MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București
Școala Doctorală de Inginerie Industrială și Robotică

Alexandru VASILE

REZUMAT AL TEZEI DE DOCTORAT

Configurarea miezurilor din metamateriale utilizate pentru componente structurale de tip sandwich

Conducător științific,

Prof.univ.dr.ing. **Dan Mihai CONSTANTINESCU**

- 2025 -

COMISIA DE DOCTORAT

Președinte		Universitatea Naţională de Ştiinţă şi Tehnologie POLITEHNICA București
Conducător științific	Prof.univ.dr.ing. Dan Mihai CONSTANTINESCU	
Referent	Prof.univ.dr.ing. Mircea Cristian DUDESCU	Universitatea TEHNICĂ din Cluj-Napoca
Referent	Prof.univ.dr.ing. Amado George ȘTEFAN	Academia Tehnică Militară „Ferdinand I”
Referent	Prof.univ.dr.ing. Gheorghe Gabriel JIGA	Universitatea Naţională de Ştiinţă şi Tehnologie POLITEHNICA București

CUPRINS

CUPRINS 1
INTRODUCERE 2
CAPITOLUL 1 - ANALIZA TIPURILOR DE METAMATERIALE MECANICE 6
CAPITOLUL 2 REALIZAREA MODELULUI GEOMETRIC AL STRUCTURILOR DE TIP SANDWICH CU MIEZ DIN METAMATERIALE MECANICE 8
CAPITOLUL 3 SOLICITAREA LA COMPRESIUNE A PROBELOR DE METAMATERIALE PROPUSE 13
CAPITOLUL 4 SIMULAREA NUMERICĂ A TESTELOR DE COMPRESIUNE 17
CAPITOLUL 5 SOLICITAREA EXPERIMENTALĂ LA IMPACT CU VITEZE REDUSE 21
CAPITOLUL 6 CONCLUZII FINALE 25
6.1 Concluzii generale 25
6.2 Contribuții personale 28
6.3 Direcții pentru cercetări viitoare 28
BIBLIOGRAFIE 30

INTRODUCERE

Motivaţia alegerii temei de cercetare

Dezvoltarea structurilor de tip sandwich își are originile în ingineria aerospațială și navală a secolului XX, unde erau necesare materiale ușoare, dar de înaltă rezistență, pentru a asigura eficiența structurală. Configurațiile tradiționale de tip sandwich, constând din două fețe rigide și un strat interior ușor, au folosit inițial miezuri de tip fagure sau spumă pentru a îmbunătăți rigiditatea la încovoiere și absorbția de energie. Odată cu progresele realizate în știința materialelor, fabricația aditivă (AM) și proiectarea computațională (CAD), miezurile din metamateriale mecanice au devenit o alternativă atractivă, oferind performanțe superioare prin topologia personalizată și comportamentul programabil. Interesul comunității de cercetare pentru acest subiect a crescut în secolul XXI datorită potențialului metamaterialelor de a obține comportamente mecanice fără precedent, cum ar fi valori negative ale coeficienților lui Poisson, disipare și absorbție mare a energiei de impact și anizotropie reglabilă. Ca rezultat, convergența dintre modelarea și fabricarea unor topologii complexe de dimensiuni foarte reduse și a posibilității validării experimentale și numerice a acestora a propulsat explorarea acestor arhitecturi artificiale innovative noi, făcându-le un domeniu proeminent al cercetării interdisciplinare.

Provocările actuale includ optimizarea și minimizarea defectelor apărute pe timpul fabricației unor astfel de structuri, îmbunătățirea robusteței mecanice în condiții complexe de încărcare și creșterea abilităților de parametrizare și scalare a unor astfel de geometrii. În plus, înțelegerea durabilității pe termen lung și a mecanismelor de deformare a configurațiilor de tip sandwich cu topologii noi, rămâne un domeniu critic de cercetare. De asemenea, este nevoie de metode avansate de modelare și simulare pentru a prezice eficient comportamentul mecanic al metamaterialelor, în vederea optimizării structurale încă din faza de proiectare a acestora. Motivația care a stat la baza alegerii temei de cercetare a tezei a apărut din nevoia de abordare a acestor provocări prin cercetare interdisciplinară și explorare a multifuncționalității structurilor sandwich bazate pe metamateriale, cum ar fi amortizarea vibrațiilor și absorbția energiei, în vederea creșterii interesului de adoptare la scară largă a acestora în inginerie.

Actualitatea și importanța cercetării doctorale

Încorporate sau nu în componente de tip sandwich, metamaterialele constituie o direcție de cercetare de actualitate în domeniul elementelor structurale neconvenționale, fiind materiale artificiale proiectate să manifeste proprietăți sau comportamente neobișnuite. Deși noțiunea este suficient de matură pentru a fi așteptate cercetări intense în domeniul mecanic, aceasta nu a cunoscut un interes semnificativ decât în ultimele decenii, odată cu progresele întâlnite în tehnologii de imagistică și dezvoltare a capabilităților fabricației aditive. Aceste instrumente au transformat mijloacele disponibile cercetătorilor din diferite domenii, oferind un control mai eficient asupra scalei de fabricație și permițând exploatarea de noi configurații geometrice și de proiectare a materialelor. În același timp a fost dezvoltată ideea de modificare a micro-geometriei unei structuri cu scopul de a obține un comportament macroscopic adaptat la o aplicație specifică [1].

De la structuri de metamateriale cu secțiune transversală constantă, cum ar fi cele de tip fagure hexagonal sau topologia chirală, până la geometrii complexe tridimensionale, cum ar fi miezuri pe bază de ligamente interconectate, spumă sau pereți pliabili, toate au cunoscut o expunere îndelungată la cercetare și implementare în aplicații practice. În plus, odată cu progresul tehnologiilor de fabricație aditivă, topologiile foarte complexe pot fi acum generate

și analizate cu metode care implică o abordare automată. Clasificări mai detaliate a tipurilor de structuri sandwich existente cu miezuri din metamateriale sunt prezentate în [2–4].

Utilizarea intensivă în multe aplicații critice, împreună cu existența mai multor componente în construcția de bază, a favorizat analiza libertăților de proiectare a unor astfel de configurații. Există o multitudine de tipuri de miezuri și fețe ce pot fi utilizate, iar alegerea materialelor depinde de cerințele specifice fiecărei aplicații. Performanța panourilor este influențată de factori precum natura și proprietățile fizice ale elementelor componente, interacțiunea dintre acestea, rapoartele dintre caracteristicile geometrice definitorii etc. De exemplu, miezurile de tip fagure sunt adesea folosite în aplicații aerospațiale datorită raportului rezistență-greutate ridicat, în timp ce miezurile de spumă sunt utilizate în mod obișnuit în industria construcțiilor, datorită costului redus și a proprietăților bune de izolare.

Studiile sistematice ale diferitelor proprietăți mecanice ale celor mai comune tipuri de metamateriale, cum ar fi [5–8], pot oferi indicații valoroase asupra posibilelor aplicații ale unor astfel de topologii. Modificarea răspunsului mecanic al structurilor, cum ar fi capacitatea de absorbție a energiei și stabilitatea generală a structurii, se poate face prin modificarea dimensiunilor și a orientării elementului de volum reprezentativ (RVE) sau utilizând o abordare bazată pe gradient. Articole relevante pentru înțelegerea modului în care diferite modificări ale geometriei de bază afectează proprietățile mecanice sunt [9], [10], [11,12].

Tehnici de fabricație aditivă, cum ar fi topirea selectivă cu laser (SLM) [13,14], sinterizarea directă cu laser a metalelor (DMLS) [15,16] și stereolitografia (SLA) [17,18], au fost deja demonstrate ca fiind potrivite pentru crearea de topologii complexe din metale, polimeri sau ceramică. Observații generale asupra parametrilor de fabricație ai fiecărei metode sunt reunite în studii precum [19,20]. Cercetările în curs urmăresc să perfecționeze parametrii de fabricație pentru a obține o rezoluție mai mare, a reduce defectele și a îmbunătăți proprietățile mecanice, investigând în același timp noi materiale și abordări ale îmbinărilor hibride pentru a îmbunătăți performanțele și scalabilitatea structurilor din metamateriale.

Metoda tradițională de dezvoltare a metamaterialelor mecanice implică o abordare euristică, în care materialele artificiale sunt dezvoltate și testate manual, pentru a fi confirmate sau infirmate ca fiind o opțiune viabilă pentru anumite direcții de implementare. Deseori, acestea nu sunt construite pe baza unor reguli clare în ceea ce privește configurația de bază a unei structuri de tip sandwich. Astfel, lipsa restricțiilor de număr de materiale, număr de fețe, parametri de fabricație, geometria de nivel macro sau micro și modul de interfațare al materialelor dă naștere unei selecții nesfârșite de combinații de topologii existente sau imaginabile, respectiv materiale sau tehnologii de fabricație asociate.

Apare astfel necesitatea de a stabili reguli pe baza cărora să se simplifice alegerea tipului de geometrie utilizat. Printre acestea se regăsesc modul în care se va utiliza structura, intensitatea solicitărilor anticipate pe parcursul duratei de viață și rentabilitatea materialelor utilizate. În plus, este utilă stabilirea unei metodologii care să pornească de la alegerea tipului de configurație de tip sandwich și a miezului utilizat și să se finalizeze prin obținerea proprietăților mecanice relevante pentru o anumită aplicație, ținând cont de toate aspectele legate de fabricația, testarea și simularea comportamentului componentei structurale.

Astfel, pe baza multitudinii de lucrări științifice publicate în fiecare an în acest domeniu și a dezideratului de a identifica soluții inovatoare de structuri ușoare de înaltă performanță, tema tezei de doctorat capătă actualitate și poate ajuta la stimularea interesului de cercetare în această direcție.

Scopul și obiectivele cercetării doctorale

Scopul principal al lucrării este elaborarea unei metodologii ce implică proiectarea, fabricarea și testarea unor configurații noi de structuri de tip sandwich cu miezuri formate din

metamateriale mecanice, ce pot fi integrate ușor în componente fizice, fie că discutăm despre configurații sandwich clasice care sunt utilizate în zone prestabilite, fie că discutăm despre înglobarea acestora în piese de sine stătătoare prin utilizarea elementelor de tip cochilii.

Pentru îndeplinirea acestui deziderat, teza de doctorat își propune să atingă următoarele obiective principale:

1. Studierea literaturii de specialitate în vederea identificării celor mai promițătoare topologii de metamateriale utilizate în configurații de tip sandwich, cât și a metodelor de fabricație și testare aplicabile.
2. Configurarea unor structuri de tip sandwich care să înglobeze miezuri de metamateriale formate din celule reprezentative noi, clar definite și ușor parametrizabile.
3. Fabricarea configurațiilor propuse și investigarea calității probelor obținute, prin evidențierea defectelor de fabricație probabile și a modurilor de evitare a acestora.
4. Testarea epruvetelor la compresiune unxiaxială și identificarea unor moduri generale de deformare, precum și estimarea proprietăților mecanice la alte valori ale densității relative.
5. Explorarea și caracterizarea unor modificări a celulelor proiectate, pentru validarea parametrizării facile a topologiilor propuse și studierea modului în care acestea influențează proprietățile mecanice.
6. Utilizarea analizei cu elemente finite pentru a prognoza comportamentul mecanic al structurilor studiate și realizarea unei comparații între rezultatele obținute și datele experimentale.
7. Studierea răspunsului structurilor la solicitări de impact cu viteze reduse, precum și a unor metode de creștere a performanțelor de absorbției a energiei.

Organizarea tezei de doctorat

Teza de doctorat este structurată pe șase capitole, însoțite de referințe bibliografice.

În capitolul 1 este prezentat un studiu al literaturii de specialitate, care oferă context și evidențiază cercetările existente în domeniul metamaterialelor mecanice. Sunt detaliate configurațiile existente relevante pentru miezuri și pentru compozite de tip sandwich, observații asupra aplicațiilor și a proprietăților lor, informații despre tehnicile de fabricație aditivă utilizate cât și procedee de testare distructivă și non-distructivă a structurilor proiectate.

În capitolul 2 este elaborat un set de reguli generale care a stat la baza proiectării celulelor reprezentative a unor metamateriale noi de tip suprafețe minime triplu periodice (TPMS) și stocastice, modul în care acestea au fost definite cât și o analiză preliminară asupra posibilităților de tipărire aditivă, parametrilor constructivi și a anizotropiei. Ulterior sunt detaliate proprietățile materialului și procedura de fabricație de tip SLA adoptată pentru realizarea epruvetelor, precum și diferite metode de control a acesteia: analiza abaterilor dimensionale, a calității suprafețelor și a omogenității.

Testarea la compresiune uniaxială a celor 10 tipuri de epruvete de tip sandwich printate din rășină foto-polimerică este prezentată în capitolul 3. Este detaliat pentru fiecare epruvetă mecanismul de cedare determinat experimental, prin comparație cu geometria de tip giroid, utilizată ca topologie de referință. Ulterior, este analizată repetabilitatea testelor și modul în care distribuția masei în volumul piesei poate influența modul în care structurile se deformează. În plus, este prezentată o metodă prin care se pot estima proprietățile mecanice pentru multiple valori ale densității relative pe baza datelor experimentale, modul în care alterarea geometriilor uniforme propuse inițial influențează comportamentul structurilor, precum și răspunsul mecanic al epruvetelor la solicitări ciclice compresive.

În capitolul 4 este dezvoltată analiza numerică a testelor de compresiune. Sunt expuse caracteristicile modelării geometrice implicite și modul în care modelele obținute prin această tehnică pot fi integrate în simulări numerice. Ulterior sunt prezentate patru tipuri de modele de material, condițiile la limită, discretizarea geometriilor și modul în care acestea influențează rezultatele obținute. În final sunt detaliate abaterile dintre rezultatele analizei cu elemente finite și datele obținute prin încercări experimentale.

Analiza comportamentului la impact cu viteze reduse a topologiilor propuse, atât simple cât și cu umplutură de silicon bi-component, este făcută în capitolul 5. De asemenea, este dezvoltată o metodă pentru umplerea golurilor din volumul probelor astfel încât să se asigure omogenitatea acestora. În final, sunt prezentați parametrii evaluați în urma efectuării testelor de impact și rezultatele obținute în urma solicitărilor la două energii de impact diferite, pe 10 structuri sandwich.

Capitolul 6 conține concluziile esențiale ale tezei, contribuțiile aduse, limitările întâlnite și posibile direcții pentru cercetări viitoare.

