



Domeniul Inginerie Industrială

TEZĂ DE DOCTORAT

- REZUMAT -

**Cercetări privind dezvoltarea de noi fractali de tip arbore pentru
piese metalice realizate prin LPBF**

Student-doctorand:
Anca Viorica
Stanciu Bîrlescu

Conducător științific:
Prof. Dr. Ing. Nicolae BÂLC

Comisia de evaluare a tezei de doctorat:

Președinte: Prof. Dr. Ing. **Daniela Popescu** - Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca;

Conducător științific: Prof. Dr. Ing. **Nicolae Bâlc** - Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca;

Referenți:

- Prof. Dr. Ing. **Cristian Doicin** - Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București;

- Prof. Dr. Ing. **Gheorghe Oancea** - Universitatea Transilvania din Brașov;

- Prof. Dr. Ing. **Marian Borzan** - Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca.

**- Cluj-Napoca -
2025**

Cuprins

Abrevieri.....	5
1 Introducere	7
2 Stadiul actual al structurilor interne în piesele SLM	11
2.1 Fabricația aditivă	11
2.2 Topirea selectivă cu laser.....	13
2.3 Materiale utilizate în SLM	19
2.4 Structuri interne	20
2.5 AM inspirată din natură.....	24
2.6 Fractali utilizați în fabricația aditivă.....	28
2.7 Metode de generare a fractalilor de tip arbore.....	31
2.8 Concluzii	36
3 Motivație și obiectivele cercetării	39
4 Model computațional pentru structurile fractal de tip arbore	41
4.1 Context matematic.....	43
4.2 Modelare matematică a structurilor fractal de tip arbore	44
4.3 Model computațional pentru intersecția fractal-suprafața	52
4.4 Generarea de volum pentru structura de fractal	56
4.4.1 Metoda computațional geometrică.....	57
4.4.2 Metoda CAD	65
4.4.3 Comparatie între metoda geometrică și metoda CAD.....	67
4.5 Studii de caz.....	67
4.5.1 Generarea fractalilor prin utilizare metodei geometrice.....	67
4.5.2 Generarea fractalilor într-o emisferă utilizând metoda CAD	69
4.5.3 Generarea epruvetelor cu fractali utilizând metoda CAD	70
4.6 Concluzii	73
5 Cercetări experimentale privind fabricarea și testarea pieselor SLM cu structuri de fractali încorporate	75
5.1 Metode, Materiale și rezultate.....	76
5.1.1 Proiectarea CAD a epruvetelor.....	76
5.1.2 Fabricarea SLM a epruvetelor	83
5.1.3 Analiză cu element finit.....	91
5.1.4 Testarea mecanică a epruvetelor	97
5.2 Comparatie preliminară a testelor experimentale – Interpretarea rezultatelor	105
5.3 Model predictibil pentru epruvetele de încovoiere cu fractali de tip arbore	107
5.3.1 Teste experimentale pentru încovoiere	108
5.3.2 Model bazat pe date, pentru încovoiere.....	110
5.3.3 Interpretarea rezultatelor	113

5.4	Comparație între fractalii de tip arbore și structurile lattice	124
5.5	Concluzii	128
6	Studii de caz pentru metodele propuse	131
6.1	Metode si materiale.....	131
6.2	Studiu de caz 1 – Mandriă.....	133
6.3	Studiu de caz 2 – Cască.....	138
6.4	Ghid.....	144
6.5	Concluzii	146
7	Concluzii finale, contribuții și perspective de viitor	149
7.1	Concluzii generale.....	149
7.2	Contribuții.....	152
7.3	Perspective de viitor	153
	Referințe	155
	Listă cu figuri	163
	Listă cu tabele.....	167
	Anexe	169
	Listă cu publicații	177

Introducere

Fabricația aditivă (AM), cunoscută și sub denumirea de printare 3D, a evoluat într-o tehnologie versatilă de fabricație care poate să producă piese cu geometrii complexe și cu greutate redusă și piese personalizate. Dintre tehnologiile AM, topirea selectivă cu laser (SLM), parte a procesului de fuziune cu laser cu pat de pulbere (LPBF), este una dintre cele mai utilizate metode pentru fabricarea pieselor metalice complexe și de înaltă densitate, cu structuri interne. Cele mai cunoscute și studiate structuri interne sunt structurile lattice, care au o celulă unitară ce se repetă pentru a umple spațiul. Similar cu structurile lattice, fractalii au proprietatea de a umple spațiul, dar aici geometria nu este doar repetată, ci este și scalabilă, menținând toate caracteristicile geometrice. Paradigma elementelor inspirate din natură în inginerie nu este una nouă. De fapt, majoritatea structurilor lattice sunt inspirate din natură (ex. fagurele), iar conceptul de biomimetică (unde structurile găsite în natură sunt optimizate și implementate în aplicații ingineresti) este bine stabilit chiar și pentru tehnologia SLM.

Fractalii sunt structuri întâlnite în natură, precum frunzele de ferigă, fulgii de zăpadă și vasele de sânge. Caracteristicile fractalilor includ structura similară, geometria recurentă, capacitatea de a scala infinit geometria și pot fi descriși prin funcții iterative. Cei mai cunoscuți fractali sunt: Mandelbrot, fulgul Koch, curba Hilbert, buretele Menger, triunghiul Sierpinski și alții. Structurile cu fractali au aplicații în grafică pe calculator, procesare și analiză de imagini, medicină, artă, telecomunicații și multe altele.

Motivația și obiectivul principal al acestei lucrări este de a **studia fezabilitatea utilizării fractalilor de tip arbore în SLM ca structuri interne**, prin dezvoltarea de instrumente pentru a studia proprietățile mecanice ale acestora în funcție de diverși parametri. Acest lucru necesită modele matematice și algoritmi numerici care sunt utilizați pentru a crea fractali și pentru a popula modelele CAD cu fractali de tip arbore. În plus, pentru a determina fezabilitatea fractalilor de tip arbore, sunt necesare teste experimentale pentru a studia proprietățile lor mecanice. Se vor fabrica epruvetele CAD cu fractali, folosind SLM, pentru a le testa apoi. Materialul utilizat va fi oțel de scule. Experimentele de laborator vor fi efectuate pe epruvetele fabricate pentru a colecta date care vor fi utilizate pentru a dezvolta modele numerice care să prezică relația dintre parametrii fractalilor (asupra cărora avem control complet) și proprietățile mecanice. Această lucrare reprezintă un prim pas în studiul fractalilor de tip arbore ca structuri interne în SLM, și se va propune un ghid scurt pentru utilizarea acestora. Cu cercetări viitoare, mai multe proprietăți ale fractalilor de tip arbore pot fi descoperite, iar ghidul poate fi extins, devenind baza unor noi tehnici de design generativ.

