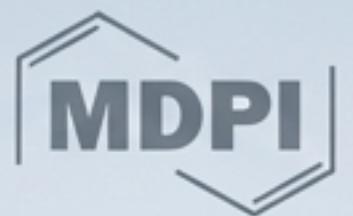




applied sciences



**Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București – Facultatea de
Mecanică și Tehnologie**

Tehnologii de Fabricație Aditivă

Curs 6. Controlul Calității în Fabricația Aditivă

Titular curs: Prof. dr. ing. Daniel-Constantin ANGHEL

Program de Master: Ingineria și Managementul Fabricației Produselor



Agenda Cursului: O Abordare Inginerească a Calității



1. De Ce? Importanța Strategică a Calității în AM.

De ce controlul calității nu este negociabil în aplicațiile de înaltă performanță.



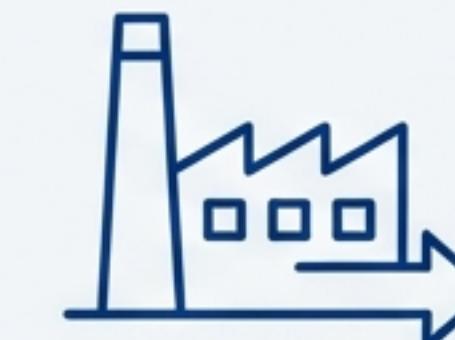
2. Ce? Anatomia Defectelor: Tipologii și Cauze.

Identificarea și înțelegerea inamicilor preciziei: abateri, rugozitate și delaminare.



3. Cum? Arsenalul Inginerului: Măsurare și Acceptare.

Utilizarea metodelor avansate de verificare și a criteriilor riguroase pentru a cuantifica și valida calitatea.



4. Și Deci? Conexiuni Aplicate: Laborator, Industrie, Viitor.

Trecerea de la teorie la practică: aplicarea cunoștințelor în laborator, relevanța industrială și perspectivele optimizării prin IA.



[DE CE?] Calitatea Nu Este Optională, Este o Condiție a Performanței

Impact Direct asupra Funcționalității: Calitatea dictează performanța, fiabilitatea și, cel mai important, siguranța produsului final.

Consecințe Economice: Non-calitatea generează costuri directe (rebuturi, re-procesări) și indirecte (reputația brandului, pierderea de contracte).

Cerință de Certificare în Domenii Critice: În aplicații medicale (implanturi personalizate), aerospațiale (componente de turbină) sau auto (prototipuri funcționale), un defect poate avea consecințe catastrofale. Aici, calitatea este sinonimă cu certificarea.

[CE?] Anatomia Defectelor În Fabricația Aditivă

Un defect reprezintă orice deviație a piesei fizice de la modelul digital ideal (CAD), fie ea geometrică, structurală sau estetică.



Geometrice & Dimensionale:

Erori de formă, abateri de la cote, deformări (warping). Acestea afectează direct asamblarea și funcționalitatea.

Structurale & Mecanice:

Porozitate internă, aderență slabă între straturi (delaminare), fisuri. Acestea compromit integritatea și rezistența mecanică a piesei.

Estetice & de Suprafață:

Rugozitate excesivă, efect de "scară" (stair-stepping), urme vizibile ale procesului. Afectează aspectul, dar și proprietăți funcționale precum frecarea.

Defecte Tipice (1): Abateri Dimensionale și Deformări (Warping)

Definiție:

