



Universitatea
Transilvania
din Braşov

TEZĂ DE ABILITARE

Titlu: Cercetări privind fabricația aditivă și analiza calității produselor
industriale polimerice

Domeniul: Inginerie industrială

Autor: Conf. Dr. Ing. Răzvan Udroi

Universitatea Transilvania din Braşov

BRAȘOV, 2023

CUPRINS

| | |
|---|-----------|
| Mulțumiri..... | 4 |
| Lista de notații..... | 5 |
| Lista de abrevieri..... | 5 |
| (A) Summary..... | 7 |
| (B) REALIZĂRI ȘTIINȚIFICE ȘI PROFESIONALE ȘI PLANURI DE EVOLUȚIE ȘI DEZVOLTARE A CARIEREI..... | 10 |
| B1. REALIZĂRI ȘTIINȚIFICE ȘI PROFESIONALE..... | 10 |
| B1.1. REALIZĂRI ȘTIINȚIFICE..... | 10 |
| Introducere..... | 10 |
| Capitolul 1. Cercetări privind optimizarea proceselor de fabricație aditivă pentru teste funcționale..... | 11 |
| 1.1. Aspecte privind metodologia de fabricare aditivă a pieselor polimerice pentru aplicații industriale..... | 11 |
| 1.1.1. Standardizarea proceselor de fabricație aditivă..... | 11 |
| 1.1.2. Procesul de fabricație aditivă prin pulverizare cu jet de materiale PolyJet..... | 13 |
| 1.1.3. Procesul de fabricație aditivă prin pulverizare cu jet de liant utilizând tehnologia 3DP..... | 16 |
| 1.2. Optimizarea proceselor de fabricație aditivă pentru teste funcționale..... | 19 |
| 1.2.1. Cercetări privind optimizarea poziționării și orientării unei piese în fabricația aditivă..... | 19 |
| 1.2.2. Cercetări privind fabricarea aditivă a rotorului unei turbine Pelton..... | 23 |
| 1.2.3. Cercetări privind optimizarea poziționării a două piese pentru teste de asamblare..... | 27 |
| 1.2.4. Cercetări privind optimizarea poziționării mai multor piese fabricate aditiv concomitent..... | 31 |
| Capitolul 2. Cercetări experimentale privind fabricarea rapidă a sculelor și matrițelor prin procedee aditive..... | 34 |
| 2.1. Introducere în RT..... | 34 |
| 2.2. Cercetări privind fabricarea rapidă a sculelor prin pulverizare cu jet de liant..... | 36 |
| 2.3. Cercetări privind fabricarea rapidă a matrițelor prin pulverizare cu jet de materiale PolyJet..... | 38 |
| 2.3.1. Materiale și tehnologii specifice..... | 38 |
| 2.3.2. Procedee RT indirecte bazate pe tehnologia PolyJet..... | 40 |

| | |
|---|-----------|
| 2.3.3. Fabricarea matrițelor prin metode RT directe utilizând tehnologia PolyJet | 42 |
| Capitolul 3. Metodologie și cercetări experimentale privind analiza calității suprafețelor plane fabricate prin procedee aditive | 43 |
| 3.1. Calitatea suprafețelor pieselor obținute prin procedee AM: sinopsis și motivație | 43 |
| 3.2. Designul unui artefact de test pentru analiza calității suprafețelor în fabricația aditivă | 45 |
| 3.3. Metodologie privind analiza calității suprafețelor plane fabricate aditiv | 48 |
| 3.4. Investigații experimentale privind tehnologia PolyJet | 51 |
| 3.5. Rezultate | 56 |
| 3.5.1. Distribuția rugozității determinate experimental | 57 |
| 3.5.2. Rugozitatea experimentală versus modele teoretice | 58 |
| 3.5.3. Defecte de suprafață a pieselor fabricate prin PolyJet | 60 |
| 3.5.4. Rezultatele analizei statistice | 60 |
| Capitolul 4. Metodologie și cercetări experimentale privind analiza calității suprafețelor pieselor aerodinamice fabricate prin procedee aditive | 65 |
| 4.1. Suprafețe aerodinamice realizate prin fabricație aditivă: sinopsis și motivație | 65 |
| 4.2. Metodologie privind analiza calității suprafețelor aerodinamice prin procedee aditive | 66 |
| 4.3. Simulări și investigații experimentale privind tehnologia PolyJet | 69 |
| 4.4. Rezultate | 73 |
| Capitolul 5. Metodologie și cercetări experimentale privind analiza performanței sistemului și a capabilității de proces în fabricația aditivă | 83 |
| 5.1. Introducere: sinopsis și motivație | 83 |
| 5.2. Metodologie privind analiza capabilității sistemelor și proceselor în fabricația aditivă | 85 |
| 5.3. Investigații experimentale | 88 |
| 5.3.1. Artefact de test, materiale și proces de fabricație | 88 |
| 5.3.2. Variabilitatea sistemului de măsurare | 89 |
| 5.3.3. Capabilitatea sistemului și procesului de fabricație aditivă PolyJet | 90 |
| 5.3.4. Calculul toleranței capabile pentru procedeul de fabricație aditivă PolyJet | 92 |
| 5.4. Rezultate | 93 |
| 5.4.1. Rezultate privind variabilitatea sistemului de măsurare | 93 |
| 5.4.2. Rezultate privind capabilitatea /performanța sistemului de fabricație aditivă Objet EDEN 350 PolyJet | 95 |
| 5.4.3. Rezultate privind capabilitatea procesului de fabricație PolyJet | 97 |
| 5.4.4. Rezultate privind toleranța capabilă și abateri capabile pentru procesul PolyJet | 100 |

| | |
|--|------------|
| 5.4.5. Determinarea treptei de toleranță pentru PolyJet | 101 |
| 5.4.6. Rezultate privind analiza microscopică | 102 |
| Capitolul 6. Metodologie și cercetări privind analiza structurii interne a pieselor de tip multi-material prin control nedistructiv | 105 |
| 6.1. Introducere | 105 |
| 6.2. Metodologie privind determinarea defectelor interne de tip porozitate pentru un multi-material prin tomografie CT | 106 |
| 6.3. Investigații experimentale privind caracterizarea porozității unui multi-material | 108 |
| 6.4. Rezultate | 110 |
| Concluzii și contribuții personale | 114 |
| Concluzii generale privind cercetările | 114 |
| Contribuții personale | 118 |
| B1.2. REALIZĂRI PROFESIONALE | 120 |
| B1.2.1. Studii și experiență profesională | 120 |
| B1.2.2. Activitatea didactică | 122 |
| B1.2.3. Activitatea de cercetare științifică | 124 |
| B2. PLANURI DE EVOLUȚIE ȘI DEZVOLTARE A CARIEREI | 134 |
| B2.1. Planuri de dezvoltare ale activității didactice | 134 |
| B2.2. Planuri de dezvoltare ale activității de cercetare științifică | 137 |
| B2.3. Planuri de evoluție și dezvoltare ale carierei profesionale | 138 |
| B3. Bibliografie | 139 |

Mulțumiri

„In viața noastră de zi cu zi trebuie să ne dăm seama că nu fericirea ne face recunoscători, ci recunoștința ne face fericiți.” Albert Clarke

Această teză de abilitare a fost realizată pe parcursul activităților desfășurate în cadrul Departamentului de Ingineria fabricației din Universitatea Transilvania din Brașov. Subiectul acestei lucrări este de mare actualitate abordând soluționarea problemelor științifice și practice privind performanțele sistemelor de fabricație aditivă și calitatea pieselor obținute prin fabricație aditivă.