Obiectivele specifice propuse pentru atingerea obiectivului principal sunt:

- 01:** Cercetarea stadiului actual privind SLM și elemente inspirate din natură.
- 02:** Dezvoltarea unui model computațional pentru generarea fractalilor de tip arbore și integrarea acestora în modelele CAD.
- 03:** Proiectarea și fabricarea de epruvete prin SLM, cu diferiți parametrii geometrici. Teste preliminare asupra comportamentului noilor structuri fractal în piesele SLM.
- 04:** Determinarea proprietăților mecanice a fractalilor de tip arbore prin analiza cu element finit și teste experimentale.
- 05:** Validarea structurilor fractal de tip arbore în piese fabricate prin SLM și propunerea unor aplicații fezabile.

Stadiul actual al structurilor interne în piesele SLM

Fabricația aditivă (AM) a evoluat semnificativ, oferind noi posibilități pentru prototipare rapidă și producție industrială. Una dintre cele mai folosite tehnici de AM pentru metale este topirea selectivă cu laser (SLM) — un proces de fuziune cu pat de pulbere care utilizează un laser de mare putere pentru a topi și a fuziona pulberile metalice strat cu strat. Această metodă permite crearea de piese cu geometrii interne complexe și o densitate aproape completă, comparabilă cu piesele turnate [1, 4].

Procesul începe cu un model CAD 3D care este secționat în straturi și transformat într-un fișier .STL. Imprimanta întinde pulberea metalică pe platforma de lucru; laserul topește selectiv pulberea conform designului fiecărui strat. După fiecare strat, platforma de lucru coboară și un nou strat de pulbere este aplicat. Gaze inerte precum argonul creează un mediu sigur, fără oxidare. După finalizarea imprimării, piesa trece prin etape de post-procesare, inclusiv îndepărtarea structurilor de suport, tratament termic și finisare a suprafeței [1, 9]. Parametrii de proces, precum puterea laserului, viteza de scanare, grosimea stratului și strategia de scanare, sunt esențiali pentru calitatea finală a piesei. Parametrii incorecți pot duce la defecte precum porozitate sau tensiuni reziduale [4, 9]. SLM poate procesa o gamă largă de materiale: aliaje de titan (ex. Ti6Al4V), oțeluri (ex. oțel de scule 1.2709, oțel inoxidabil 316L), aliaje de aluminiu, aliaje de nichel și chiar ceramică [22, 24].

Aplicațiile pot fi în industria aerospațială (structuri ușoare precum paletele turbinelor), industria auto, medicină (implanturi, structuri poroase), schimbătoare de căldură, scule așchietoare și matrițe cu canale de răcire [3, 15, 16]. Avantajul major al SLM este capacitatea de a fabrica piese cu structuri interne tip lattice, care reduc greutatea păstrând în același timp rezistența. Acestea permit o absorbție mai bună a energiei, gestionare termică și performanță mecanică [3, 5, 41]. Cercetătorii optimizează structurile lattice prin optimizare topologică și studiază impactul tipului de celulă unitară, grosimea ramurilor și geometria [25, 27].

Designurile inspirate din natură sunt intens studiate în AM. Exemplele includ rețele hiperboloide inspirate din carapacea gândacilor, structuri biomorfe de bambus pentru absorbția energiei și structuri de tip diatom sau bureți de sticlă pentru aplicații cu suprafață mare [27, 28, 49]. Aceste soluții bio-inspirate combină rezistența cu eficiența la greutate, fiind de folos în aplicații aerospațiale și medicale [15]. Fractalii sunt structuri complexe, auto-similare, întâlnite în natură și sunt de asemenea explorați în AM. Geometrii de fractali precum curbele Hilbert, curbele Koch și buretele Menger au fost utilizate ca structuri de umplere sau strategii de scanare pentru a reduce tensiunile reziduale și porozitatea [35, 36]. Fractalii de tip arbore sunt folosiți în principal ca structuri de suport și nu ca structuri interne; aceștia pot minimiza consumul de material și timpul de post-procesare [31, 32, 62]. Algoritmii actuali pentru generarea fractalilor de tip arbore se bazează adesea pe sisteme L, sisteme de funcții iterative sau algoritmi genetici pentru a optimiza geometria pentru susținerea suprafețelor. Totuși, aplicarea acestor fractali ca structuri interne în AM pentru metale rămâne un domeniu puțin explorat, oferind potențial pentru cercetări viitoare [60, 63].

Fractalii de tip arbore ca structuri interne în AM pentru piese metalice reprezintă o cale nouă care necesită dezvoltarea de noi modele matematice și algoritmi pentru a valorifica beneficiile acestora. Cercetări continue privind proprietățile mecanice, performanța structurală și aplicațiile practice sunt necesare pentru a extinde utilizarea fractalilor dincolo de structurile de susținere și către designuri funcționale complet integrate.

Model computațional pentru structuri fractal de tip arbore în fabricația aditivă

Secțiunea prezentată introduce un nou model computațional conceput pentru generarea și integrarea structurilor fractal de tip arbore ca structuri interne în piese produse prin fabricația aditivă, cu accent pe topirea selectivă cu laser (SLM). Spre deosebire de structurile de tip lattice convenționale utilizate frecvent în fabricația aditivă a metalelor, fractalii oferă o strategie inovatoare de design inspirată din forme naturale precum arborii, sistemele vasculare sau rețelele de rădăcini. Această abordare bio-inspirată permite geometrie complexă, capabilă să umple spațiul, reducând în același timp greutatea și menținând sau chiar îmbunătățind performanțele mecanice.

Modelul computațional descris în această secțiune are la bază fundamente matematice. Matricele de transformare omogenă, care sunt standard în cinematică și robotică, formează baza procesului de generare a fractalilor. Fiecare nod și ramură dintr-o structură de fractali este definită precis folosind transformări care combină rotații și translații. Modelul descrie o relație clară părinte-copil între noduri, asigurând că direcția, lungimea și orientarea fiecărei ramuri sunt calculate într-un mod coerent și repetabil. Această rigoare matematică permite ca structurile de fractali să fie scalabile, flexibile și ușor de personalizat.

Datele fiecărui fractal sunt reprezentate sub formă tabelară clară. Poziția fiecărui nod, unghiurile și lungimile corespunzătoare sunt stocate într-un format structurat, ceea ce facilitează implementarea întregului algoritm în programe care suportă operații vectoriale, precum Matlab sau Python. Procesul începe prin definirea parametrilor de intrare, incluzând originea fractalului, unghiurile ramurilor, lungimile și nivelele, dorită de recursivitate. Odată ce tabelul este construit, coordonatele nodurilor sunt calculate recursiv. Această abordare sistematică permite proiectantului să controleze simetria sau asimetria fractalului, oferind libertate în adaptarea geometriei interne pentru nevoi specifice.