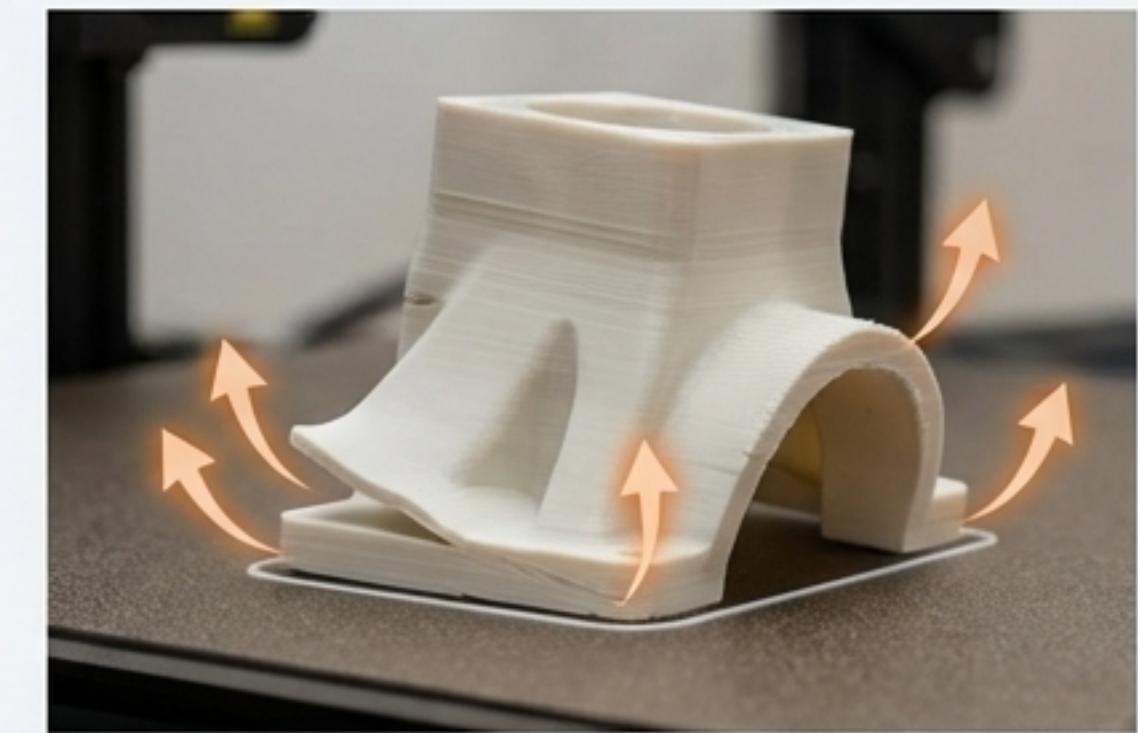
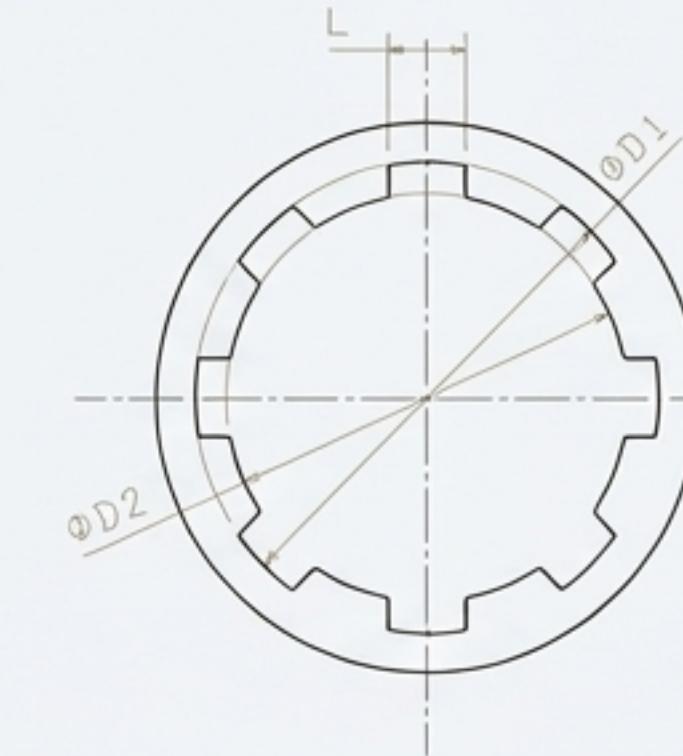
Discrepanțe între dimensiunile măsurate ale piesei reale și cele specificate în modelul CAD.

Cauze Comune:

- Termice: Contraction neuniformă a materialului în timpul răcirii, generând tensiuni interne.
- Proces: Calibrare incorectă a echipamentului, parametri de proces neoptimizați (ex. temperatura patului de printare).
- Geometrie: Designul piesei poate favoriza acumularea de tensiuni.

Impact Ingineresc:

- Impossibilitatea asamblării (jocuri incorecte, interferențe).
- Neîncadrarea în toleranțele de proiectare specificate.
- Pierderea funcționalității (ex: o etanșare necorespunzătoare).