Lucrarea acoperă o parte din activitățile mele de după susținerea tezei de doctorat și până în prezent. Un reper esențial în această direcție îl constituie grantul de tip Platforme Laboratoare de formare și cercetare interdisciplinară, denumit PLADETINO (Platformă pentru dezvoltări tehnologice inovative) din anul 2008, care a permis realizarea unei baze materiale în domeniul fabricației aditive în cadrul Departamentului de Ingineria fabricației. Doresc să adresez deosebite mulțumiri distinsului prof. dr. ing. Nicolae Valentin IVAN, conducătorul meu de doctorat și directorului acestui grant, care m-a susținut, îndrumat, a avut încredere în mine și mi-a oferit posibilitatea să inițiez, să dezvolt și să aprofundez cercetări în domeniul fabricației aditive.

Doresc să adresez mulțumiri domnului decan prof. dr. ing. Gheorghe Oancea, directorului departamentului de Ingineria fabricației prof. dr. ing. Cristin-Olimpiu Morariu, colegilor, precum și coautorilor articolelor științifice și colaboratorilor cu care am lucrat în diferite proiecte de cercetare, pentru sprijinul, optimismul și încrederea acordată. Aș dori să le mulțumesc colaboratorilor mei în cercetare, în special conf.dr.ing. Paul Bere din cadrul Departamentului de Ingineria fabricației al Universității Tehnice din Cluj Napoca și colegului meu din studenție dr. ing. Ion Cristian Braga.

De asemenea doresc să mulțumesc companiilor și colaboratorilor din mediul economic care în cadrul contractelor de cercetare cu mediul socio economic, m-au ajutat la dezvoltarea mea profesională. Astfel, doresc să mulțumesc în mod special firmei CAD Works SRL cu care am organizat în Universitatea Transilvania din Brașov un număr de peste 20 de seminarii naționale anuale CAD/CAM/CAE/PDM/RP/RE, care mi-au permis accesul la ultimele noutăți în domeniul proiectării asistate de calculator și fabricației aditive.

În cele din urmă, dar nu în ultimul rând, vreau să mulțumesc soției mele Cosmina pentru sprijinul moral, răbdarea și înțelegerea manifestată în această perioadă de timp, precum și tuturor colegilor care m-au ajutat în acest demers.

Vă sunt recunoscător și vă mulțumesc tuturor!

Lista de notații

| | |
|---------------------|---|
| Ra | Roughness (abaterea medie aritmetică a rugozității suprafeței) |
| USL | Upper Specification Limit (Limită superioară de specificație) |
| LSL | Lower Specification Limit (Limită inferioară de specificație) |
| UCL | Upper Control Limit (Limită superioară de control) |
| LCL | Lower Control Limit (Limită inferioară de control) |
| s^2 | Dispersia (varianța) |
| s | Abaterea standard sau abaterea medie pătratică (măsura a gradului de împrăștiere) |
| CV | Coeficientul de variație (informații despre împrăștierea unei variabile relativ la valoarea medie). |
| Q_x | Cuantila X (exemplu $q_{0,99865}$) |
| α | Nivel de semnificație (de exemplu $\alpha=0,5\%$) |
| IT | Treapta de toleranță |
| i | Factor de toleranță ce exprimă dependența toleranței de dimensiune |
| n_i | Unitatea de toleranță |
| $D_{\min}-D_{\max}$ | Interval de dimensiuni |
| Cp/Cpk | indici capabilitate proces |
| Cm/ Cmk | indici capabilitate mașină |
| Pp/Ppk | indici performanță procese |
| t | grosime strat depus |
| k1 | factor de corecție datorat postprocesării |
| θ | unghiul de inclinare a plăcuței plane |
| ψ | unghi de contact picătură de rășină |

Lista de abrevieri

| | |
|-------------|---|
| AM /FA | Additive manufacturing (Fabricație aditivă) |
| 3D printing | Printare tridimensională |
| STL | Standard Triangulation Language / Standard Tessellation Language (Limbajul Standard bazat pe discretizare cu triunghiuri) |
| AMF | Additive Manufacturing File (Format de fișier specific fabricației aditive) |
| PolyJet | Polymer Jetting (Pulverizare cu jet de polimeri) |
| 3DP | Three dimensional printing by ZCorp (Printare 3D de tip inkjet sau printare 3D cu pulverizare de jet de liant) |
| VP | Vat Photo-Polymerization (Fotopolimerizare Vat) |
| BJ | Binder Jetting (Pulverizare cu jet de liant) |
| ME | Material Extrusion (Extrudare de material) |

| | |
|----------|--|
| MJ | Material Jetting (Pulverizare cu jet de material) |
| SL | Sheet Lamination (Laminare foi) |
| PBF | Powder Bed Fusion (Fuziunea patului cu pulberi) |
| DED | Directed Energy Deposition (Depunere cu energie directă) |
| SLA | Stereolithograph (Stereolitografie) |
| FDM/ FFF | Fused Deposition Modeling / Fused Filament Fabrication (depunere de material topit prin extrudare termoplastică) |
| LOM | Laminated Object Manufacturing (Fabricare stratificată prin laminare) |
| SLS | Selective Laser Sintering (Sinterizare selectivă cu laser) |
| SLM | Selective Laser Melting (Topire selectivă cu laser) |
| 3DP | 3D inkjet printing (Printare 3D de tip inkjet) |
| LENS | Laser-Engineered Net Shaping |
| DOD | Drop-On-Demand (Pulverizare controlata) |
| UV | Ultraviolet Lights (lumina ultravioletă) |
| HP | Hewlett Packard |
| CAD | Computer-Aided Design (Proiectare Asistată de Calculator) |
| RT | Rapid Tooling (Pregătire Rapidă a Fabricației) |
| RIM | Reaction injection moulding (Formare prin injecție cu reacție in matriță) |
| GFRP | Glass Fiber Reinforced Polymer (Polimer armat cu fibre de sticlă) |
| CNC | Computer Numerical Control (Conducere numerică cu calculatorul) |
| STAR | Standard Test Artifacts (Artefacte standard de test) |
| AOS | Advanced on site sensor |
| SEM | Scanning Electron Microscope (Microscop electronic cu baleiaj) |
| CT | X-Ray Computed Tomography (Tomografie computerizata cu raze X) |
| ISO | International Organization for Standardization (Organizația Internațională de Standardizare) |
| ASTM | American Society for Testing and Materials (Societatea Americană pentru Testare și Materiale) |
| AIAG | Automotive Industry Action Group (Grupul de Acțiune pentru Industria Auto) |
| MSA | Measurement System Analysis (Analiza Sistemului de Măsurare) |
| VDA | Verband der Automobilindustrie (Asociația Industriei Auto) |
| DOE | Design of Experiments (Proiectarea experimentelor) |
| ANOVA | Analysis of Variance (Analiza variațională sau analiza dispersionala) |
| GageR&R | Gage Repeatability and Reproducibility (Repetabilitatea și Reproducibilitatea sistemului de măsurare) |
| GLM | Generalized linear model (Modelul liniar generalizat) |

(A) Summary

The habilitation thesis presents a synthesis of scientific and professional results of the candidate dr. eng. Răzvan UDROIU, obtained and published after the completion, in 2003, of the doctoral thesis titled "Design and manufacturing of complex shape parts" and obtaining the title of Doctor engineer, CUM LAUDE, in the field of Industrial Engineering, within Transilvania University of Braşov (scientific advisor: professor dr. eng. Nicolae-Valentin IVAN). The author of the thesis currently holds the teaching position of Associate Professor, full time, in the Department of Manufacturing Engineering of the Transilvania University of Braşov.

The habilitation thesis "Research on additive manufacturing and the quality analysis of polymeric industrial products" presents the achievements that attest to the capacities and performances in the field of Industrial Engineering, regarding additive manufacturing and the quality analysis of the processes and products related to it. The processes of material jetting and binder jetting, as well as their applications, are mainly covered.