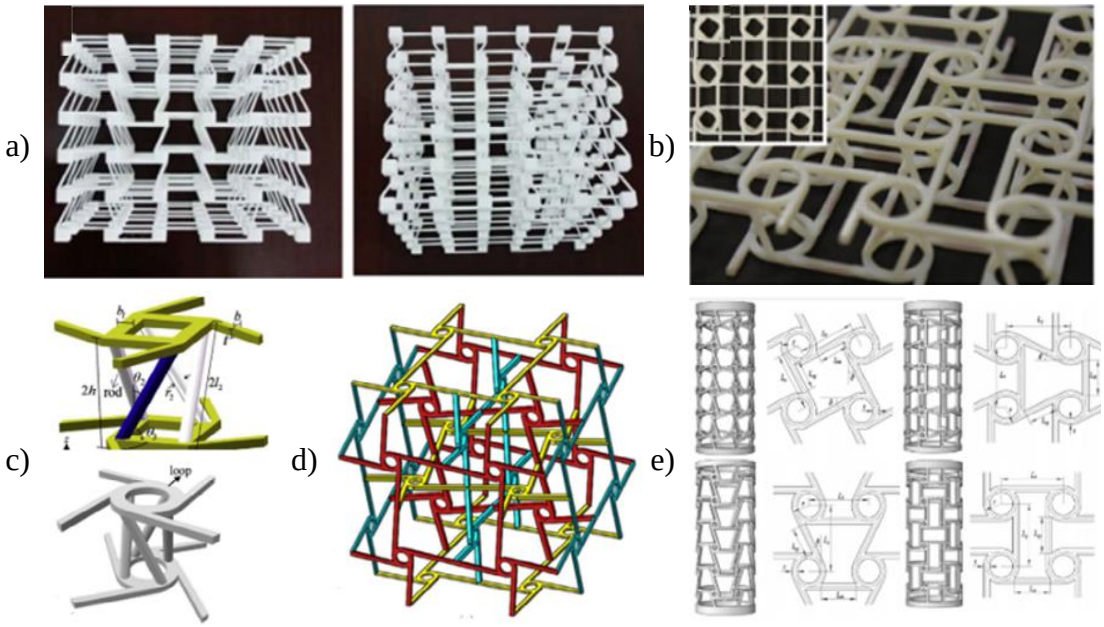
CAPITOLUL 1 - ANALIZA TIPURILOR DE METAMATERIALE MECANICE

Metamaterialele mecanice oferă un grad ridicat de libertate în ceea ce privește proiectarea, de la tipurile de materiale, la geometria utilizată, la modurile de combinare a elementelor ce compun o structură de tip sandwich, la modul de interfațare a acestora, la componentele adiționale de umplutură ce pot fi folosite. Acest lucru, deși pare avantajos, poate induce o continuă căutare a modelelor perfecte ce este costisitoare de timp și resurse financiare. Este important să se restrângă aria de căutare, pe baza observațiilor favorabile ale cercetărilor anterioare astfel încât să se ajungă cât mai rapid la cele mai promițătoare rezultate.

Procedeele de fabricație aditivă, deși conceptual par foarte ușor accesibile, sunt greu de folosit astfel încât să se obțină piese lipsite de defecte, care să prezinte repetabilitate în ceea ce privește testarea lor. Cunoașterea influenței parametrilor de fabricație poate îmbunătăți rezultatele și consistența acestora.

Atribuirea unui mod de cedare metamaterialelor mecanice este dificilă, sesizându-se mai multe tipuri de solicitări care duc la distrugerea probelor. Pe lângă influențele semnificative ale defectelor de fabricație, metamaterialele pot avea un comportament *„bending dominated”* sau *„stretching dominated”*, în funcție de cele mai puternice solicitări care apar în elementele componente, momente de încovoiere sau sarcini axiale. În general mecanismul de deformare dominat de încovoiere face ca structurile să fie ideale pentru absorbția energiei, în timp ce structurile dominate de întindere tind să fie mai rigide.

Multe lucrări de cercetare au studiat răspunsurile la solicitare axială, încovoiere și impact a metamateriale în forma lor brută sau a structurilor de tip sandwich cu miezuri bidimensionale, însă foarte puține au verificat comportamentul configurațiilor tridimensionale. Exemple de astfel de topologii sunt prezentate în Fig. 1-1. În consecință, este evident că cercetarea în domeniul utilizării metamaterialelor mecanice tridimensionale sub formă de miez în aplicații de tip sandwich nu este suficient dezvoltată pentru a crește gradul de încredere în acest tip de materiale și a duce la adoptarea lor în aplicații industriale.



f)

g)

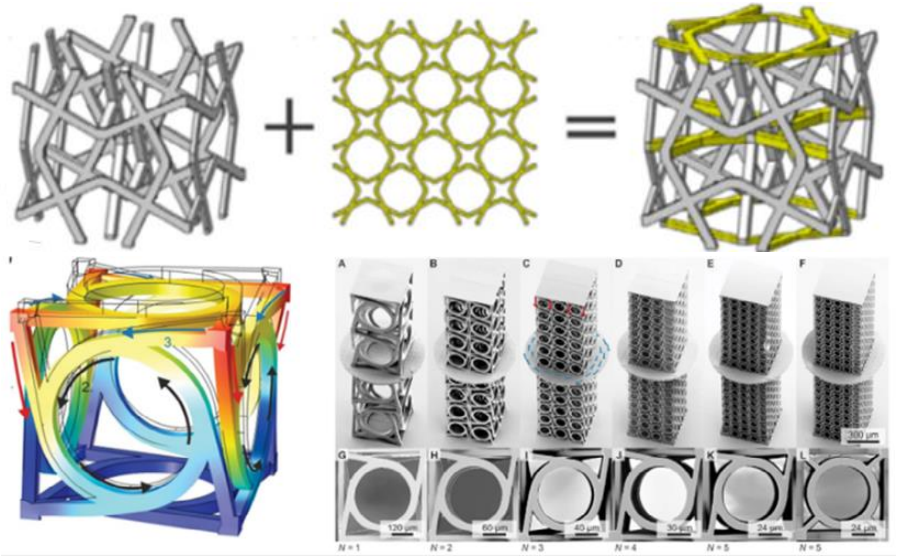


Fig. 1-1 Topologii de metamateriale 3D [21], [22], [23], [24], [25]

Astfel, în urma consultării stadiului actual al structurilor de metamateriale existente și realizării unei analize referitoare la modul în care acestea pot fi fabricate, consider că o direcție potrivită de cercetare este prototiparea unor configurații de metamateriale mecanice tridimensionale noi, prin procedee de fabricație aparținând unor categorii diferite de tehnologii. În plus față de aspectele adesea întâlnite în literatură, trebuie să se efectueze o analiză a probelor printate pentru identificarea defectelor de fabricație ce pot induce erori în interpretarea comportamentul metamaterialelor. Acest lucru se poate face fie prin încercarea unui număr însemnat de eșantioane pentru observarea repetabilității rezultatelor, fie prin scanarea tridimensională precisă a structurilor și interpretarea problemelor identificate. De asemenea, se poate încerca realizarea structurilor cu densitate relativă variabilă, cu gradienți diferiți, astfel încât densitatea să fie maximă în apropierea zonelor de încărcare mare și minimă în zonele slab solicitate. În final, după testarea experimentală, se recomandă verificarea rezultatelor prin comparația cu simulări numerice, deși acest pas poate pune probleme având în vedere geometriile complexe și interacțiunea dintre materiale diferite. În cazul în care o analiză computațională este imposibilă, este indicat să fie identificată o aplicație practică care să încorporeze configurațiile propuse, astfel încât să se realizeze o testare eficientă.

CAPITOLUL 2 REALIZAREA MODELULUI GEOMETRIC AL STRUCTURILOR DE TIP SANDWICH CU MIEZ DIN METAMATERIALE MECANICE

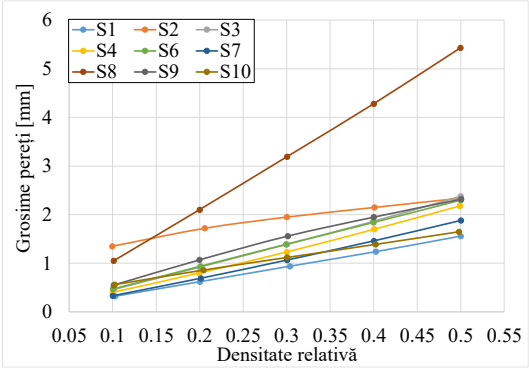
În urma analizei realizată în cadrul primului capitol asupra tipurilor de metamateriale existente și a caracteristicilor acestora, coroborat cu posibilitățile de fabricație disponibile, a fost definit un set de reguli, menit să simplifice alegerea direcției principale de cercetare. Pe baza acestuia, au fost definite opt topologii noi de structuri de tip TPMS, împreună cu geometria de tip giroid selectată ca element de referință, dat fiind faptul că aceasta a fost intens studiată în literatura de specialitate. În plus, a fost definită și o geometrie de tip stocastic, menită să simuleze un comportament specific spumelor. Expresiile matematice ale topologiilor propuse sunt prezentate în Tabelul 2-1.

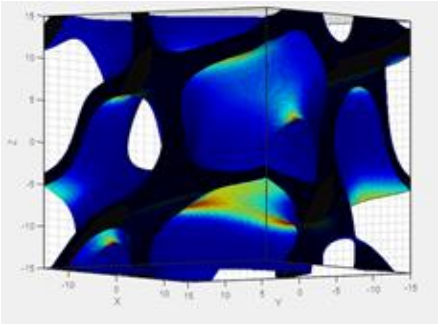
Tabelul 2-1 Funcțiile matematice care descriu topologiile probelor analizate

Probă	Funcție	
S1	$f(x,y,z) = cos(x)\,sin(y) + cos(y)\,sin(z) + cos(z)\,sin\,(x)$	(2-1)
S2	$\mathrm{f(x,y,z) = 2[cos(x)\,cos(y) + cos(x)\,cos(z) + cos(z)\,cos\,(y)] - [cos(2x) + cos(y) + cos\,(2z)]}$	(2-2)
S3	$f(x,y,z) = cos(x)\,cos(y) + cos(x)cos(z) + cos\,(y)cos(z) + sin(x)cos(y) + sin(x)cos(z) + sin(y)cos\,(z) + sin(y)cos(z) + sin\,(z)cos(x) + sin\,(z)cos(y)$	(2-3)
S4	$\mathrm{f(x,y,z) = cos(2x)\,cos(y)cos(z) + cos(2y)\,cos(x)\,cos(z) + cos(2z)\,cos(x)\,cos(y) + sin(x)\,cos(y) + sin(x)\,cos(z) + sin(y)\,cos(z) + sin(y)\,cos(z) + sin(z)\,cos(x) + sin(z)\,cos(y)}$	(2-4)
S5	$f(x,y,z) = sin(x)\,cos(y)\frac{z}{2} + sin(y)\,cos(z)\frac{x}{2} + sin(z)\,cos(x)\frac{y}{2}$	(2-5)
S6	$\mathrm{f(x,y,z) = 4cos(x)cos(y)cos(z) - (cos(2x)cos(2y) + cos(2y)cos(2z) + cos(2x)cos(2z))}$	(2-6)
S7	$\mathrm{f(x,y,z) = 4sin(x)cos(y)cos(z) - (cos(x)cos(y) + cos(y)cos(z) + cos(x)cos(z))}$	(2-7)
S8	$\mathrm{f(x,y,z) = 8cos\left(\frac{x}{2}\right)cos\left(\frac{z}{2}\right)sin\left(\frac{x}{2}\right) + 8cos\left(\frac{y}{2}\right)cos\left(\frac{z}{2}\right)sin\left(\frac{y}{2}\right) + 8cos\left(\frac{x}{2}\right)cos\left(\frac{y}{2}\right)sin\left(\frac{z}{2}\right)}$	(2-8)
S9	$\mathrm{f(x,y,z) = sin(x)\,sin(y) + sin(x)\,sin(y) + sin(x)\,sin(y) - 4\,cos(x)\,cos(y)\,cos(z)}$	(2-9)
S10	Stocastic (condiții impuse: vector pe direcție z, cu un număr mediu de 6 ligamente care se intersectează în același punct și o distanță medie între ele de 3,5 mm	

Pentru proiectarea structurilor, a fost utilizată o abordare implicită, prin folosirea software-urilor *Ntopology* și *TPMS Designer*. Cu ajutorul acestora a putut fi analizată printabilitatea, variația parametrilor constructivi în funcție de densitatea relativă, gradul de anizotropie și distribuția de masă în interiorul probelor. Figuri reprezentative care rezumă elementele acestei analize sunt prezentate în Fig. 2-2.

a)





b)

c)

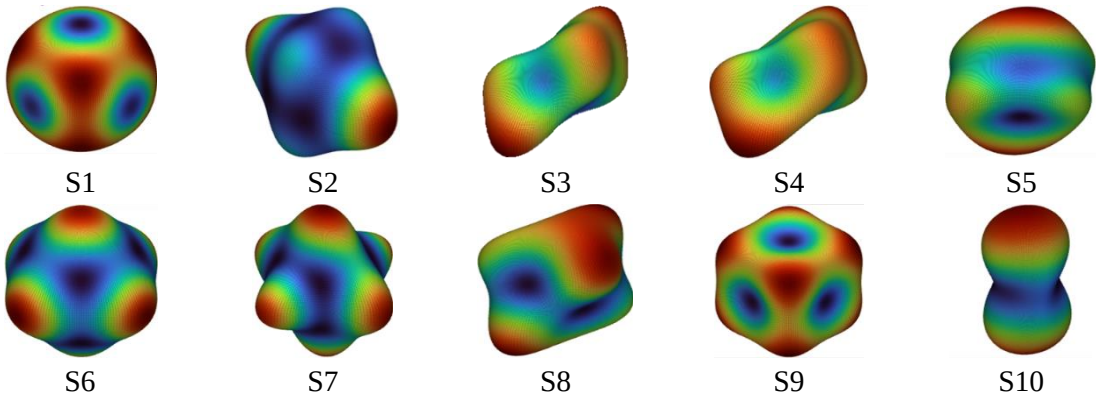


Fig. 2-1 a) Variația grosimii pereților în funcție de densitatea relativă a probelor; b) Reprezentarea necesității suporților pe timpul fabricației aditive; c) Reprezentarea anizotropiei fiecărei probe [26]

Ulterior a fost folosită o tehnologie de fabricație de tip SLA (Fig. 2-2 a)) pentru printarea probelor (Fig. 2-2 b)), fiind prezentate considerații practice referitoare la fabricarea cu succes a unor astfel de geometrii complexe. Au fost realizate teste de tracțiune pentru validarea proprietăților foto-polimerului utilizat. În general, acestea au coincis cu valorile declarate de producător, mai puțin în cazul deformației specifice la rupere, unde au fost identificate diferențe semnificative de până la 22%.

a)

b)

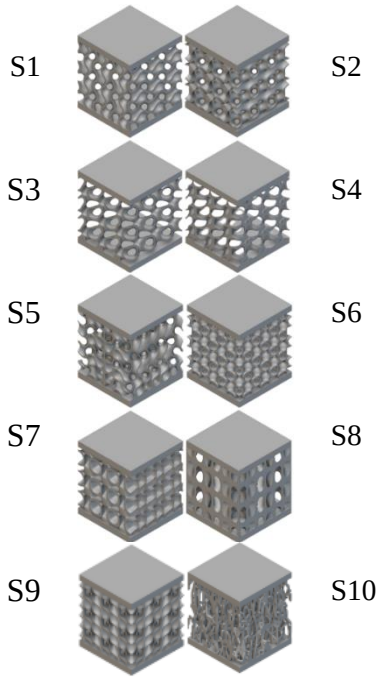


Fig. 2-2 a) Fabricarea probelor prin stereolitografie; b) Fiecare tip de epruvetă

În continuare, s-a realizat o analiză a calității probelor fabricate în ceea ce privește rugozitatea suprafețelor, abaterilor dimensionale și de masă și a porozității interne a materialului.

