cu materialele a) TPU 70A b) TPU 85A c) TPU 95A

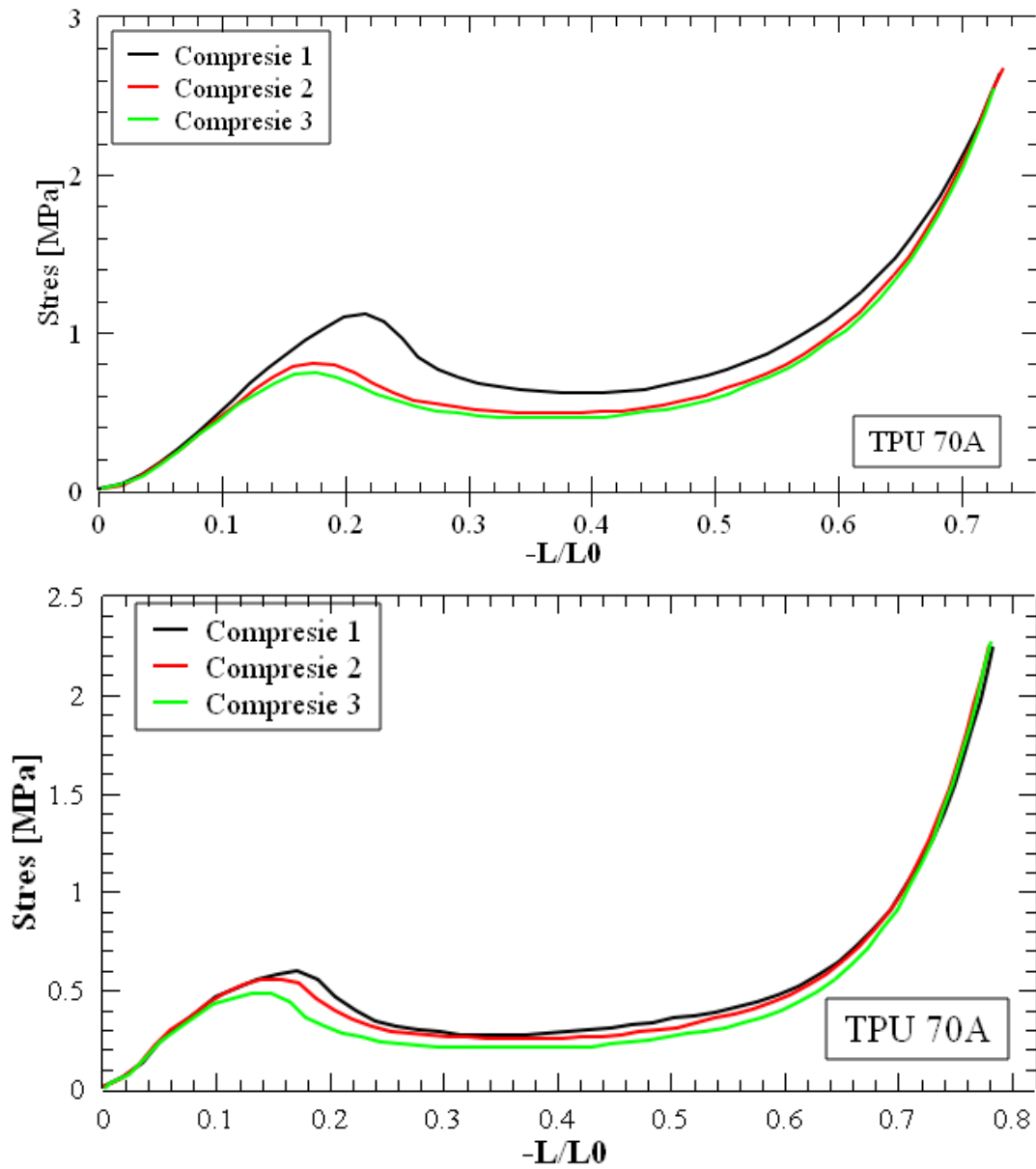


Figură 3.12 Structură de absorbție de tip fagure de miere cu structură interioară hexagonală, cu planul superior rotit la un unghi de 30°, printate cu materialele a) TPU 70A b) TPU 85A c) TPU 95A

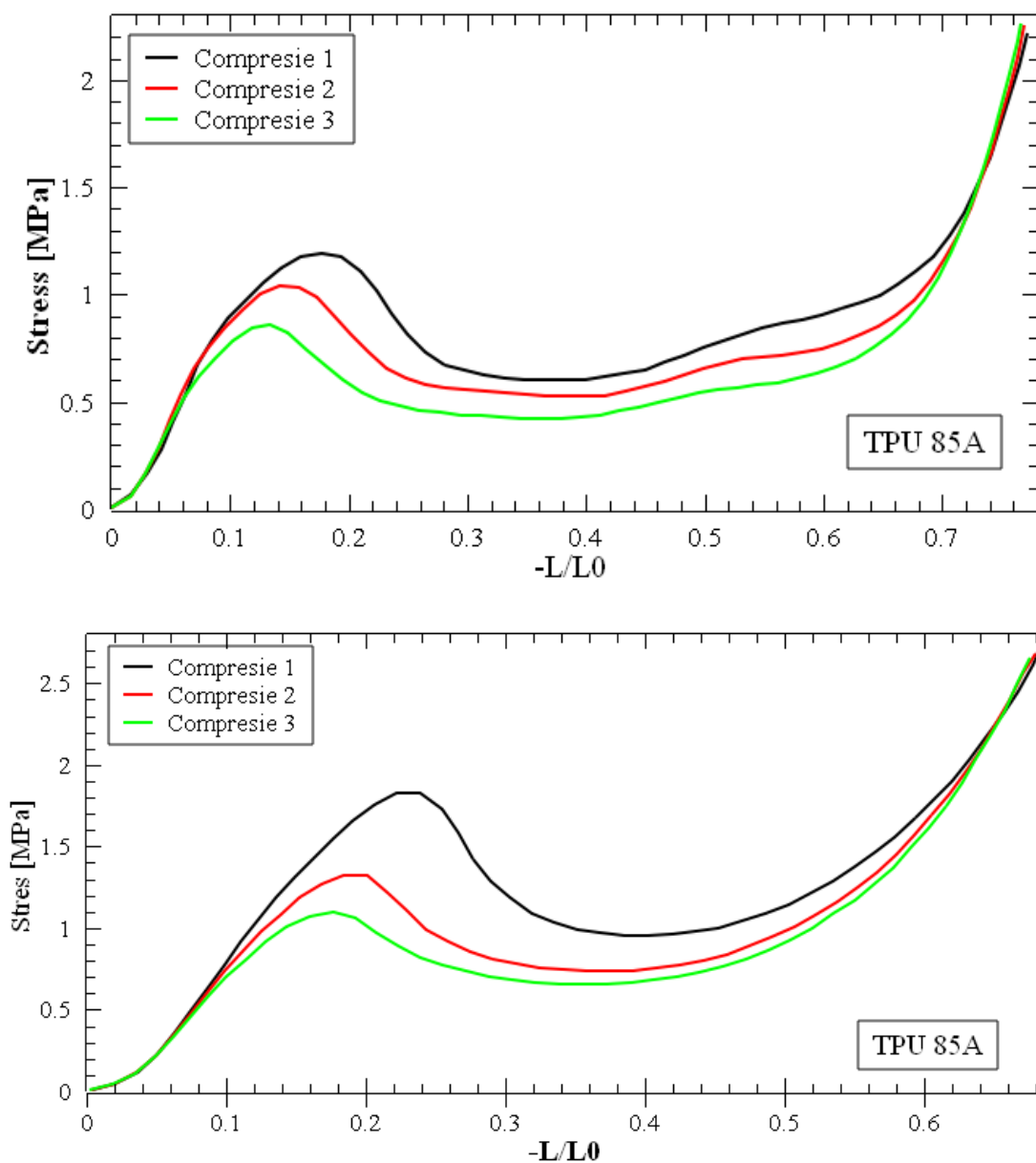


Figură 3.13 Structură de absorbție de tip fagure de miere cu structură interioară circulară, cu planul superior rotit la un unghi de 30°, printate cu materialele a) TPU 70A b) TPU 85A c) TPU 95A

