

Cursul 3: Procese de Fabricație Aditivă

De la Idee la Obiect: Alegerea și Stăpânirea Tehnologiei Potrivite



Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București
Facultatea de Mecanică și Tehnologie
Program de master: Ingineria și Managementul Fabricației Produselor (IMFP)
Titular Curs: Prof. dr. ing. Daniel-Constantin ANGHEL

Harta Cursului: Ce Vom Construi Astăzi?

1.



Principiul Fundamental AM: Fundația comună: de la stratificare la solidificare.

2.



Unealta 1: Extrudarea de Material (FDM/FFF): Prototipare rapidă și piese funcționale accesibile.

3.



Unealta 2: Fotopolimerizarea în Cuvă (SLA): Precizie și finisaj de excepție pentru detalii complexe.

4.



O Viziune Spre Producție: Fuziunea în Pat de Pulbere (SLS): Libertate geometrică totală.

5.



Analiza Comparativă: Matricea decizională a inginerului.

Obiectivele Învățării

La finalul acestui curs, veți putea:

- Selecta conștient tehnologia AM optimă pentru o aplicație dată.
- Justifica parametrii de proces aleși pentru a controla calitatea piesei.
- Anticipa avantajele și limitările fiecărui proces în context industrial.

Fundamentul Comun: Construcția Strat cu Strat

Toate procesele de Fabricație Aditivă (AM) urmează un flux digital comun: transformă un model 3D (CAD) în straturi digitale subțiri (slicing) și apoi construiesc piesa fizică prin adăugarea și consolidarea consolidarea succesivă a acestor straturi de material.



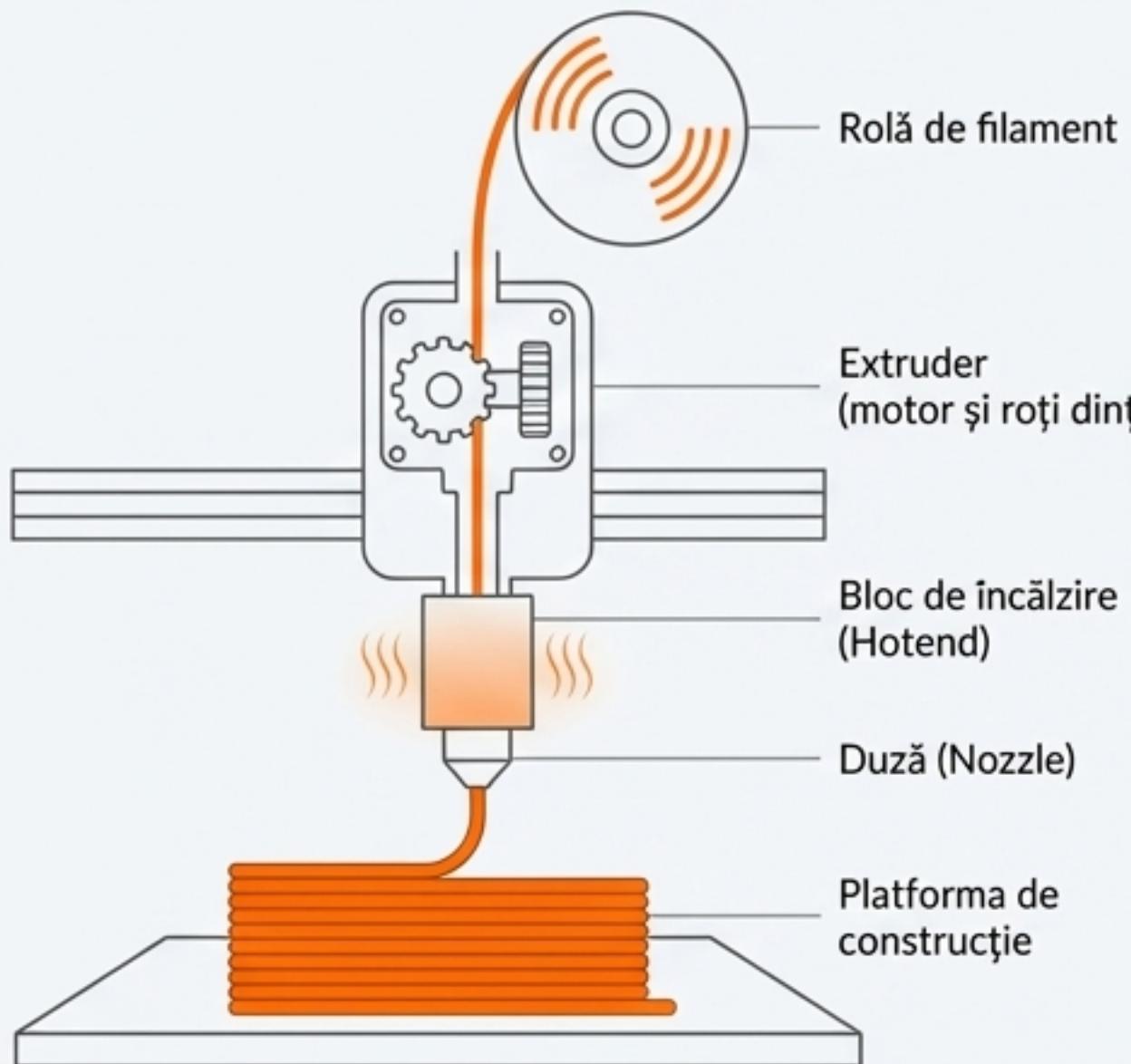
STL (Standard Tessellation Language):
Formatul standard de interfață între software-ul CAD și imprimantele 3D.