The paper contains the following main sections: **B1.1 Scientific achievements**, **B1.2 Professional achievements**, and **B2 Career development and development plans**. The first section highlights the scientific achievements being divided into six distinct chapters followed by a chapter of conclusions and personal contributions.

Chapter 1, Research on the optimization of additive manufacturing processes for functional tests, presents three case studies that treat the optimization of the position and orientation of one part, two parts and several parts on the built platform of additive manufacturing system. Also, the additive manufacturing of the rotor of a Pelton turbine is analyzed in two constructive variants. The results of the research consisted in the determination of positioning and orientation rules of the parts to optimize the manufacturing time and the materials consumption, in the case of material jetting and material binding processes.

Chapter 2, Experimental research on the rapid tooling based on additive manufacturing, comprises three case studies regarding the rapid tooling by additive manufacturing processes. In the first case study, a tool for making a bellows-type component is designed and manufactured by material binding process. The second and third case studies respectively present indirect RT and direct RT processes using PolyJet material jetting technology, and their applications.

Chapter 3, entitled Methodology and experimental research regarding the planar surfaces quality analysis in additive manufacturing, is structured in five subchapters. A literature review regarding the surfaces quality in additive manufacturing was presented. A new methodology regarding the surface quality analysis of the parts obtained by additive manufacturing, based on a test artefact was proposed. The methodology is validated by an experimental case study focused on PolyJet material jetting technology. The test artifact

designed to investigate the quality of planar surfaces, consists of rotated platens around a horizontal axis, and contains design configurations with editable geometry. The family of artifacts fit with different build platform sizes of the AM systems.

The effects of three main factors (artifact orientation, platen orientation, finish type) on the surface roughness of platens are investigated using the statistical design of experiments. A theoretical roughness distribution model including the post-processing was proposed, and compared with the experimental roughness distribution. The significant factors that influence the surface roughness are platen orientation, finish type, and their interaction. Also, the experimental roughness (Ra) for the PolyJet process was in the range of 0.5–15 μm for matte finish, respectively in the range of 0.5–4 μm for glossy finish.

In **Chapter 4, Methodology and experimental research regarding the analysis of the surface quality of aerodynamic parts manufactured by additive processes**, a new methodology to analyse the roughness of aerodynamic parts was proposed and validated by experimental research and case studies for material jetting technology (PolyJet). Two test artefacts of aerodynamic shape, for preliminary tests and validation tests were designed. Different orientations of the artifacts were analyzed based on keeping the same surface quality on the upper and lower surface of the sample. The surface roughness of the aerodynamic artefacts was analyzed in three different locations such as leading-edge, central, and trailing-edge zones, on upper and lower surfaces. The effects of main factors on the surface roughness of the artefact were investigated using the statistical design of experiments. The best results were obtained for XY orientation on the build platform for the artefact manufactured in matte finish. Also, the surfaces of the aerodynamic artefacts were analyzed and characterized by microscopy.

Chapter 5, entitled Methodology and experimental research regarding the analysis of the system performance and process capability in additive manufacturing, presents a methodology for the analysis of an additive manufacturing system performance and additive manufacturing process capability, using statistical control. This methodology consists in six steps, starting with process specification followed by determination of the variability of the measurement system, checking the critical capability assumptions, determination of AM system capability, determination of AM process capability, and microscopy investigations. A case study based on PolyJet technology has validated the proposed methodology. Batches of 50 samples of circular shape were additive manufactured of photopolymer resins. Two critical characteristics of the specimen were considered in this study.

A repeatability and reproducibility study was performed in order to determine the variability of the measurement system. Machine and process capabilities were determined and the results were analyzed based on the requirements from the statistical process control. The results show that capability indices of EDEN 350 machine and Polyjet process are over 1.67 within a capable tolerance interval of 0.22 mm.

The international tolerance grade for a circular part built by material jetting was determined as IT9 for radial dimension and IT10 for linear dimensions. The microscopy analysis has explained and validated some results from the capability study..

Chapter 6, Methodology and research on the analysis of the internal structure of multi-material parts by non-destructive testing, presents in the first part a methodology regarding the determination of internal defects of porosity type for a multi-material by X-ray computed tomography, and in the second part experimental investigations regarding the porosity characterization of a composite multi-material. This methodology consists of the following steps: CT scanning of samples from a multi-material, 3D morphological analysis of five samples, determination of porosity for each component material, and statistical analysis of pore characteristics.

General conclusions regarding the research after the completion of the doctoral thesis, and the **personal contributions** of the author of this habilitation thesis are presented in a separate chapter.

The second section, **B1.2 Professional achievements** present the main aspects regarding the author's professional experience, didactic activity and scientific research. The author's plans regarding the development of the didactic activity, scientific research and professional career are presented in detail in the third section of the work entitled **Evolution and career development plans**. The **bibliographic references** used in the elaboration of this habilitation thesis are presented in the last part of the work.

In summary, the thesis contains 125 figures, 29 tables, 6 original reports and 148 bibliographic titles. The elaboration of the habilitation thesis was based on the scientific results published in 16 scientific articles as main author and obtained in 15 scientific research projects as project director, after obtaining the title of doctor engineer.

(B) REALIZĂRI ȘTIINȚIFICE ȘI PROFESIONALE ȘI PLANURI DE EVOLUȚIE ȘI DEZVOLTARE A CARIEREI

(B1) REALIZĂRI ȘTIINȚIFICE ȘI PROFESIONALE

(B1.1) REALIZĂRI ȘTIINȚIFICE

INTRODUCERE

Cercetările în domeniul proiectării și fabricației asistate de calculator efectuate în cadrul tezei de doctorat au pus bazele dezvoltării ulterioare de noi tehnologii asistate de calculator, cum ar fi fabricația aditivă, proiectarea pentru fabricație aditivă și analiza calității produselor asistată de calculator.

Fabricația aditivă este o tehnologie din categoria fabricației asistate de calculator care folosește modele tridimensionale (3D) și programe din categoria conducerii numerice pentru a realiza piese prin depunerea materialelor strat cu strat. De asemenea, diversitatea de materiale în continua dezvoltare, folosite în fabricația aditivă, precum și marea varietate de procese tehnologice de fabricație aditivă conduce spre o cercetare multidisciplinară.

Fabricația aditivă are un rol important în procesul de digitalizare și transformare digitală permițând obținerea de organizații digitale și implementarea noii revoluții industriale, Industria 4.0.

Această teză de abilitare prezintă o sinteză a rezultatelor științifice și profesionale ale autorului privind următoarele:

- optimizarea proceselor de fabricației aditivă pentru teste funcționale;
- fabricarea rapidă a sculelor și matrițelor prin tehnologii de fabricație aditivă;
- analiza calității suprafețelor pieselor fabricate prin procedee aditive;
- analiza performanței sistemului și a capacității de proces în fabricația aditivă,
- analiza structurii interne a pieselor, cu accent pe analiza porozității, prin control nedistructiv.

Ținând cont de aspectele multidisciplinare amintite anterior privind fabricația aditivă și caracterul de digitalizare a acesteia, un domeniu stringent de cercetare este cel al managementului calității produselor și performanței proceselor în fabricația aditivă pentru a satisface cerințele clienților.

CAPITOLUL 1 CERCETĂRI PRIVIND OPTIMIZAREA PROCESELOR DE FABRICAȚIE ADITIVĂ PENTRU TESTE FUNCȚIONALE

Testele funcționale reprezintă o etapă importantă din ciclul de dezvoltare al unui produs industrial [137]. Principalele direcții ale acestora se referă la teste de asamblare și teste privind funcționarea ansamblului unui nou produs. Optimizarea proceselor de fabricație aditivă pot permite obținerea unor componente care se pot asambla ușor fără operații de postprocesare și ajustare. În cadrul acestui capitol sunt prezentate cercetări privind fabricația aditivă desfășurate în diverse proiecte focusate pe teste de funcționare. Acest capitol se bazează pe articolele reprezentative în acest domeniu publicate de autorul acestei teze de abilitare, în calitate de unic autor în [34], [35], și în calitate de prim autor și corespondent în [6], [21], [22], [23], [27], [28], [33].