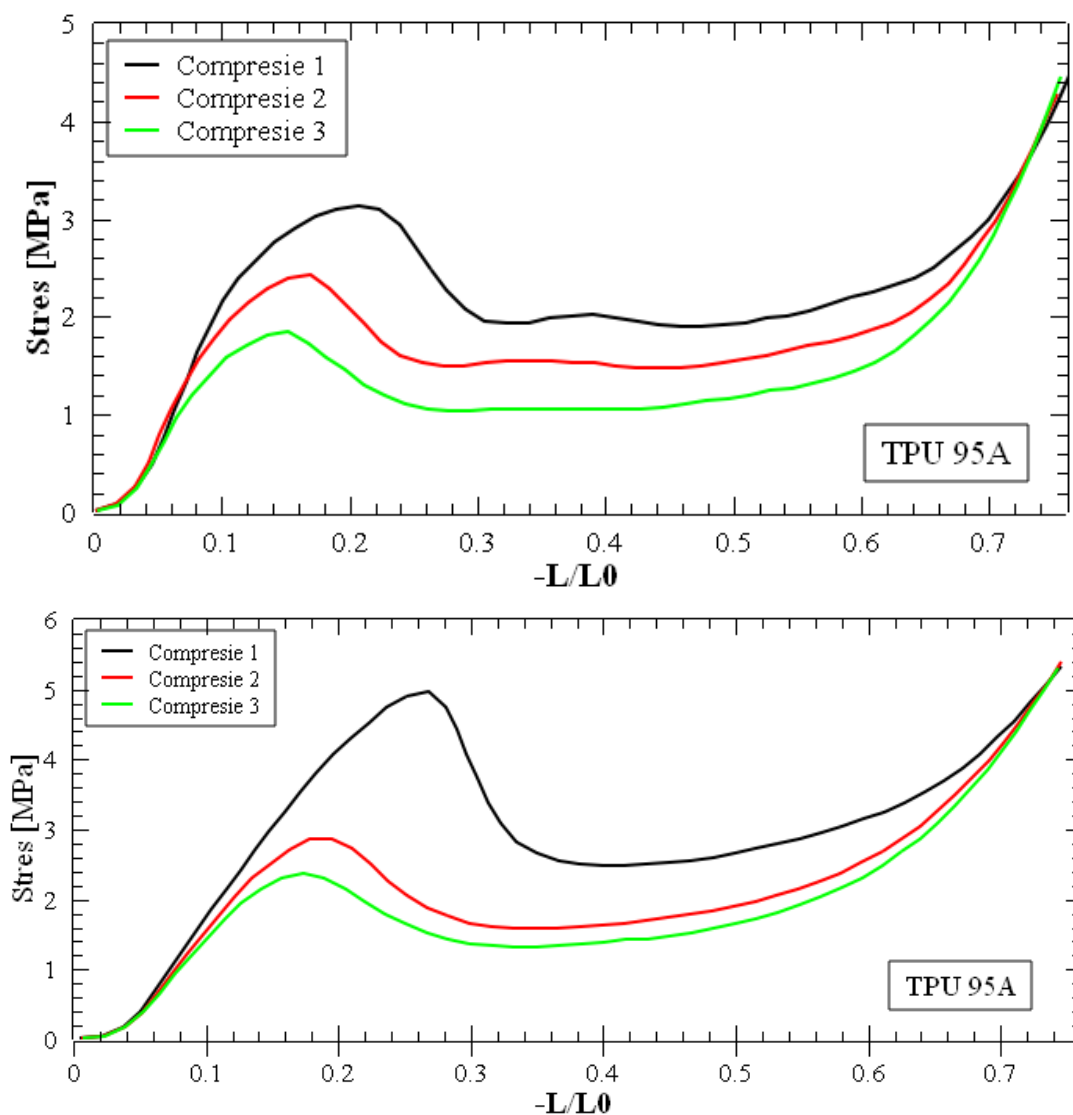
Din punct de vedere al ariei unei secțiuni din probă, avem două tipuri de structuri, cele cu orificii hexagonale, acestea având o arie a suprafeței de 440.5 mm^2 și cele cu orificii circulare, acestea au aria suprafeței de 737 mm^2 . Pentru a avea un mod de comparație clar al acestor tipuri de structuri, am ales să reprezentăm grafic stresul în funcție de sarcină, în locul variantei de forță în funcție de distanța comprimării. Rezultate sunt prezentate în figurile 3.14 – 3.19



Figură 3.14 Curba de compresie a structurilor de absorbție de tip fagure de miere cu structură interioară hexagonală (sus) și circulară (jos) realizate din TPU 70A



Figură 3.15 Curba de compresie a structurilor de absorbție de tip fagure de miere cu structură interioară hexagonală (sus) și circulară (jos) realizate din TPU 85A



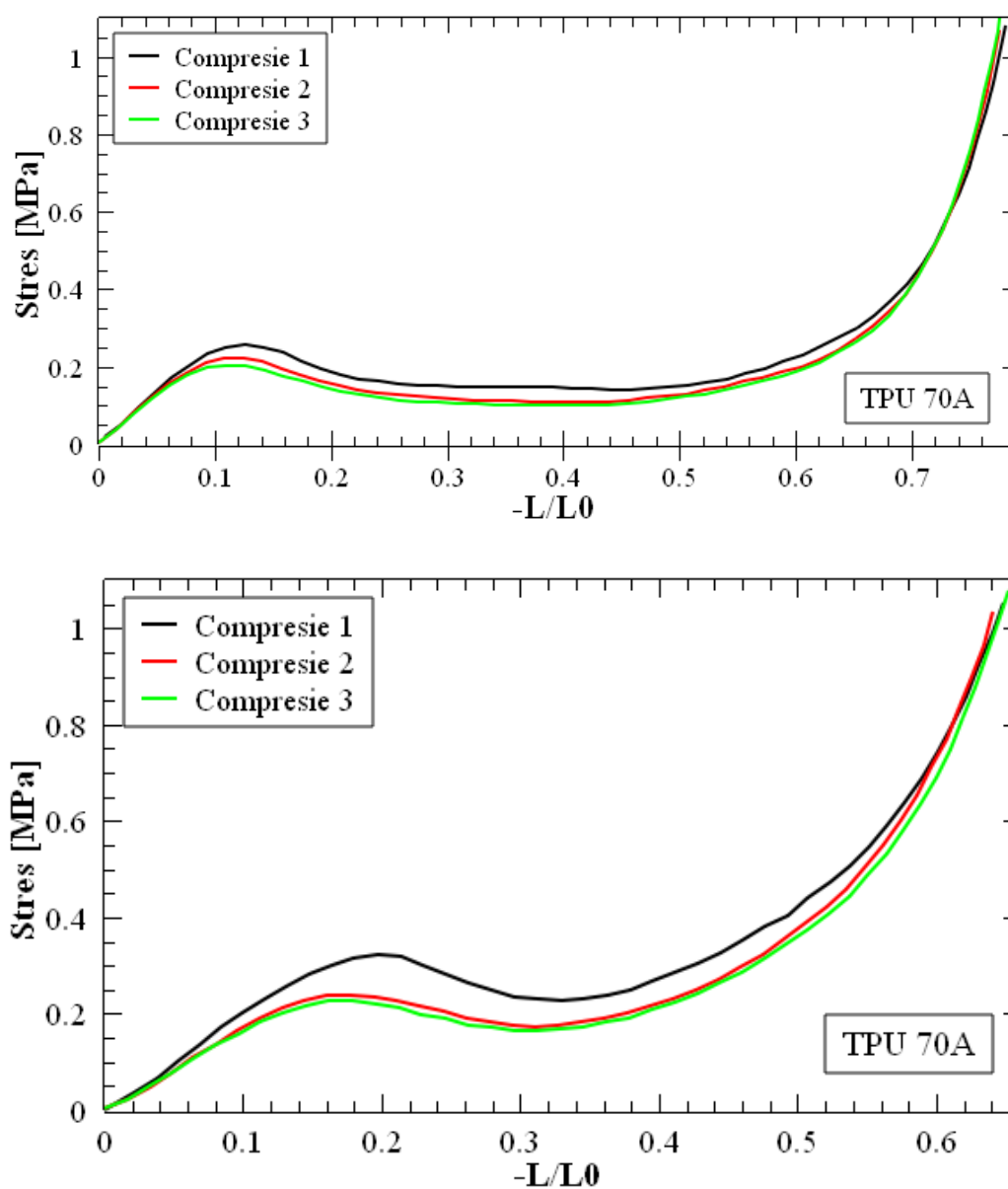
Figură 3.16 Curba de compresie a structurilor de absorbție de tip fagure de miere cu structură interioară hexagonală (sus) și circulară (jos) realizate din TPU 95A

Observăm că în cazul structurilor de absorbție cu găuri hexagonale, curba compresiei prezintă un decalaj constant între comprimările 1-2 cât și între comprimările 2-3. În cazul structurilor cu găuri circulare, curba primei comprimări este mult diferită de următoarele două, din această cauză considerăm ca o parte din structura internă este distrusă, astfel următoarele comprimări sunt capabile să reziste unui stres mai mic, acest aspect este confirmat vizual de figura 3.29 c, aceasta prezintă structura cu găuri circulare, realizată din TPU 95A după testare. Structura prezintă rupturi parțiale sau complete ale pereților în zona cea mai subțire a acestora. Doar proba realizată din TPU 95A prezintă aceste rupturi vizibile, considerăm că acest lucru se produce datorită durității materialului, precum și formei pereților. Aspectul celulei de bază a structurilor a fost prezentat în

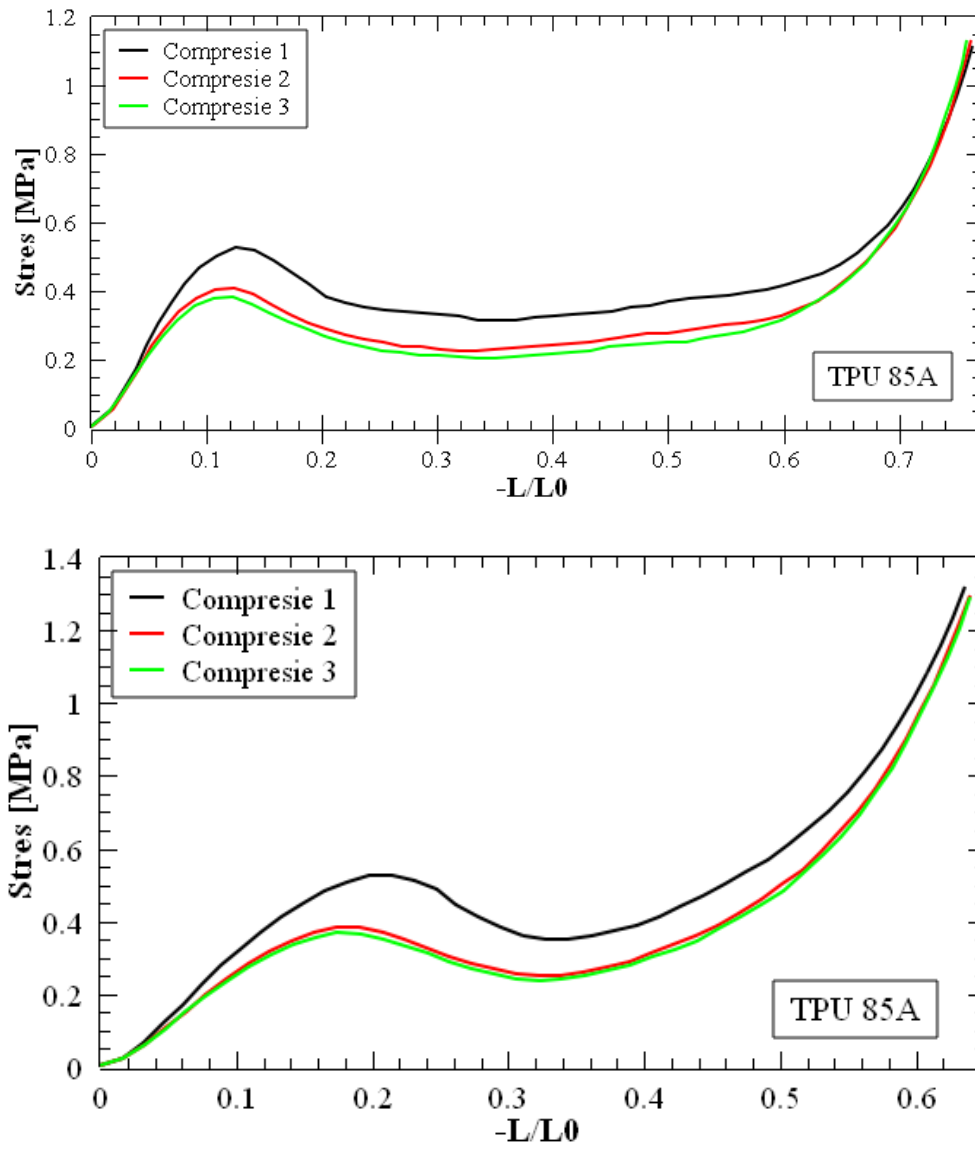
figura 2.11, observăm că în cazul structurilor cu orificii circulare grosimea pereților variază, astfel în timpul comprimării mare parte din forță este distribuită către zona subțire a pereților.