Un alt aspect al modelului computațional este metoda sa de integrare a fractalilor în cavitățile pieselor CAD existente. Deoarece fractalii sunt prin natura lor expansivi, aceștia trebuie decupați pentru a nu depăși limitele piesei (figura 1). Pentru a realiza acest lucru, modelul folosește un algoritm de intersecție suprafață–fractal bazat pe metoda de intersecție rază/triunghi. Acest lucru asigură că ramurile care intersectează suprafața cavității sunt identificate corect și tăiate la punctele de intersecție. Ramurile tăiate sunt apoi eliminate din calculele ulterioare pentru a evita artefactele nedorite. Acest pas garantează că structura internă finală se conformează precis formei piesei.

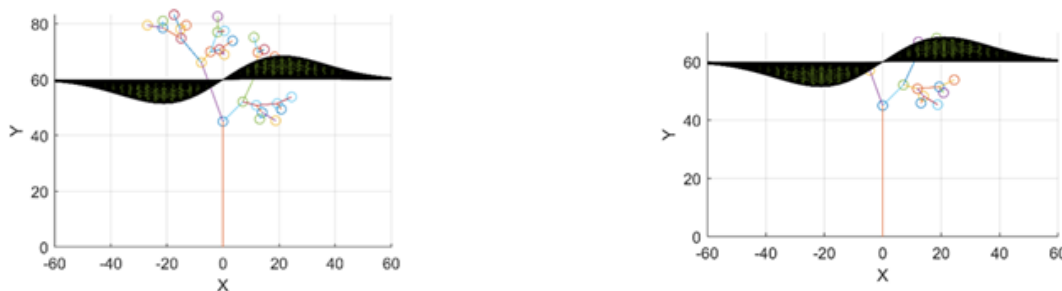


Figura 1. Exemplu de fractal decupat

Dincolo de generarea și decuparea fractalilor, lucrarea detaliază două strategii pentru conversia datelor abstracte ale nodurilor și ramurilor în volume 3D ce se pot fabrica: Metoda geometrică computațională (figura 2), care operează direct cu suprafețe; Fiecare ramură este construită ca un cilindru, ramurile care se intersectează sunt îmbinate la noduri, iar întreaga structură de fractali este fuzionată cu piesa. Metoda CAD, care folosește instrumente software CAD pentru a genera fiecare ramură ca cilindru, o rotește și o translatează în poziția corectă, apoi o îmbină cu modelul piesei; Decuparea se poate face utilizând negativul piesei ca unealtă de tăiere.

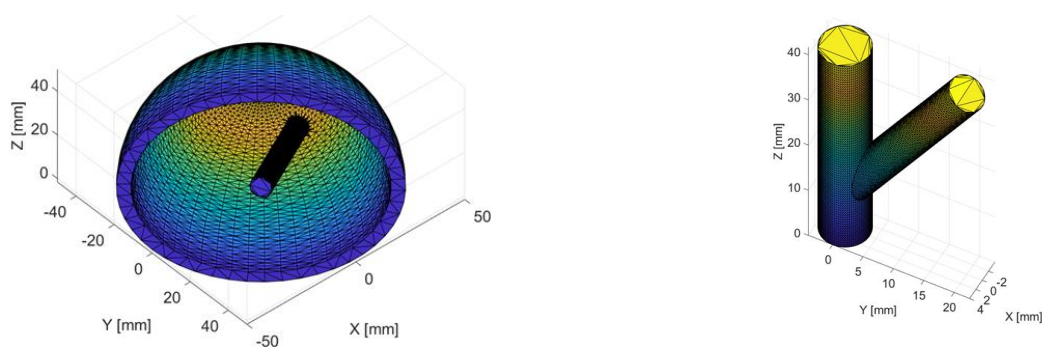


Figura 2. Modelul computațional geometric

Utilitatea practică a modelului propus a fost demonstrată prin mai multe studii de caz (figura 3). Un exemplu implică o placă plană combinată cu o cavitate cu suprafață curbată, care a fost umplută cu patru structuri de fractali distincte. Fiecare fractal a fost definit prin parametri de intrare unici, cum ar fi lungimi variabile ale ramurilor, unghiuri și niveluri de adâncime, subliniind capacitatea sistemului de a gestiona geometrii complexe, cu origini multiple. Un alt exemplu, prezintă o piesa tip emisfera cu douăzeci și patru de fractali de tip arbore, evidențiind scalabilitatea modelului și capacitatea sa de a se adapta la cavități de formă organică – tipice aplicațiilor biomedicale sau componentelor ușoare pentru industria aerospațială. De asemenea, sunt prezentate epruvete de testare simple proiectate pentru experimente mecanice, inclusiv probe de compresie și încovoiere în care părți plane sunt conectate prin mai mulți fractali.

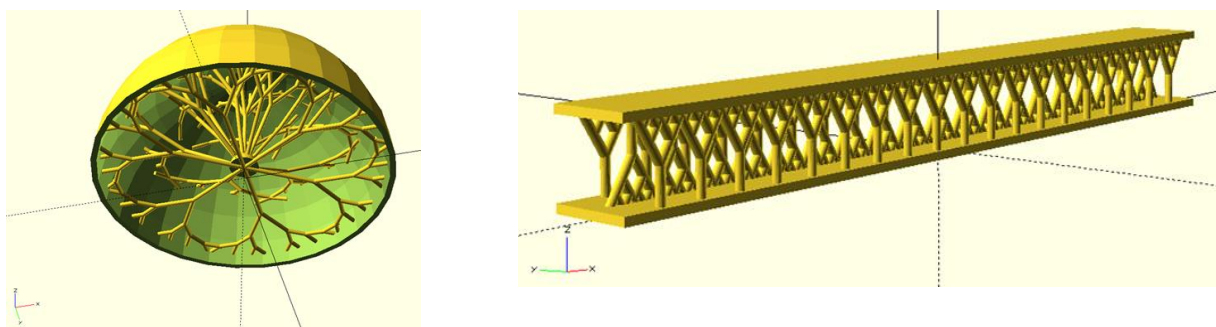


Figura 3. Studii de caz

În concluzie, modelul computațional pentru structuri fractal de tip arbore reprezintă un pas important în proiectarea structurilor interne pentru fabricația aditivă a pieselor metalice. Acesta combină precizia matematică cu strategii practice de implementare, asigurând că structurile de umplere rezultate sunt posibil de fabricat, coerente din punct de vedere structural și adaptate specificațiilor proiectantului. Natura recursivă a fractalilor îi face deosebit de potriviți pentru diverse designuri, care pot fi exploatate pentru a îmbunătăți raportul rigiditate-greutate, absorbția de energie și chiar managementul termic al pieselor metalice.