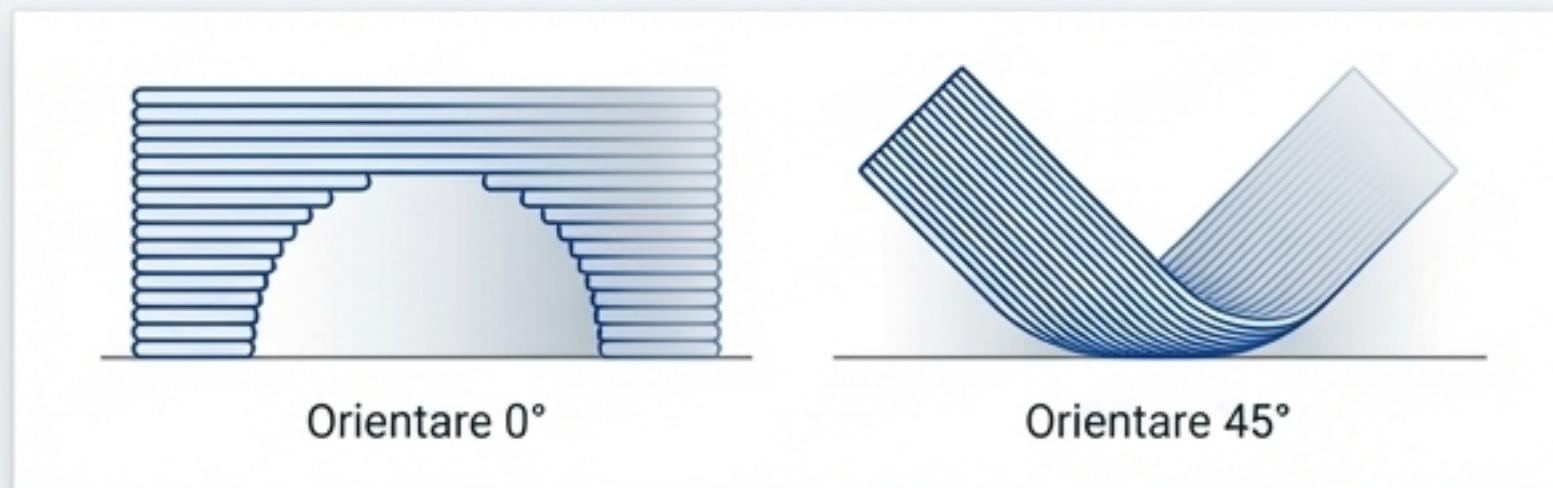
Defecte Tipice (2): Rugozitatea Suprafetei

Definiție:

Măsura neregularităților la scară micro și macro de pe suprafața piesei, inherentă procesului de depunere strat cu strat.

Cauze Comune & Factori de Influență:

- * **Grosimea Stratului:** Cel mai important factor. Straturile mai subțiri produc suprafete mai netede, dar cresc timpul de printare.
- * **Orientarea Pieseii:** Suprafetele curbe sau înclinate sunt predispuse la efectul de "scară" (stair-stepping).
- * **Parametri de Printare:** Viteza, temperatura, fluxul de material.



Impact Ingineresc:

- * Frecare crescută în contacte mobile.
- * Performanță slabă a suprafetelor de etanșare.
- * Inițierea de fisuri din cauza concentratorilor de tensiune.
- * Aspect vizual neprofesional.



Defecte Tipice (3): Aderența Inter-Strat (Delaminarea)



Definiție:

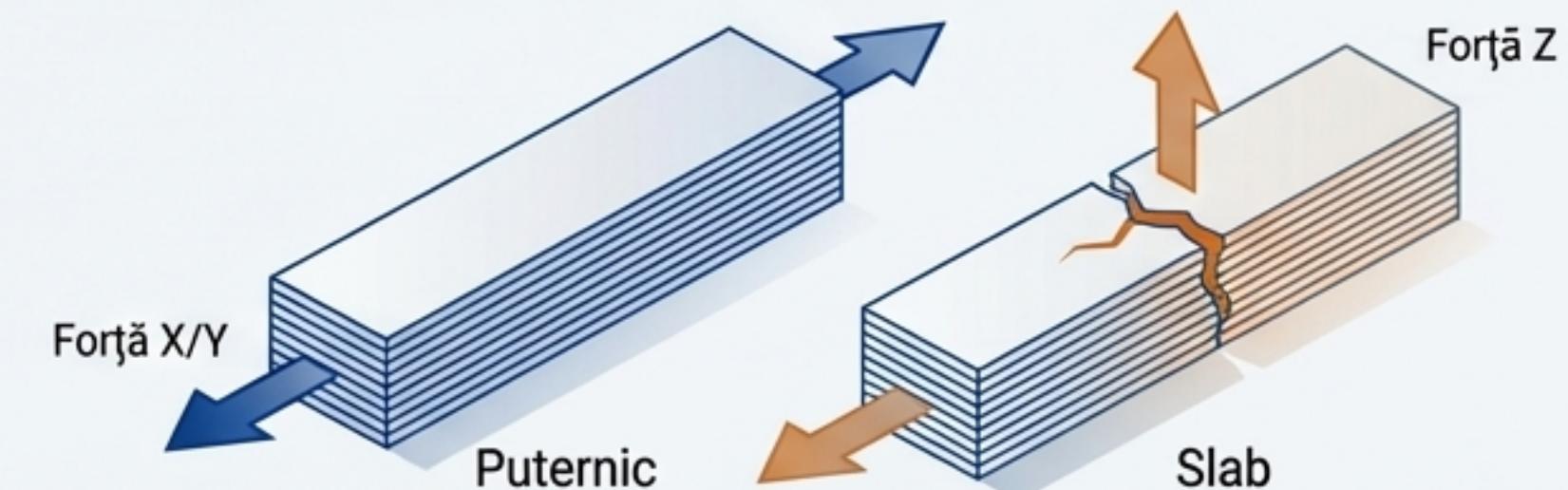
Legătură mecanică slabă între straturile succesive de material, ducând la separarea acestora sub sarcină.