În cazul structurilor rotite cu un unghi de 30° curba specifică primei compresii este decalată față de următoarele. Curbele specifice compresiilor 2 și 3 prezintă valori asemănătoare în majoritatea cazurilor. Putem să anticipăm că după prima compresie, următoarele vor avea valori ale stresului asemănătoare, astfel probele permit o serie de compresii până la distrugere.

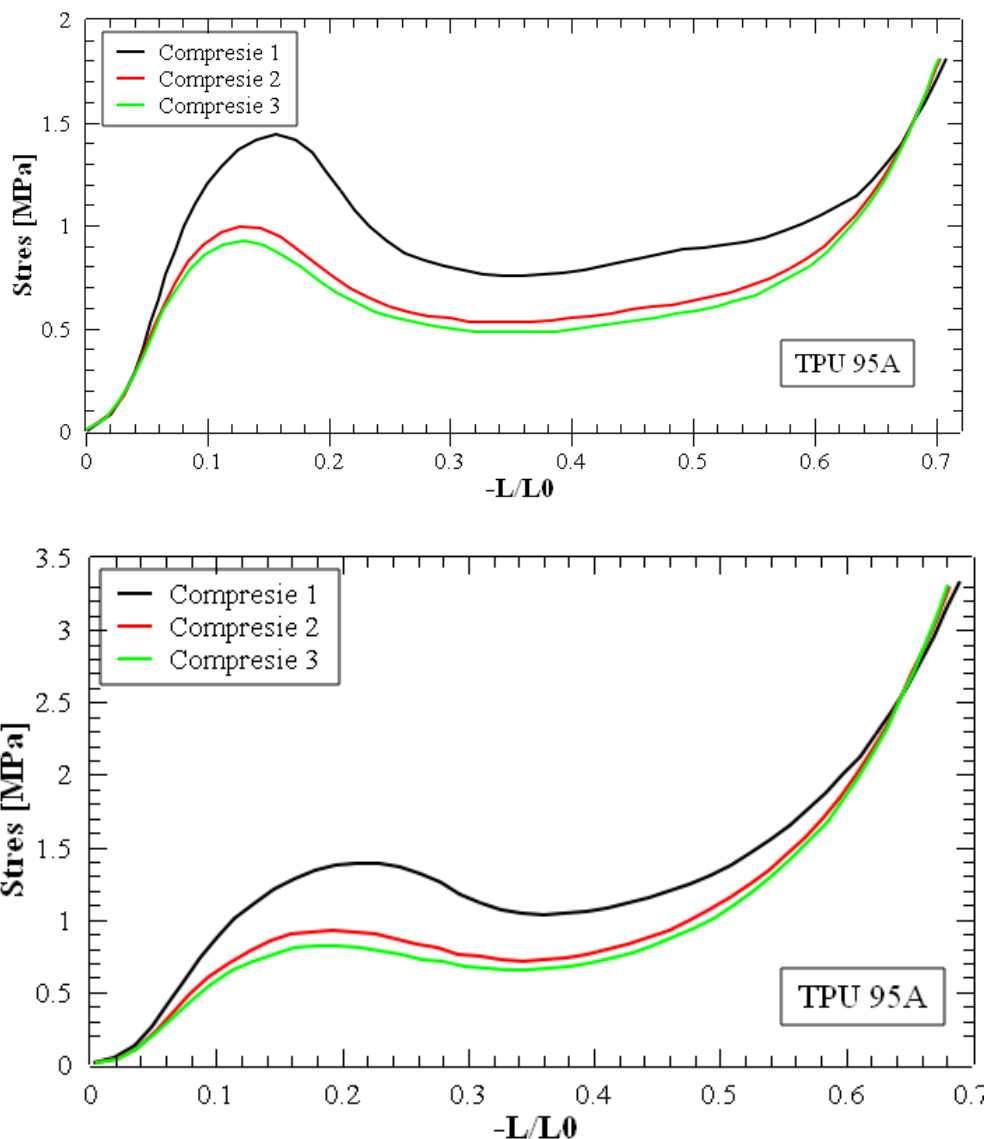
Observăm că în cazul structurilor de bază sau rotite cu orificii circulare, curba compresiei prezintă o zonă liniară redusă, însă înălțimea dintre vârful maxim și zona parțial liniară este mai mică decât în cazul structurilor cu orificii hexagonale. Acest aspect este de ajutor în calculul eficienței energiei absorbite.



Figură 3.17 Curba de compresie a structurilor de absorbție de tip fagure de miere cu structură interioară hexagonală (sus) și circulară (jos), cu planul superior rotit la un unghi de 30° realizate din TPU 70A



Figură 3.18 Curba de compresie a structurilor de absorbție de tip fagure de miere cu structură interioară hexagonală (sus) și circulară (jos), cu planul superior rotit la un unghi de 30° realizate din TPU 85A



Figură 3.19 Curba de compresie a structurilor de absorbție de tip fagure de miere cu structură interioară hexagonală (sus) și circulară (jos), cu planul superior rotit la un unghi de 30° realizate din TPU 95A

Pentru compararea structurilor printate, am ales să utilizăm o serie de parametri, prezentați în capitolul 2.7. Astfel, pentru o vizualizare mai ușoară am ales să transpunem rezultatele acestora sub forma unor histograme pentru a observa mai ușor diferențele. În toate histogramele, structurile de bază se află în partea stânga a reprezentării unei mărimi, iar cele rotite în partea dreaptă, culorile pentru structurile de bază au fost verde pentru structurile cu orificii circulare și roșu pentru cele cu orificii hexagonale, iar pentru cele rotite sub un unghi de 30° am ales albastru pentru cele cu orificii hexagonale și roz pentru cele cu orificii circulare.

Primii parametri calculați pentru o structură de absorbție a energiei sunt energia totală absorbită și eficiența acesteia. Cea din urmă se referă la procentul de energie absorbită din potențialul maxim de energie ce ar putea fi transmisă. Eficiența depinde foarte mult de lungimea platoului liniar,

deoarece o zonă liniară mai lungă permite absorbția unei cantități mari de energie. Un alt lucru de care depinde este diferența de înălțime dintre vârful maxim din prima parte a graficului și zona liniară. Dacă această este mică, energia absorbită este mai apropiată de energia totală ce poate să fie absorbită teoretic deoarece energie totală este calculată ca fiind aria de sub graficul format de o curbă liniară, paralelă cu Ox, de mărime egală cu stresul σ_v ce corespunde vârfului maxim din prima parte a graficului.

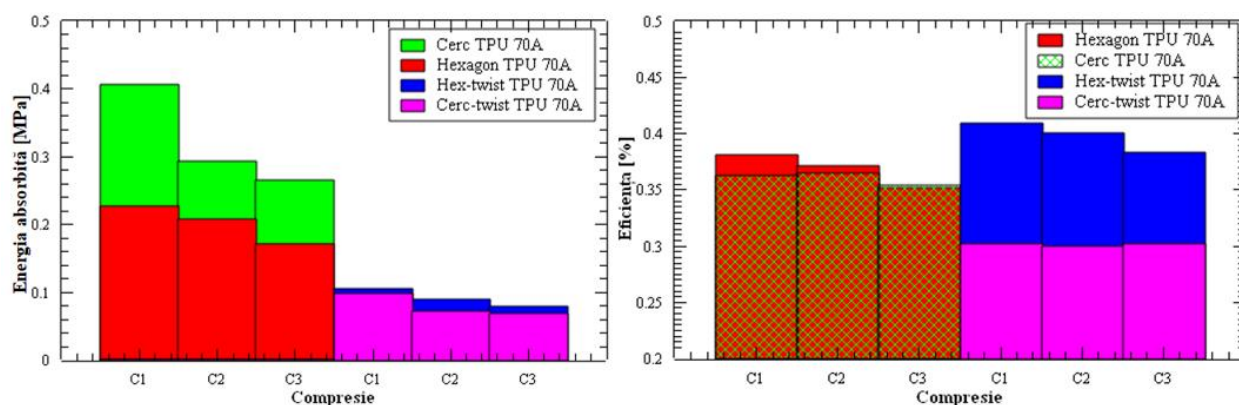
Din figurile 3.20 – 3.22 observăm că structurile de bază, cele sub formă de fagure de miere cu orificii circulare și hexagonale fără un unghi de rotație, absorb o cantitate mai mare de energie comparativ cu structurile rotite. Această cantitate de energie diferă și de materialul din care este realizată structura. Astfel, observăm comparativ că în cazul unui material mai moale, precum TPU 70A, cantitatea de energie pentru prima compresie în cazul structurii cu orificii circulare este de aproximativ 0.4 kJ, față de cel mai dur material unde aceeași structură, pentru prima compresie, are valoarea de aproximativ 2.1 kJ. Observăm mai departe că în cazul structurii de bază cu orificii circulare o diferență de energie mare între comprimările 1 și 2 comparativ cu cele hexagonale: în timp ce prima comprimare absoarbe multă energie, următoarele comprimări tind să absoarbă o cantitate de energie asemănătoare (compresiile 2 și 3). Acest aspect este mai puternic sesizabil cu cât utilizăm un material mai dur. Astfel, în cazul TPU 70A există o diferență de aproximativ 0.1 kJ între C1 și C2, iar în cazul TPU 95A această diferență este de aproximativ 1 kJ.