Slicing: Procesul de "feliere" a modelului digital în straturi 2D și generarea căilor de construcție.

G-code: Limbajul de comandă care dirijează mișările imprimantei 3D.

Unealta 1: Fused Deposition Modeling (FDM / FFF) – Calul de Bătaie al Inovării

Anatomia unui Print FDM



Anatomia unui Print FDM

Principiu de Funcționare

Un filament de material termoplastice (ex: Z-ABS, Z-PLA) este încălzit până la punctul de topire și extrudat printr-o duză controlată numeric, care ‘desenează’ fiecare strat al piesei pe o platformă de construcție.

Aplicații Industriale Cheie

- Prototipuri rapide pentru validare de formă și funcționalitate.
- Dispozitive de fixare și montaj (Jigs & Fixtures).
- Piese de uz final cu solicitări mecanice reduse sau serii mici personalizate.

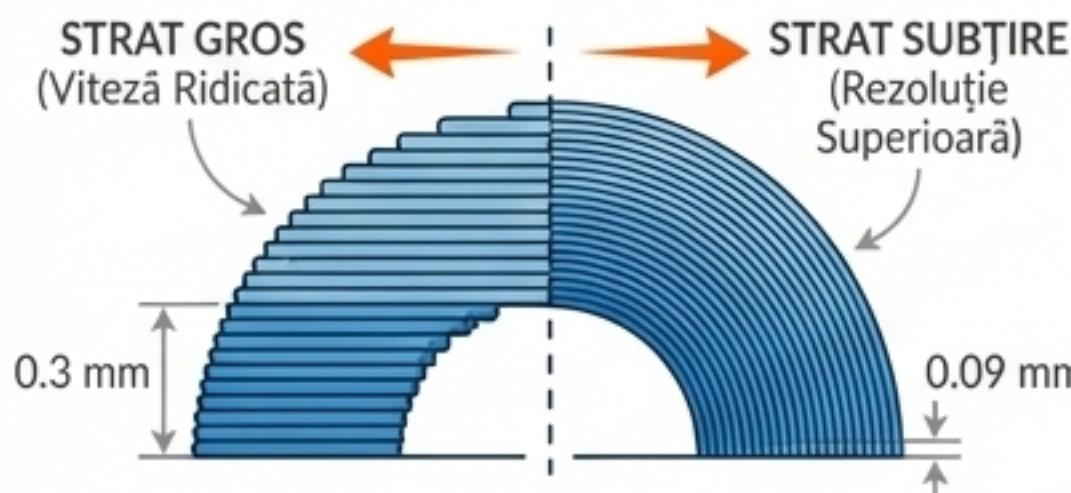
Reglaj Fin: Cum Parametrii Definesc Produsul

(Panoul de Comandă al Inginerului)

Calitatea și performanța unei piese FDM nu sunt predefinite, ci sunt **rezultatul direct al deciziilor inginerești luate la setarea parametrilor**. Fiecare parametru este un compromis.