Cauze Comune:

- * Temperatură de extrudare prea joasă: Materialul nu fuzionează corespunzător cu stratul anterior.
- * Răcire prea rapidă: Contractionile termice induc tensiuni între straturi.
- * Material: Umiditate în filament, calitate slabă a materialului.
- * Viteză de printare excesivă.

Impact Ingineresc: Anizotropie Pronunțată:

- * Rezistență mecanică a piesei pe axa Z (perpendicular pe straturi) este dramatic redusă față de axele X și Y.
- * Piesa devine fragilă și poate ceda sub sarcini de întindere sau încovoiere aplicate perpendicular pe straturi.



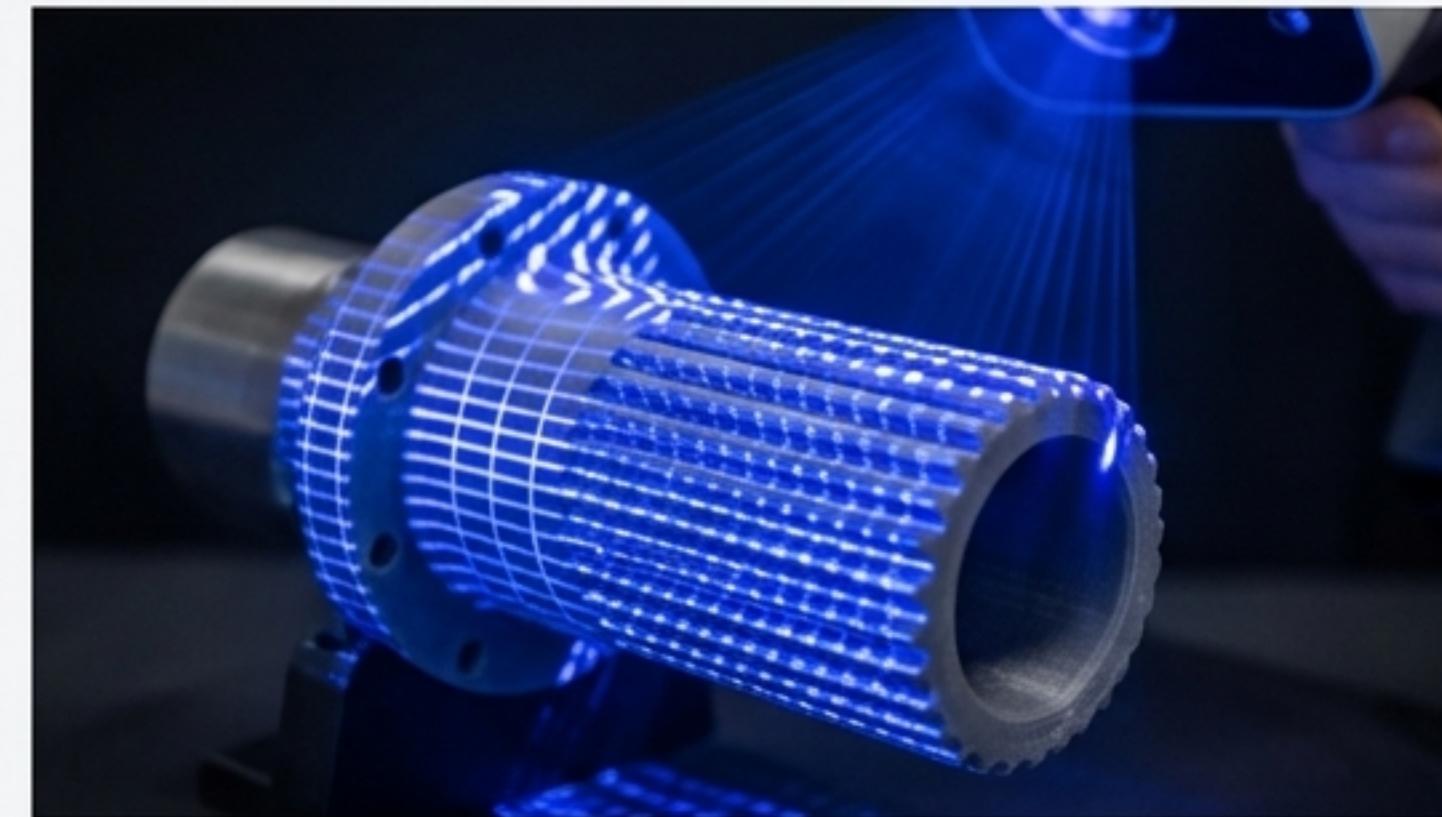
[CUM?] Arsenalul Inginerului: Metode de Verificare și Măsurare

"Nu poți controla ceea ce nu poți măsura."