Din punct de vedere al eficienței, majoritatea probelor tind să aibă valori asemănătoare, acestea se încadrează între 36% și 47%. Maximul eficienței de absorbție a fost atins de structura de bază cu orificii hexagonale produsă din TPU 95A, următoarea după aceasta fiind structura cu orificii hexagonale rotită cu 30° și realizată din TPU 85A. Dacă luăm în calcul și modul în care structura își menține capacitatea de absorbție, cea mai bună dintre acestea este structura cu orificii hexagonale rotită cu 30° și realizată din TPU 85A, aceasta având o diferență mai mică între eficiențele specifice fiecărei compresii. Observăm din histogramele specifice eficienței că formele rotite au o eficiență comparativă cu cele de bază, ba chiar mai bună. Pentru un material mai moale putem să afirmăm că absorbția este eficientizată de forma structurilor, în cazul TPU 70A structurile cu orificii hexagonale, rotite, au o eficiență mai bună. Prin creșterea durității materialului observăm că eficiența în cazul probelor realizate din aceeași structură de bază este asemănătoare (Hex și Hex-twist precum și Cerc și Cerc-twist), acest lucru se petrece în cazul probelor realizate din TPU 85A. În cazul celui mai dur material utilizat, TPU 95A, eficiența probelor este mai mare în cazul celor cu structură de bază, tot aceste structuri prezintă și cea mai mare cantitate de energie stocată, astfel putem să considerăm că din punct de vedere a cantității de energie în raport cu eficiența de absorbție, structura cu orificii hexagonale este cea mai capabilă.

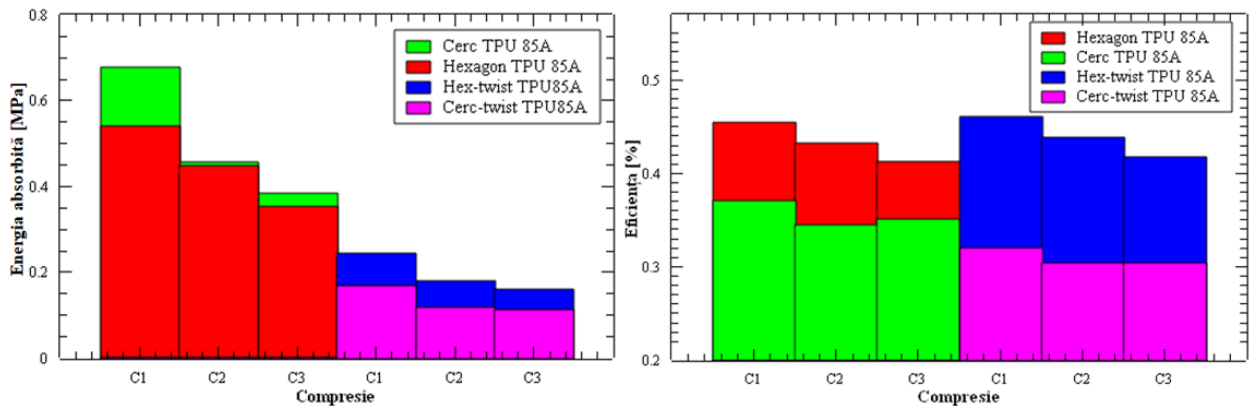
Observăm din figura 3.23.a, că în funcție de densitatea materialului din care sunt realizate, structurile au o rezistență la forța de compresie din ce în ce mai mare, astfel o structură de bază cu orificii circulare, realizată din TPU 95A poate să reziste până în jurul valorii de 3600 N, comparativ cu structurile realizate din TPU 70A care cedează până în 850 N. În funcție de această forță, structurile au aplicații diferite, pentru absorbția șocului produs de o greutate mai mică, o structură realizată din TPU 70A este mai eficientă decât una din TPU 95A.

Observăm că în cazul structurilor cu orificii circulare rotite cu 30° , dar și în cazul celor de baza, eficiența se menține constantă pe pentru TPU 70A și TPU 85A, însă procentul este unul mic. Putem astfel să spunem despre aceste structuri că își mențin stabile proprietățile mecanice, însă acestea nu sunt cele mai bune pentru absorbția șocului.

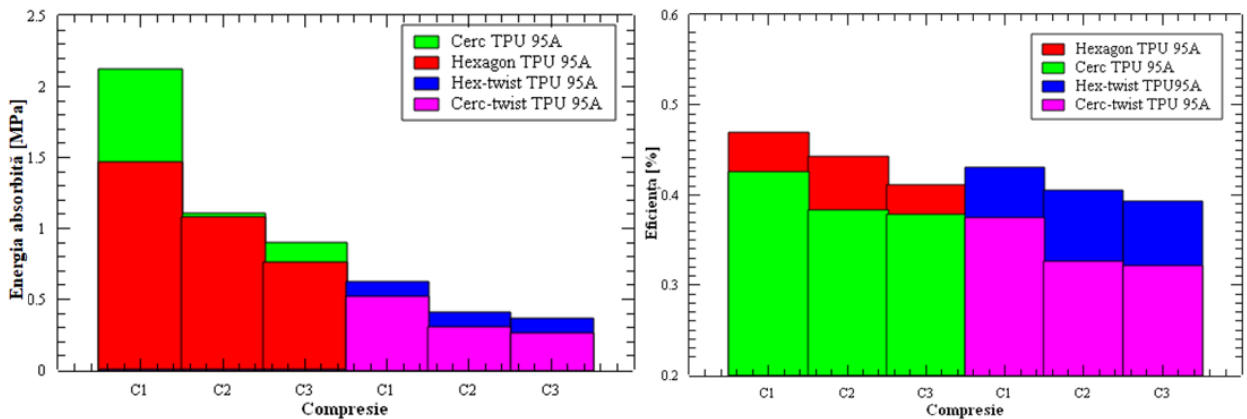
Observăm că probele realizate din TPU 95A, față de celelalte materiale, prezintă o eficiență a absorbției de peste 37% (chiar 43% dacă proba Cerc-twist este neglijată) în cazul oricărui tip de structură. Acest lucru ne face să considerăm ca TPU 95A este cel mai bun material din cele utilizate. Dacă luăm în calcul histograma energiei absorbite, prezentă în figura 3.22 stânga și figura 3.23.a, unde sunt prezentate forțele sub care structura începe să absoarbă energia, observăm că probele realizate din TPU 95A prezintă o plajă extinsă de valori, aceste diferențe fiind datorate modelului structurii. Astfel putem să afirmăm că utilizând materialul TPU 95A, prin modificarea structurii sau suprapunerea mai multor tipuri de structuri putem să obținem un produs pretabil pentru aplicația șocurilor de intensitate mică, cât și celor cu intensitate mai mare.



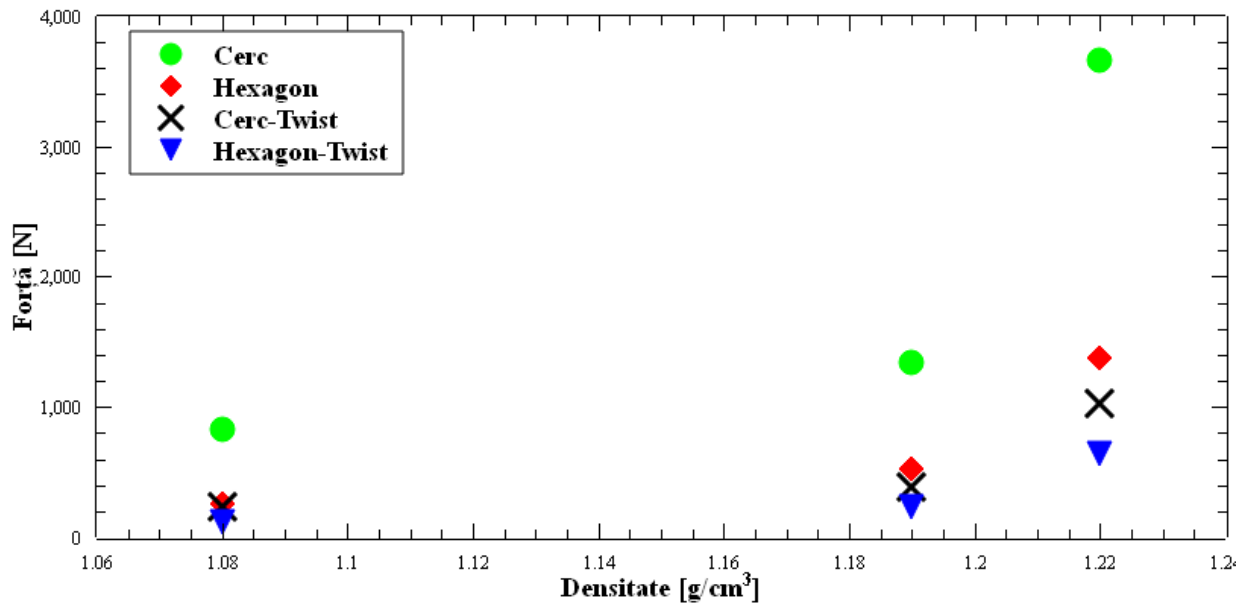
Figură 3.20 Cantitatea de energie absorbită de structurile de tip fagure de miere produse din TPU 70A (stânga) și eficiența absorbției (dreapta), indicii C1, C2, C3 reprezintă numărul compresiei