Cercetări experimentale privind fabricarea și testarea pieselor SLM cu structuri de fractali încorporate

În această secțiune sunt prezentate toate detaliile privind testarea experimentală a fractalilor de tip arbore, inclusiv fabricarea și simulările. În plus, este propus un model predictiv, și o comparație cu structurile lattice.

Primul pas a fost proiectarea CAD a epruvetelor de testare, folosind software-ul Siemens NX. Geometriile de fractal au fost dezvoltate parametric, permițând modificarea ușoară a acestora prin ajustarea unor parametri precum: lungimea ramurilor, unghiurile de ramificare (notate cu α) și diametrul ramurilor. Această flexibilitate parametrică a permis testarea mai multor configurații fără a fi nevoie de reconstruirea modelelor de la zero.

Pentru a determina printabilitatea și cât de robuste sunt aceste structuri, au fost create inițial mostre cu diametre variabile ale ramurilor: $\varnothing 0.5$ mm, $\varnothing 0.7$ mm și $\varnothing 1$ mm. Observațiile din testele preliminare au demonstrat că ramurile mai subțiri de 0.7 mm tind să se deformeze din cauza tensiunilor termice apărute în timpul printării, în timp ce ramurile mai groase ofereau o stabilitate mai bună, dar adăugau greutate inutilă. Diametrul de $\varnothing 0.7$ mm a fost ales ca un compromis optim pentru epruvetele următoare.

Au fost proiectate diferite epruvete pentru a determina comportamentul și proprietățile mecanice fractalilor la compresiune (figura 4), încovoiere (figura 5) și tracțiune (figura 6). Două configurații, denumite S și SJ (cu unghiul $\alpha = 35^\circ$), au fost studiate — diferența dintre ele fiind că în SJ rândurile de fractali sunt inversate alternativ pentru a studia efectul orientării asupra comportamentului la flambaj. Epruvetele pentru încovoiere au fost mai complexe, conținând până la 57 de fractali aranjați în trei rânduri într-o structură subțire de tip placă. Prin varierea unghiului α (între 25° și 45°), cercetarea a investigat sistematic cum influențează geometria performanța la încovoiere. Pentru testele de tracțiune, au fost proiectate două configurații cu două rânduri de fractali: una cu toți fractalii aliniați identic și alta cu fiecare al doilea fractal inversat.

Pentru comparație în testele de încovoiere, au fost proiectate și probe cu structuri lattice convenționale, având diametre similare ale ramurilor și dimensiuni echivalente ale celulei unitare, pentru a asigura o evaluare corectă față de epruvetele cu fractali încorporați.

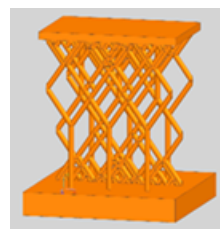
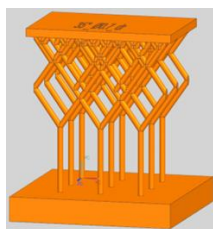


Figura 4. Epruvete pentru compresiune S și SJ, modele CAD

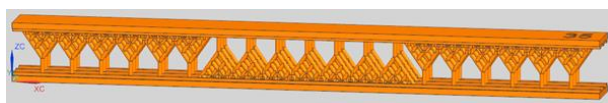


Figura 5. Epruvete pentru încovoiere S și SJ, modele CAD



Figura 6. Epruvete pentru tracțiune SJ și SJ-1, modele CAD

Toate epruvetele au fost produse pe imprimanta SLM Renishaw AM400, utilizând oțel de scule 1.2709 (M300). Acest oțel are rezistență mare și este potrivit pentru inserții de matrițe și piese structurale ce necesită proprietăți excelente de tracțiune și curgere. Parametrii de proces au inclus: puterea laserului de 200 W, viteza de scanare de până la 2 m/s și grosimea stratului de 40 μm . Orientarea pieselor pe platforma de lucru și suporti de sprijin au fost luați în considerare, deoarece ramurile fractalilor pot ridica provocări privind disiparea căldurii și stabilitatea dimensională. După printare, suporti au fost îndepărtați manual sau pe mașina de tăiat cu fir (EDM), urmate de o lustruire ușoară a suprafețelor. Nu s-au aplicat tratamente termice, astfel că rezultatele reflectă condiția materialului „așa cum a fost fabricat”.

Analiza cu Elemente Finite (FEA) a fost realizată în ANSYS pentru a simula comportamentul mecanic al epruvetelor cu fractali. Pentru simulări s-au utilizat proprietăți elastice ajustate pentru posibile defecte de imprimare, care pot reduce local modulul lui Young în regiunea cu fractali. Condițiile de limită au fost adaptate pentru a imita dispozitivele de testare reale: pentru compresie s-a aplicat o forță pe placa superioară; pentru încovoiere s-a replicat un dispozitiv de testare în 3 puncte; iar pentru tracțiune, capetele epruvetelor au fost fixate și trase până la rupere. Testele de calibrare au confirmat că rezultatele simulărilor sunt asemănătoare cu datele experimentale, cu o marjă de eroare sub 10%, oferind încredere în predicțiile numerice.

Testele experimentale au fost efectuate pe mașini de încercat universale Instron. La compresie, configurația SJ a rezistat la sarcini mai mari decât configurația S, demonstrând că orientarea influențează rezistența și comportamentul la flambaj (figura 7).

Pentru testele de încovoiere, rezultatele au arătat că unghiul α joacă un rol esențial: pe măsură ce α creștea, curbele forță-deplasare se modificau sistematic, confirmând o relație cauzală între geometria fractalilor și comportamentul la încovoiere (figura 8). Deși configurația S a rezistat la sarcini maxime mai mari, aceasta era mai predispusă la fracturi locale în punctele slabe, vizibile ca vârfuri în curbele tensiune-deformație. În schimb, configurația SJ s-a deformat mai uniform, indicând o transmitere mai distribuită a sarcinilor.

Pentru testele de tracțiune, orientarea fractalilor a influențat, de asemenea, rezultatele. Epruvetele cu orientare alternantă a fractalilor au obținut sarcini maxime mai mari și o întârziere a inițierii ruperii, sugerând că aranjarea fractalilor poate influența ductilitatea (figura 9).