Înălțimea Stratului

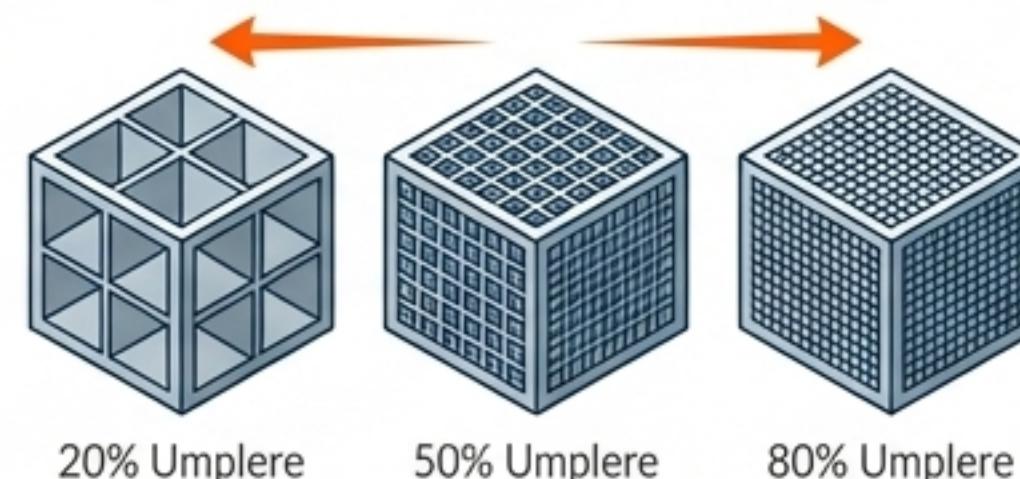
Compromis: Viteză ↔ Rezoluție & Precizie Dimensională



Efect: Straturile mai subțiri (ex: 0.09 mm) cresc precizia, dar și timpul de printare.

Densitatea Umplерii

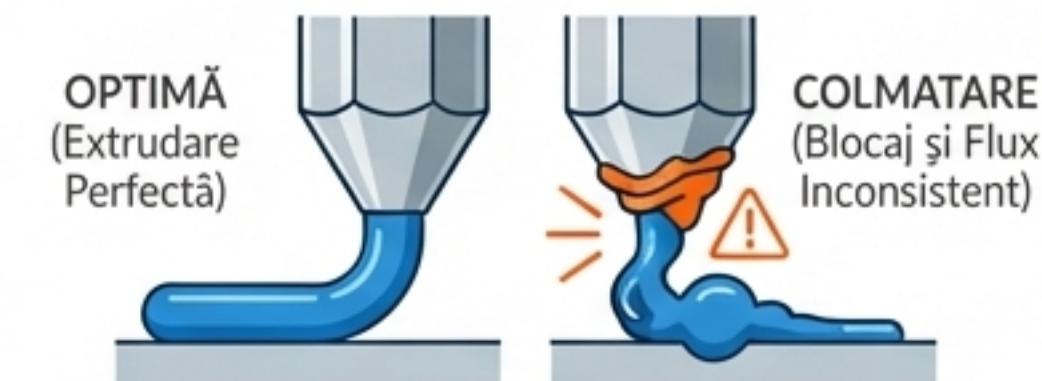
Compromis: Rezistență Mecanică ↔ Timp & Material



Efect: O densitate mai mare (ex: 80% vs 20%) îmbunătățește rigiditatea, dar crește costul.

Temperatura & Viteza de Printare

Provocare: Găsirea "ferestre de proces" optime pentru adeziune fără defecte precum "colmatarea" (clogging).



Asigură o bună adeziune între straturi și evită defectele de curgere.

Insight: "Optimizarea acestor parametri este esențială pentru a minimiza abaterile dimensionale și a asigura funcționalitatea, în special la piese complexe precum îmbinările canelate."

FDM În Balanță: Când și De Ce?

✓ Avantaje

- ✓ **Cost Redus:** Echipamente și materiale accesibile.
- ✓ **Gamă Largă de Materiale:** Polimeri standard (PLA, ABS, PETG), tehnici (PCTG, CPE HT) și compozite armate cu fibră de sticlă (GF) sau carbon (CF).
- ✓ **Viteză Mare:** Ideal pentru cicluri rapide de prototipare iterativă.
- ✓ **Simplitate Operațională:** Mantenanță și operare relativ simple.

✗ Limitări

- ✗ **Precizie și Finisaj Inferioare:** Liniile de strat sunt vizibile, afectând aspectul și precizia.
- ✗ **Anizotropie:** Proprietățile mecanice sunt mai slabe pe axa Z (între straturi) decât în planul XY.
- ✗ **Necesitatea Structurilor de Suport:** Geometriile cu unghiuri mari necesită suport, care trebuie îndepărtat ulterior.



PCTG – Rezistență la impact și claritate.