1.1. Aspecte privind metodologia de fabricație aditivă a pieselor polimerice pentru aplicații industriale

1.1.1. Standardizarea proceselor de fabricație aditivă

Tehnicile de fabricație aditivă (AM) [1] prezintă un interes deosebit în multe domenii, cum ar fi cel aerospațial, auto și medical, pe baza flexibilității lor oferind realizarea de structuri complexe, care sunt greu de fabricat folosind metodele convenționale. AM reduce timpul, costurile și eforturile pentru realizarea produselor, prin realizarea de structuri ușoare care nu necesită investiții în SDV-istica. De asemenea, AM joacă un rol important în producția hibridă și fabricile inteligente [2] și este o tehnologie cheie în implementarea noii revoluții industriale, Industria 4.0 [3, 4].

De a lungul timpului calitatea a avut un caracter dinamic evoluând sub diverse forme de la inspecția calității, controlul calității, asigurarea calității și managementul calității totale. Sistemul de management al calității (SMC) [5] conține un ansamblu de acțiuni și măsuri planificate, care garantează că produsul realizat îndeplinește condițiile de calitate pe baza unei documentații realizată în conformitate cu standardele internaționale (ISO). Calitatea unui produs realizat prin procedee aditive indică gradul de conformitate a aceluși produs cu documentația tehnică care trebuie realizată pe baza unor standarde și norme. Dar, calitatea unui produs este determinată în general de o serie de elemente principale, cum ar fi caracteristicile produsului, prețul produsului, termene de livrare scurte și serviciile oferite. Dacă ne referim la produsele realizate prin procedee aditive de fabricație, vom analiza în continuare în principal caracteristicile produsului și vom lua în considerare că termenele de livrare ale acestor produse sunt considerabil mai mici decât în cazul fabricației tradiționale.

Controlul calității produselor este o componentă a managementului calității, care este focalizată pe îndeplinirea cerințelor referitoare la calitate de obicei prin metode statistice de control, asigurând ca produsele satisfac cerințele clienților. Pentru implementarea unui sistem de management al calității în fabricația aditivă sunt necesare o serie de etape, dintre care amintesc următoarele: definirea cerințelor clienților; determinarea și definirea proceselor de fabricație aditivă; stabilirea și aplicarea unor metode de măsurare a performanței proceselor de fabricație aditivă; determinarea mijloacelor de prevenire a neconformităților și eliminarea cauzelor; îmbunătățirea continuă a SMC. Noțiunea de "calitate totală" în fabricația aditivă este focalizată în principal asupra calității în proiectarea pentru fabricația aditivă, calității materialelor și calității proceselor de fabricație aditivă.

Standardele au impact asupra abilității de a certifica produsele și procesele și de asemenea în dezvoltarea unor modele privind proiectarea și fabricația aditivă. AM are un caracter multidisciplinar iar standardizarea acesteia este esențială pentru sectorul industrial. Principalele organizații care lucrează și colaborează pentru standardizarea proceselor de AM sunt Organizația Internațională de Standardizare ISO, comitetul tehnic ISO/TC 261 (creat în anul 2011), Societatea Americană pentru Testare și Materiale, grupul ASTM F42 (înființat în anul 2009), și Comitetul European de Standardizare, comitetul tehnic CEN/TC 438 (înființat în anul 2015) [6].

Standardul ISO/ASTM 52900-15 a stabilit și a definit termenii utilizați în tehnologia AM, prin definirea AM ca „procesul de îmbinare a materialelor pentru a realiza piese din datele modelelor tridimensionale (3D), de obicei strat după strat, spre deosebire de fabricația clasică care este substractivă și formativă” [6]. Procesul de fabricație reprezintă totalitatea procedurilor folosite pentru transformarea intrărilor constând în fișiere digitale, materie primă și a semifabricatelor în ieșiri adică produse finite. Pe baza standardului ISO/ASTM 52900-15, procesele de fabricație aditivă sunt clasificate după cum urmează [6, 7]: Vat Photo-Polymerization (fotopolimerizare Vat), Binder Jetting (pulverizare cu jet de liant), Material Extrusion (Extrudare de material), Material Jetting (pulverizare cu jet de materiale), Sheet Lamination (laminare foi), Powder Bed Fusion (fuziunea patului cu pulberi) și Directed Energy Deposition (depunere cu energie directă).

O serie de exemple de tehnologii care se încadrează în aceste tipuri de procese [6] includ stereolitografia (SLA) ca proces VP [8], depunere filament topit (FDM sau FFF) ca proces ME [9], fabricarea obiectelor laminate (LOM) ca proces SL [10], sinterizarea / topirea selectivă cu laser (SLS / SLM) ca procese PBF [11,12], imprimarea cu jet 3D (3DP) ca proces BJ [10], pulverizare cu jet de polimeri (PolyJet) și pulverizare multi-jet (MJM) ca procesele MJ [13–15], și depunerea de material topit cu laser (LENS) ca proces DED [16].

Caracterizarea performanțelor proceselor de fabricație aditivă precum și caracterizarea materialelor folosite în AM sunt sarcini semnificative pentru standardizarea și implementarea lor în industrie. O metodă de evaluare a performanțelor procesului AM constă

în fabricarea și testarea unor piese personalizate [17]. Cele mai importante direcții axate pe metodele de testare și caracterizare a produselor fabricate prin AM [6], sunt:

- ✓ proprietăți mecanice (duritate, rezistență la tracțiune, rezistență la încovoiere, rezistență la impact, rezistență la oboseală, proprietăți de compresiune, fluaj, îmbătrânire, rezistență la forfecare),
- ✓ aspecte privind suprafața (aspect, textura suprafeței [18], culoare), și
- ✓ cerințe de geometrie [16] (dimensiuni, toleranțe dimensionale, toleranțe geometrice).

O serie de studii experimentale și teoretice, pentru a caracteriza varietatea de procese AM și materialele utilizate pentru AM au fost dezvoltate de diverși cercetători, dar o mică parte dintre acestea au ținut cont de standardele aferente fabricației aditive care sunt în curs de definire.

1.1.2. Procesul de fabricație aditivă prin pulverizare cu jet de materiale PolyJet

O parte din cercetărilor experimentale, prezentate în capitolele următoare, au fost efectuate pe baza sistemului de fabricație aditivă EDEN 350 produs de firma Objet (Stratasys, Rehovot, Israel) care utilizează tehnologia PolyJet. Acest sistem de fabricație aditivă a fost achiziționat în Universitatea Transilvania din Brașov în anul 2008, în cadrul grantului Platformă pentru dezvoltări tehnologice inovative – PLADETINO (Director proiect Prof.dr.ing. Nicolae Valentin IVAN), Cod CNCSIS 78, grant de tip Platforme Laboratoare de formare și cercetare interdisciplinara, conf.dr.ing Răzvan Udriou fiind coordonator al secțiunii Tehnologii Industriale Inovative care este focusat pe prototiparea rapidă și fabricația aditivă.