Figura 7. Epruvete S și SJ după compresie



Figura 8. Epruvete S și SJ după încovoiere



Figura 9. Epruvete SJ și SJ-1 după tractiune

O comparație între fractalii de tip arbore și structurile lattice a fost realizată pe baza testelor de încovoiere. Deși structurile lattice au prezentat o rezistență în general mai mare, acestea au avut deformări locale concentrate în punctele de aplicare a forței. În schimb, structurile fractal de tip arbore s-au deformat global, menținând paralelismul plăcilor și distribuind energia mai uniform. În figura 10 sunt reprezentate diferențele.

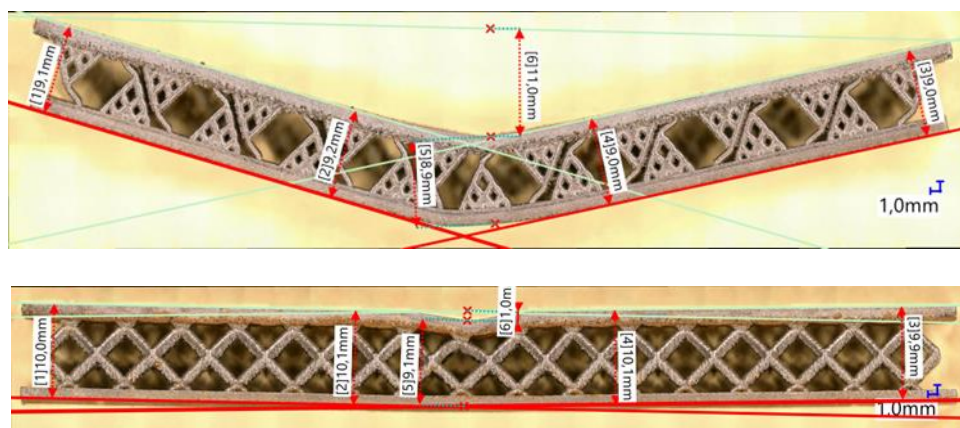


Figura 10. Diferențe dintre epruvetele cu fractali și epruvetele cu lattice, după încovoiere

Deși rezistența absolută a structurilor lattice a fost superioară, deformarea mai uniformă a fractalilor sugerează aplicații promițătoare pentru absorbția de energie, precum echipamente de protecție sau zone de impact la accidente.

Pe baza relației consistente observate între unghiul ramurii α și comportamentul mecanic, a fost propus un model numeric de regresie pentru a prezice curbele tensiune-deformație în testele de încovoiere. Acest model, bazat pe ajustări polinomiale, a atins o precizie statistică ridicată (valori R^2 aproape de 1). Validarea cu epruvete suplimentare a confirmat fiabilitatea sa, cu erori de predicție încadrate în variabilitatea experimentală naturală (figura 11).

Un astfel de model predictibil le permite inginerilor să adapteze structurile interne cu geometria de fractali în funcție de cerințele specifice privind comportamentul la încovoiere, fără a se baza exclusiv pe teste de tip trial and error.

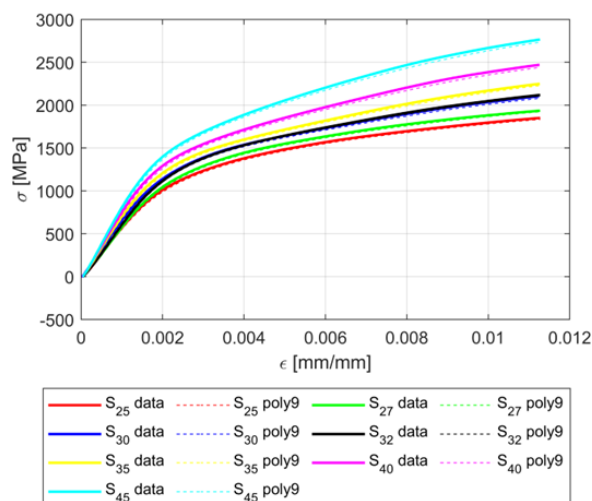


Figura 11. Comparație între modelul calculat și datele experimentale, pentru epruvetele S

Studii de caz pentru metodele propuse

Au fost alese două studii de caz pentru a demonstra posibile aplicații ale pieselor care conțin structuri fractal de tip arbore ca structuri interne. Apoi, este prezentat un scurt ghid privind modul de alegere și aplicare a fractalilor dezvoltati.

Primul studiu de caz implică utilizarea fractalilor de tip arbore în interiorul unei mandrine de fretare (figura 12). Scopul principal este de a demonstra cum geometria fractalilor poate fi folosită pentru a reduce greutatea unei mandrine metalice solide, menținând în același timp performanțele mecanice și dinamice necesare. A fost proiectat un model CAD simplificat al mandrinei, care include o cavitate internă ce va fi umplută cu structuri de fractal. Această cavitate are pereți cu grosime de 1 mm pentru a asigura integritatea structurală și a fost inclusă doar în zona care susține scula de așchietoare.

Fractalii de tip arbore au fost proiectați în perechi, oglindiți față de punctele lor de origine. Această dispunere simetrică ajută la menținerea echilibrului în interiorul mandrinei aflate în rotație și asigură ca „coroanele” fractalilor să atingă și să intersecteze atât cu pereții conici exteriori, cât și cu suprafața cilindrică. În total, au fost creați zece fractali principali, fiecare crescând progresiv de la baza conului către partea superioară. În fiecare strat, adâncimea fractalului a fost definită pe patru nivele, permițând ramurilor să se extindă și să se suprapună într-un mod controlat.

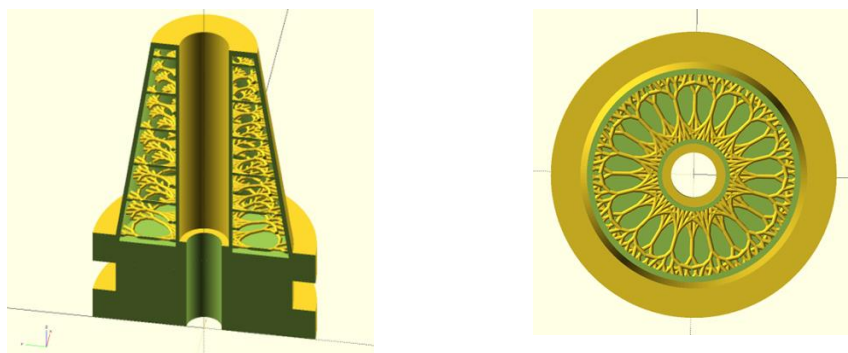


Figura 12. Secțiune din mandrina cu fractali de tip arbore

În secțiune, fractalii pot fi observați intersectând pereții conici, zona cilindrică de prindere și chiar între ei în cadrul aceluiași strat, creând o rețea densă, dar bine distribuită.