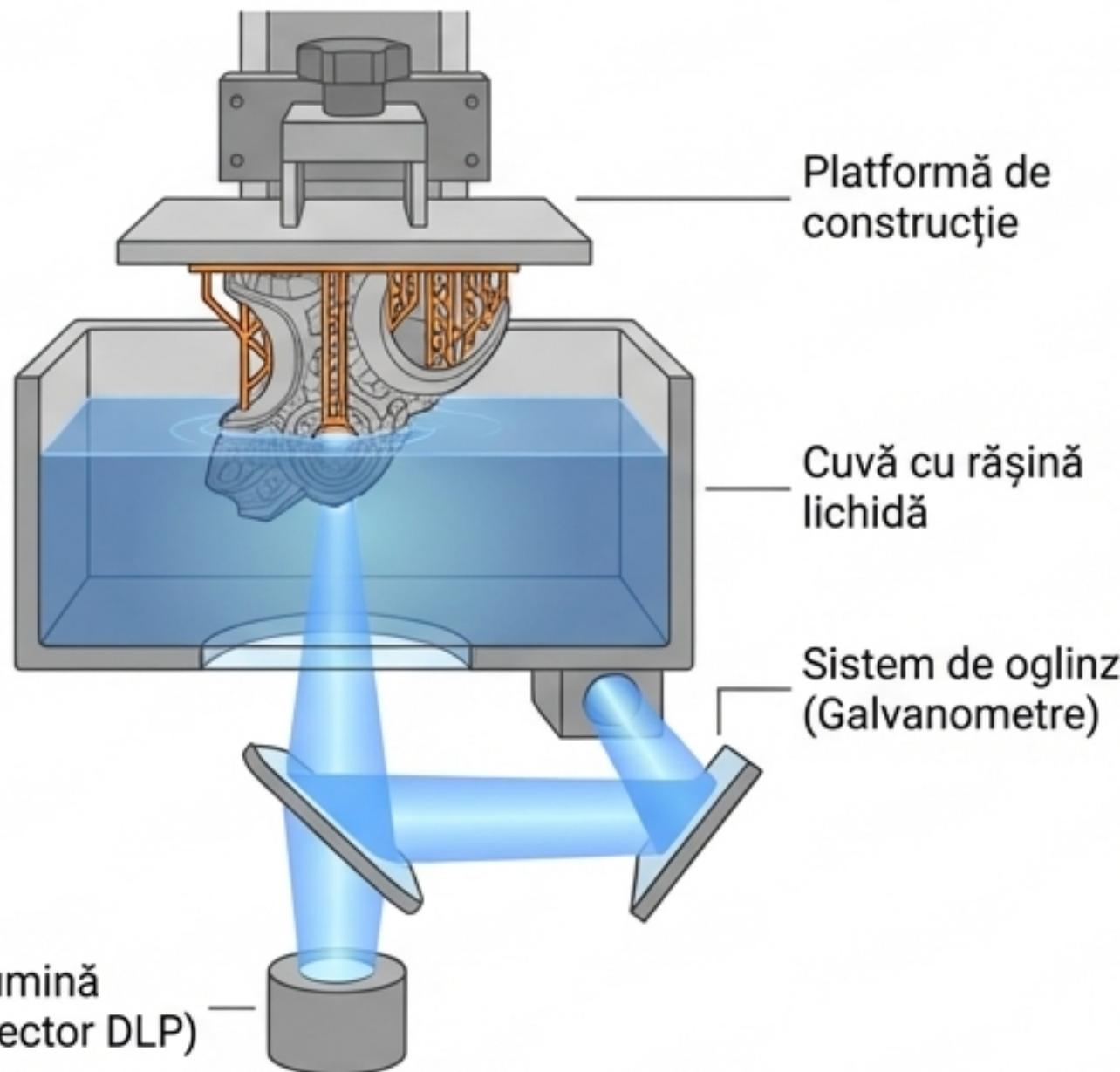
Fiberflex – Elemente flexibile și rezistente la abraziune.



Compozit cu Fibră de Carbon (CF) – Rigiditate și rezistență superioară.

Unealta 2: Stereolithography (SLA) – Arta Detaliului și a Preciziei

Anatomia unui Print SLA



Principiu de Funcționare

Un fascicul laser UV (la SLA clasic) sau un proiectoare digital (la DLP) solidifică selectiv o răsină lichidă fotosensibilă (fotopolimer) într-o cuvă, strat cu strat. Platforma de construcție se mișcă pentru a crea piesa tridimensională.

Evoluția Tehnologiei

Principiul de bază a evoluat. Tehnologii precum CLIP (*Continuous Liquid Interface Production*) elimină procesul discret strat-cu-strat, permitând o întărire continuă și viteze mult mai mari.