Principiul de funcționare a sistemului de fabricație aditivă EDEN 350, bazat pe tehnologia PolyJet este prezentat în continuare. Fabricația aditivă PolyJet utilizează o tehnologie de tip dozare controlată "drop-on-demand" (DOD) [19] pentru a genera și depune selectiv picături de polimeri. Sistemului de fabricație aditivă EDEN 350 conține un bloc de printare 3D compus din opt capete de printare paralele, dintre care patru sunt alocate materialului model iar celelalte sunt alocate materialului suport. Atât materialul suport cât și materialul model sunt materiale fotopolimerice, având proprietatea de a polimeriza sub acțiunea luminii ultraviolete. În timpul procesului de printare 3D, capetele de printare și rășinile fotopolimerice sunt încălzite la o temperatură de printare de aproximativ 72° C, scăzând astfel vâscozitatea rășinilor și permițând depunerea selectivă a acestora. Blocul de pulverizare cu jet se deplasează liniar pe axa X și incremental pe axa Y a sistemului de coordonate, depunând straturi succesive de fotopolimeri pe platforma de construcție a sistemului EDEN 350 care se deplasează pe axa Z. Un sistem de vidare controlează și menține rășinile în capetele de printare 3D. O rolă nivelează și comprimă fiecare strat de rășină depusă la valoarea setată de 0.016mm. Excesul de rășină este depozitat într-un recipient pentru deșeuri. Straturile de rășină depuse sunt întărite cu ajutorul a două lămpi cu lumină ultravioletă (UV).

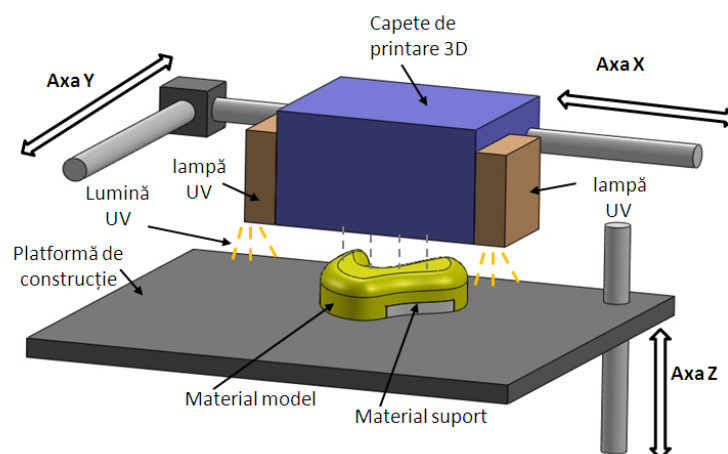


Fig.1.1 Reprezentare simplificată a principiului de funcționare PolyJet [20]

În figurile 1.1 [20] și 1.2 [6] sunt prezentate două scheme ale procesului PolyJet, prima fiind a variantă simplificată pentru a reliefa principiul funcțional iar cea de a doua prezintă în detaliu schematizat, componentele de bază ale sistemului EDEN 350.

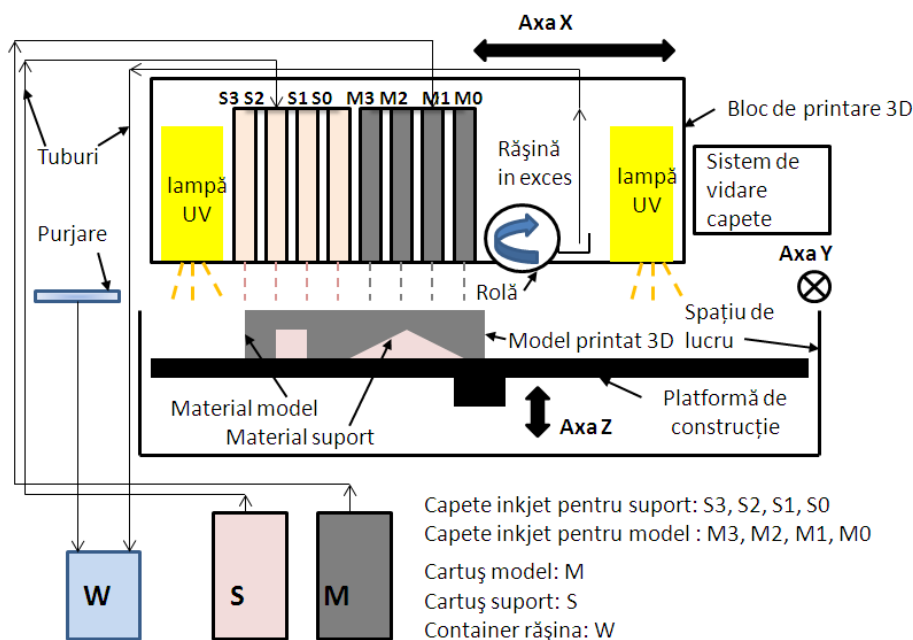


Fig.1.2 Schema detaliată privind componentele de bază ale sistemului de fabricație aditivă
Objet EDEN 350 PolyJet [6]

Realizarea pieselor prin procedeul PolyJet, ca de altfel și prin majoritatea procedeele de fabricație aditivă, presupune parcurgerea a trei **etape principale**, și anume [21]:

- ✓ preprocesarea datelor și pregătirea imprimantei 3D sau a sistemului de fabricație aditivă;
- ✓ procesarea date, adică printarea 3D propriu zisă;
- ✓ postprocesare pieselor.

În etapa de preprocesare a datelor [6, 21], un fișier în format STL, conținând modelul 3D al unei piese sau al unui ansamblu este importat în software-ul Objet Studio aferent imprimantei EDEN 350. Objet Studio permite simularea și optimizarea procesului PolyJet,

precum și calculul cantității de materiale necesare și a timpului de fabricație. Pregătirea imprimantei 3D presupune de obicei curățarea mesei de lucru și încărcarea materiei prime (materiale).

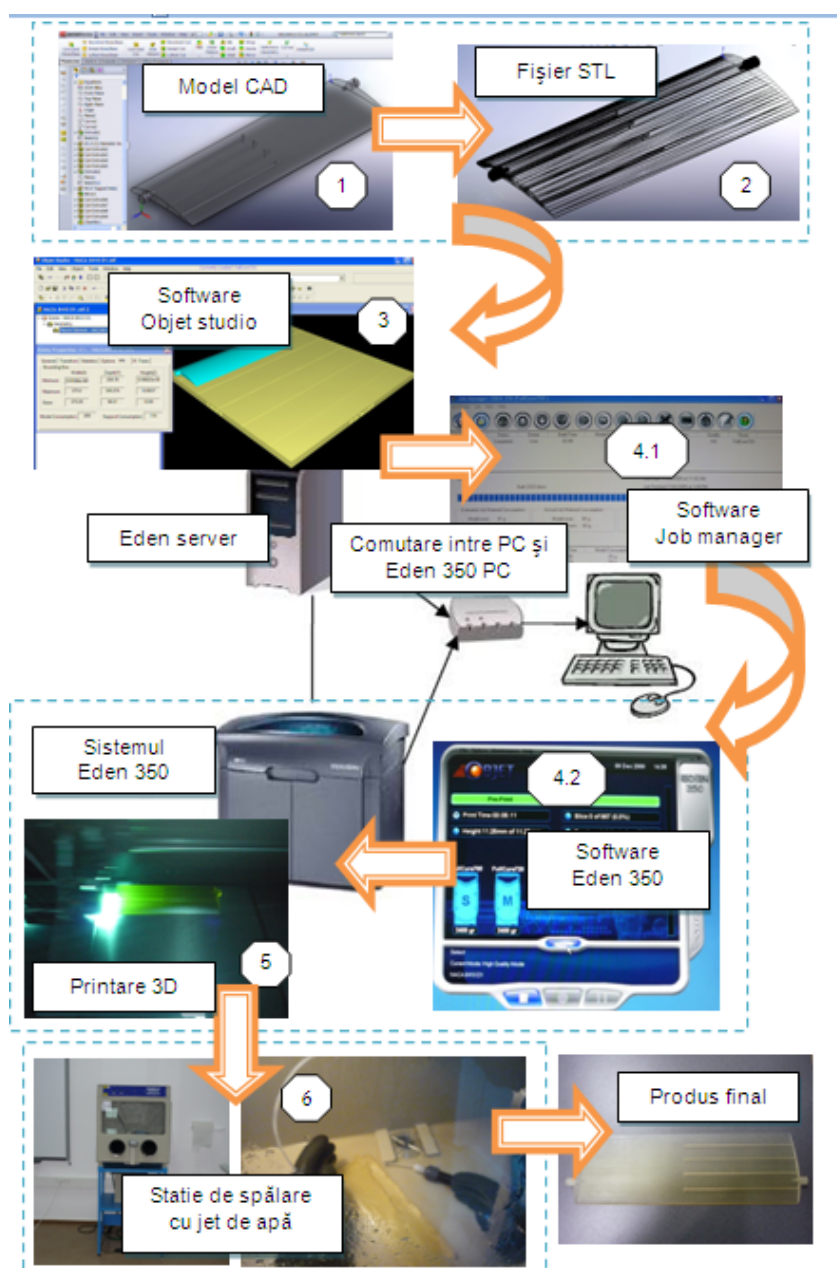


Fig. 1.3. Procesul de fabricație aditivă pe EDEN 350 [21, 22]