În urma fabricației aditive s-a determinat o neconcordanță și în ceea ce privește densitatea rășinii după polimerizare, aceasta având o valoare superioară, de 1,23 g/cm^3, față de valoarea declarată de producător de 1,07 g/cm^3. Cel mai probabil, aceasta valoare este specifică rășinii lichidă neîntărită, iar diferența de densitate este asociată cu o structură moleculară mai compactă a pieselor polimerizate. O astfel de diferență a mai fost semnalată în literatura de specialitate relevantă, cum ar fi [27,28] sau specificată de alți producători de rășini [29]. S-a determinat, de asemenea, o legătură directă între suprafață maximă a topologiilor și abaterea față de masa medie, ceea ce indică că probele cu caracteristici geometrice complexe și reduse trebuie supuse unor tratamente de spălare intensive. Acest lucru este necesar pentru a îndepărta cu succes întreaga masă a rășinii ce a aderat la suprafață piesei înainte de a fi întărită în incinta de tratare.

Prin scanare tridimensională a probelor fabricate, s-a stabilit că nu există abateri însemnate de la geometria CAD proiectată, singurele dimensiuni ieșite din toleranța impusă de 0,1 mm fiind la nivelul zonelor inferioare în care piesa a intrat în contact cu placa ce susține suporții laterali. Acest lucru poate fi eliminat prin modificarea setărilor imprimantei pentru a impune o distanță mai mare între componente sau prin renunțarea completă la placa suport. Abaterile dimensionale sunt în concordanță cu cele specificate în alte publicații, unde diferența medie față de valorile nominale a variat între 0,045 mm și 0,15 mm [30] sau de la 0,042 mm la 0,127 mm [31]. De asemenea, Emir şi Ayyildiz specifică în [32], că abaterile dimensionale medii ale unei tehnici de tip SLA au o valoare de 68,5 µm, semnificativ superioare celor indicate în cadrul procedeului utilizat în această lucrare.

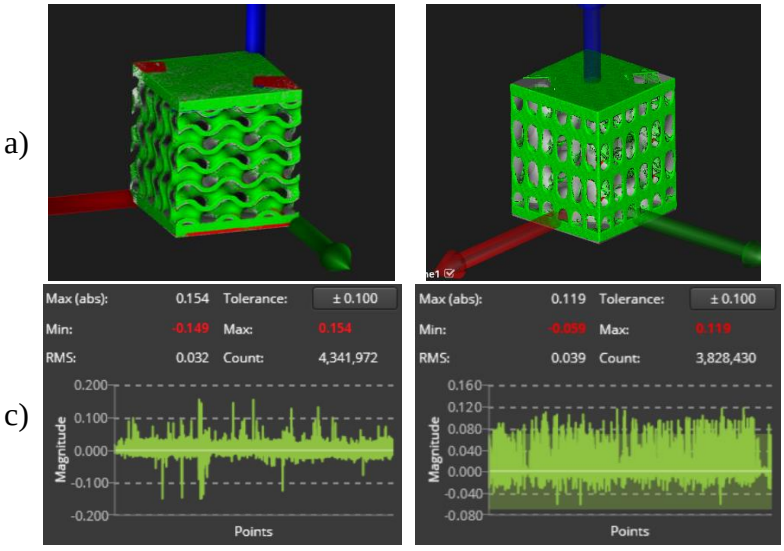


Fig. 2-3 a) Abaterile dimensionale pentru proba S1; b) Abaterile dimensionale pentru proba S8; c) Distribuția abaterilor pentru proba S1; d) Distribuția abaterilor pentru proba S8

Prin analiza rugozității suprafețelor plane ale probelor s-a determinat că, deși au existat diferențe între suprafețele de același tip, aceleași suprafețe au prezentat rugozități foarte apropiate, ceea ce denotă un procedeu de fabricație stabil, fără fluctuații. Valoric, analiza rugozității a validat rezultatele obținute anterior în cadrul analizei dimensionale, neexistând valori frecvente ale R_p peste limita impusă de 0,1 mm. Media rugozității R_a a fost de 2,47 µm, valoare specifică unor procese de fabricație aditivă bine controlate, iar media distanțelor dintre cel mai înalt și cel mai coborât punct al profilelor a fost de 26,32 µm. Aceste valori indică o calitate foarte bună a suprafețelor și lipsa aspectului strat cu strat, deci o omogenitate bună a

piesei, fără a fi nevoie de proceduri de șlefuire sau prelucrări suplimentare. Valorile obținute pentru rugozitatea R_a sunt în concordanță cu studiile relevante pe aceeași temă, precum cele specificate în [33]: 0,87–4,44 µm, apoi în [34]: 0,71– 2,91 µm sau în [35]: 2,66 - 3,37 µm. Totuși, acest aspect poate fi îmbunătățit deoarece alte lucrări sugerează valori mai reduse ale rugozității.

În vederea detectării defectelor imposibil de sesizat cu ochiul liber s-a realizat o analiză la microscop a suprafețelor exterioare ale piesei. Cea mai mare parte a suprafețelor analizate nu a prezentat defecte, întărind ideea că procesul de fabricație ales este unul potrivit pentru geometriile proiectate. Au fost evidențiate diferite tipuri de defecte superficiale posibile, unele dintre acestea putând fi limitate printr-un control mai atent al modului în care este păstrată rășina între printări succesive. De asemenea, un aspect important pentru a evita deteriorarea pieselor este curățarea foarte minuțioasă a rășinii reziduale, deoarece aceasta este aderentă și tinde să acumuleze impurități. Mai mult, o manipulare atentă a probelor înainte de a fi introduse în incinta de tratare cu radiații ultraviolete poate limita apariția defectelor de suprafață.

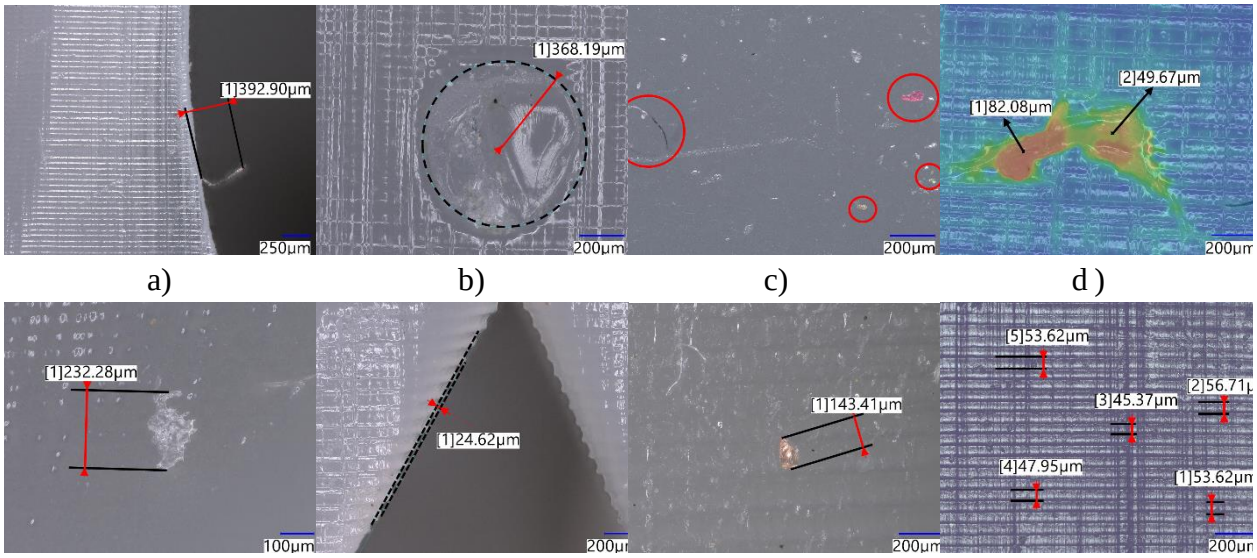
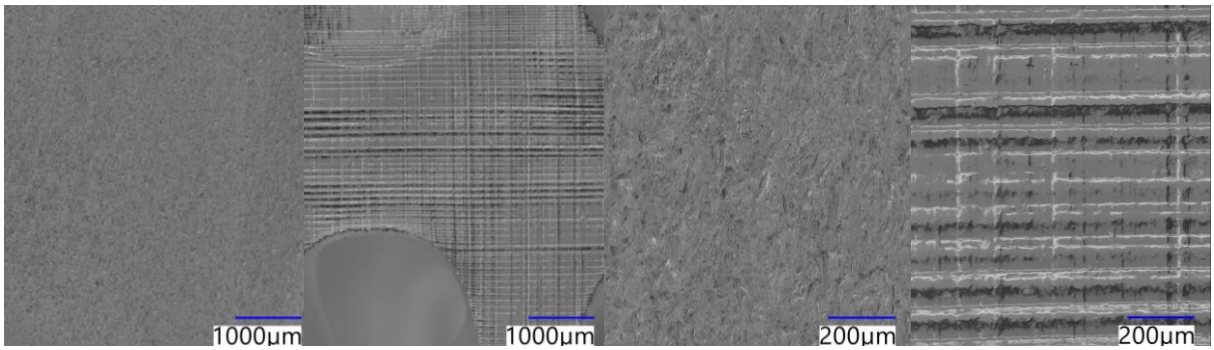


Fig. 2-4 Exemple de defecte: a) Micro-exfoliere superficială; b) Urmă lăsată prin înlăturarea suporților de printare; c) Impurități înglobate în rășină; e) Protuberanță la suprafața piesei; e) Rășină polimerizată în exces; f) Micro-neregularități; g) Contaminare cu grăunte de nisip; h) Aspect strat cu strat [36]

Pentru a analiza defectele interne ale epruvetelor s-a utilizat o metodă non-distructivă de analiză cu ajutorul undelor ultrasonice. S-au verificat suprafețele plane suficient de mari pentru a permite contactul sondei, neexistând indicii asupra prezenței defectelor în profunzimea probelor. Această metodă de testare a exclus prezența defectelor majore, precum exfolieri sau goluri interne, însă pentru a verifica dacă există porozități de dimensiuni foarte reduse, ce nu pot fi captate prin metode non-distructive, s-a optat pentru efectuarea unei analize interne a probelor. Au fost debitate piesele prin tăiere cu jet de apă și s-au analizat suprafețele generate. Prin comparație cu suprafețele laterale, s-a constatat o omogenitate mai bună în profunzimea pieselor și o lipsă a aspectului strat cu strat, care la exterior este încă vizibil la microscop. Lipsa incluziunilor de alte materiale la interiorul probei poate indica faptul că incidentele de impurități de pe suprafața exterioară nu sunt o consecință a stocării neconforme, ci a post-procesării necorespunzătoare înainte de întărire. În multitudinea de suprafețe verificate au existat și micro-porozități în suprafețele prelucrate, ce pot indica fie goluri interne polimerizate insuficient ce au fost îndepărtate în momentul tăierii, fie sunt consecința unui procedeu de tăiere necorespunzător. Oricare ar fi cauza, există indicații legate de posibilitatea apariției unor

neomogenități locale, care ar putea fi mai bine identificate într-o analiză ulterioară prin supunerea probelor la verificări cu raze X.



a) b) c) d)

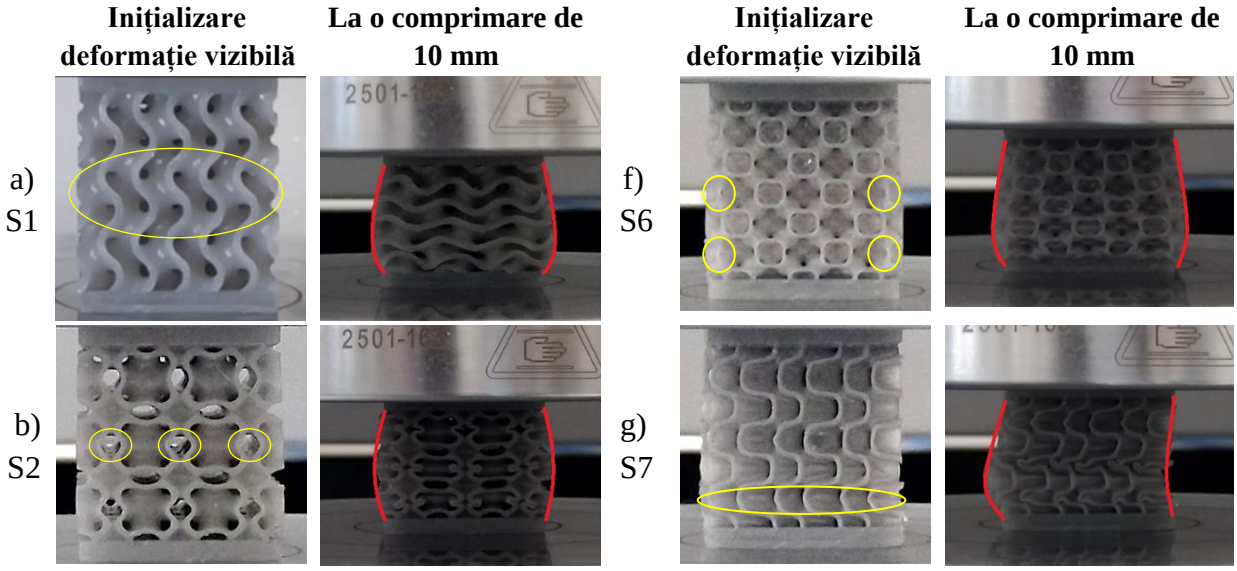
Fig. 2-5 a) Secțiunea expusă prin tăierea pieselor x40; b) Suprafața laterală x40; c) Secțiunea expusă prin tăierea pieselor x200; d) Suprafața laterală x200

Prin interpretarea rezultatelor obținute s-a observat o deviație standard a valorii maselor probelor și a rugozităților foarte redusă, ceea ce denotă o distribuție restrânsă a parametrilor și o reproductibilitate ridicată a tehnologiei de fabricație, fără a exista indicii asupra existenței unor defecte semnificative, de natură să influențeze critic comportamentul probelor analizate.

CAPITOLUL 3 SOLICITAREA LA COMPRESIUNE A PROBELOR DE METAMATERIALE PROPUSE

Printre geometriile de metamateriale definite regăsim forma de tip giroid S1 studiată extensiv în literatură, adoptată în cadrul lucrării ca etalon de comparație, alte structuri TPMS bazate pe pereți subțiri similare giroidului (S2, S3, S4, S7, S8, S9), structura stocastică (S10) care s-a comportat ca un metamaterial bazat pe ligamente interconectate, structuri cu variație a grosimii pereților pe direcția de încărcare (S5) și structuri cu dimensiuni considerabil reduse a caracteristicilor geometrice constitutive (S6).

În urma testărilor la compresiune uniaxială, miezurile propuse au prezentat metode diferite de deformare, identificate în Fig. 1-1. Topologiile S1, S6, S7 și S8 au manifestat un comportament *„bending-dominated”*, caracterizat de un platou lung, cu o înmuiere neglijabilă a materialului și fluctuații reduse a forței de încărcare. Efectul este un răspuns constant sau continuu crescător al forței capabile pe timpul deformării. Structurile S2, S3, S4, S5 și S9 au prezentat un comportament mixt, *„bending-dominated”* și *„stretching-dominated”*, unde curgerea este urmată de o zona de „înmuiere”, în care forța portantă scade odată cu flambajul local sau încovoierea pereților, până la contactul dintre aceștia, ce dă naștere la o nouă etapă de rigidizare. În funcție de modul de dispunere a materialului în interiorul probei, numărul treptelor diferă afectând mecanismul de deformare general și capacitatea de absobție de energie. Structura stocastică a manifestat un comportament pur *„stretching-dominated”*, unde forțele axiale din ligamentele miezului au condus la flambajul rapid după palierul elastic, rezultând o reducere mult mai pronunțată a capacității portante și a absorbției de energie. Totuși, comparativ cu evoluția giroidului, structura stocastică a manifestat rezultate superioare de rigiditate în zona de deformare elastică și o forță corespunzătoare debutului curgerii mai mare cu aproximativ 6%. Rezultatele evidențiază astfel diferențele dintre cele două tipuri de metamaterialelor tridimensionale amintite și reușesc să atribuie fiecăruia un tip predefinit de deformare în concordanță cu cercetările din literatură [37], [38].