Aplicații Industriale Cheie

- * Prototipuri de înaltă fidelitate vizuală (aspect de produs final).
- * Modele medicale și dentare (ghiduri chirurgicale, cimenturi osoase - PMMA).
- * Matrițe pentru injecție în serii mici.
- * Bijuterii și aplicații artistice.

SLA În Balanță: Prețul Preciziei

✓ Avantaje

- ✓ **Rezoluție Excepțională:** Detalii extrem de fine și muchii ascuțite.
- ✓ **Suprafețe Netezi:** Liniile de strat sunt practic invizibile, rezultând un aspect similar cu piesele injectate.
- ✓ **Precizia Dimensională Ridicată:** Toleranțe strânse, esențiale pentru ajustaje precise.
- ✓ **Materiale Specializate:** Rășini transparente, biocompatibile, flexibile, rezistente la temperaturi înalte.

✗ Limitări

- ✗ **Cost Mai Ridicat:** Echipamentele și rășinile sunt semnificativ mai scumpe decât cele pentru FDM.
- ✗ **Post-procesare Obligatorie:** Pieselete necesită spălare în solventi (ex. alcool izopropilic) și curare finală în lumină UV pentru a atinge proprietățile mecanice finale.
- ✗ **Proprietăți Mecanice:** Materialele standard sunt adesea mai fragile și se pot degrada în timp la expunerea la UV.
- ✗ **Volum de Construcție:** De obicei mai mic comparativ cu sistemele FDM.



Rășină transparentă (Clear Resin).



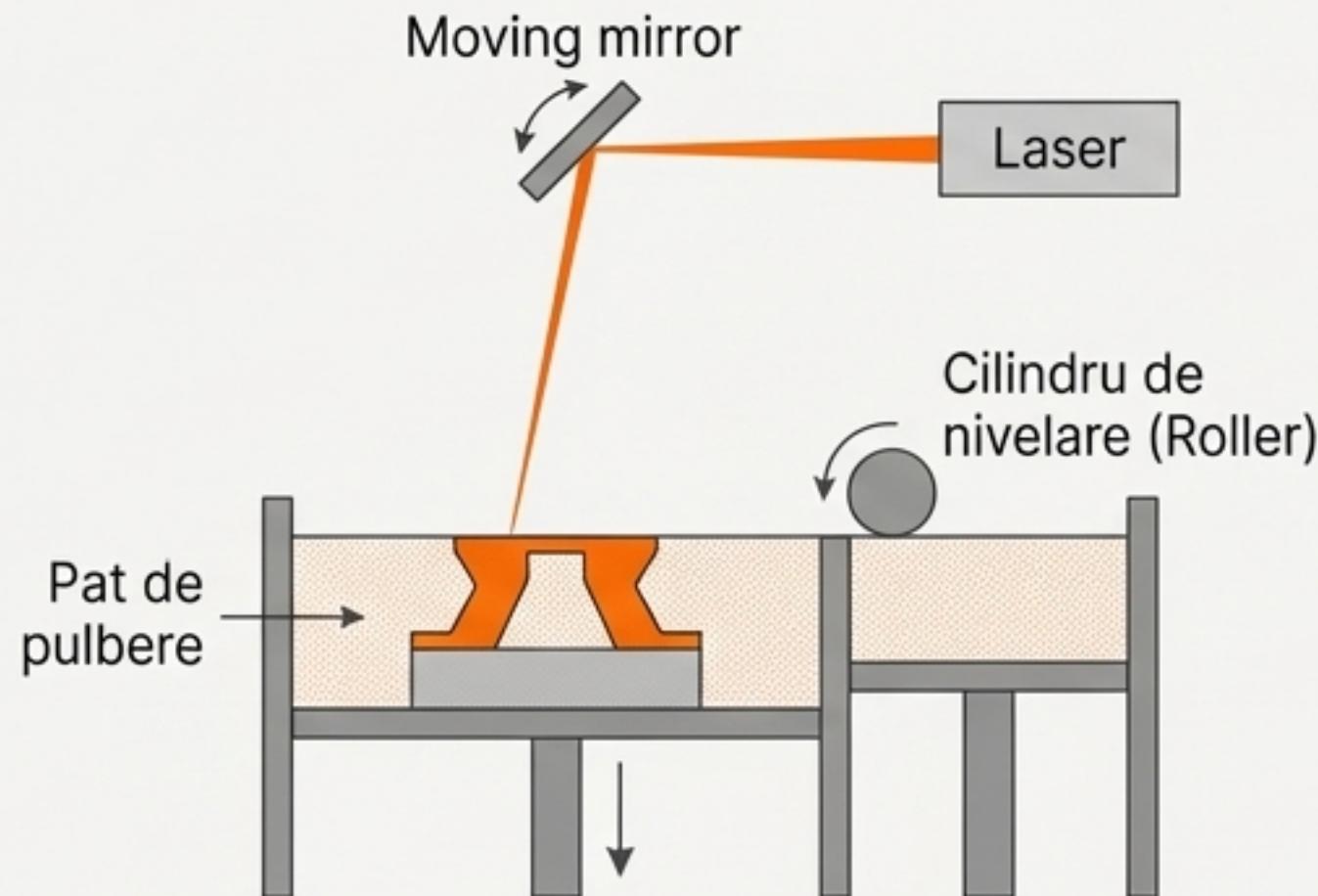
Rășină flexibilă (Flexible Resin).