Procesarea datelor constă în printarea 3D propriu zisă a piesei, fiind un proces automat. În cadrul acestei etape, capul imprimantei execută mișcări liniare de tip du-te vino de-a lungul axei X, depunând straturi foarte subțiri de fotopolimer pe platforma de construcție. Lămpile UV situate lângă capul imprimantei emit lumină UV, solidificând fiecare strat [6]. Platforma de construcție execută mișcări incrementale în jos iar procesul de depunere continuă strat cu strat, până când modelul este realizat complet. După finalizarea printării 3D piesa se va lăsa un timp pe platforma de construcție în vederea consolidării acesteia.

Etapa de post-procesare constă în înlăturarea sau extragerea piesei de pe platforma de construcție urmată de îndepărtarea materialului suport cu jet de apă sub presiune, utilizând o stație de reciclare (Figura 1.3).

Un exemplu schematizat și pe bază de imagini, privind parcurgerea tuturor etapelor amintite anterior pentru realizarea unei piese este prezentat în Figura 1.3. Astfel, pornind de la un model 3D salvat din Solid Works în fișier STL, se pregătește platforma de construcție în software-ul Objet Studio, urmând apoi procesul automat de printare 3D gestionat de software-ul EDEN 350. De asemenea, în etapa de post procesare este detaliat procesul de curățire cu jet de apă sub presiune a unei piese.

O parte din produsele realizate prin fabricație aditivă utilizând tehnologia PolyJet, constând în piese și ansambluri 3D, în cadrul contractelor de cercetare cu mediul socio-economic la care am fost director de proiect sau în cadrul colaborărilor cu doctoranzii și postdoctoranzii din cadrul departamentului de Ingineria fabricației a Universității Transilvania din Brașov sunt prezentate în figura 1.4.



Fig. 1.4 Produse realizate în cadrul contractelor și diverselor colaborări [21, 22, 23]

1.1.3. Procesul de fabricație aditivă prin pulverizare cu jet de liant utilizând tehnologia 3DP

Tehnologia 3DP face parte din categoria de procese de pulverizare cu jet de liant, și constă în depunerea controlată și selectivă a unui liant pe straturi succesive de pulbere, piesa formându-se într-un pat de pulbere, Figura 1.5.

O parte din cercetările teoretice și experimentale, prezentate în continuare se bazează pe utilizarea imprimantei 3D, ZCorp 310 Plus produsă de firma ZCorporation din Statele Unite ale Americii, care utilizează tehnologia de pulverizare cu jet de liant. Această imprimantă 3D a fost achiziționată în anul 2007, în cadrul grantului Platformă pentru dezvoltări tehnologice inovative – PLADETINO.

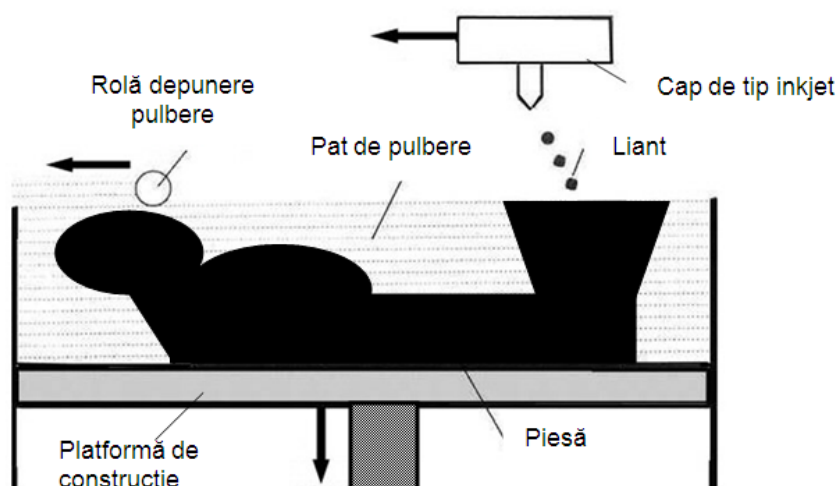


Fig.1.5 Schema procesului de fabricație aditivă prin pulverizare cu jet de liant [21,24]

Fabricația aditivă prin tehnologia 3DP presupune parcurgerea celor trei etape comune procedurilor de fabricație aditivă și anume preprocesarea, procesarea și post procesarea datelor. În etapa de preprocesare, un model 3D salvat în format STL, PLY sau VRML este importat în software-ul ZPrint aferent imprimantei ZCorp 310 Plus, și se realizează optimizarea poziționării pieselor precum și simularea procesului de fabricație.

O serie de operații pregătitoare procesului de printare 3D sunt necesare, privind pregătirea patului de pulbere a imprimantei și repartizarea uniformă a pulberii din patul de alimentare pe platforma de construcție pentru a crea un prim strat neted cu rol de suport.

Etapa de procesare (printare 3D) se realizează într-o incintă închisă la temperatura mediului de lucru de 38°, prin depunerea selectivă de liant pe straturi succesive de pulbere. Straturile de pulbere sunt depuse cu ajutorul unei role pe platforma de construcție, iar un cap de printare HP (Hewlett Packard) aplică selectiv pe stratul de pulbere un liant, determinând ca particulele de pulbere să se lipească între ele. În continuare pistonul din rezervorul de alimentare cu pulbere se ridică iar platforma de construcție coboară cu grosimea unui strat. Imprimanta depune un nou strat de pulbere și procesul se repetă până la printarea piesei. Piesa rezultată este poroasă.

Procesul de post-procesare constă în îndepărtarea piesei din stratul de pulbere, urmată de desprăfuirea piesei cu aer comprimat într-o stație de reciclare. Piesa printată 3D este în stare crudă și necesită o durificare a pereților. Acest lucru poate fi realizat prin infiltrarea piesei cu diverse tipuri de rășini, pentru a îi conferi rezistență și duritate ridicată.

În figura 1.6 este prezentat schematizat procesul de printare 3D pe sistemul de fabricație aditivă ZCorp 310 Plus, urmând toate etapele prezentate anterior.

O serie de piese fabricate aditiv pe imprimanta 3D ZCorp 310 Plus, realizate de către autor în cadrul laboratoarelor cu studenții și pentru doctoranzi, sau în cadrul contractelor de cercetare cu mediul industrial, sunt prezentate în figura 1.7.