Deși promițător din punct de vedere tehnic, acest design rămâne unul conceptual și nu a fost fabricat. Este important de menționat că producerea unei mandrine cu fractali ca structuri interne ar necesita respectarea strictă a regulilor de proiectare pentru fabricarea aditivă, precum și testare funcțională în condiții reale de prindere a sculelor.

Cel de-al doilea studiu de caz este proiectarea unei căști de protecție care conține fractali de tip arbore pentru absorbția energiei de impact (figura 13). Casca trebuie să atingă un echilibru între rezistență și capacitate de deformare controlată, asigurând absorbția eficientă a șocurilor și protejarea capului purtătorului.

Pentru această aplicație, „rădăcinile” fiecărui fractal sunt poziționate de-a lungul emisferei interioare a carcasei căștii, în timp ce „coroanele” cresc spre exterior, umplând cavitatea și intersectând suprafața exterioară. Au fost utilizate șaisprezece rânduri principale, formând „coroane” concentrice care se extind de la baza emisferei până în vârf. Adâncimea fractalului a fost setată la patru nivele, iar unghiurile ramurilor au fost alese astfel încât să asigure o distribuție echilibrată. Lungimea ramurilor fractalilor a fost menținută pe toate rândurile la fel, pentru a oferi o distribuire uniformă a materialului pentru absorbția șocului.

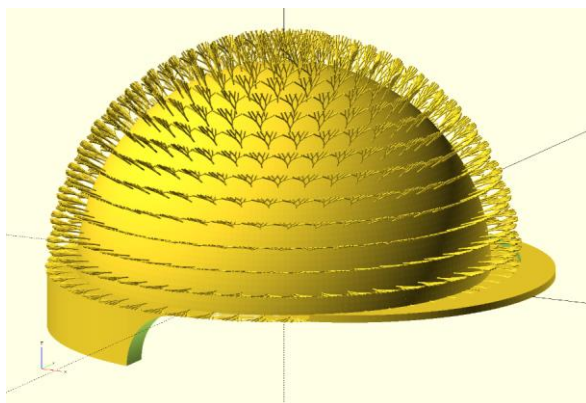


Figura 13. Casca cu fractali de tip arbore

Modelul CAD final arată casca fără carcasa exterioară, pentru a evidenția rețeaua complexă de fractali aranjați pe rânduri sub formă de coroană. Această configurație arată modul în care structurile fractal de tip arbore pot oferi o arhitectură ierarhică pentru disiparea forțelor de impact, distribuind energia pe mai multe niveluri, în loc să o concentreze în puncte discrete.

Conceptul de cască nu a fost fabricat fizic și testat în cadrul acestui studiu. Autorii menționează că, deși fractalii interni ajută la reducerea greutății și pot îmbunătăți performanța la impact, o cască realizată prin fabricație aditivă din metal ar putea fi totuși mai grea decât căștile convenționale din polimeri. Mai mult, ar fi necesare teste extinse de absorbție a șocurilor pentru a valida dacă fractalii de tip arbore oferă într-adevăr avantaje de performanță față de alte structuri interne, cum ar fi spumele sau structurile lattice standard.

Pe baza caracterizării inițiale a comportamentului structurilor fractal prezentate în această cercetare, este propus un ghid preliminar. Totuși, sunt necesare cercetări suplimentare pentru a înțelege pe deplin comportamentul acestor structuri în diferite condiții.

Parametrii geometrici ai fractalului trebuie aleși cu grijă, în funcție de aplicația dorită și performanțele mecanice necesare ale piesei. De exemplu, un unghi de ramificare mai mic permite fractalului să ajungă mai repede la suprafața carcasi, dar poate acoperi mai puțin din suprafața internă, în timp ce un unghi mai mare poate duce la o umplere mai uniformă și o structură mai densă. Lungimea ramurilor trebuie fie echilibrată între extindere și compactare. Ramurile mai lungi pot intersecta mai repede carcasa, dar riscă să o depășească, în timp ce cele scurte necesită mai multe nivele pentru a umple volumul eficient și poate rezulta o structura mai densă.

Grosimea ramurilor este esențială. Trebuie să se încadreze în capacitățile procesului SLM pentru a evita defectele de imprimare precum îndoirea nedorită. Pe baza acestei cercetări, un diametru minim de 0.7 mm este recomandat. Acest parametru trebuie ajustat în funcție de materialul și imprimantele utilizate, dar și de cerințele funcționale ale piesei.

Densitatea și orientarea fractalilor influențează semnificativ performanța. O densitate mai mare poate crește rigiditatea, dar și greutatea totală. Fiecare fractal poate avea o origine și direcție unică, ceea ce oferă libertate de design, dar necesită planificare atentă pentru a evita probleme la printare, cum ar fi suprafețe nesustținute.

Analiza cu Elemente Finite (FEA) poate prezice distribuția tensiunilor și identifica punctele slabe, dar are limitări, în special când vine vorba de simularea procesului real SLM. După cum reiese din această cercetare, rezultatele simulărilor se aliniază cu datele experimentale în principal în domeniul elastic liniar, dar pot diferi în condiții mai complexe. Testarea experimentală rămâne esențială pentru o evaluare exactă. Testele de încovoiere realizate în acest studiu au demonstrat, de exemplu, că unghiurile de ramificare mai mici tind să se îndoaie mai ușor, în timp ce unghiurile mai mari pot avea rezistență mai mare înainte de a se deforma.

În ceea ce privește materialele și parametrii de proces, ghidul rămâne flexibil. În acest studiu a fost utilizat doar oțelul de scule 1.2709, datorită disponibilității sale și performanțelor cunoscute în procesul SLM. Metodele de post-procesare, îndepărtarea suporturilor și orientarea pieselor trebuie, de asemenea, stabilite în funcție de proprietățile specifice ale materialului și de funcția finală a piesei. Testele inițiale și modelul predictibil dezvoltate în această cercetare oferă un punct de plecare pentru astfel de ajustări.

Concluzii și contribuții

Obiectivul principal al tezei, studiul fezabilității introducerii fractalilor ca structuri interne în piese fabricate prin topire selectivă cu laser (SLM) pentru diferite aplicații, a fost atins prin realizarea obiectivelor specifice. Următoarele concluzii au fost identificate după realizarea cercetărilor pentru fiecare obiectiv:

O1: Cercetarea stadiului actual privind SLM și elemente inspirate din natură.

- Fractalii sunt elemente naturale folosite frecvent în fabricația aditivă pentru proprietățile lor de umplere a spațiului. Fractalii de tip arbore sunt utilizați în producția prin SLM, dar doar ca structuri de sprijin. Proiectarea fractalilor de tip arbore este limitată de parametrii geometrici, iar generarea lor începe de la suprafața piesei până în partea de jos.
- Cercetarea stadiului actual privind aplicabilitatea fractalilor în fabricația aditivă, cu accent pe SLM, a evidențiat o lipsă: fractalii de tip copac nu sunt folosiți ca structuri

interne pentru piesele SLM, fiind necesar un nou algoritm pentru generarea lor. În plus, sunt necesare și studii privind comportamentul lor mecanic.