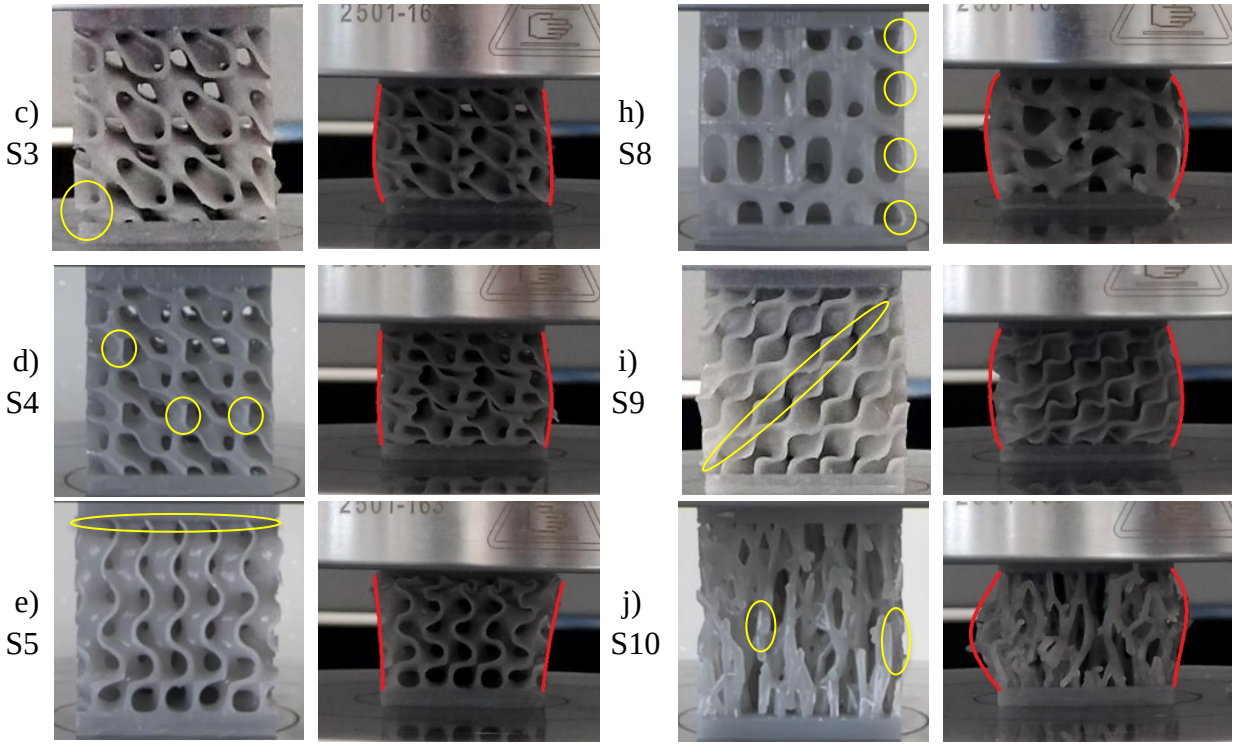
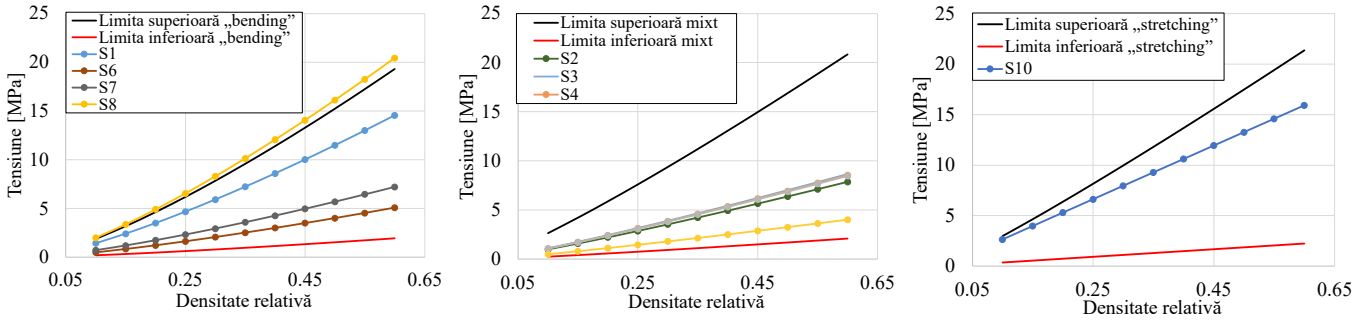


Fig. 1-1 Imagini din timpul testării la compresiune pentru fiecare probă în momentul în care s-a constatat inițializarea vizibilă a deformației și la o comprimare de 10 mm [39]

Comparativ cu giroidul, topologia S8 a prezentat o evoluție similară a capacității de încărcare, cu valori semnificativ mai mari cu până la 31% a valorii forței corespunzătoare punctului de curgere și o rată de densificare superioară. Surplusul forței capabile sugerează că o geometrie echivalentă, dar cu o densitate relativă mai scăzută, ar putea conduce la valori similare celor obținute prin testarea structurii de tip giroid, însă cu avantajul de reducere a masei.

În ceea ce privește eficiența absorbției de energie, s-a scos în evidență faptul că structurile cu valori superioare sunt cele ale cărei tensiuni nu prezintă fluctuații însemnate pe parcursul încărcării, ci oferă un platou de curgere evident și lung. Astfel probele S8 și S1 au prezentat valori apropiate, în timp ce curbele specifice celorlalte topologii TPMS au manifestat reduceri semnificative ale eficienței, date de fluctuațiile însemnate ale forței compresive. Acestea au fost maxime în cazul geometriei stocastice, care a avut eficiența cea mai scăzută la valori ridicate a deformației specifice.

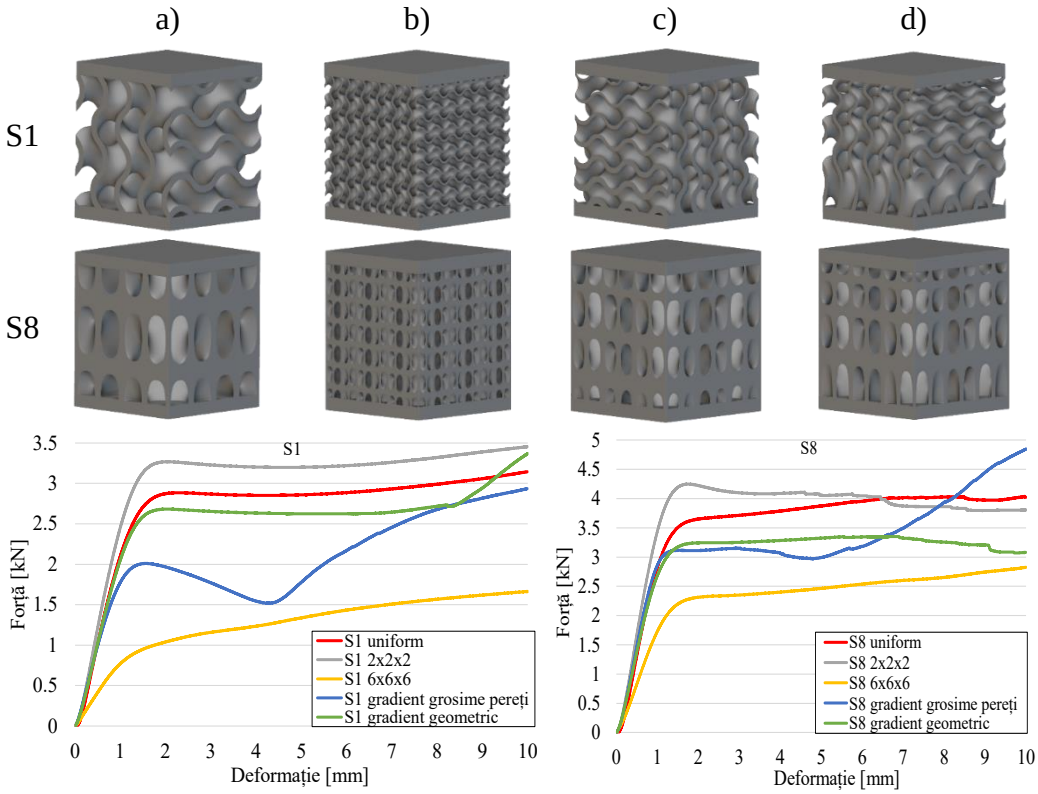
În vederea estimării proprietăților mecanice la diferite densități relative, s-a utilizat un model specific structurilor bazate pe ligamente interconectate cu celule deschise. A fost prezentată evoluția variației modulului de elasticitate și a tensiunii de curgere pe baza valorilor cunoscute pentru densitatea relativă aleasă în cadrul experimentelor. S-a observat că în cea mai mare parte a cazurilor, valorile se regăsesc între limitele menționate în literatură specifice polimerilor, cu excepția unui singur caz întâlnit la specimenul S8. Această abatere poate fi pusă pe baza diferențelor existente între tehnologiile de fabricație și a familiei largi de materiale căreia îi sunt atribuite limitele.



a) b) c)

Fig. 1-2 Variația tensiunii de curgere în funcție de densitatea relativă a probelor pentru comportament: d) *„bending”*; e) *„mixt”*; f) *„stretching”*

În continuare au fost prezentate patru moduri de modificare a geometriilor uniforme propuse inițial (Fig. 1-3). Acestea demonstrează capacitățile ridicate de particularizare a miezurilor pe baza modelării implicite și prezintă modul în care alegerea unei configurații cu un număr sau o formă diferită a celulei reprezentative influențează comportamentul mecanic. S-a observat că utilizarea unui număr mai redus de celule oferă o rezistență la compresiune superioară, dar și o deformație specifică până la apariția primelor fisuri mai redusă, în timp ce utilizarea unui număr mai ridicat de celule distribuie mai uniform tensiunea în masa probei și permite deformații specifice mai ridicate în detrimentul forței de încărcare și a rigidității. Utilizarea unui gradient al grosimii pereților duce la o deformație localizată în zona superioară împreună cu un platoul specific zonei plastice și o absorbție de energie mai redusă decât a modelului omogen.



e) f)

Fig. 1-3 Modificări ale formei pentru S1 și S8: a) 2x2x2; b) 6x6x6; c) aplicarea unui gradient al grosimii peretelui; d) aplicarea unui gradient al înălțimii celulei; e) Diagrama forței de compresiune în funcție de deformație pentru S1; b) Diagrama forței de compresiune în funcție de deformație pentru S8

Analizând modul în care configurațiile își revin la dimensiuni apropiate de cele nominale după ce au fost supuse unei deformații specifice de 33,33%, s-a observat că acestea sunt pretabile aplicațiilor la care apar solicitări repetate. În acest sens s-au realizat teste ciclice, observându-se evoluția pe care o are capacitatea de absorbție de energie pentru fiecare probă în parte. S-a observat că pentru solicitări în domeniul elastic, S1 s-a clasat pe poziția a treia, după S8 și S10, care au avut însă o rată de acumulare a deformației reziduale mai rapidă. În final se poate menționa că giroidul S1 a avut o comportare mecanică puțin inferioară specimenului S8, în timp ce geometria stocastică S10 a avut un comportament specific metamaterialelor bazate pe ligamente interconectate tridimensionale, pentru care fisurile din profunzimea piesei au determinat un comportament inferior la o testare repetată.

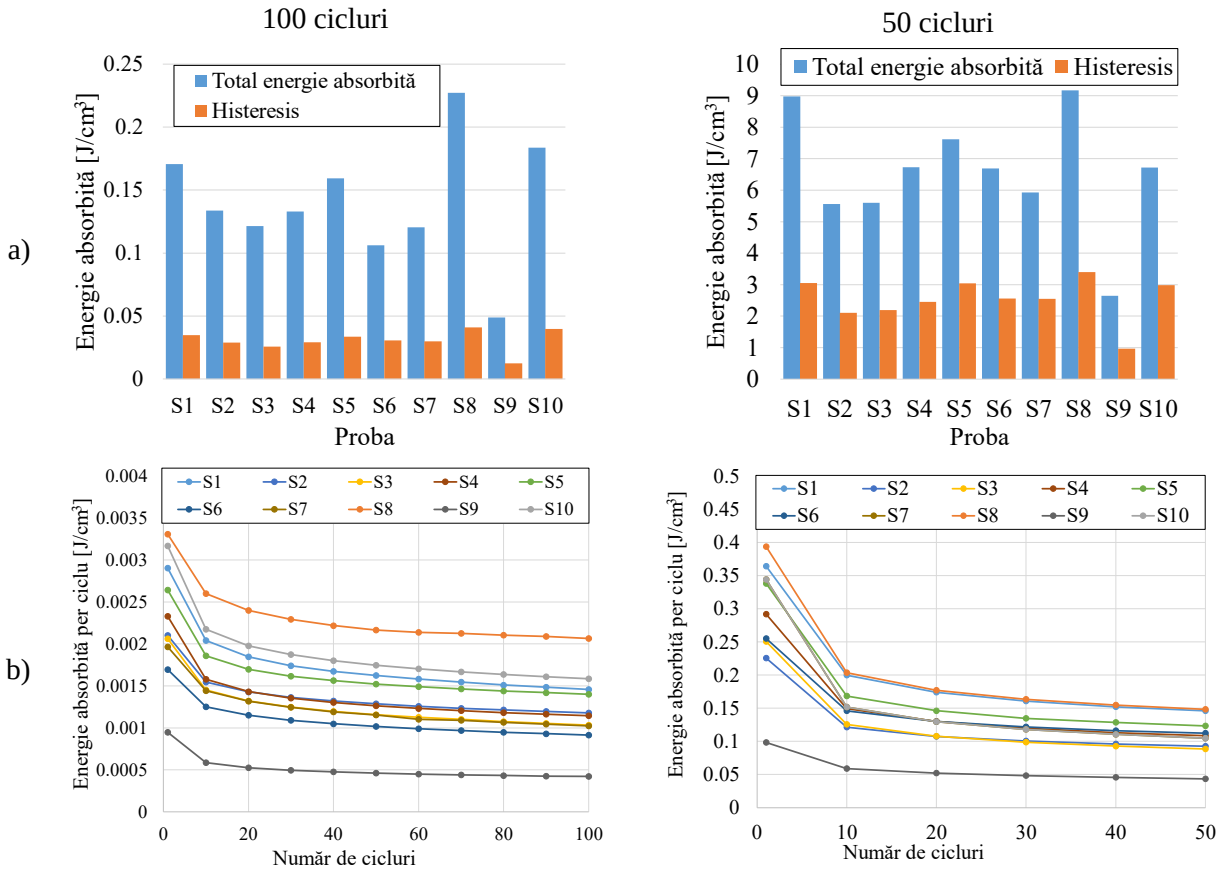


Fig. 1-4 a) Energia totală absorbită pe timpul încărcării și histerezisul, pe parcursul; b) Variația energie absorbită pe parcursul a 100 /50 cicluri [40]

CAPITOLUL 4 SIMULAREA NUMERICĂ A TESTELOR DE COMPRESIUNE

În urma unei analize de convergență a discretizării s-a stabilit că o dimensiune maximă a laturii elementelor de tip tetraedru regulat de 0.3 mm oferă un echilibru optim între precizia rezultatelor și creșterea efortului de calcul necesar obținerii unei soluții. Utilizarea unei discretizări unice se poate dovedi totuși insuficientă în cazul miezurilor cu pereți a căror grosime nu este constantă sau în zone cu grosimi foarte reduse, unde nu se pot construi cel puțin două rânduri de elemente, rezultând probleme de convergență sau reduceri ale preciziei, cum este cazul configurațiilor S4 și S10.