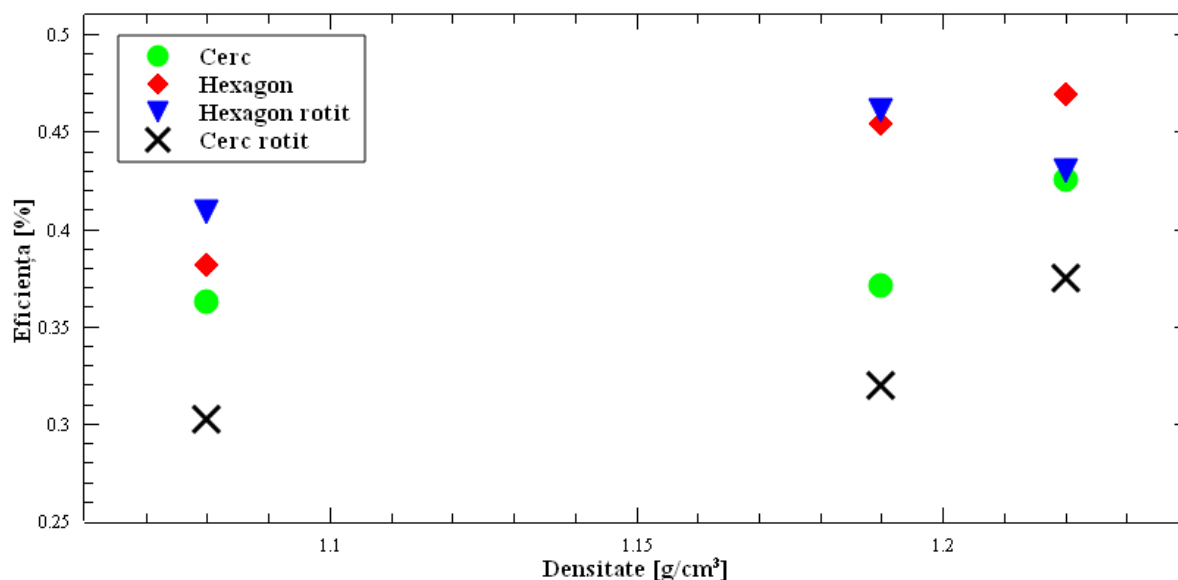
Figură 3.21 Cantitatea de energie absorbită de structurile de tip fagure de miere produse din TPU 85A (stânga) și eficiența absorbției (dreapta), indicii C1, C2, C3 reprezintă numărul compresiei



Figură 3.22 Cantitatea de energie absorbită de structurile de tip fagure de miere produse din TPU 95A (stânga) și eficiența absorbției (dreapta), indicii C1, C2, C3 reprezintă numărul compresiei



Figură 1.23 a) Forța sub care structura începe să absoarbă în funcție de densitatea materialului din care sunt realizate, densitatea pentru TPU 70A este 1.08, pentru TPU 85A este 1.19, iar pentru TPU 95A este 1.22 g/cm³



Figură 3.23 b) Eficiența structurilor de absorbție (jos) în funcție de densitatea materialului din care sunt realizate, densitatea pentru TPU 70A este 1.08, pentru TPU 85A este 1.19, iar pentru TPU 95A este 1.22 g/cm³

Pentru caracterizarea structurilor din mai multe puncte de vedere, am ales să utilizăm și parametrii SEA și CLE, aceștia au fost calculați prin intermediul ecuațiilor (2) și (6) din capitolul 2.7. Rezultatele sunt prezentat sub forma unor histograme ce respectă regulile legat de culorile specifice fiecărei structuri.

SEA este energia specifică absorbită de fiecare structură iar aceasta este calculată, în cazul nostru, în funcție de masa structurii. Fiecare structură a fost cântărită în prealabil deoarece apar diferențe de greutate între probe datorită modului de printarea a materialului. Aceste diferențe constau în apariția reziduri de material în momentul în care extruderul se deplasează în aer. Acest parametru ne prezintă cantitatea de energie stocată într-o unitate de masă, în cazul nostru într-un g din structură. În cazul absorbției energiei am observat că structurile cu orificii circulare absorb o cantitate mai mare de energie. Pentru SEA valorile se modifică, deoarece probele cu orificii circulare au nevoie de cantitate mai mare de material pentru a fi produse. Putem să afirmăm astfel că structurile cu găuri hexagonale absorb o cantitate mai mică de energie, însă aceasta este absorbită mai eficient conform figurii 3.23.b, iar cantitatea de material utilizat este redusă. Structurile cu orificii circulare utilizează între 16 g și 20.5 g de material, iar cele cu orificii hexagonale între 10 g și 14 g de material. Cu aproximativ aceeași cantitate de material putem să realizăm două structuri cu găuri circulare sau trei cu găuri hexagonale. Cantitatea de energie absorbită de 3 structuri de tip fagure de miere cu găuri hexagonale este mai mare decât energia absorbită de același tip de structură dar cu găuri circulare. Modul de printare al structurilor cu găuri hexagonale este mult mai rapid și prezintă mai puține reziduri, deoarece grosimea pereților este realizată printr-o singură trecere a extruderului, comparativ cu structurile cu găuri circulare unde extruderul realizează o serie de mișcări. În general, însă acest lucru depinde de materialul

utilizat, timpul pentru printarea probelor cu orificii circulare este dublu față de structurile cu orificii hexagonale.

Observăm din figurile 3.24 - 3.26 stânga, că în majoritatea cazurilor, cea mai mare cantitate de energie într-o unitate de masă este stocată de structurile cu orificii hexagonale simple sau rotite.

Pentru a vedea dacă o structură este un bun absorbant utilizăm parametrul CLE, acesta fiind adimensional. Cu cât valoarea parametrului este mai apropiată de 1, adică de 100%, cu atât mai bună este structura ca absorbant.

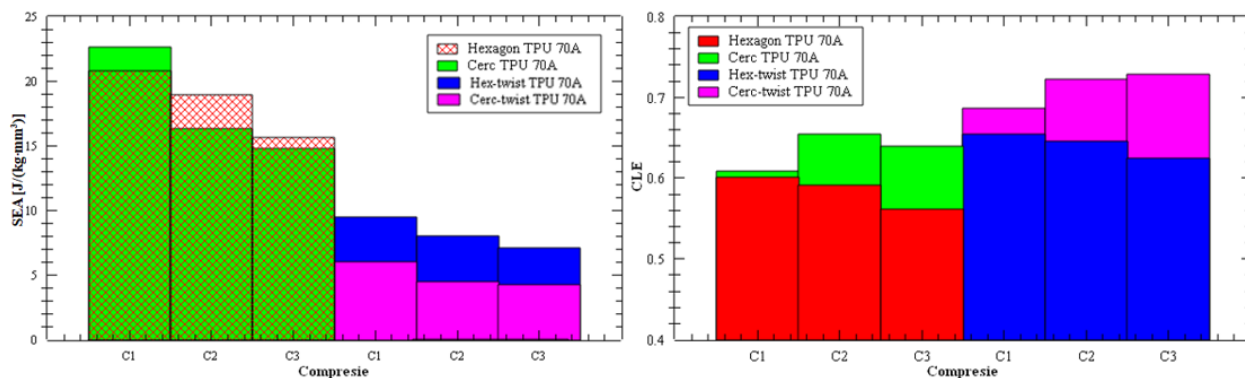
Observăm că în cazul acestui parametru, structurile rotite prezintă valori mai apropiate de 1 comparativ cu structurile de bază. Pentru majoritatea structurilor, acest parametru se menține constant de la o compresie la cealaltă. O situație neobișnuită se întâmplă în cazul structurilor circulare simple sau rotite, realizate din TPU 70A. Parametrul CLE pentru compresiile 2 și 3 este mai mare decât pentru prima compresie. Acest lucru se poate explica prin forma curbei de compresie, observăm că înălțimea dintre vârful maxim și zona liniară este mai mică în cazul compresiilor 2 și 3 față de prima compresie.

Parametrul CLE scade în cazul structurilor cu orificii hexagonale deoarece curbele de compresie ale acestor structuri își mențin forma de la o comprimare la cealaltă, însă valoarea forței maxime scade.

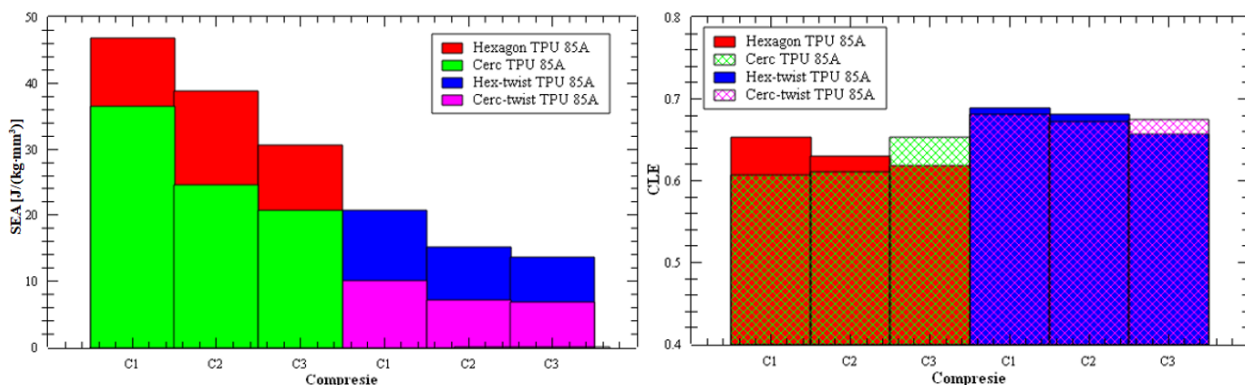
Aceste tipuri de comportamente se pot explica prin structură și modul de producție. În cazul structurilor cu orificii circulare, acestea prezintă în prima parte a curbei specifică compresiei o pantă mai mică în comparație cu panta curbei aceleași structuri cu orificii hexagonale (observăm în figura 3.18 sus și jos). Această pantă indică modul prin care structura preia stresul, astfel pentru o pantă abruptă avem o structură ce este rigidă până în punctul de maxim iar mai apoi cedează. O pantă mai puțin abruptă indică faptul că structura preia o parte din stres și până în punctul de maxim. Din punct de vedere al producției, structurile cu orificii circulare sunt predispuse la defecte mai mari, deoarece modul de printare este unul mai complex în comparație cu structurile cu orificii hexagonale. Aceste defecte, dar și diferențele de grosime a peretelui structurii induc o rearanjare a structurii în prima compresie.