Metode de Contact (Precizie Înaltă)



Metode Non-Contact (Optice - Viteză și Date Complete)

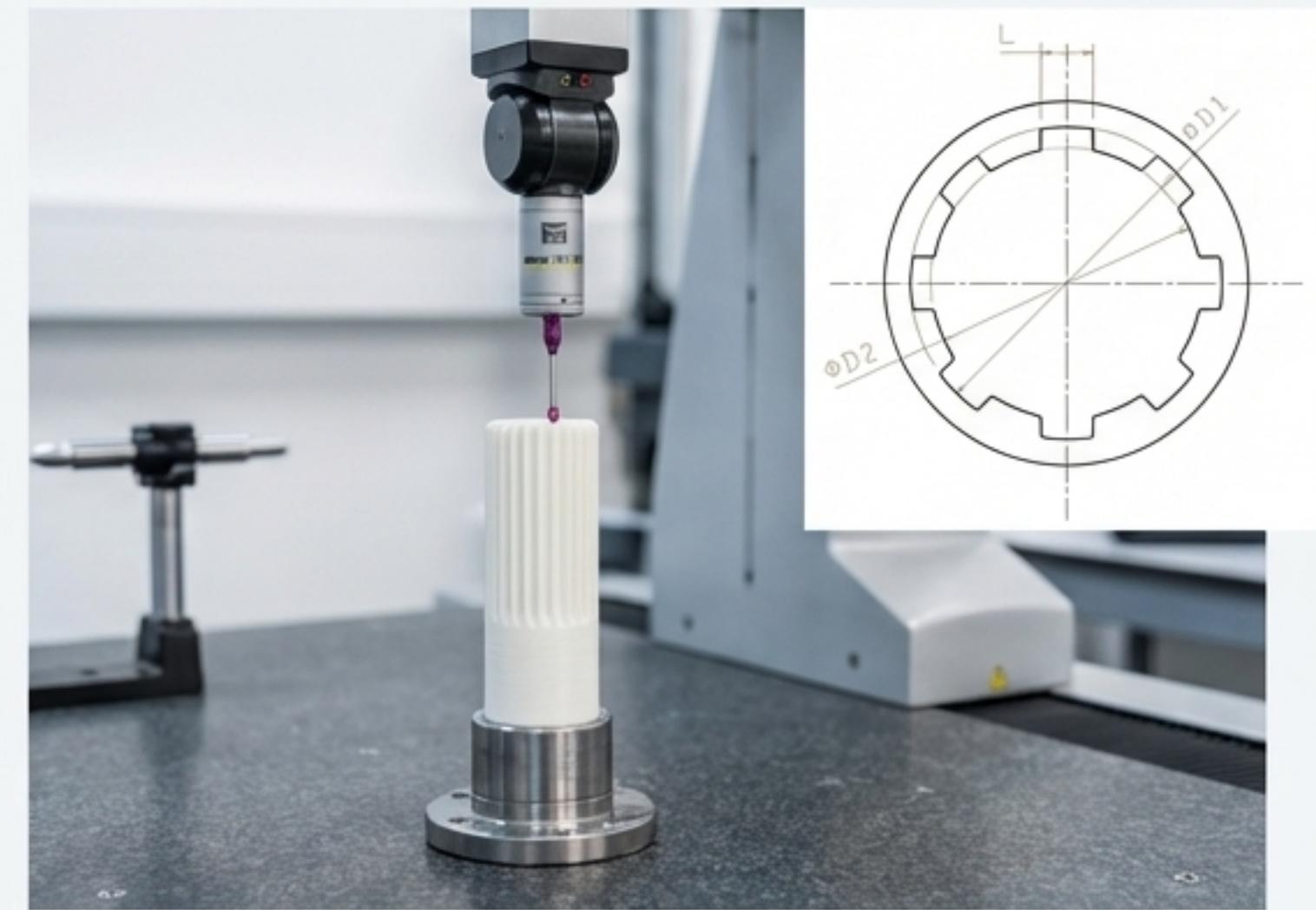


- **Mașini de Măsurat în Coordonate (CMM):** Standardul de aur pentru precizie (microni). Ideal pentru validarea cotelor critice și a toleranțelor geometrice.
- **Exemplu din laborator:** Tesa Micro-Hite 3D, utilizată în studiile facultății.
- **Instrumente Clasice:** Șublere, micrometre pentru verificări rapide.

- **Scanere 3D (lumină structurată/laser):** Achiziție rapidă a geometriei complete a piesei. Ideal pentru comparația directă a norului de puncte cu modelul CAD (analiză colorimetrică a abaterilor).
- **Microscopie (Optică/Electronică):** Analiza detaliată a rugozității, a micro-structurii și a defectelor la scară mică.