A fost realizată o analiză a implicaţiilor pe care le are utilizarea modelării implicite în simularea cu elemente finite. Pentru aceeaşi topologie de tip giroid, au fost realizate modele geometrice obţinute atât prin metoda convenţională de tip CAD (Fig. 1-1 a)), cât şi printr-o metodă proprie, ce permite integrarea în analize numerice a geometriilor obţinute prin modelare implicită (Fig. 1-1 b)). Abaterile dimensionale au depăşit valoarea toleranţei impusă de 0,1 mm, având valori maxime de 0,17 mm. Totuși, rezultatele obținute în ceea ce privesc curbele de variație a forței de compresiune în funcție de deformație (Fig. 1-1 c)) au prezentat o suprapunere foarte bună între cele două modele. Un dezavantaj îl constituie faptul că pentru utilizarea unei geometrii obținute prin modelare implicită, timpii necesari pentru stabilirea geometriei fațetate, transformarea geometriei în solid, discretizarea și obținerea soluției sunt semnificativ mai ridicați. Aceștia pot fi până la de cinci ori mai mari decât în cazul unei abordări convenționale, fapt ce face cu atât mai dificilă discretizarea mai fină a solidelor datorită creșterii rapide a efortului de calcul.

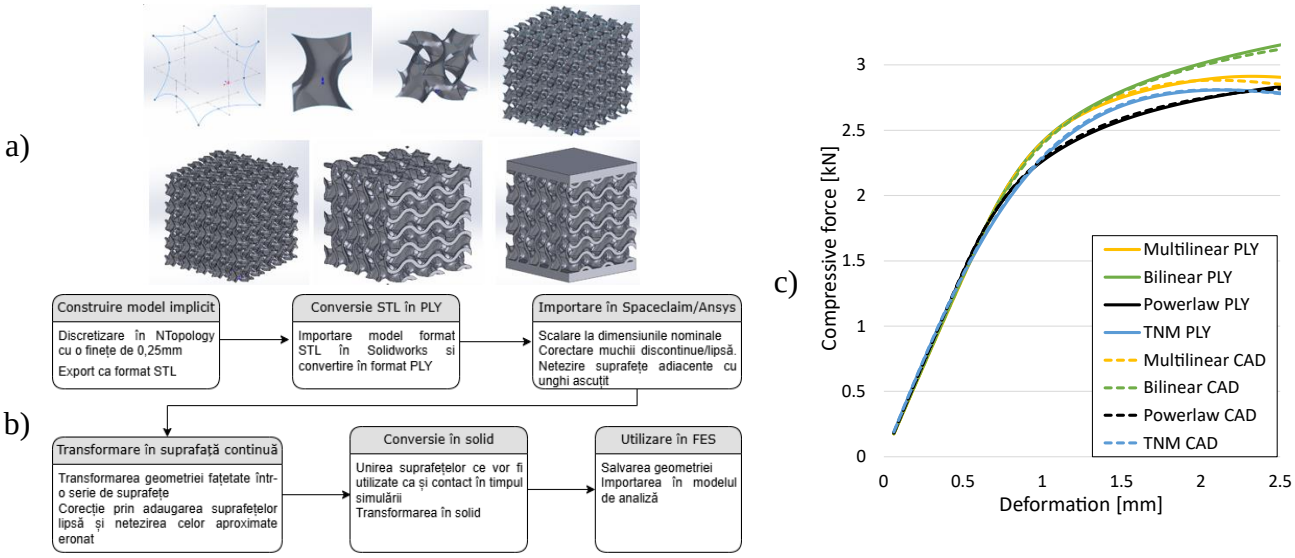


Fig. 1-1 a) Realizarea geometriei de tip CAD a probei S1; b) Procedură pentru obținerea unor solide utilizabile în analiza cu model finit pornind de la modelarea implicită; c) Evoluția forței de încărcare a epruvetei S1 în funcție de tipul de geometrie utilizat

Au fost propuse patru modele de material (Fig. 1-2 a)-d)) și s-a verificat care dintre acestea aproximează cât mai fidel comportamentul rășinii foto-polimerice alese. Cu ajutorul datelor obținute pe care experimentală prin teste de tracțiune au fost definite empiric două modele de materiale izotrope, cel biliniar și cel multiliniar. În continuare a fost folosită o metodă iterativă prin care s-au configurat alte două modele de materiale, *Powerlaw* și *Three Network Model*. Parametrii de definiție a ecuațiilor acestora au fost configurați astfel încât curbele caracteristice ale comportării materialelor să se suprapună cât mai exact peste curba medie

caracteristică reală și prezentați astfel încât modelul de material să fie simplu de replicat în programul de calcul *Ansys*. În urma testelor efectuate pe cele patru tipuri de materiale s-a verificat cât de mare este abaterea fiecăruia față de curba forță-deformație medie determinată experimental (Fig. 1-2 e)). S-au constatat abateri de sub 6%, modelul optim fiind cel multiliniar ce a avut o deviație de doar 2,54%.

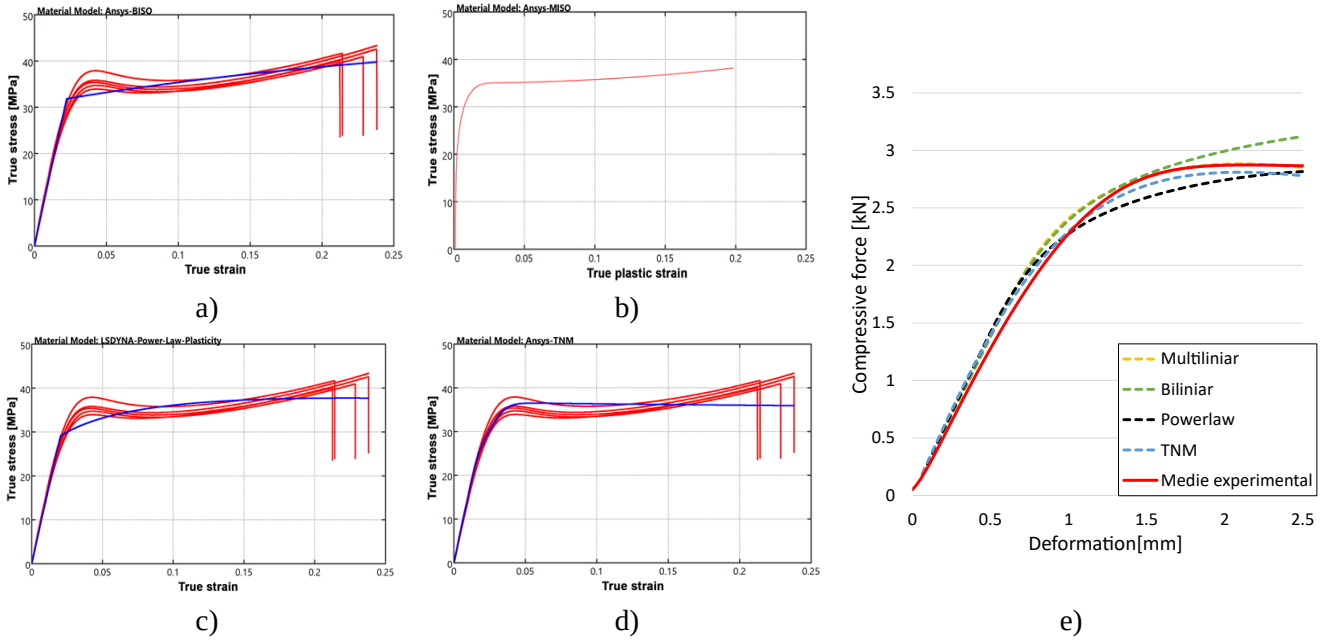


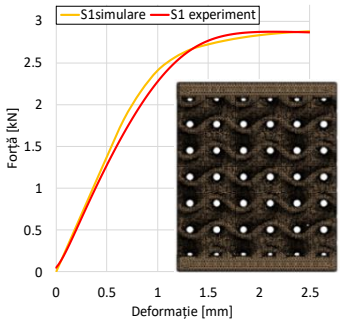
Fig. 1-2 a) Modelul *Bilinear isotropic hardening*; b) Modelul *Multilinear isotropic hardening*; c) Modelul *Power Law Plasticity*; d) Modelul *Three Network Model*; e) Evoluția forței de încărcare a epruvetei S1 în funcție de deformație pentru modelele de material definite

Au fost realizate două tipuri de simulări cu elemente finite, cea realizată în software-ul *NTopology*, prezentat în **Error! Reference source not found.**, și cea realizată în *Ansys Static Structural*, prezentată în **Error! Reference source not found.**. Studiind diferența dintre cele două analize se poate observa că în ceea ce privește distribuția tensiunilor echivalente von Mises există un grad de similitudine ridicat. Limitările modului de definiție al materialului în *NTopology* fac ca diferențele dintre valorile tensiunile echivalente maxime să fie substanțiale, chiar mai mari de 100% cum este cazul probelor S1 și S10. În plus, simulările în modulul *Ansys* oferă indicii mai clare care să conducă la anticiparea modului de deformare al probelor cum sunt cele ale topologiilor S2, S7 și S9. Totuși, ca un prim pas într-un efort de prototipare rapidă, modulul de simulare din *NTopology* poate oferi un răspuns suficient de corect pentru filtrarea mai rapidă a topologiilor în funcție de răspunsul mecanic dorit.

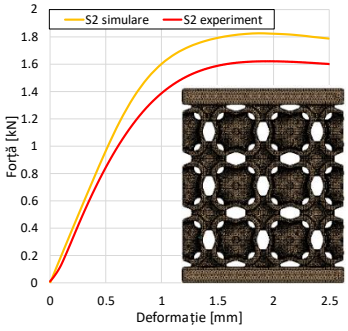
Realizarea unor analize numerice cvasi-statice care să cuprindă deformații mari pe geometrii tridimensionale complexe se poate dovedi dificilă din cauza contactelor ce apar în interiorul probelor. Creșterea toleranței pătrunderii pereților unul în celălalt poate crește rata de convergență însă va conduce și la precizii reduse. În acest sens au fost realizate teste statice pe o deformație de doar 2,5mm, valoare aleasă astfel încât să nu aibă loc contacte care să conducă la dificultăți de obținere a unei soluții. Chiar și în acest caz, datorită naturii periodice ce a determinat pereți subțiri pe conturul miezului de tip S4 a fost redusă valoarea deformației la 1mm astfel încât simularea să conveargă spre o soluție, chiar dacă se captează o zona mai redusă a fenomenului de curgere. Evitarea sau minimizarea acestor situații se poate face prin modificarea intervalului funcției ce definește piesa sau prin rotația ulterioară a celulei reprezentative în jurul unei axe. Trebuie să se aibă în vedere că aceasta din urmă ar duce la alte tipuri de comportamente mecanice, deoarece geometriile nu sunt simetrice în ambele direcții

Coroborând câmpul tensiunilor echivalente von Mises și a deformațiilor echivalente totale obținute pentru fiecare probă, se pot trage concluzii referitoare la modul general de cedare al probelor. În general, toate aceste concluzii conduc către un mecanism de deformare similar cu cel identificat prin teste experimentale. Proba S6 este excepția de la regulă, deformația mai însemnată din zona inferioară neputând fi identificată prin simulare. Există posibilitatea ca modul de cedare al acesteia să fie influențat de defecte de fabricație ce nu au fost identificate anterior, în special având în vedere topologia celulei reprezentative cu caracteristici de dimensiuni mai reduse decât a celorlalte probe.

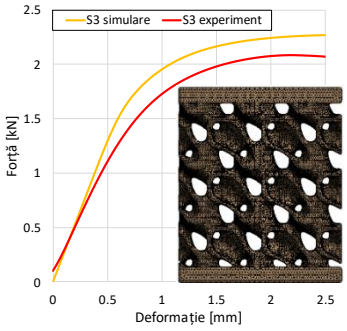
Analizând curbele de compresiune forță-deformație obținute prin simulare și comparându-le cu cele experimentale (Fig. 4-3) se poate observă că suprapunerea este optimă doar la probele S1 și S8 ce au prezentat cele mai mari valori ale forței capabile. Celelalte probe prezintă abateri semnificative pe măsură ce valoarea acesteia se reduce. Totuși alura curbei se menține, iar o caracterizare mai fidelă a materialului utilizat poate duce către îmbunătățirea semnificativă a rezultatelor, în special în zona palierului plastic. Natura neliniară a comportamentului polimerilor face dificilă simularea exactă a realității determinărilor experimentale datorită deformațiilor ridicate ce conduc la distorsiuni în discretizare și la probleme de convergență. În plus, trecerea la comportamentul plastic este mult mai sensibilă și complexă decât în cazul materialelor convenționale. De asemenea, contactele ce se produc inevitabil în interiorul geometriilor complexe de tip TPMS introduc neliniarități suplimentare deoarece condițiile la limită se modifică pe măsură ce suprafețele deformate intră în contact.