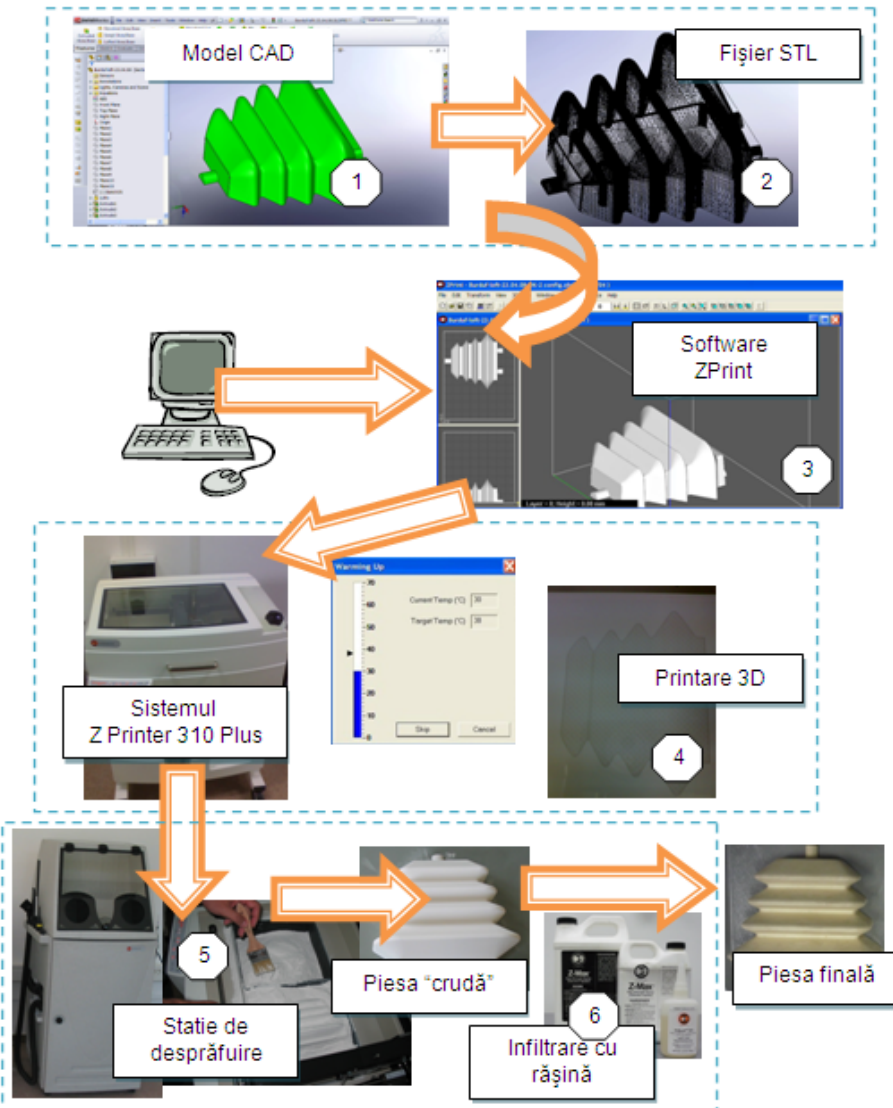


Fig. 1.6 Etapele procesului de fabricație aditivă prin tehnologia 3DP [21, 24]



Fig.1.7 Produse realizate prin tehnologia 3DP [21, 22]

1.2. Optimizarea proceselor de fabricației aditivă pentru teste funcționale

În acest capitol sunt prezentate o serie de studii comparative privind optimizarea producției aditive folosind sistemele de fabricație aditivă ZCorp 310 Plus și Objet 350. În al doilea rând, sunt propuse o serie de reguli privind problema orientării optime și poziționării optime a pieselor pe platforma de construcție a sistemelor de fabricație aditivă pentru procesele de pulverizare cu jet de material și pulverizare cu jet de liant.

1.2.1 Cercetări privind optimizarea poziționării și orientării unei piese in fabricația aditivă

Acest studiu de caz a luat în considerare un profil aerodinamic NACA care a fost proiectat în software-ului Solid Works.

Găsirea unei orientări optime a profilului aerodinamic pe platforma de construcție [25, 26] a sistemului de fabricație aditivă este importantă din mai multe motive. În primul rând, proprietățile pieselor fabricate aditiv pot varia de la o direcție de fabricație la alta, in diverse orientări de-a lungul axelor sistemului de coordonate al mașinii X, Y și Z [6]. De asemenea, poziția modelului pe platforma de construcție influențează timpul de fabricație. În acest studiu de caz s-a realizat optimizarea orientării modelului pe platforma de construcție pentru a minimiza timpul de construcție și consumul de materiale.

In prima parte a acest subcapitol este analizată fabricația aditivă prin tehnologia PolyJet, ținând cont de particularitățile acesteia. Trei orientări diferite ale modelului pe tava de construcție (Figurile 1.8, 1.9 și 1.10) au fost luat în considerare pentru analiză. Astfel, in software-ul Objet Studio, piesa a fost importată in format STL și orientată pe rând, cu cea mai mare dimensiune a sa de-a lungul axei X, Y și Z. Pentru fiecare caz au fost calculate consumul de materiale, incluzând materialul model și cel suport, precum și timpul de construcție [26].

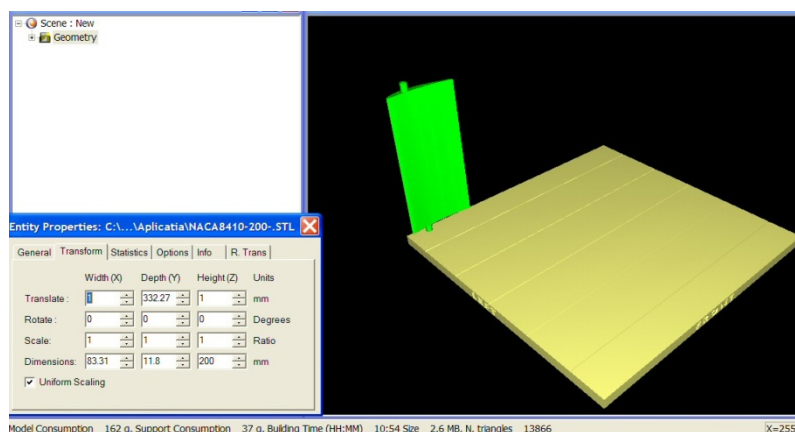


Fig. 1.8 Orientarea piesei pe platforma de construcție a sistemului de fabricație aditivă EDEN 350: cea mai mare dimensiune in lungul axei Z [21]

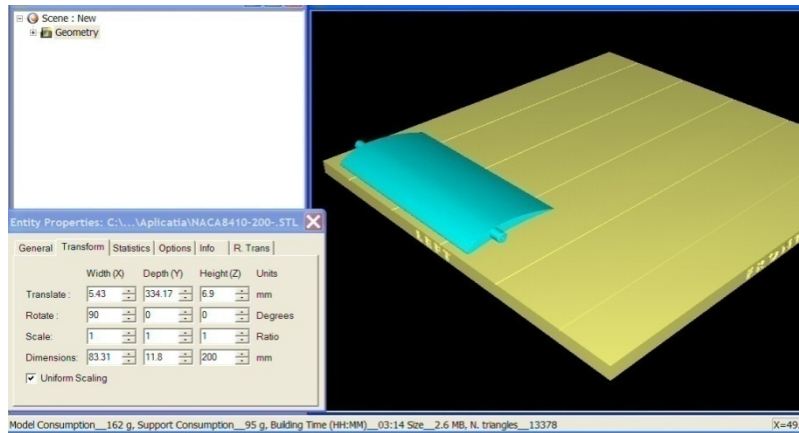


Fig.1.9 Orientarea piesei pe platforma de construcție a sistemului de fabricație aditivă EDEN 350: cea mai mare dimensiune in lungul axei Y [21]