Conform histogramelor (fig. 3.24 - fig. 3.26, partea dreaptă), cel mai bun parametru CLE (72-73,5%) l-au avut structurile rotite cu orificii circulare, realizate din TPU 95A și TPU 70A. Structura de bază cu orificii hexagonale, produsă din TPU 95A a avut un coeficient CLE de 0.665 (66.5%). Structura rotită cu orificii hexagonale, produsă din TPU 85A a avut un coeficient

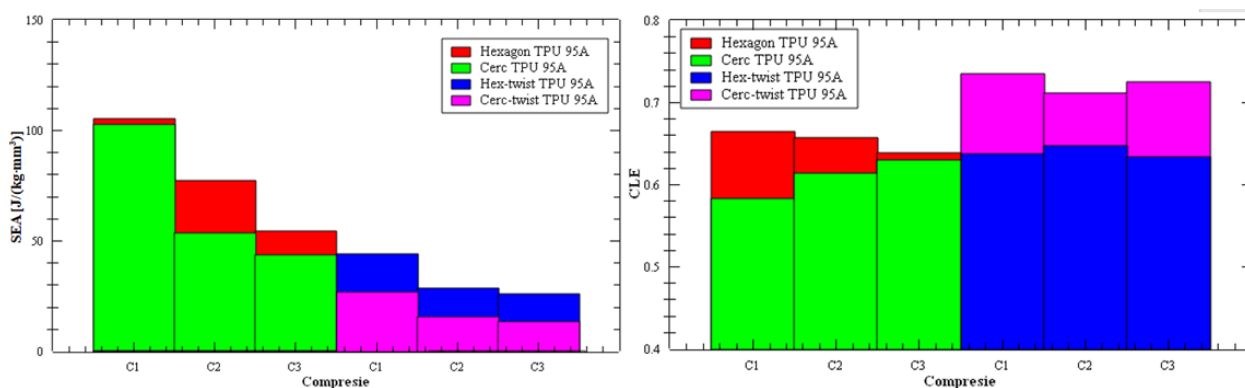
de 0.69 (69%). Aceste valori sunt apropiate de maximele parametrului CLE, am dorit să indicăm aceste structuri deoarece au avut rezultate bune în cazul celorlalți parametri studiați.



Figură 3.24 Cantitatea de energie specifică absorbită pe unitate de masă pentru structurile de tip fagure de miere produse din TPU 70A (stânga) și eficiența sarcinii de comprimare (dreapta), indicii C1, C2, C3 reprezintă numărul compresiilor



Figură 3.25 Cantitatea de energie specifică absorbită pe unitate de masă pentru structurile de tip fagure de miere produse din TPU 85A (stânga) și eficiența sarcinii de comprimare (dreapta), indicii C1, C2, C3 reprezintă numărul compresiilor

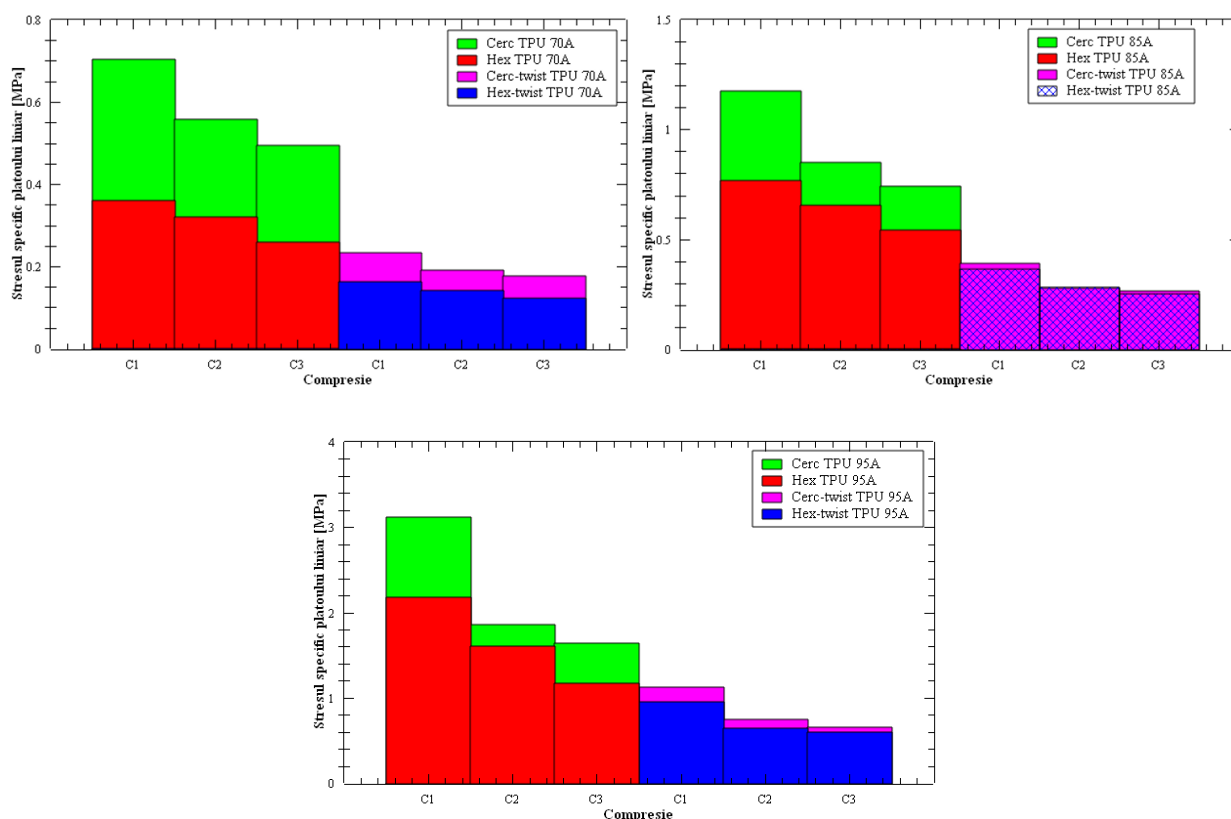


Figură 3.26 Cantitatea de energie specifică absorbită pe unitate de masă pentru structurile de tip fagure de miere produse din TPU 95A (stânga) și eficiența sarcinii de comprimare (dreapta), indicii C1, C2, C3 reprezintă numărul compresiilor

Pentru caracterizarea liniarității platoului specific absorbției am ales să calculăm stresul specific al acestui platou. Cum am spus și în prima parte, absorbția depinde mult de liniaritatea platoului

și lungimea acestuia, astfel cu cât platoul este mai lung iar liniaritatea se menține, structura este mai puternic absorbantă.

Acest parametru reprezintă energia absorbită în zona platoului liniar în raport cu lungimea platoului pe care se absoarbe această energie. Cu cât platoul este mai lung, mai multă energie este absorbită, iar valoarea stresului mediu pentru acest platou este mai mare (teoretic). Trebuie să luăm în considerare și faptul că acest stres depinde de materialul din care este realizată structura. Observăm un exemplu practic în cazul probei cu orificii circulare realizată din TPU 95A stresul platoului are valoarea de 3.12MPa, iar pentru următorul material (TPU 85A) acesta este de 1.17MPa. În cazul probelor de bază, valoarea stresului scade considerabil după fiecare compresie. În cazul structurilor rotite cu 30°, valoarea stresului scade, însă mult mai puțin după fiecare compresie. Putem să afirmăm astfel ca structurile rotite pot menține mult mai bine valoarea stresului platoului liniar după o serie de comprimări. Din acest punct de vedere, cele mai bune rezultate le are proba rotită cu orificii hexagonale.



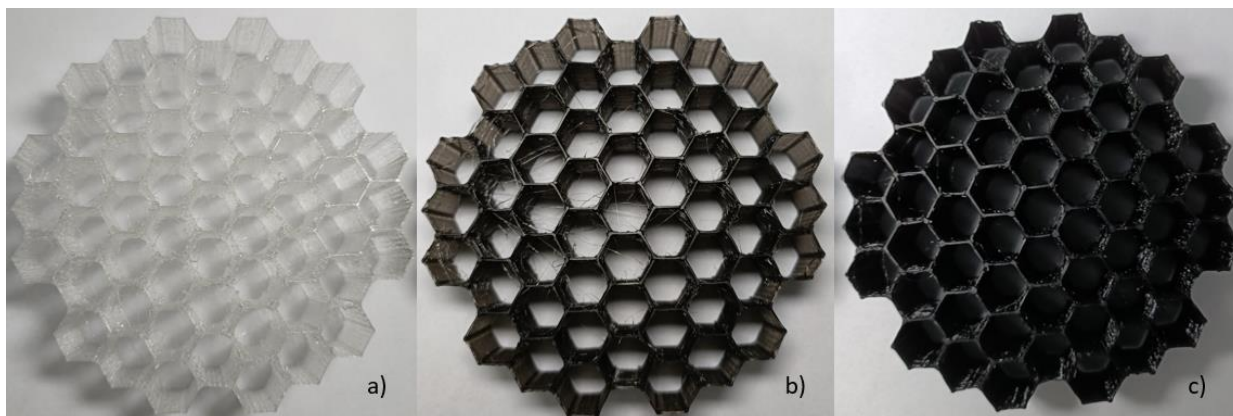
Figură 3.27 Stresul specific platoului liniar pentru structurile de absorbție de tip fagure de miere produse din TPU 70A (stânga), TPU 85A (dreapta) și TPU 95A (jos)