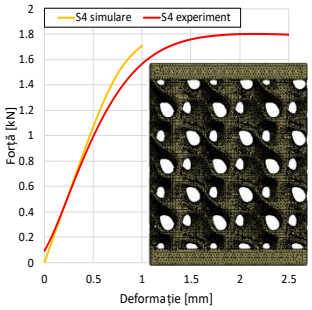
S1



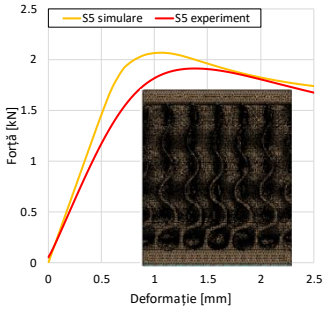
S2



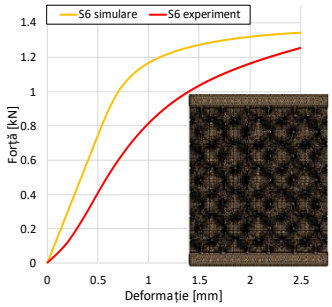
S3



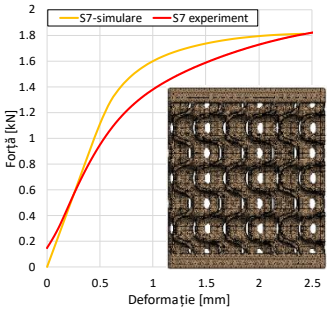
S4



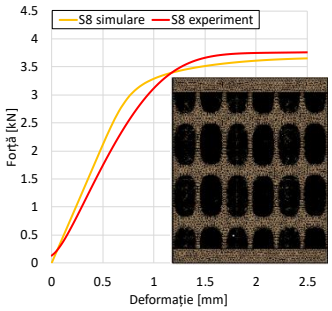
S5



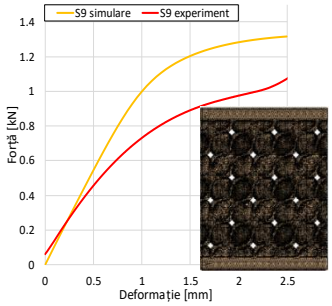
S6



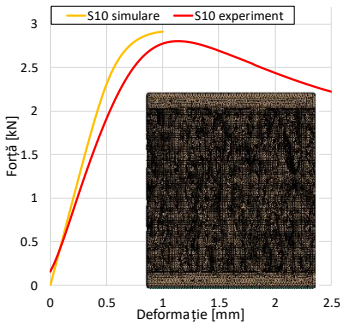
S7



S8



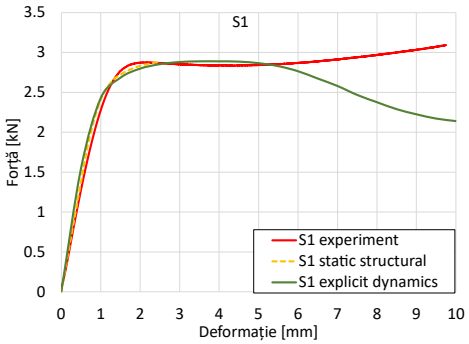
S9



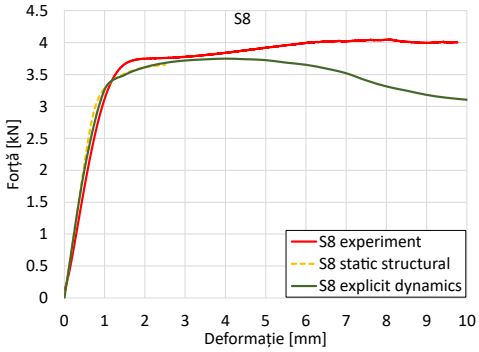
S10

Fig. 4-3 Comparația dintre curbele forță-deformație obținute pe cale experimentală și prin analiză cu elemente finite pentru fiecare geometrie în parte [41]

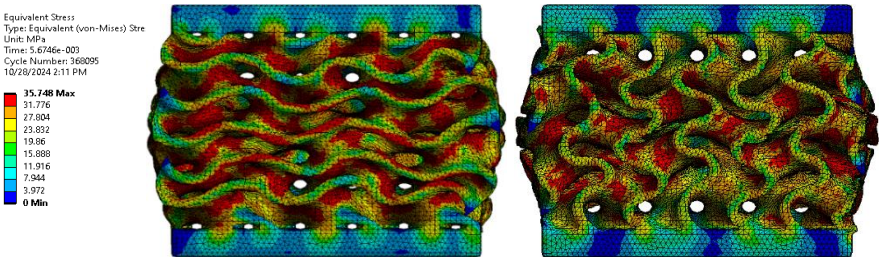
Analiza în modulul *Explicit Dyamics* a captat mai fidel suprapunerea straturilor celulelor, conducând către rezultate similare în zona de deformații reduse. A prezentat însă o reducere sesizabilă a forței de încărcare a materialului la valori mari ale deformației, fapt pus pe baza neliniarității materialului. Astfel, nici acest model de calcul nu reușește să surprindă perfect fenomenul de rigidizare treptată a miezurilor propuse. Cu toate acestea, în cazul acestei analize cât și în cazul analizei statice, modul de cedare a coincis cu cel identificat pe cale experimentală.



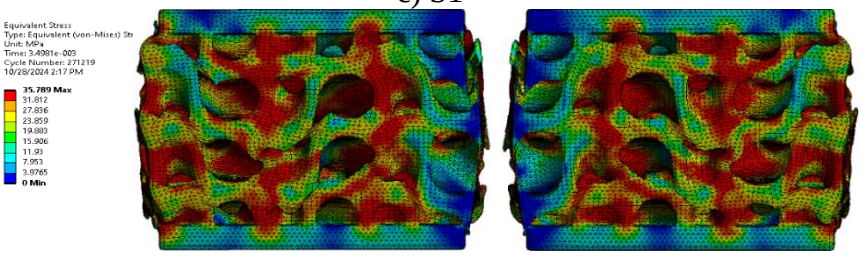
a)



b)



c) S1



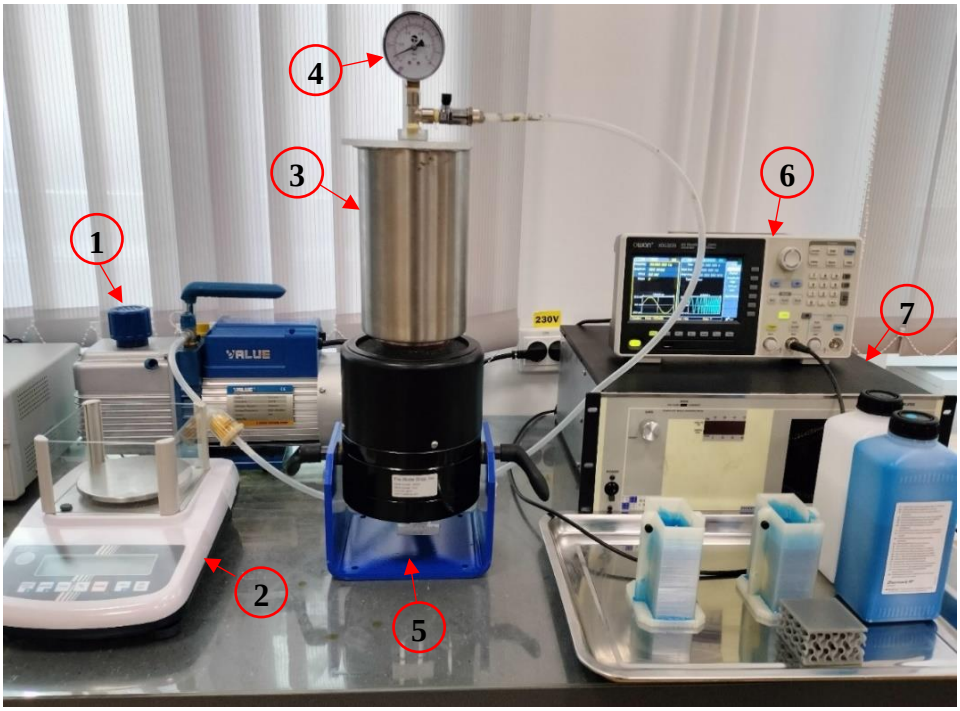
d) S8

Fig. 1-4 Comparația dintre curba forță-deformație reală și cele obținute prin analiză cu elemente finite pentru: a) S1; b) S8; Câmpul tensiunilor echivalente von Mises în două vederi, din faţă şi lateral, pentru: c) S1; d) S8;

CAPITOLUL 5 SOLICITAREA EXPERIMENTALĂ LA IMPACT CU VITEZE REDUSE

Capitolul are ca obiectiv extinderea înțelegerii comportării structurilor de tip TPMS și stocastice propuse în capitolele anterioare, prin încercări la impact cu viteze reduse. Au fost alese cele mai promițătoare două tipuri de topologii triplu periodice și topologia stocastică. Ca extindere a studiului și datorită interesului existent pe această direcție în literatura de specialitate, a fost propusă umplerea golurile din miezurile TPMS cu o soluție siliconică formată din două componente, vulcanizată la temperatura camerei (RTV). Topologia miezurilor propuse face posibilă o astfel de abordare, datorită faptului că în interior sunt generate unul sau mai multe volume continuu comunicante care pot fi umplute cu material de adaos, fără a exista incinte închise.

Au fost propuse și realizate prin stereolitografie (SLA) 10 probe din același material utilizat anterior pentru a fi testate la impact la două energii diferite. Pentru umplerea cu material de adaos, sunt adoptate recomandările specifice materialului de tip siliconic pentru omogenizarea acestuia, apoi este propusă o metodă proprie pentru a se asigura eliminarea pe cât posibil a porozității siliconului din interiorul epruvetelor printate (Fig. 1-1). Din observații proprii, utilizarea unei pompe de vid este insuficientă pentru realizarea unei structuri omogene. Procedeul utilizat presupune astfel amestecarea soluției și utilizarea pompei de vid pentru extragerea aerului înglobat pe timpul mixării. Apoi, aceasta este turnată matrițele realizate pentru extragere ulterioară facilă, iar incinta este montată pe un excitator pentru introducerea de vibrații pe direcție verticală și este din nou conectată la pompa de vid pentru încă 8-10 minute. După 24 de ore, piesele sunt extrase din matrițe iar excesul de material este înlăturat.



1. Pompă de vid VE2100N
2. Balanță de precizie PFB2000-2
3. Incintă pentru vidare
4. Manometru
5. Shaker 2075E
6. Generator de funcții arbitrare XDG2035
7. Amplificator de putere 2050E09

Fig. 1-1 Instalația propusă pentru eliminarea aerului din volumul probei

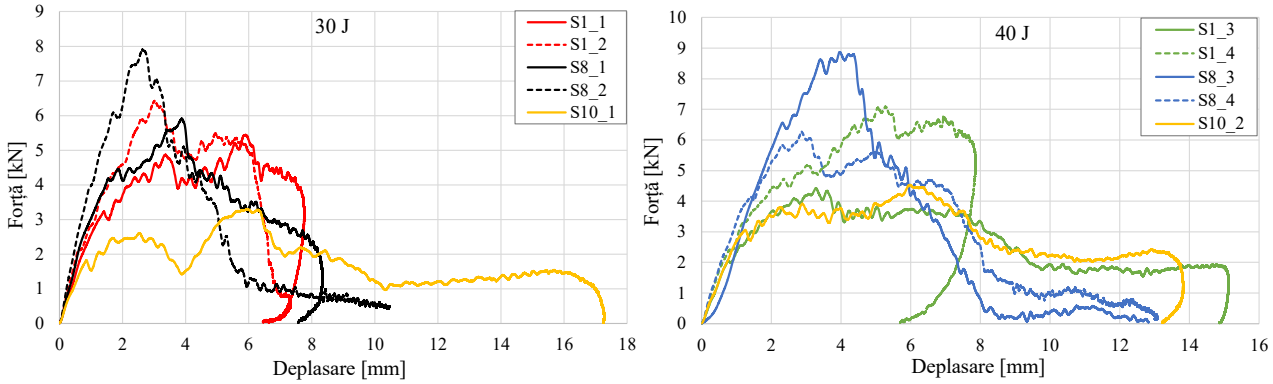
Probele obținute au fost testate la impact cu viteze reduse, cu energii de 30 J și 40 J. Pentru a permite comparația performanțelor structurilor propuse, s-au evaluat parametrii prezentați în Tabelul 1-1. Au fost evidențiate cu verde și roșu valorile cele mai ridicate, respectiv reduse, ale parametrilor, pentru fiecare set de teste în parte.

Tabelul 1-1 Parametrii de evaluare a performanțelor structurilor la solicitarea de impact

Tip probă	Energie impact	Masa	Forța maximă	Deformația maximă	Energia absorbită totală	Forța medie	Energia absorbită specifică	Eficiența forței de impact	Energia recuperată	Indice de amortizare
	[J]	[g]	[kN]	[mm]	[J]	[kN]	[J/kg]	[-]	[J]	[-]
S1_1	30	67	5,413	7,76	29,07	3,75	433,95	0,692	0,93	31,25
S1_2	30	147	6,35	7,33	29,72	4,05	201,90	0,639	0,28	106,14
S8_1	30	66,6	5,798	8,33	29,78	3,58	447,08	0,617	0,22	135,36
S8_2	30	146	7,911	10,43	29,88	2,86	204,24	0,362	0,12	249
S10_1	30	67,8	3,275	17,27	30,19	1,75	445,48	0,534	0,19	158,89
S1_3	40	66,1	4,428	15,09	40,35	2,67	610,72	0,604	0,35	115,28
S1_4	40	147	7,067	7,86	37,17	4,73	253,72	0,669	2,83	13,13
S8_3	40	66	8,869	12,81	39,75	3,10	602,18	0,350	0,25	159
S8_4	40	147	6,271	13,04	39,61	3,04	268.,91	0,484	0,39	101,56
S10_2	40	66,3	4,526	13,82	39,93	2,89	601,90	0,638	0,07	570,42

O primă observație este faptul că procedeul de fabricație rămâne unul optim, datorită deviațiilor minime ce apar între masele specimenelor de același tip. Deviația standard pentru probele fără material de umplutură a fost de 0,66 în timp ce pentru cele cu adaos de silicon aceasta a fost de 0,49. Totuși, umplerea epruvetelor de tip sandwich duce la obținerea unor structuri cu o masă finală de 2.2 ori (219%) mai mare decât cele inițiale, fapt ce poate prezenta un impediment în situațiile în care masa este un criteriu important.

Fig. 1-2 prezintă evoluția forței de impact în funcție de deplasarea impactorului pentru S1, S8 și S10, cu și fără silicon. Studiind valoarea forței maxime obținute, se observă că utilizarea umpluturii siliconice, a condus, în trei din patru cazuri, la probe mai rigide, ce dezvoltă forțe de răspuns la impact superioare. Totuși, forța maximă este înregistrată pentru structura S8 simplă, testată la o energie de impact de 40 J, caz în care adaosul de silicon a dus la obținerea unei valori inferioare a forței. Datorită răspunsului neașteptat a fost realizat încă un test, în vederea studierii repetabilității datelor, prin care a fost validat răspunsul obținut. O altă observație este că structura de tip S8 prezintă valori superioare ale forței de impact față de giroidul clasic, în timp ce proba cu miez stocastic a obținut cele mai mici valori pe timpul ambelor teste, datorită rigidității reduse a ligamentelor utilizate.



a) b)

Fig. 1-2 Evoluția forței de impact în funcție de deplasare pentru : a) 30 J ; b) 40 J

De cele mai multe ori, o forță de impact mare a fost însoțită și de o valoare mare a deplasării impactorului și implicit a indentării probei. Acesta este cazul pentru structurile S1_2,

S8_2, S8_3, S8_4, pentru care fisurarea feței superioare a determinat și spargerea miezului pe întreaga înălțime. Deci, deși topologia S8 prezintă valori mai mari ale forței maxime de impact, aceasta este mai susceptibilă la pierderea integrității structurale, în special la valori mari ale energiei de impact. În schimb, probele S1_1, S8_1 și S1_4 au prezentat doar deteriorarea feței superioare, cu fisurări minime în profunzimea miezului. Structurile S10_1 și S10_2 au permis deformări locale ridicate, iar impactorul a distrus ligamentele din zona de impact, fără a genera distrugerea totală a pieselor. Acest fenomen este cel mai vizibil la topologia stocastică, dar a fost întâlnit și la testul cu energie de 40 J asupra probei giroid, S1_3.