Studiu de Caz Aplicat: Analiza Preciziei Dimensionale a Arborilor Canelăți

- **Context:** Studiu realizat în cadrul laboratorului (Sursă: Rizea, Anghel et al., *Appl. Sci.* 2025) pentru a înțelege impactul parametrilor FDM asupra preciziei.
- **Obiectiv:** Investigarea influenței a 3 parametri de printare (grosime strat, densitate umplere, diametru nominal) asupra abaterilor dimensionale ale arborilor și butucilor canelați.
- **Metodologie:**
 - **Proiectare:** Plan experimental factorial complet.
 - **Fabricație:** Pieze printate FDM din material Z-PLA.
 - **Măsurare:** Utilizarea mașinii de măsurat în coordonate de înaltă precizie (Tesa Micro-Hite 3D).
- **Rezultat Cheie:** S-a demonstrat o corelație statistică puternică între parametrii de proces și acuratețea dimensională finală, validând că alegerea parametrilor este o decizie inginerescă critică.

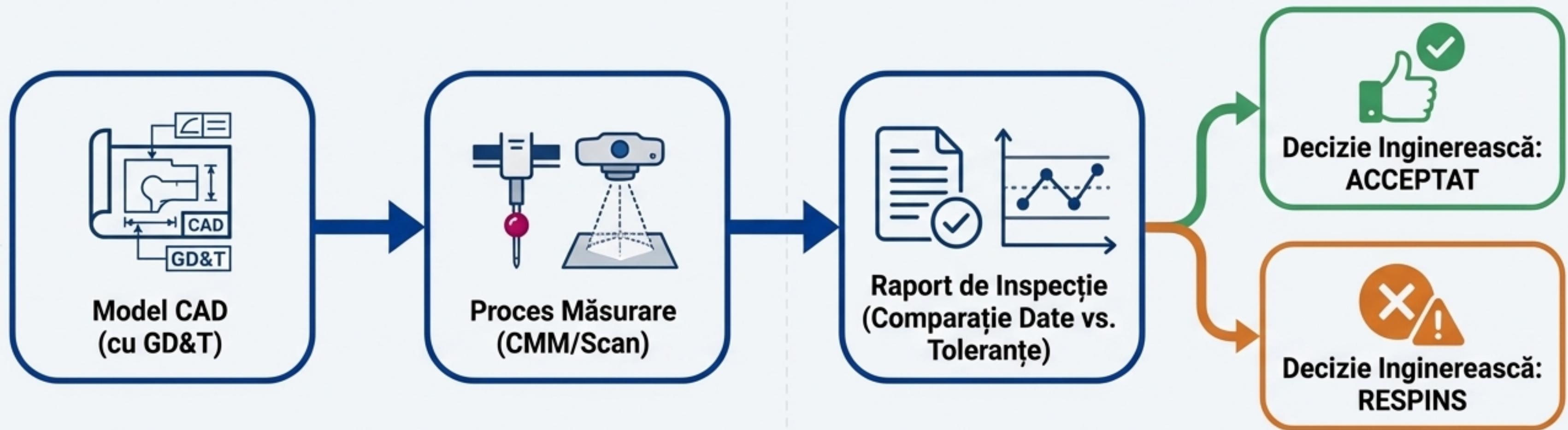


Tabel 2: Rezultate Cheie ale Analizei Dimensionale (Abateri mm)

Parametri	Abatere Medie d2	Abatere Medie D2	Valoare p (Stat.)
Grosime Strat (0.1 mm)	+0.025	+0.018	< 0.001
Densitate Umplere (40%)	+0.042	+0.031	0.005
Diametru Nominal (20mm)	-0.010	-0.008	0.120

De la Date la Decizii: Criterii de Acceptare a Pieselor

O piesă este considerată "conformă" dacă abaterile sale măsurate se încadrează în limitele de toleranță specificate.



Surse pentru Criteriile de Acceptare:

- Specificații de Proiectare (Sursa principală)**: Toleranțele dimensionale și geometrice (GD&T) definite în modelul CAD și pe desenul tehnic.
- Cerințe Funcționale**: Piesa trebuie să treacă teste de performanță specifice aplicației (ex: test de asamblare corectă, probă de etanșeitate, test de rezistență mecanică la o sarcină definită).
- Standarde Industriale**: Conformitatea cu standarde relevante (ex: ISO/ASTM pentru terminologie și procese, standarde specifice domeniului - aerospațial, medical).

[ŞI DECI?] Conexiuni Aplicate: De la Laborator la Industrie

În Laboratorul de TFA (Aplicare Imediată)



- **Lucrarea de laborator 5 - Analiza pieselor imprimate:** Veți utiliza instrumente de măsură pentru a evalua dimensional și calitativ piesele printate, aplicând direct concepțele discutate.
- **Lucrarea de laborator 6 - Optimizarea proceselor de imprimare:** Veți ajusta experimental parametrii (grosime strat, umplere) pentru a minimiza defectele identificate în lucrarea anterioară.