După ce probele au fost supuse testului de compresie, acestea fiind comprimate de trei ori, structura acestora este asemănătoare cu cea inițială. În cazul structurilor cu orificii hexagonale (fig. 3.28) observăm că pereții aceeași liniaritate perfectă ca în cazul inițial, iar forma unor celule

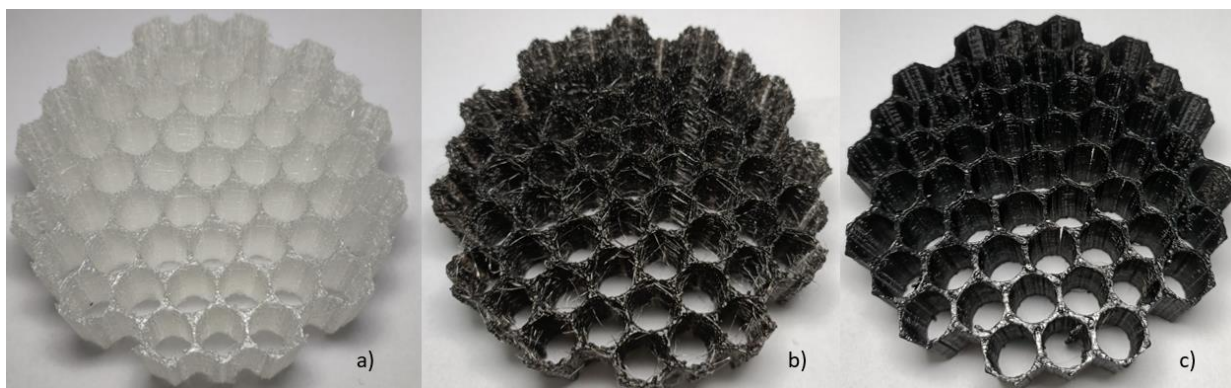
de bază este ușor modificată. Formele hexagonale ce realizează structura de bază sunt acum ușor alungite.

În cazul structurilor cu orificii circulare (fig. 3.29 c) ce au fost produse din TPU 95A, observăm câteva ruperi totale sau parțiale ale pereților în zona în care aceștia sunt mai subțiri.

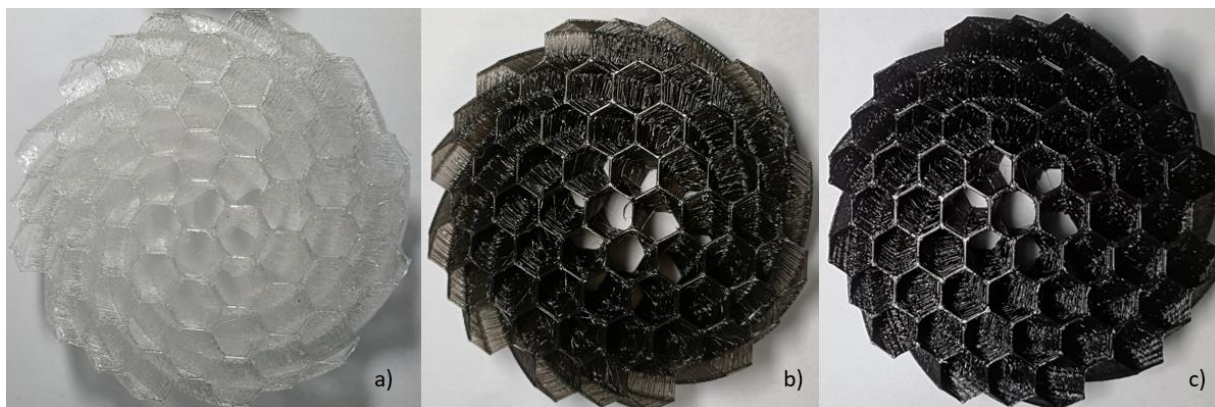
În cazul structurilor rotite cu un unghi de 30° , formele nu prezintă defecte sau modificări ale aspectului vizibile cu ochiul liber.



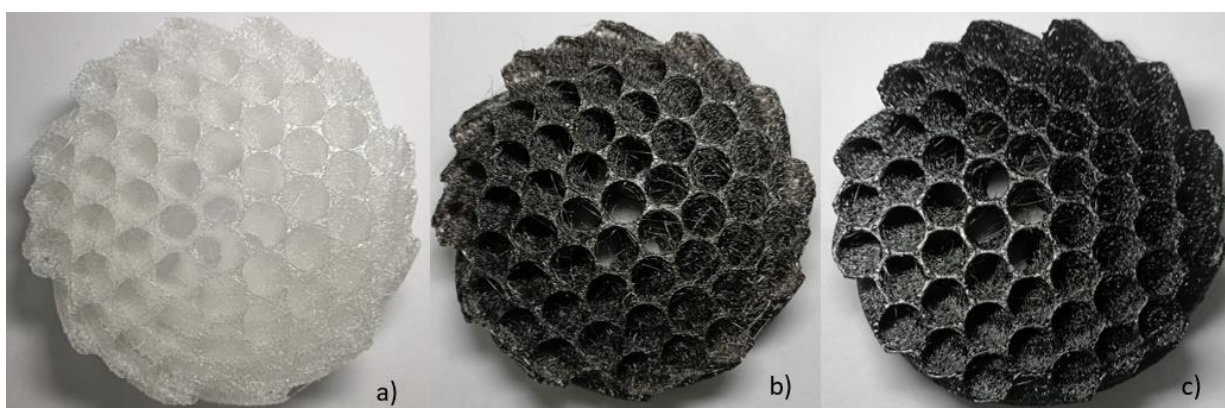
Figură 3.28 Structură de absorbție de tip fagure de miere cu structură interioară hexagonală după testul de compresie ce a presupus 3 comprimări. Acestea au fost printate cu materialele a) TPU 70A b) TPU 85A c) TPU 95A



Figură 3.29 Structură de absorbție de tip fagure de miere cu structură interioară circulară după testul de compresie ce a presupus 3 comprimări. Acestea au fost printate cu materialele a) TPU 70A b) TPU 85A c) TPU 95A



Figură 3.30 Structură de absorbție de tip fagure de miere cu structură interioară hexagonală, cu planul superior rotit la un unghi de 30° după testul de compresie ce a presupus 3 comprimări. Acestea au fost printate cu materialele a) TPU 70A b) TPU 85A c) TPU 95A



Figură 3.31 Structură de absorbție de tip fagure de miere cu structură interioară circulară, cu planul superior rotit la un unghi de 30° după testul de compresie ce a presupus 3 comprimări. Acestea au fost printate cu materialele a) TPU 70A b) TPU 85A c) TPU 95A

Conform parametrilor precum eficiența în absorbția energiei sau CLE, structura cu orificii hexagonale produsă din TPU 95A prezintă cel mai bun raport al rezultatelor. Energia absorbită de această structură este de 1.5 MPa, iar energia specifică absorbită este de 105 kPa/g. Materialul din care este realizată structura (TPU 95A) este unul versatil, datorită plajei mari de valori ale forței maxime de compresie pe care poate să o acopere (fig. 3.23 a). Datorită valorilor rezultatelor de remarcă este și structura rotită cu orificii hexagonale, produsă din TPU 85A. Această structură a avut o eficiență de 46%, iar parametrul CLE este 0.69 (69%). Energia specifică absorbită este de 20.6 kPa/g, iar energia absorbită este de 0.2 MPa, din această cauză, acest tip de structură este pretabil doar pentru absorbția șocurilor de amplitudine joasă. Aceeași structură realizată din TPU 95A are rezultate mai proaste, dar asemănătoare.

În cazul structurilor rotite cu orificii circulare, chiar dacă acestea au avut un rezultat bun pentru parametrul CLE, energia specifică absorbită de acestea este una mică în comparație cu greutatea probei. Rezultatele pentru eficiența structurii au fost sub rezultatele structurii de bază, astfel nu considerăm eficientă producerea acestui tip de structură.

4. Concluzii

Acest studiu prezintă o serie de proprietăți a patru tipuri de structuri ce prezintă proprietăți de absorbție a energiei mecanice, și obținute utilizând o imprimantă de tip FFF. Materialul utilizat pentru producerea probelor este TPU de trei durități diferite (70A, 85A și 95A).

Înainte de producerea structurilor de absorbție, temperatura ideală pentru extrudare a fost stabilită prin printarea unor probe standard ASTM-D628-10 Type V. Probele au fost printate vertical față de suprafața de printare pentru a putea testa forța la care straturile printate se dezlipesc. Am acoperit plaja de valori între 210 – 230 °C cu o diferență de 5 °C între probe. În urma testelor de rupere efectuate am stabilit că temperatura optimă de extrudare în cazul nostru este de 215 °C pentru toate materialele de tip TPU.

Au fost printate 4 tipuri de structuri de absorbție folosind două tipuri de celule de bază. Probele au fost supuse unui test de compresie, iar pentru fiecare probă au fost efectuate 3 seturi de comprimări pentru a studia capacitatea de reutilizabilitate.

Din curbele specifice compresiei am dedus o serie de parametri precum E_{abs} (energia absorbită), SEA (energia specifică absorbită), CLE (eficiența stresului), η_{abs} (eficiența absorbției) sau σ_p (stresul platoului liniar). În funcție de acești parametri, cele mai bune tipuri de structuri au fost: structura de bază cu orificii hexagonale, produsă din TPU 95A și structura rotită cu orificii hexagonale produsă din TPU 85A. Structura produsă din TPU 95A a absorbit o energie de 1.47 MPa, parametrul SEA pentru aceasta fiind de 105 kPa/g. Eficiența absorbției energiei a fost de 47%, iar parametrul CLE de 66%. În cazul structurii realizate din TPU 85A, energia absorbită a fost de 0.24 MPa, în timp ce energia specifică absorbită a atins valoarea de 20.6 kPa/g. Eficiența absorbției energiei în acest caz a fost de 46%, iar parametrul CLE de 69%.