Pe timpul testelor, toate probele au atins pragul impus de 30 J, respectiv 40 J. Totuși, unele dintre ele au absorbit integral această energie, iar altele au transmis înapoi o mică parte din aceasta către impactor. Energia absorbită este controlată de deteriorarea plastică a probelor, astfel că proba cu cea mai bună capacitate de absorbție este proba S1_3, care s-a deformat până la o valoare de 15 mm, în timp ce proba care a absorbit cea mai mică parte din energia de impact introdusă pe timpul testelor a fost S1_4, a cărei rezistență a dus la transmiterea înapoi către impactor a unei energii mai mari, de 2,83 J. Se poate trage concluzia că o structură cu o valoare redusă a energiei reintrodusă în sistem la finalul testului, prezentată în penultima coloana din Tabelul 1-1, este favorabilă în aplicațiile de absorbție a energiei, deoarece poate conduce la reducerea daunelor provocate obiectului care impactează proba. În schimb, dacă se dorește ca obiectul lovit să sufere daune cât mai reduse, este de dorit ca energia recuperată să aibă valori superioare, cum este cazul probelor de tip giroid.

Deși topologia S8 a prezentat în majoritatea cazurilor valori superioare ale forței de impact, deformațiile însemnate fac ca forța medie de impact să aibă cea mai mare valoare în cazul probei S1_4, datorită lipsei deformării plastice și a ricoșării impactorului. La polul opus se regăsesc piesele cu miez stocastic care au prezentat cele mai însemnate deformații, rezultând o forța medie de impact redusă.

Dacă se ia în calcul masa suplimentară introdusă de umplutura siliconică se observă că structurile hibride conduc către valori ale energiei absorbite specifice mult mai reduse. S-au obținut valori cu până la 215% mai mici în urma testelor cu o energie de impact de 30 J, respectiv 240% pentru 40 J.

Existența unor oscilații însemnate în valorile forței de impact este evidențiată prin eficiența forței de impact. Cu cât evoluția acesteia are o distribuție mai restrânsă, cu atât se consideră că structura poate absorbi mai eficient energia de impact, fără introducerea unor gradienți mari de tensiuni pe timpul fenomenului, ce pot provoca deformații plastice însemnate. În acest caz se regăsesc structurile cu miez giroid și stocastic care prezintă eficiențe de 0,6-0,7.

Indicele de amortizare indică capacitatea sistemului de a reduce vibrațiile după producerea impactului. Cu cât acest indice are valori mai reduse, cu atât structurile tind să genereze vibrații mai mari și fenomene de ricoșare a impactorului. Analog, structurile cu valori ridicate ale indicelui de amortizare pot disipa mai multă energie și atenua mai rapid vibrațiile [42]. În majoritatea cazurilor, aproape toată energia absorbită a fost folosită pentru penetrarea probelor și doar o cantitate redusă de energie a fost transferată înapoi către impactor, astfel că amortizarea este foarte ridicată. Excepție fac structurile S1_1 și S1_4.

Având toate acestea în vedere, se poate concluziona că structurile de tip sandwich cu miezuri TPMS și stocastice sunt soluții optime pentru aplicații în care absorbția de energie este importantă. Structura S8 a prezentat performanțe mai ridicate la valori mai reduse ale energiei de impact, însă s-a deformat plastic mai rapid prin pierderea integrității structurale la energii mai ridicate. În același timp, structura stocastică a prezentat cel mai previzibil răspuns, de localizare a deformației, fără a fi pusă în pericol integritatea panoului, în conformitate cu observații similare din literatura de specialitate [43].

În ceea ce privește utilizarea materialului siliconic de umplere, soluția conduce în general la un răspuns mai rigid din partea structurilor, ca urmare a testării la energii mari de

impact, dar nu îmbunătățește semnificativ proprietățile de absorbție a energiei. Având în vedere procedeul de obținere al unor astfel de structuri omogene, în special la scară mare, cât și masa adițională pe care o implică, utilizarea acestora este eficientă doar în aplicații specifice, în care se dorește a se împiedica distrugerea panourilor, siliconul acționând ca un liant între camerele generate în volumul miezului. Propunerea de utilizare a umplerii realizată cu silicon bi-component este însă doar un exemplu folosit pentru a ilustra conceptul hibrid de proiectare care poate fi utilizat pentru o geometrie de tip TPMS și fezabilitatea sa de fabricare. Structurile propuse își pot găsi aplicabilitate în diferite domenii, cum ar fi amortizarea vibrațiilor, sistemele de atenuare a impactului sau alte aplicații specifice.

CAPITOLUL 6 CONCLUZII FINALE

1.1 Concluzii generale

În cadrul tezei de doctorat sunt prezentate analize experimentale și numerice referitoare la comportamentul la compresiune și la impact cu viteze reduse a configurațiilor inovatoare de tip sandwich cu miezuri din metamateriale mecanice. Pe baza studiului realizat se pot extrage următoarele observații și concluzii generale:

- Au fost dezvoltate opt configurații noi de tip TPMS și o geometrie stocastică, cu scopul de a le compara performanțele mecanice cu cele ale unei structuri de tip giroid, des întâlnită în literatură. Astfel, s-au demonstrat capabilitățile modelării implicite de a genera topologii de metamateriale inedite.
- Există programe software ce permit elaborarea unei metode prin care se pot defini astfel de topologii care se pot analiza din punct de vedere al posibilităților de fabricație, a gradului de anizotropie sau a parametrilor constructivi.
- Modelarea implicită permite scalarea și modificarea rapidă a parametrilor constructivi. Acest lucru a fost demonstrat prin alterarea topologiei de bază în patru moduri diferite, utilizând tehnici care nu pot fi implementate prin proiectare computațională convențională. Au fost astfel concepute 19 tipuri de epruvete, de geometrii sau dimensiuni diferite.
- S-a dovedit că tehnica de fabricație de tip SLA poate printa topologii de tip TPMS și stocastic cu dimensiuni ale celulelor reprezentative de până la 5 mm și grosime a pereților de până la 0,3 mm. Setările adoptate care au generat epruvete de o calitate optimă sunt bazate pe următoarele observații și recomandări:
    - evitarea generării incintelor închise în volumul pieselor, deoarece în acestea rămâne înglobată rășină care generează abateri semnificative de la geometria nominală;
    - utilizarea unei grosimi a stratului de 0,05 mm;
    - printarea direct pe masa de printare;
    - utilizarea doar a suporților laterali a căror bază este separată de probă;
    - poziționarea la distanță a epruvetelor una de cealaltă pe masa de printare pentru a putea spăla eficient rășina reziduală depusă pe acestea;
    - la finalizarea procedurii de fabricație este necesară minimizarea timpului până la începerea post-procesării pentru a se evita apariția abaterilor de formă;
    - încălzirea prealabilă a incintei de post-procesare cu radiații ultraviolete pentru a garanta repetabilitatea procesului pe epruvete diferite;
    - controlul atent al expunerii rășinii la radiații ultraviolete și al contaminării acesteia cu impurități.
- S-a demonstrat aplicabilitatea procedeului de fabricație ales prin verificarea calității pieselor cu următoarele rezultate:
    - abaterile dimensionale a două epruvete obținute prin scanare tridimensională cu laser au o medie pătratică de 35 µm;
    - abatere medie a maselor probelor este de 1,54% față de valoarea medie a acestora;
    - rugozitatea medie a fost de 2,47 µm, în concordanță cu valorile specificate ca fiind optime în literatura din specialitate;

  - prezența unor tipuri diferite de defecte de suprafață care nu pun însă în pericol integritatea probelor;
  - analiza cu ultrasunete nu a identificat neomogenități în volumul pieselor;
  - secțiunile transversale ale epruvetelor au prezentat omogenitate optimă în urma unei analize microscopice.
- S-au realizat teste de compresiune cvasi-statică pentru cele 10 configurații propuse, fiind atribuit fiecăreia un mecanism general de deformație. S1, S6, S7 și S8 au manifestat un comportament de tipul *„bending-dominated”*, caracterizat de o reducere neglijabilă a forței capabile după zona de curgere și o densificare lentă. S2, S3, S4, S5 și S9 au prezentat un răspuns „*mixt*”, caz în care modul de intrare în contact al pereților celulelor a determinat o evoluție în trepte a forței de compresiune. S10 a arătat un comportament de tipul *„stretching-dominated”*, evidențiat prin reducerea semnificativă a valorii forței dată de ruperea prematură a ligamentelor. Topologia S8 a manifestat o valoare a forței corespunzătoare începerii curgerii cu până la 31% mai mare, iar S10 cu până la 6% mai mare, prin comparație cu geometria de tip giroid.
- În urma testelor de compresiune ciclică s-a determinat că structura S8 are performanțe mai bune de absorbție a energiei, cu 39% mai mari decât în cazul probei S1, în 100 de cicluri de încărcare în zona elastică. În cazul solicitărilor ciclice în zona de deformare plastică, S8 rămâne configurația cu cele mai bune rezultate, obținându-se numai 3% mai multă energie absorbită în raport cu giroidul.
- Aducând modificări geometriei inițiale s-au constat următoarele:
  - un număr mai mic de celule asigură o rezistență mai mare la compresiune, dar reduce deformația specifică până la apariția primelor fisuri;
  - un număr mai mare de celule distribuie tensiunea mai uniform în volumul piesei, permițând deformații specifice mai mari, în detrimentul forței maxime de încărcare și a rigidității;
  - aplicarea unui gradient al grosimii pereților determină o deformație localizată în zona superioară (cu grosimea mai mică) și o capacitate de absorbție a energiei mai redusă comparativ cu modelul omogen;
  - aplicarea unui gradient geometric conduce la o curbă a forței de compresiune în funcție de deformație care urmărește alura identificată în cazul probei uniforme, dar cu valori ușor inferioare ale forței.
- Simularea cu elemente finite a încercării la compresiune cvasi-statică a scos în evidență următoarele:
  - o discretizare cu dimensiune maximă de 0,3 mm sau 3 elemente tetraedrice regulate pe grosimea pereților asigură un echilibru optim între precizia rezultatelor și creșterea cerințelor de putere de calcul;
  - utilizarea geometriilor obținute prin modelare implicită în modele de simulare nu induce erori semnificative în rezultate, însă presupun timpi de până la cinci ori mai mari pentru convergența rezultatelor;
  - cele patru modele de material propuse aproximează suficient de bine fenomenul real; modelul de tip multiliniar a prezentat cea mai mică deviație față de datele experimentale, cu o valoare de doar 2,54% pentru topologia giroid S1;
  - utilizând criteriul tensiunilor echivalente von Mises și a deformațiilor echivalente totale, se poate estima mecanismul de cedare al structurilor

propuse; la opt din nouă structuri TPMS, zonele cu valori maxime ale tensiunilor au fost cele care au cedat primele în timpul testelor experimentale, conducând către un mod de deformare similar cu cel determinat fenomenologic.

- A fost dezvoltată o metodă proprie pentru minimizarea porozității siliconului adaugat ca material de umplurură în epruvetele propuse; aceasta presupune utilizarea unei pompe de vid în două etape, în paralel cu utilizarea unui excitator, care introduce vibrații ce facilitează eliminarea golurilor de aer din volumul piesei.
- În urma testelor de impact cu viteze reduse, cu energii de 30 J și 40 J, s-au evidențiat următoarele:
    - în 75% din cazuri, umplerea cu silicon a incintelor interioare ale topologiilor studiate a dus la obținerea unor structuri sandwich mai rigide, capabile să genereze forțe de impact cu până la 60% mai mari decât în cazul soluțiilor constructive simple, neumplute;
    - proba S8 generează forțe de impact mai mari comparativ cu giroidul, în timp ce configurația cu miez stocastic S10 a înregistrat cele mai mici valori pentru ambele energii de testare, din cauza rigidității scăzute a ligamentelor;
    - proba S8 este mai predispusă la pierderea integrității structurale, prezentând deformări ce se transmit mai ușor în volumul piesei, comparativ cu topologia de tip giroid; epruveta stocastică impactată a dus la obținerea celor mai predictibile rezultate privind deformația, aceasta rămânând localizată în zona din vecinătatea impactorului;
    - masa suplimentară adăugată prin umplerea cu silicon conduce evident la structuri hibride cu masă mai mare, dar și la valori ale energiei specifice absorbite semnificativ mai mici, de până la 215% pentru o energie de impact de 30 J și până la 240% pentru 40 J.
    - luând în considerare eficiența forței de impact, ce presupune o forță de impact medie mai ridicată și mai puține fluctuații ale tensiunii în timpul impactului, structurile S1 și S10 oferă eficiențe superioare geometriei S8, cu valori de până la 0,6-0,7;
    - topologiile S8 și S10 au un indice de amortizare superior topologiei S1 de tip giroid, făcându-le mai potrivite aplicațiilor în care se dorește păstrarea integrității obiectului care lovește sau pentru amortizarea vibrațiilor; în schimb, proba S1 a fost cea care a transferat cea mare mare cantitate de energie înapoi către impactor, fiind potrivită pentru aplicații în care se dorește protecția pieselor ce sunt lovite;
    - utilizarea adaosului de silicon determină un răspuns mai rigid al structurilor însă nu îmbunătățește semnificativ performanța de absorbție a energiei; ținând cont de complexitatea procesului de obținere a unor astfel de structuri, în special la scară mare, precum și adăugarea masei suplimentare, utilizarea acestora este recomandată doar în aplicații specifice, unde prevenirea distrugerii panourilor sandwich este esențială, siliconul având rol de liant între camerele din volumul miezului.

1.2 Contribuții personale

Contribuțiile personale aduse metodelor experimentale și numerice aplicabile la dezvoltarea de miezuri din metamateriale utilizate pentru componente structurale de tip sandwich se remarcă prin:

- Proiectarea a opt topologii inedite de tip TPMS și a unei geometrii stocastice, în vederea comparării proprietăților mecanice cu cele ale giroidului (configurație de referință în literatură) - Subcapitolul **Error! Reference source not found.**
- Construirea în programul *nTopology* a unei metodologii de lucru cu etape clar definite, în vederea modificării rapide a parametrilor definitorii ai topologiilor create. Aceasta permite în același timp și impunerea unei densități relative, studierea unor parametri constructivi, verificarea proprietăților de anizotropie și realizarea unei simulări numerice preliminare - Subcapitolul **Error! Reference source not found.**.
- Optimizarea parametrilor de fabricație ai unei tehnologii de tip SLA, astfel încât să poată fi printate peste 40 de structuri cu geometrii și dimensiuni diferite, cu un grad foarte ridicat de repetabilitate a calității probelor - Subcapitolul **Error! Reference source not found.**.
- Utilizarea cu succes a echipamentelor de inspecție non-distructivă și distructivă a pieselor, a celor de prototipare rapidă prin foto-polimerizare și a celor folosite pentru adăugarea cu succes a materialului de adaos în geometrii de tip TPMS - Subcapitolele **Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.** și **Error! Reference source not found.**
- Construirea unei proceduri prin care să poată fi analizată calitatea pieselor realizate prin fabricație aditivă. Aceasta include determinarea abaterilor dimensionale, a rugozității și defectelor superficiale și a omogenității - Subcapitolul **Error! Reference source not found.**.
- Realizarea unei analize experimentale și numerice a comportamentului celor 10 topologii propuse la solicitări compresive cvasi-statice și ciclice, pentru determinarea performanțelor structurale și de absorbție de energie - Subcapitolul **Error! Reference source not found.** și **Error! Reference source not found.**.
- Studierea implicațiilor pe care le are alterarea geometriei de bază (modificarea dimensiunilor celulelor și utilizarea unor gradienți) asupra răspunsului mecanic al probelor - Subcapitolul **Error! Reference source not found.**.
- Elaborarea unei metodologii clare pentru utilizarea cu succes a geometriilor obținute prin modelare implicită în analize cu elemente finite și prezentarea implicațiilor acestora - Subcapitolul **Error! Reference source not found.** și **Error! Reference source not found.**.
- Propunerea unei metode simplificatoare pentru adaptarea unor modele de materiale utilizate în analiza cu elemente finite, pe baza datelor experimentale realizate pe rășina folosită la fabricarea epruvetelor - Subcapitolul **Error! Reference source not found.** și **Error! Reference source not found.**.
- Dezvoltarea unei instalații și a unei metode de umplere a golurilor din volumul topologiilor de tip TPMS cu material lichid de tip cauciuc vulcanizabil, în vederea obținerii unor epruvete hibride, cu omogenitate optimă - Subcapitolul **Error! Reference source not found.**.
- Completarea analizei experimentale la compresiune cu un studiu al răspunsului epruvetelor la solicitări de impact cu viteze reduse, la diferite energii de impact.