Rășină biocompatibilă
(Biocompatible Resin - ex. PMMA)

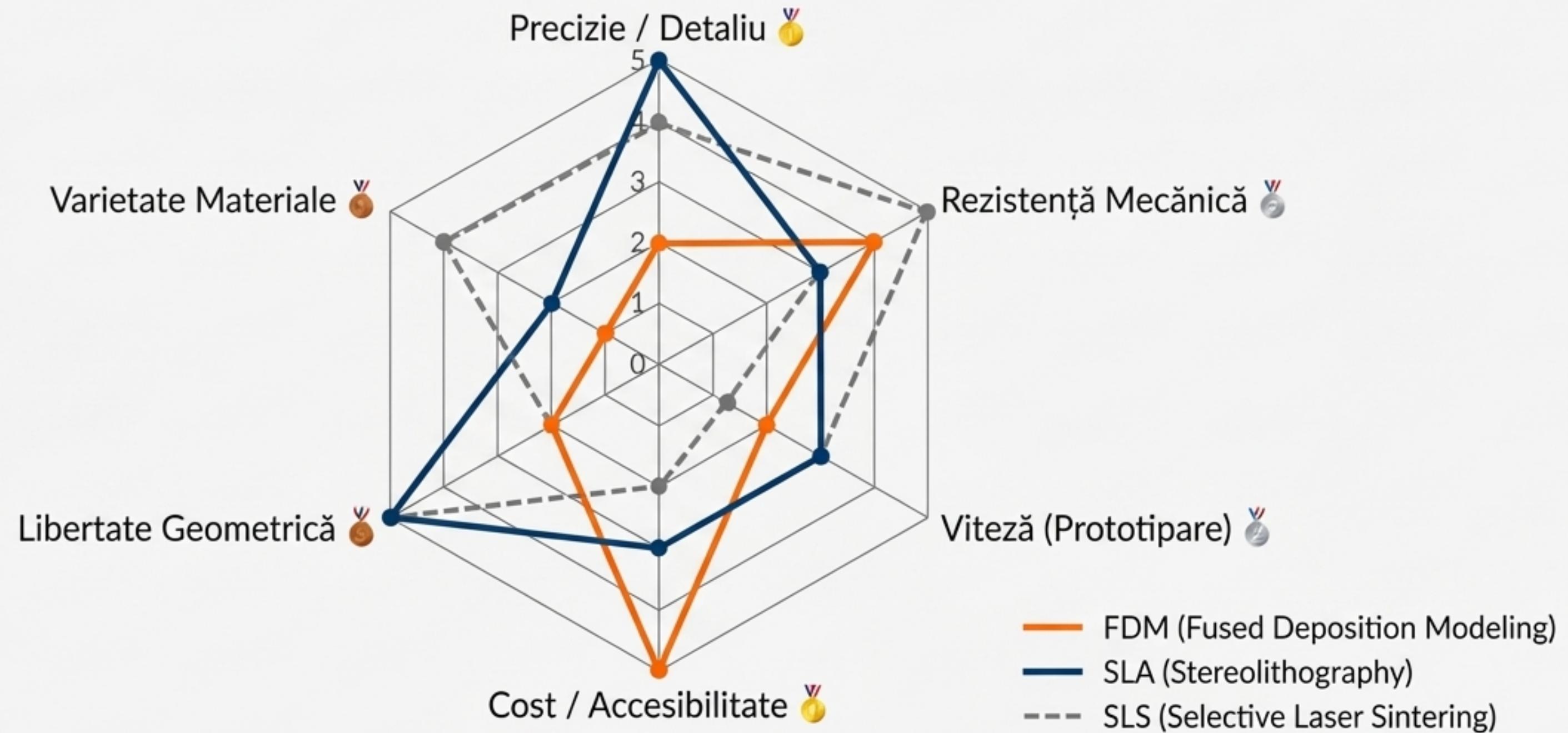
O Viziune Spre Producție: Selective Laser Sintering (SLS)