Rezultate remarcabile pentru parametrul CLE au fost obținute și în cazul structurilor rotite cu orificii circulare, produse din TPU 95A. Valoarea parametrului s-a menținut pentru fiecare compresie între 71-73.5%. Însă problema acestor structuri este greutatea, care conduce la un parametru SEA mult mai mic al acestor structuri în comparație cu cea mai buna structură. O probă cu orificii hexagonale utilizează în medie 11g de material, iar probele cu găuri circulare utilizează în medie 18g de material. Cu aceeași cantitate de material putem să realizăm trei structuri cu orificii hexagonale ce au o capacitate de absorbție mai buna sau două structuri cu orificii circulare.

În comparație cu rezultate din literatură de specialitate [24] ce dorește să realizeze structuri de absorbție reutilizabile, probele produse de noi prezintă rezultate pentru eficiența absorbției superioare. În cazul structurilor cu orificii hexagonale produse din TPU 95A și comprimate până

la 80% din grosimea lor, eficienței energiei absorbite a fost de 47%, comparativ cu rezultate din literatură ce indică o eficiență de 45% pentru o probă comprimată până la 70% din grosimea ei. Și în cazul structurii rotite cu orificii hexagonale eficiența de 46% se menține superioară.

Acest tip de structuri poate să fie utilizat ca absorbant al șocului în interiorul unor căști de protecție precum cele moto [25]. Rezultatele în comparație cu materialul de bază în producția căștilor de protecție [26] (polistiren extrudat) este unul superior. Polistirenul extrudat are o eficiență de absorbție de aproximativ 37%. Mai departe, aceste structuri se pot utiliza în industria de automobile ca și componente pentru absorbția energiei mecanice rezultate, de exemplu, în accidente, acestea fiind foarte ușoare și, datorită orificiilor, prezintă caracteristici bune din punct de vedere aerodinamic.

Pe viitor ne propunem să înlocuim materialul din care sunt realizate structurile cu PDMS (polidimetilsiloxan) ranforsat cu micro sfere termo-expandabile, acest tip de material a prezentat rezultate remarcabile [27] în cazul probelor de tip „bulk”. Considerăm că prin așezarea acestui material într-o structură de absorbție eficientă, acesta ar putea avea rezultate superioare în ceea ce privește absorbția energiei mecanice. Ne dorim ca prin intermediul imprimantei 3D să realizăm matricele din poli vinil alcool (PVA) care sunt mai umplute cu materialul PDMS+TEHM. Datorită proprietăților de solubilitate în apă a materialului PVA, matricele pot fi dizolvate cu ușurință.

Bibliografie

- [1] C. Lubombo and M. A. Huneault, “Effect of infill patterns on the mechanical performance of lightweight 3D-printed cellular PLA parts,” *Mater Today Commun*, vol. 17, pp. 214–228, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.mtcomm.2018.09.017.
- [2] C. W. Isaac, “Crashworthiness performance of green composite energy absorbing structure with embedded sensing device providing cleaner environment for sustainable maintenance,” *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 25, p. e00196, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.susmat.2020.e00196.
- [3] K. Wei *et al.*, “Mechanical analysis and modeling of metallic lattice sandwich additively fabricated by selective laser melting,” *Thin-Walled Structures*, vol. 146, p. 106189, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.tws.2019.106189.
- [4] Y. Zhang, Y. Lin, Y. Li, and X. Li, “3D printed self-similar AlSi10Mg alloy hierarchical honeycomb architectures under in-plane large deformation,” *Thin-Walled Structures*, vol. 164, p. 107795, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.tws.2021.107795.
- [5] X. Zhang, C. An, Z. Shen, H. Wu, W. Yang, and J. Bai, “Dynamic crushing responses of bio-inspired re-entrant auxetic honeycombs under in-plane impact loading,” *Mater Today Commun*, vol. 23, p. 100918, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.100918.
- [6] J. Zhang, D. Karagiozova, Z. You, Y. Chen, and G. Lu, “Quasi-static large deformation compressive behaviour of origami-based metamaterials,” *Int J Mech Sci*, vol. 153–154, pp. 194–207, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2019.01.044.
- [7] H. Jiang, L. Le Barbenchon, B. A. Bednarczyk, F. Scarpa, and Y. Chen, “Bioinspired multilayered cellular composites with enhanced energy absorption and shape recovery,” *Addit Manuf*, vol. 36, p. 101430, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101430.
- [8] K. Lin *et al.*, “Laser powder bed fusion of bio-inspired honeycomb structures: Effect of twist angle on compressive behaviors,” *Thin-Walled Structures*, vol. 159, p. 107252, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.tws.2020.107252.
- [9] C. W. Isaac and F. Duddeck, “Current trends in additively manufactured (3D printed) energy absorbing structures for crashworthiness application – a review,” *Virtual Phys Prototyp*, vol. 17, no. 4, pp. 1058–1101, Oct. 2022, doi: 10.1080/17452759.2022.2074698.
- [10] A. Frick and A. Rochman, “Characterization of TPU-elastomers by thermal analysis (DSC),” *Polym Test*, vol. 23, no. 4, pp. 413–417, Jun. 2004, doi: 10.1016/j.polymertesting.2003.09.013.
- [11] S. R. G. Bates, I. R. Farrow, and R. S. Trask, “3D printed polyurethane honeycombs for repeated tailored energy absorption,” *Mater Des*, vol. 112, pp. 172–183, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.08.062.
- [12] A. Valerga, M. Batista, J. Salguero, and F. Girot, “Influence of PLA Filament Conditions on Characteristics of FDM Parts,” *Materials*, vol. 11, no. 8, p. 1322, Jul. 2018, doi: 10.3390/ma11081322.
- [13] “Schematic representation of Fused Filament Fabrication 01 - Fused filament fabrication - Wikipedia” (accesat la data 07.06.2023 la 11:45)

- [14] https://wiki.opensourceecology.org/wiki/E3D_Titan_Aero_Extruder (accesat la data 26.04.2023 ora 14:34)
- [15] G. D. Goh, Y. L. Yap, H. K. J. Tan, S. L. Sing, G. L. Goh, and W. Y. Yeong, “Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing via Material Extrusion: A Review,” *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, vol. 45, no. 2, pp. 113–133, Mar. 2020, doi: 10.1080/10408436.2018.1549977.
- [16] <https://ninjatek.com/wp-content/uploads/NinjaFlex-TDS.pdf> (accesat la data 16.06.2023 ora 21:45)
- [17] <https://makerbot.my.salesforce.com/sfc/p/#j0000000HOnW/a/5b000004UZS8/BFu9ADWYgMCFMUMoKa7e09bIQwrMG3AesDny5xh.myY> (accesat la data 16.06.2023 ora 21:50)
- [18] <https://drive.google.com/drive/u/1/folders/1b1YqUSY3u4PbGNSWM9uAjZ0HrjZGHYKv> (accesat la data 16.06.2023)
- [19] M. A. Kader *et al.*, “Novel design of closed-cell foam structures for property enhancement,” *Addit Manuf*, vol. 31, p. 100976, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.addma.2019.100976.
- [20] U. Morales, A. Esnaola, M. Iragi, L. Aretxabaleta, and J. Aurrekoetxea, “The effect of cross-section geometry on crushing behaviour of 3D printed continuous carbon fibre reinforced polyamide profiles,” *Compos Struct*, vol. 274, p. 114337, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.114337.
- [21] X. Wu, Y. Su, and J. Shi, “In-plane impact resistance enhancement with a graded cell-wall angle design for auxetic metamaterials,” *Compos Struct*, vol. 247, p. 112451, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112451.
- [22] C. W. Isaac, “Crushing response of circular thin-walled tube with non-propagating crack subjected to dynamic oblique impact loading,” *International Journal of Protective Structures*, vol. 11, no. 1, pp. 41–68, Mar. 2020, doi: 10.1177/2041419619849087.
- [23] S. Li *et al.*, “In-plane compression of 3D-printed self-similar hierarchical honeycombs – Static and dynamic analysis,” *Thin-Walled Structures*, vol. 157, p. 106990, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.tws.2020.106990.
- [24] M. Mohsenizadeh, F. Gasbarri, M. Munther, A. Beheshti, and K. Davami, “Additively-manufactured lightweight Metamaterials for energy absorption,” *Mater Des*, vol. 139, pp. 521–530, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2017.11.037.
- [25] G. D. Caserta, L. Iannucci, and U. Galvanetto, “Shock absorption performance of a motorbike helmet with honeycomb reinforced liner,” *Compos Struct*, vol. 93, no. 11, pp. 2748–2759, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.compstruct.2011.05.029.
- [26] R. A. de Sousa, D. Gonçalves, R. Coelho, and F. Teixeira-Dias, “Assessing the effectiveness of a natural cellular material used as safety padding material in motorcycle helmets,” *Simulation*, vol. 88, no. 5, pp. 580–591, May 2012, doi: 10.1177/0037549711414735.
- [27] J.-H. Cai, M.-L. Huang, X.-D. Chen, and M. Wang, “Thermo-expandable microspheres strengthened polydimethylsiloxane foam with unique softening behavior and high-efficient energy absorption,” *Appl Surf Sci*, vol. 540, p. 148364, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.apsusc.2020.148364.

DECLARAȚIE PE PROPRIE RĂSPUNDERE

Subsemnatul, Buștihan Alin-Antonio, declar că Lucrarea de licență pe care o voi prezenta în cadrul examenului de finalizare a studiilor la Facultatea de Fizică, din cadrul Universității Babeș-Bolyai, în sesiunea 2023 , sub îndrumarea Lect. dr. Ioan Botiz, reprezintă o operă personală. Menționez că nu am plagiat o altă lucrare publicată, prezentată public sau un fișier postat pe Internet. Pentru realizarea lucrării am folosit exclusiv bibliografia prezentată și nu am ascuns nici o altă sursă bibliografică sau fișier electronic pe care să le fi folosit la redactarea lucrării.

Prezenta declarație este parte a lucrării și se anexează la aceasta.

Data,

25.06.2023

Buștihan Alin-Antonio