02: Dezvoltarea unui model computațional pentru generarea fractalilor de tip arbore și integrarea acestora în modelele CAD

- A fost dezvoltat un model computațional pentru generarea structurilor fractal de tip copac (ca structuri interne pentru piesele SLM).
- Metoda computațională este ușor scalabilă și oferă flexibilitate asupra parametrilor geometrici: originea fractalului, numărul de nivele, lungimea și diametrele ramurilor (pe fiecare nivel) și unghiurile dintre ramuri.
- Au fost definite două metode pentru generarea fractalilor de tip arbore (în 3D): o metodă geometrică (care calculează părți din intersecția suprafețelor) și o metodă CAD (care folosește unelte standard CAD).

03: Proiectarea și fabricarea de epruvete prin SLM, cu diferiți parametrii geometrici. Teste preliminare asupra comportamentului noilor structuri fractal în piesele SLM.

- Au fost proiectate epruvete pentru trei teste mecanice: compresiune, încovoiere și tracțiune. Pentru fiecare test s-au ales două configurații (S și SJ) ale aranjamentului fractalilor de tip arbore, iar pentru testele de îndoire fiecare configurație a avut variații ale parametrului geometric, unghiul dintre două ramuri.
- Probele au fost fabricate cu imprimanta SLM Renishaw AM400, din oțel de scule 1.2709, în trei exemplare. Diametrul potrivit al ramurilor pentru acest studiu a fost de 0.7 mm (diametrul de 0.5 mm s-a deformat în procesul de printare).
- Experimentele de compresiune au arătat că fractalul de tip arbore poate atinge o forță între 1200 și 1600 N, în funcție de configurație. Testele de tracțiune nu au fost concludente și au arătat că designul și aranjamentul fractalilor influențează rezultatele. Pentru probele SJ a fost necesară o forță de 7000 N, în timp ce pentru SJ-1 forța a fost aproape dublă. Probele pentru încovoiere au avut un comportament uniform și au rezistat peste 1300 N. Probele pentru îndoire au fost alese pentru cercetări detaliate.
- Din toate testele mecanice preliminare s-a putut concluziona că geometria de fractali și aranjamentul/configurația lor influențează proprietățile mecanice.

04: Determinarea proprietăților mecanice a fractalilor de tip arbore prin analiza cu element finit și teste experimentale.

- Studiul preliminar s-a făcut doar pe epruvete cu unghiul $\alpha=35^\circ$, cu două configurații geometrice. Testele de compresiune, îndoire și tracțiune au fost realizate atât în laborator, cât și prin FEA.
- Experimentele de laborator și analiza FEA au sugerat că parametrii geometrici ai fractalilor de tip arbore influențează comportamentul mecanic al epruvetelor testate.
- Testele de îndoire au fost extinse, iar epruvetele cu configurațiile S și SJ, cu parametri unghi α : 25° , 27° , 30° , 32° , 35° , 40° și 45° , au fost fabricate și studiate. Proprietățile mecanice au arătat că unghiul are o influență semnificativă asupra rezistenței mecanice; pentru ambele configurații, creșterea unghiului α duce la creșterea raportului stres-deformație.

05: Validarea structurilor fractal de tip arbore în piese fabricate prin SLM și propunerea unor aplicații fezabile.

- A fost realizat un model numeric folosind regresie polinomială pentru descrierea curbelor tensiune-deformație obținute experimental. Modelul numeric descrie cu

acuratețe datele, cu erori între 2.5% și 5.7% (în funcție de probă), erori mai mici decât variabilitatea naturală dintre seturile de trei experimente.

- A fost făcută o comparație între structurile fractal de tip arbore și structurile lattice, folosind proprietățile mecanice din testele de îndoire. Structurile fractal au o deformabilitate mai bună și pot avea potențial pentru absorbția de impact. Structurile lattice au avut însă o rezistență mecanică superioară.
- Comportamentul fractalilor de tip arbore poate fi utilizat în aplicații de siguranță, dar și pentru umplerea cavităților. Au fost propuse două studii de caz, unde metodologia pentru introducerea fractalilor în piese a fost explicată în detaliu.

Pentru atingerea obiectivelor principale ale tezei, au fost realizate următoarele contribuții personale:

- Studiu consistent a literaturii privind structurile interne utilizate în piesele metalice realizate prin SLM. Cercetare extinsă asupra stadiului actual privind structurile inspirate din natură și structurile fractal aplicate în fabricația aditivă.
- Dezvoltarea unui model computațional pentru generarea fractalilor de tip arbore bazat pe matrice de transformare omogene, cu parametri de intrare predefiniți pentru geometria fractalilor.
- Dezvoltarea algoritmilor pentru generarea structurilor fractal de tip arbore pentru componente CAD, ținând cont de volum, forme fractalilor și intersecții.
- Proiectarea unor epruvete variate în CAD (NX și Matlab), cu diferiți parametri geometrici pentru structurile fractal, pe baza modelelor computaționale.
- Simularea epruvetelor proiectate cu fractali de tip arbore ca structuri interne folosind Analiza Elementelor Finite.
- Fabricarea probelor și efectuarea experimentelor de laborator pentru compresiune, încovoiere și tracțiune, pentru a determina proprietățile mecanice ale componentelor.
- Dezvoltarea unui model numeric pentru prezicerea comportamentului mecanic al pieselor care conțin fractali de tip arbore, bazat pe curbele tensiune-deformație din testele de încovoiere.
- Compararea structurilor lattice cu noile structuri interne fractali de tip arbore.
- Metodologia pentru implementarea și personalizarea fractalilor în piese, sintetizată într-o schemă logică.
- Propunerea a două studii de caz ca aplicații pentru structurile interne fractal de tip copac.
- Ghid pentru alegerea fractalilor potriviți pentru aplicații, pe baza parametrilor și caracteristicilor fractalilor de tip copac.