Concept (Prezentare Conceptuală): Un laser de mare putere fuzionează (sinterizează) particule fine de pulbere polimerică (ex: nylon) într-un pat încălzit. Piesa este construită strat cu strat, iar **pulberea nesinterizată din jur acționează ca suport natural pentru întreaga piesă.**



Implicația Inginerească Fundamentală: Eliminarea necesității structurilor de suport proiectate deschide ușa către producția de piese funcționale, durabile, cu o libertate geometrică aproape totală. Piese care sunt imposibil de fabricat prin alte metode devin posibile.

Matricea Decizională a Inginerului: FDM vs. SLA vs. SLS



Concluzie Cheie: Alegera nu se bazează pe ‘cea mai bună’ tehnologie în absolut, ci pe cea care oferă cel mai bun profil de performanță pentru cerințele specifice ale proiectului.

Provocare Inginerească: Proiectarea unei Carcase pentru Dronă



Sarcina: Fabricarea unei carcase pentru o dronă.

- **Faza 1: Prototipare:** Avem nevoie de 3 iterații rapide pentru a valida forma, potrivirea componentelor și ergonomia. Costul și viteza sunt critice.
- **Faza 2: Producție Serie Mică:** Avem nevoie de o serie de 20 de piese funcționale. Piesa finală trebuie să fie ușoară, dar rezistentă la impact și să aibă o geometrie complexă pentru aerisire.



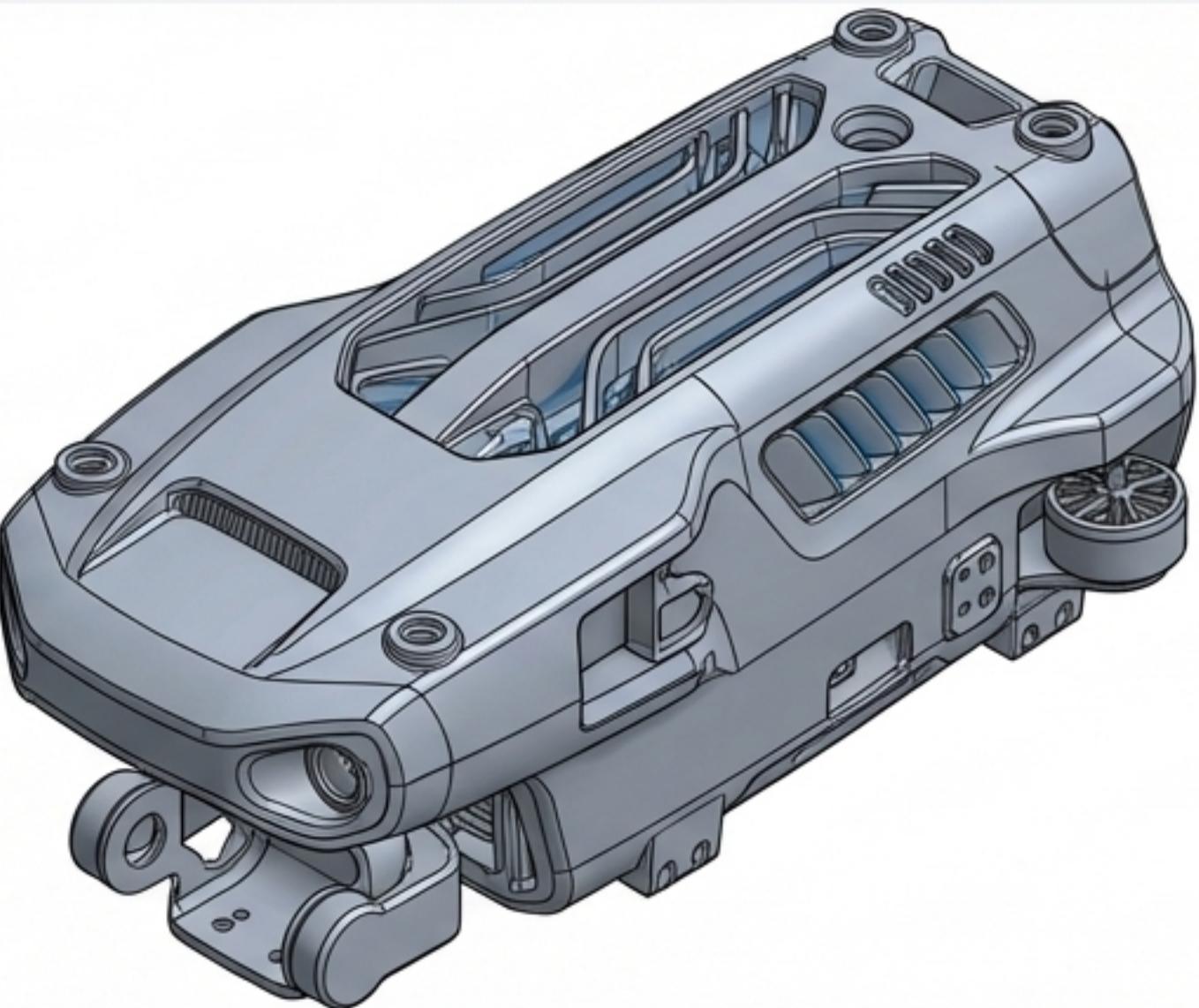
Întrebări Dirijate pentru Discuție:

Pentru Faza 1 (Prototipare):

- Ce tehnologie alegeți? De ce? (*Răspuns așteptat: FDM, pentru viteză și cost redus*)
- Ce parametru veți prioritiza: înălțimea stratului mică (pentru aspect) sau infill redus (pentru viteză)? Justificați.

Pentru Faza 2 (Serie Mică):

- Ce tehnologie oferă cel mai bun echilibru între rezistență, greutate redusă și libertate geometrică? (*Răspuns așteptat: SLS, pentru piese funcționale din naiлон fără suport*)
- Ce alternativă FDM ați putea considera dacă bugetul este extrem de limitat? (*Răspuns posibil: FDM cu un compozit CF/GF, dar cu constrângeri de design*)



Sinteză și Idei Cheie de Reținut



Nu există ‘cea mai bună’ tehnologie, ci doar tehnologia optimă pentru o anumită aplicație, echilibrând cerințe de cost, viteză, proprietăți și geometrie.



FDM este unealta de electie pentru **prototipare rapidă și accesibilă**. Calitatea depinde critic de masterizarea parametrilor de proces.



SLA exceleză unde **detaliile fine și finisajul de suprafață** sunt prioritare, fiind alegerea pentru modele vizuale și aplicații de înaltă precizie.



SLS deblochează **producția de piese complexe și rezistente mecanic**, eliminând constrângerile impuse de structurile de suport.



Decizia inginerescă este un proces de optimizare multi-criterială.

Gândire Critică & Punte către Laborator

Întrebări de Reflecție

1. Anizotropia FDM: Cum influențează orientarea de printare a unei piese FDM (ex: o pârghie) deciziile de proiectare (DfAM) dacă aceasta este supusă la eforturi de încovoiere? În ce orientare ati printa-o pentru rezistență maximă?

2. Alegerea Materialului: Pentru un ghid chirurgical personalizat care necesită biocompatibilitate, transparență pentru vizualizare și precizie sub 0.1 mm, ce proces (SLA/FDM) și ce tip de material ati alege? Justificați decizia.



Punte către Laborator

Conceptele discutate astăzi vor fi aplicate direct în activitățile de laborator.

- În **Lucrarea de Laborator 3**, veți seta experimental parametrii unei imprimante FDM (înălțimea stratului, infill) pentru a executa o piesă și veți analiza impactul acestora asupra calității.
- În **Lucrarea de Laborator 5**, veți efectua analiza dimensională a pieselor imprimate, corelând setările cu rezultatele măsurate.

Bibliografie Selectivă și Resurse Suplimentare

Standarde Cheie

- ISO/ASTM 52900:2021 – *Additive manufacturing – General principles – Fundamentals and vocabulary.*
- ASTM F42 – ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES.

Cărți de Referință

- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. – *Additive Manufacturing Technologies, 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, Springer, 2015.
- Rizea A.D., Anghel D.C., Iordache M.D., Stănescu N.D., *Fabricarea pieselor prin 3D printing. Ghid de proiectare*, Editura Universității din Pitești, 2021.

Jurnale de Specialitate

- *Additive Manufacturing*, Elsevier.

Întrebări și Discuții

Prof. dr. ing. Daniel-Constantin ANGHEL

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București
Departamentul Fabricație și Management Industrial
Email: dc.anghel@upb.ro