În Practica Industrială (Aplicare În Carieră)



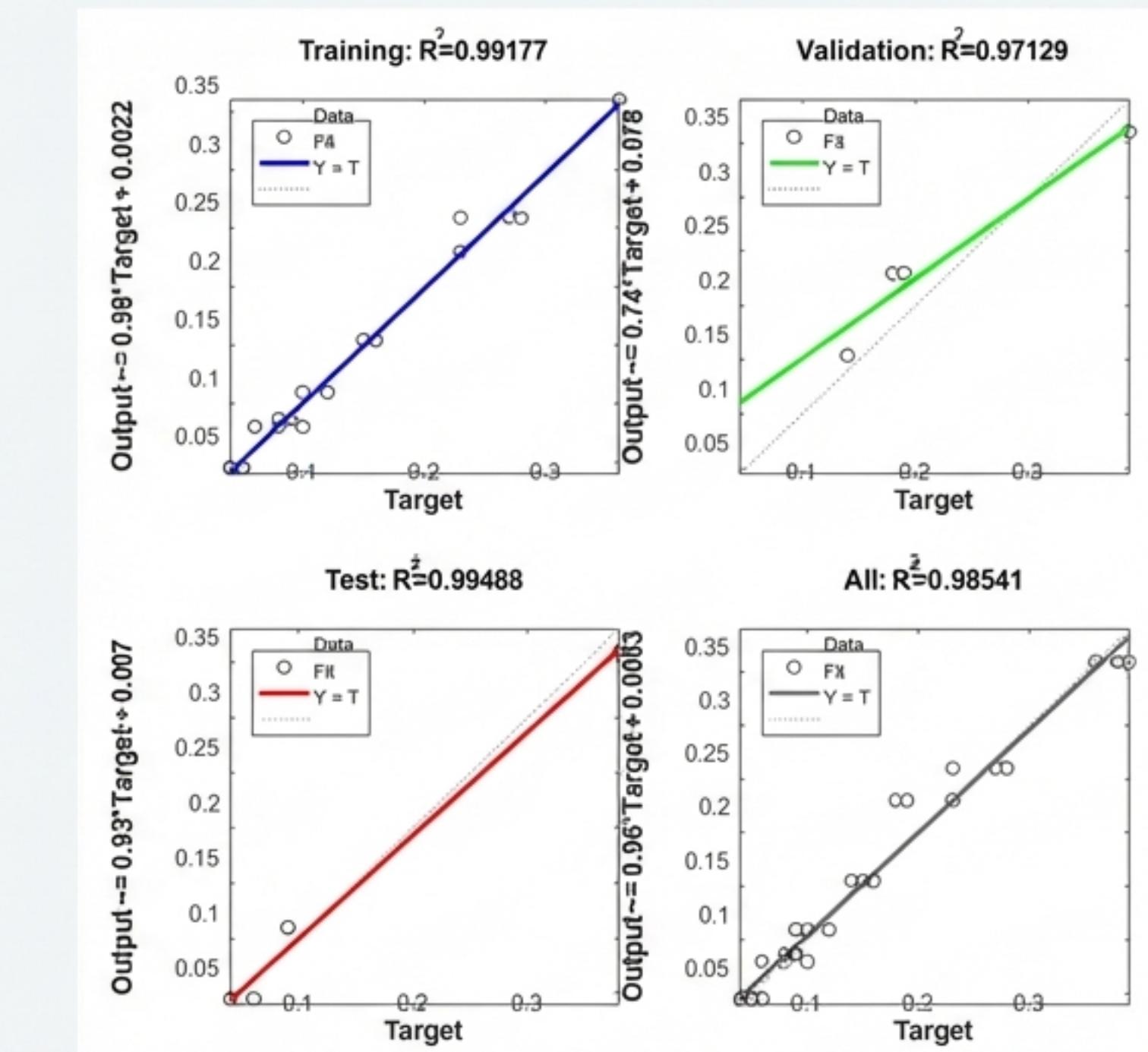
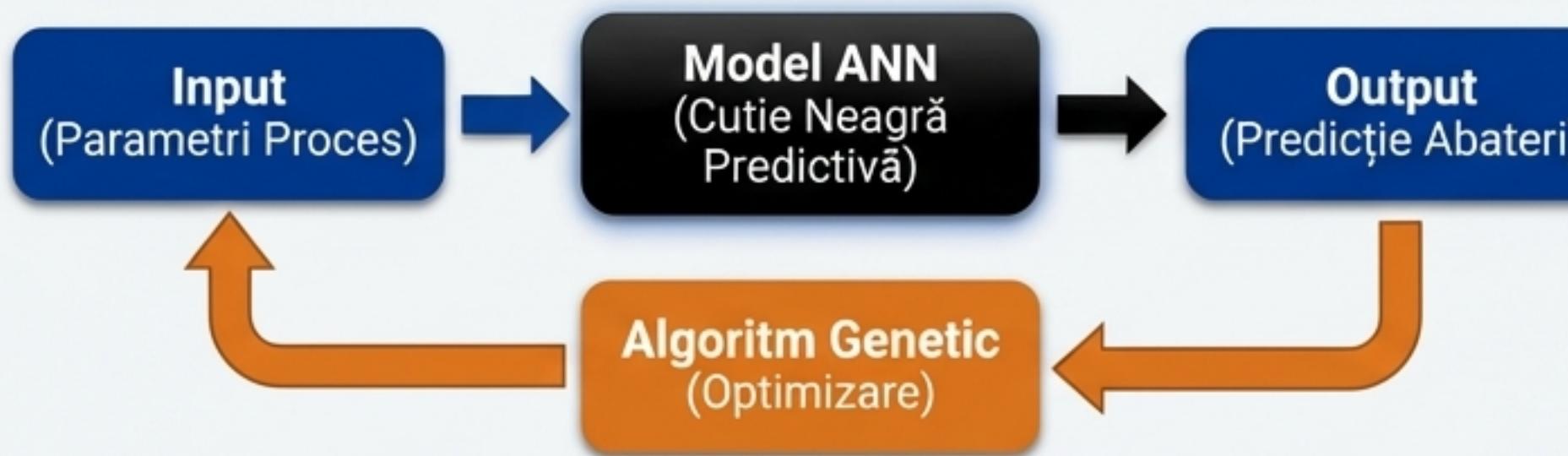
- **Controlul Calității la Recepție:** Verificarea conformității pieselor printate 3D de către furnizori externi.
- **Validarea Procesului de Producție (Process Validation):** Asigurarea repetabilității și capabilității procesului de fabricație aditivă pentru producția de serie.
- **Mentenanță și Inginerie Inversă:** Scanarea unei piese uzate sau ieșite din fabricație pentru a o reproduce cu acuratețe.