Acestea au fost realizate pe trei tipuri de topologii, atât simple cât și umplute cu silicon - Subcapitolul **Error! Reference source not found.**.

1.3 Direcții pentru cercetări viitoare

- Analiza defectelor și omogenității epruvetelor fabricate prin SLA, prin tehnici imagistice de tipul tomografiei computerizate și compararea rezultatelor cu cele identificate prin tehnicile prezentate în lucrare.
- Studierea răspunsului mecanic al probelor propuse la alte tipuri de solicitări, precum încovoierea în trei puncte sau impactul la viteze considerabil diferite de cele utilizate în lucrare.
- Fabricarea epruvetelor propuse printr-o tehnologie de fabricație aditivă bazată pe sinterizarea pulberilor metalice și reluarea metodologiei din lucrare în vederea analizei calității fabricației și a proprietăților mecanice ale probelor obținute. Se poate astfel stabili care dintre tehnologii este optimă pentru printarea configurațiilor tridimensionale complexe și modul în care aceste tehnologii influențează comportamentul mecanic general al structurilor la aceleași solicitări.
- Realizarea epruvetelor dintr-un tip diferit de rășină polimerică și studierea impactului pe care îl are materialul asupra mecanismelor de deformare. Se dorește a se stabili dacă influența critică asupra performanțelor mecanice este dată de arhitectura celulelor sau de materialul din care acestea sunt fabricate.
- Dezvoltarea unei metode prin care să se genereze în mod automat topologii noi de metamateriale, impunând constrângeri de fabricație și aspect general, filtrarea acestora făcându-se prin simularea comportamentul mecanic, fie prin utilizarea capabilităților software-ului nTopology, fie printr-o abordare integrată Python-Ansys.

BIBLIOGRAFIE

[1] R. S. Kshetrimayum, "A brief intro to metamaterials," *IEEE Potentials*, vol. 23, no. 5, pp. 44–46, Dec. 2004, doi: 10.1109/mp.2005.1368916.

[2] Y. Feng, H. Qiu, Y. Gao, H. Zheng, J. Tan, "Creative design for sandwich structures: A review," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 17, no. 3, May 2020, doi: 10.1177/1729881420921327.

[3] C. Lu, M. Hsieh, Z. Huang, C. Zhang, Y. Lin, Q. Shen, F. Chen, L. Zhang, "Architectural design and additive manufacturing of mechanical metamaterials: A review," *Engineering*, vol. 17, pp. 44–63, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.eng.2021.12.023.

[4] X. Yu, J. Zhou, H. Liang, Z. Jiang, L. Wu, "Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review," *Progress in Materials Science*, vol. 94, pp. 114–173, May 2018, doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.12.003.

[5] A. Ronca, G. G. Buonocore, G. Rollo, P. Cerruti, G. Fei, X. Gan, L. Ambrosio, M. Lavorgna, H. Xia, C. Silvestre, "Selective laser sintering fabricated thermoplastic polyurethane/graphene cellular structures with tailorable properties and high strain sensitivity," *Applied Sciences* 2019, vol. 9, no. 5, 864, Feb. 2019, doi: 10.3390/app9050864.

[6] T. Gao, K. Liu, X. Wang, K. Wei, Z. Wang, "Multi-level mechanism of biomimetic TPMS hybridizations with tailorable global homogeneity and heterogeneity," *Extreme Mechanics Letters*, vol. 68, 102136, May 2024, doi: 10.1016/j.eml.2024.102136.

[7] Y. P. Wei, H. Li, J. Han, Y. Ma, H. Zhou, J. Cheng, J. Shi, B. Yu, F. Lin, Z. Miao, "Mechanical and damping performances of TPMS lattice metamaterials fabricated by laser powder bed fusion," *China Foundry*, vol. 21, no. 4, pp. 327–333, Jul. 2024, doi: 10.1007/s41230-024-4026-5/metrics.

[8] C. Yang, W. Wu, Z. Fu, H. Zheng, "Preparation and thermal insulation properties of TPMS 3Y-TZP ceramics using DLP 3D printing technology," *Journal of Materials Science*, vol. 58, no. 29, pp. 11992–12007, Aug. 2023, doi: 10.1007/s10853-023-08749-0.

[9] N. Novak, M. Borovinšek, O. Al-Ketan, Z. Ren, M. Vesenjak, "Impact and blast resistance of uniform and graded sandwich panels with TPMS cellular structures," *Composite Structures*, vol. 300, 116174, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.compstruct.2022.116174.

[10] J. Song, M. Wang, D. Li, J. Zhang, "Deformation and energy absorption performance of functionally graded TPMS structures fabricated by selective laser melting," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 5, 2064, Mar. 2024, doi: 10.3390/app14052064.

[11] E. A. Ramírez, N. Béraud, F. Pourroy, F. Villeneuve, J. L. Amaya, M. Museau, "Design methodology of functionally graded cellular materials: Manipulating design parameters of triply periodic minimal surfaces through three-dimensional density

distributions," *Computer-Aided Design*, vol. 177, 103778, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.cad.2024.103778.

[12] N. V. Viet, W. Waheed, A. Alazzam, W. Zaki, "Effective compressive behavior of functionally graded TPMS titanium implants with ingrown cortical or trabecular bone," *Composite Structures*, vol. 303, 116288, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.compstruct.2022.116288.

[13] T. Szatkiewicz, D. Laskowska, B. Bałasz, K. Mitura, "The influence of the structure parameters on the mechanical properties of cylindrically mapped gyroid TPMS fabricated by selective laser melting with 316L stainless steel powder," *Materials*, vol. 15, no. 12, 4352, Jun. 2022, doi: 10.3390/ma15124352/s1.

[14] N. Wang, G. K. Meenashisundaram, S. Chang, J. Y. H. Fuh, S. T. Dheen, A. Senthil Kumar, "A comparative investigation on the mechanical properties and cytotoxicity of Cubic, Octet, and TPMS gyroid structures fabricated by selective laser melting of stainless steel 316L," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 129, 105151, May 2022, doi: 10.1016/j.jmbbm.2022.105151.

[15] C. M. Suryawanshi, S. Sagar, R. Bhallamudi, S. Mishra, "Effective design and mechanical response of Gyroid lattice scaffold for orthopedic implants," *Manufacturing Letters*, vol. 35, pp. 493–501, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.mfglet.2023.07.015.

[16] M. Ozdemir, U. Simsek, G. Kiziltas, C. E. Gayir, A. Celik, P. Sendur, "A novel design framework for generating functionally graded multi-morphology lattices via hybrid optimization and blending methods," *Additive Manufacturing*, vol. 70, 103560, May 2023, doi: 10.1016/j.addma.2023.103560.

[17] S. Yu, J. Sun, J. Bai, "Investigation of functionally graded TPMS structures fabricated by additive manufacturing," *Materials & Design*, vol. 182, 108021, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2019.108021.

[18] M. Li, J. Jiang, W. Liu, X. Huang, X. Wu, W. Wei, H. Zhu, J. Zhang, J. Xiao, H. Dai, "Bioadaptable bioactive glass-β-tricalcium phosphate scaffolds with TPMS-gyroid structure by stereolithography for bone regeneration," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 155, pp. 54–65, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.jmst.2023.01.025.

[19] A. Almesmari, N. Baghous, C. J. Ejeh, I. Barsoum, R. K. Abu Al-Rub, "Review of Additively Manufactured Polymeric Metamaterials: Design, Fabrication, Testing and Modeling," *Polymers*, Vol. 15, Page 3858, vol. 15, no. 19, 3858, Sep. 2023, doi: 10.3390/polym15193858.

[20] L. Yuan, S. Ding, C. Wen, "Additive manufacturing technology for porous metal implant applications and triple minimal surface structures: A review," *Bioactive Materials*, vol. 4, no. 1, pp. 56–70, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.bioactmat.2018.12.003.

[21] W. Wu, D. Qi, H. Liao, G. Qian, L. Geng, Y. Niu, J. Liang, "Deformation mechanism of innovative 3D chiral metamaterials," *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, pp. 1–10, Aug. 2018, doi: 10.1038/s41598-018-30737-7.

[22] H. Ebrahimi, D. Mousanezhad, H. Nayeb-Hashemi, J. Norato, A. Vaziri, "3D cellular metamaterials with planar anti-chiral topology," Materials & Design, vol. 145, pp. 226–231, May 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.02.052.

[23] Z. Wang, C. Luan, G. Liao, J. Liu, X. Yao, J. Fu, "Progress in auxetic mechanical metamaterials: structures, characteristics, manufacturing methods, and applications," *Advanced Engineering Materials*, vol. 22, no. 10, 2000312, Oct. 2020, doi: 10.1002/adem.202000312.

[24] C. Ma, H. Lei, J. Liang, W. Wu, T. Wang, D. Fang, "Macroscopic mechanical response of chiral-type cylindrical metastructures under axial compression loading," *Materials & Design*, vol. 158, pp. 198–212, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.08.022.

[25] T. Frenzel, M. Kadic, M. Wegener, "Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist," *Science*, vol. 358, no. 6366, pp. 1072–1074, Nov. 2017, doi: 10.1126/science.aao4640.

[26] **A. Vasile**, I. C. Coropetchi, D. M. Constantinescu, Şt. Sorohan, C. R. Picu, "A simulated annealing algorithm for stiffness optimization," *Procedia Structural Integrity*, vol. 37, no. C, pp. 857–864, 2021, doi: 10.1016/j.prostr.2022.02.019.

[27] R. Ni, B. Qian, C. Liu, X. Liu, J. Qiu, "A cross-linking strategy with moderated pre-polymerization of resin for stereolithography," *RSC Advances*, vol. 8, no. 52, pp. 29583–29588, 2018, doi: 10.1039/c8ra05432k.

[28] M. Ren, L. Wang, T. Li, B. Wei, "Molecular investigation on the compatibility of epoxy resin with liquid oxygen," *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, vol. 10, no. 1, pp. 38–45, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.taml.2019.06.010.

[29] "Solid density of 3D-printed resin parts| Liqcreate." Accesat: Nov. 28, 2024. [Online], https://www.liqcreate.com/supportarticles/solid-density-of-3d-printed-resin-parts-after-post-processing.

[30] A. Mukhangaliyeva, D. Dairabayeva, A. Perveen, D. Talamona, "Optimization of Dimensional Accuracy and Surface Roughness of SLA Patterns and SLA-Based IC Components," *Polymers*, vol. 15, no. 20, 4038, Oct. 2023, doi: 10.3390/polym15204038.

[31] M. Mukhtarkhanov, A. Perveen, D. Talamona, "Application of Stereolithography Based 3D Printing Technology in Investment Casting," *Micromachines*, vol. 11, no. 10, 946, Oct. 2020, doi: 10.3390/mi11100946.

[32] F. Emir, S. Ayyildiz, "Accuracy evaluation of complete-arch models manufactured by three different 3D printing technologies: a three-dimensional analysis," *Journal of Prosthodontic Research*, vol. 65, no. 3, pp. 365–370, 2021, doi: 10.2186/jpr.jpor_2019_579.

[33] C. Arnold, D. Monsees, J. Hey, R. Schweyen, "Surface quality of 3D-printed models as a function of various printing parameters," *Materials*, vol. 12, no. 12, Jun. 2019, doi: 10.3390/ma12121970.

[34] Y. Lu, A. J. Feilzer, L. Wang, A. M. O. Dal Piva, J. P. M. Tribst, I. Nedeljkovic, C. J. Kleverlaan, "Influence of surface finishing and printing layer orientation on surface roughness and flexural strength of stereolithography-manufactured dental zirconia," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 143, 105944, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.jmbbm.2023.105944.

[35] X. Zheng, Z. Li, F. Duan, Z. Song, H. Mo, Y. Song, Y. Su, X. Wang, "A TMPS-designed personalized mandibular scaffolds with optimized SLA parameters and mechanical properties," *Frontiers in Materials*, vol. 9, 966031, Aug. 2022, doi: 10.3389/fmats.2022.966031/bibtex.

[36] **A. Vasile**, D. M. Constantinescu, I. C. Coropețchi, Șt. Sorohan, D. A. Apostol, "Assessment of the additive fabrication quality of sandwich structures with novel triply periodic minimal surface cores," *Solids*, vol. 5, no. 4, pp. 665–680, Dec. 2024, doi: 10.3390/solids5040045.

[37] J. Zhang, S. Xie, T. Li, Z. Liu, S. Zheng, H. Zhou, "A study of multi-stage energy absorption characteristics of hybrid sheet TPMS lattices," *Thin-Walled Structures*, vol. 190, 110989, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.tws.2023.110989.

[38] M. F. Ashby, "The properties of foams and lattices," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 364, no. 1838, pp. 15–30, Jan. 2006, doi: 10.1098/rsta.2005.1678.

[39] **A. Vasile**, D. M. Constantinescu, I. C. Coropețchi, Șt. Sorohan, D. A. Apostol, "Definition, Fabrication, and Compression Testing of Sandwich Structures with Novel TPMS-Based Cores," *Materials*, vol. 17, no. 21, 5150, Oct. 2024, doi: 10.3390/ma17215150.

[40] **A. Vasile**, I. C. Coropețchi, A. I. Indreș, D. M. Constantinescu, Șt. Sorohan, D. A. Apostol, "Response of sandwich structures with novel tpms cores under cyclic uniaxial compression," *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, vol. 63, Mar. 2025.

[41] **A. Vasile**, D. M. Constantinescu, A. I. Indreș, I. C. Coropețchi, Șt. Sorohan, D. A. Apostol, "Numerical simulation of compressive testing of sandwich structures with novel triply periodic minimal surface cores," *Materials*, vol. 18, no. 2, 260, Jan. 2025, doi: 10.3390/MA18020260.

[42] M. T. Dehkordi, H. Nosraty, M. M. Shokrieh, G. Minak, D. Ghelli, "Low velocity impact properties of intra-ply hybrid composites based on basalt and nylon woven fabrics," *Materials & Design*, vol. 31, no. 8, pp. 3835–3844, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2010.03.033.

[43] C. J. Ejeh, I. Barsoum, R. K. Abu Al-Rub, "Impact behavior of periodic, stochastic, and anisotropic minimal surface-lattice sandwich structures," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 276, 109359, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2024.109359.