Rezultatele cercetării au fost diseminate prin (3 articole în reviste de specialitate, 2 prezentări la conferințe, 2 prezentări sub formă de poster):

- "Computational Model for Tree-like Fractals Used as Internal Structures for Additive Manufacturing Parts", publicat în Applied Sciences (ISI Q1);
- "Analysis of the Mechanical Behavior of Tree-like Fractal Structures in SLM-Manufactured Components", publicat în Materials (ISI Q2);
- "Mechanical properties evaluation of the samples made by SLM, with tree-like fractals internal structure", publicat în Acta Technica Napocensis și prezentat la conferința MTeM, Cluj Napoca, 2023;
- "Tree-Like Fractal Structures Modeling and Their Application in 3D Printed Bones", prezentat la conferința MESROB, Craiova, 2023;
- "Geometrie de tip fractal în piesele fabricate prin SLM", prezentat ca poster la Târgul Internațional ICE-USV Suceava, 2022;

- "Research on improving the internal structures for metal parts made by SLM", prezentat ca poster la conferința Research and Innovation UTCN, Cluj-Napoca, 2025.

Această teză marchează doar un pas inițial în explorarea fractalilor de tip arbore ca structuri interne pentru piesele metalice realizate prin SLM. Sunt necesare cercetări suplimentare pentru a înțelege pe deplin comportamentul mecanic al acestora pentru diferite geometrii și forme, precum și pentru îmbunătățirea modelelor numerice și simulărilor. În viitor, generarea fractalilor ar putea fi chiar automatizată pentru design generativ bazat pe proprietăți dorite. Aplicațiile viitoare pot include implanturi medicale poroase, absorbția de impact și deformabilitatea controlată, urmând ca și alte utilizări să apară pe măsură ce performanța mecanică a acestora va fi mai bine înțeleasă.

Referințe

- [1] Gibson I, Rosen D, Stucker B, Khorasani M. Additive Manufacturing Technologies. Third Edition. Springer; 2021. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>
- [3] Korkmaz ME, Gupta MK, Robak G, Moj K, Krolczyk GM, Kuntoğlu M. Development of lattice structure with selective laser melting process: A state of the art on properties, future trends and challenges. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;81:1040–1063. doi:10.1016/j.jmapro.2022.07.051
- [4] Sefene EM. State-of-the-art of selective laser melting process: A comprehensive review. *Journal of Manufacturing Systems*. 2022;63:250–274. doi:10.1016/j.jmsy.2022.04.002
- [5] Riva L, Ginestra PS, Ceretti E. Mechanical characterization and properties of laser-based powder bed-fused lattice structures: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;113:649–671. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06631-4>/Published
- [9] Gao B, Zhao H, Peng L, Sun Z. A Review of Research Progress in Selective Laser Melting (SLM). *Micromachines*. 2023;14(1). doi:10.3390/mi14010057
- [15] du Plessis A, Broeckhoven C, Yadroitsava I, Yadroitsev I, Hands CH, Kunju R, Bhate D. Beautiful and Functional: A Review of Biomimetic Design in Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2019;27:408–427. doi:10.1016/j.addma.2019.03.033
- [16] Cosma C, Kessler J, Gebhardt A, Campbell I, Balci N. Improving the Mechanical Strength of Dental Applications and Lattice Structures SLM Processed. *Materials*. 2020;13(4):905. doi:10.3390/ma13040905
- [22] Bai Y, Zhang J, Zhao C, Li C, Wang H. Dual interfacial characterization and property in multi-material selective laser melting of 316L stainless steel and C52400 copper alloy. *Materials Characterization*. 2020;167:110489. doi:10.1016/j.matchar.2020.110489
- [24] Gunasekaran J, Sevvel P, Solomon IJ. Metallic materials fabrication by selective laser melting: A review. In: *Materials Today: Proceedings*. Vol. 37. Elsevier Ltd; 2020. p. 252–256. doi:10.1016/j.matpr.2020.05.162
- [25] Xiao Z, Yang Y, Xiao R, Bai Y, Song C, Wang D. Evaluation of topology-optimized lattice structures manufactured via selective laser melting. *Materials & Design*. 2018;143:27–37. doi:10.1016/j.matdes.2018.01.023
- [27] Du Y, Gu D, Xi L, Dai D, Gao T, Zhu J, Ma C. Laser additive manufacturing of bio-inspired lattice structure: Forming quality, microstructure and energy absorption behavior. *Materials Science and Engineering: A*. 2020;773:138857. doi:10.1016/j.msea.2019.138857
- [28] Gu D, Yang J, Wang H, Lin K, Yuan L, Hu K, Wu L. Laser powder bed fusion of bio-inspired reticulated shell structure: Optimization mechanisms of structure, process, and compressive property. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021;35:1–12. doi:10.1016/j.cirpj.2021.04.005
- [31] Zhang Y, Wang Z, Zhang Y, Gomes S, Bernard A. Bio-inspired generative design for support structure generation and optimization in Additive Manufacturing (AM). *CIRP Annals*. 2020;69(1):117–120. doi:10.1016/j.cirp.2020.04.091
- [32] Hünting J, Manuel J, Lozares C, Maiwald MI, Michael J, Emmelmann C, Röver T. Development of a tree-support software module for PBF-LB/M. In: *Lasers in Manufacturing Conference 2023. WLT*; 2023.
- [35] Catchpole-Smith S, Aboulkhair N, Parry L, Tuck C, Ashcroft IA, Clare A. Fractal scan strategies for selective laser melting of ‘unweldable’ nickel superalloys. *Additive Manufacturing*. 2017;15:113–122. doi:10.1016/j.addma.2017.02.002
- [36] Zhao M, Qing H, Wang Y, Liang J, Zhao M, Geng Y, Liang J, Lu B. Superelastic behaviors of additively manufactured porous NiTi shape memory alloys designed with Menger sponge-

- like fractal structures. *Materials & Design.* 2021;200:109448. doi:10.1016/j.matdes.2021.109448
- [41] Alomar Z, Concli F. A Review of the Selective Laser Melting Lattice Structures and Their Numerical Models. *Advanced Engineering Materials.* 2020;22(12). doi:10.1002/adem.202000611
- [49] He M, Li Y, Yin J, Sun Q, Xiong W, Li S, Yang L, Hao L. Compressive performance and fracture mechanism of bio-inspired heterogeneous glass sponge lattice structures manufactured by selective laser melting. *Materials & Design.* 2022;214:110396. doi:10.1016/j.matdes.2022.110396
- [60] L-system. Wikipedia. [accessed 2025 Feb 15]. <https://en.wikipedia.org/wiki/L-system>
- [62] Díaz Lantada A, de Blas Romero A, Sánchez Isasi Á, Garrido Bellido D. Design and Performance Assessment of Innovative Eco-Efficient Support Structures for Additive Manufacturing by Photopolymerization. *Journal of Industrial Ecology.* 2017;21:S179–S190. doi:10.1111/jiec.12660
- [63] Vaissier B, Pernot JP, Chougrani L, Véron P. Genetic-algorithm based framework for lattice support structure optimization in additive manufacturing. *CAD Computer Aided Design.* 2019;110:11–23.