Perspectivă Avansată: Optimizarea Calității prin Inteligență Artificială

Schimbare de Paradigmă: Trecerea de la controlul post-proces (măsurarea defectelor) la predicția și optimizarea proactivă a calității.

Studiu de Caz (Sursă: Anghel et al., Processes 2021 & Rizea et al., Appl. Sci. 2025):

- **Predicție cu Rețele Neuronale Artificiale (ANN):** Antrenarea unui model ANN cu date experimentale (parametri de intrare vs. abateri de ieșire) pentru a prezice cu acuratețe deviațiile dimensionale. Modelele au atins coeficienți de corelație $R^2 > 0.91$.
- **Optimizare cu Algoritmi Genetici (GA):** Utilizarea unui GA pentru a explora spațiul de soluții și a identifica setul *optim* de parametri de printare care minimizează simultan abaterile pentru mai multe dimensiuni critice.



Impact Statement: Trecerea de la "trial-and-error" la o abordare bazată pe date (data-driven) pentru a atinge calitatea dorită din prima încercare.

Întrebări de Reflecție și Gândire Inginerească



Scenariul 1: Prioritizarea Calității

Cum ați ierarhiza importanța criteriilor de calitate (precizie dimensională, rugozitate, rezistență mecanică) pentru:

- un prototip vizual de prezentare a unui nou produs?
- o piesă funcțională, cum ar fi un pinion într-un angrenaj de mică putere? Justificați alegerile.



Scenariul 2: Diagnosticarea Defectelor

Un client raportează că o serie de piese printate de dvs. cedează sistematic de-a lungul axei Z (se delamitează). Care ar fi **primii trei parametri de proces** pe care i-ați investiga pentru a remedia problema și de ce?



Scenariul 3: Alegerea Metodei de Control

Discutați avantajele și dezavantajele utilizării unui CMM versus un scaner 3D pentru a valida o serie de producție de 100 de piese identice cu geometrie complexă. Ce metodă ați alege și în ce condiții?

Sinteză: Idei Cheie de Reținut



Calitatea în AM este fundamentală: Este o cerință de bază pentru funcționalitate, siguranță și viabilitate economică, nu un lux.



Defectele au cauze specifice și impact direct: Abaterile dimensionale, rugozitatea și delaminarea sunt cauzate de parametri de proces, material și design, afectând direct performanța piesei.



Măsurarea este cheia controlului: Metodele de contact (CMM) pentru precizie și cele non-contact (scanare 3D) pentru date complete sunt esențiale pentru a cuantifica calitatea.



Deciziile se bazează pe criterii clare și obiective: Conformitatea este evaluată riguros în raport cu toleranțele de proiectare, cerințele funcționale și standardele aplicabile.



Viitorul controlului calității este proactiv și inteligent: Tehnicile de Inteligență Artificială (ANN, GA) permit predicția și optimizarea calității, reducând ciclul de dezvoltare și costurile.

Resurse și Contact

Acest material de curs este un punct de plecare. Aprofundarea cunoștințelor se realizează prin studiul individual, activitatea de laborator și proiectul de semestrul.

Titular Curs: Prof. dr. ing. Daniel-Constantin ANGHEL

Email: dc.anghel@upb.ro

Consultații: A se stabili conform orarului afișat