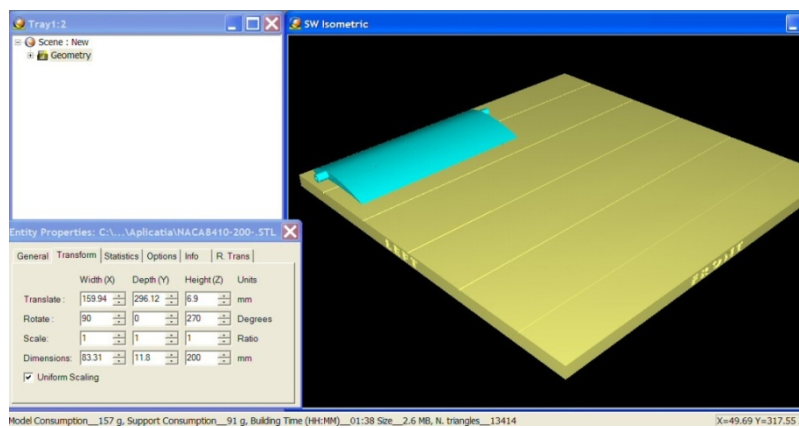


Fig.1.10 Orientarea piesei pe platforma de construcție a sistemului de fabricație aditivă EDEN 350: cea mai mare dimensiune in lungul axei X [21]

Timpul minim de fabricație a fost determinat în cel de al treilea caz, orientând cea mai mare dimensiune a acesteia in lungul axei X. Pe baza acestei constatări a fost propusă o regulă privind orientarea pieselor in planul XY in tehnologia PolyJet, denumita „**regula XY-0°**”. Un alt aspect important este alinierea modelului cu axele imprimantei 3D pentru a nu rezulta defecte de suprafață, mai ales dacă modelul este mărginit de suprafețe laterale plane.

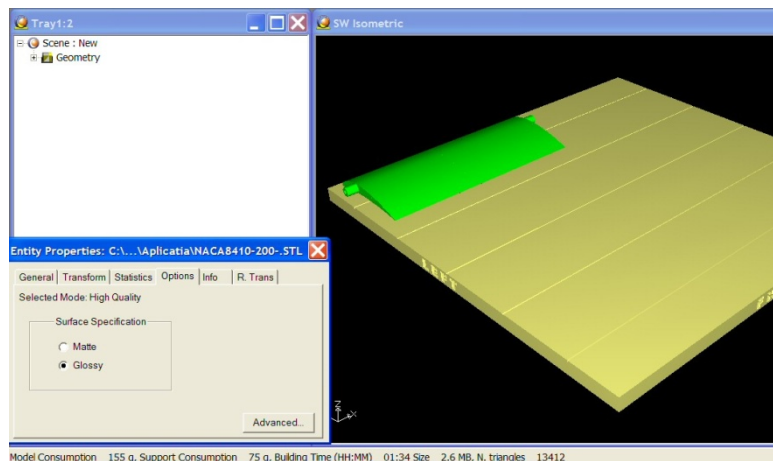


Fig.1.11 Orientarea piesei pe platforma de construcție a sistemului de fabricație aditivă EDEN 350, cu cea mai mare dimensiune in lungul axei X in modul lucios [21]

Tipul de finisare a suprafeței pieselor realizate utilizând tehnologia PolyJet poate fi ales ca fiind mat sau lucios. În varianta lucioasă, suprafața superioară a modelului este printată în modul lucios, iar suprafața inferioară în modul mat. Ținând cont de acest lucru, s-a luat în considerare un al patrulea caz privind orientarea pieselor, și anume orientare în lungul axei X în modul lucios (Figura 1.11). Consumul minim de material a fost obținut în acest caz, rezultând regula 2 de orientare denumită „regula XY-0° în mod lucios”.

Rezultatele privind consumul de materiale și timpul de fabricație, utilizând tehnologia PolyJet, sunt prezentate în tabelul 1.

Tab.1 Estimarea parametrilor de fabricație pentru tehnologia PolyJet [21]

| | Consum de material model [grame] | Consum de material suport [grame] | Timp de fabricație [ore:min] |
|-------------------|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Cazul A (fig. 11) | 162 | 37 | 10 : 54 |
| Cazul B (fig. 12) | 162 | 95 | 3 : 14 |
| Cazul C (fig. 13) | 157 | 91 | 1 : 38 |
| Cazul D (fig. 14) | 155 | 75 | 1 : 34 |

În cel de al doilea studiu de caz din acest subcapitol, fabricarea prin **tehnologia 3DP (pulverizare cu jet de liant)**, piesa a fost importată în software-ul ZPrint pentru a permite optimizarea fabricației aditive. Grosimea stratului de pulbere ZP 131 utilizată este setată la valoarea de 0,0875 mm. Piesa a fost plasată pe platforma de construcție, în poziții similare ca și în cazul precedent, orientată cu dimensiunea cea mai mare în lungul axelor X, Y și Z (figurile 1.12, 1.13 și 1.14).

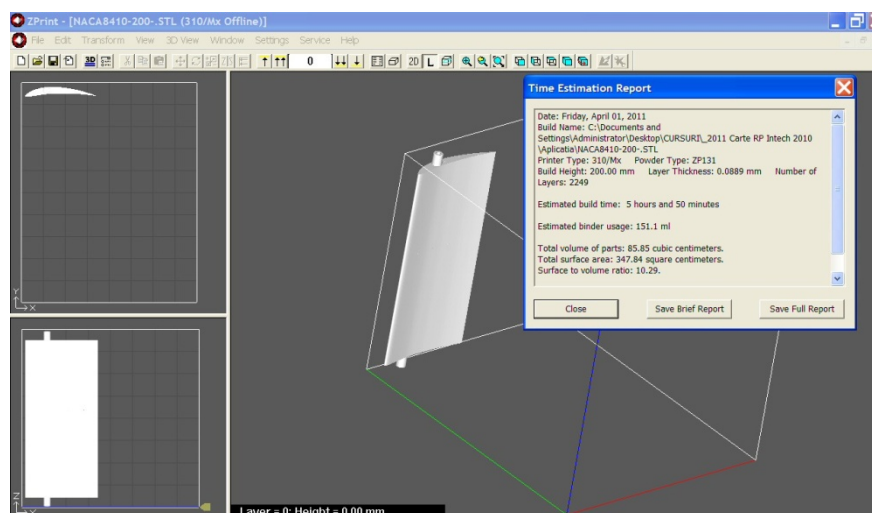


Fig.1.12 Orientarea piesei pe platforma de construcție a sistemului de fabricație aditivă Z310 Plus, cu cea mai mare dimensiune în lungul axei Z [21]

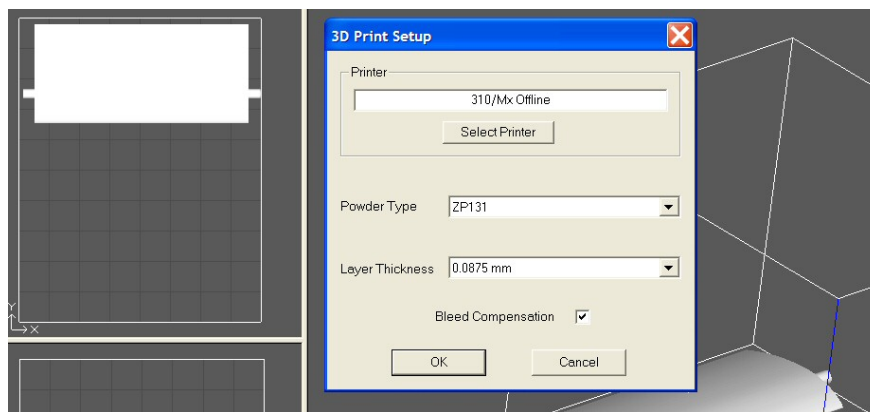


Fig.1.13 Orientarea piesei pe platforma de construcție a sistemului de fabricație aditivă Z310 Plus cu cea mai mare dimensiune in lungul axei X [21]

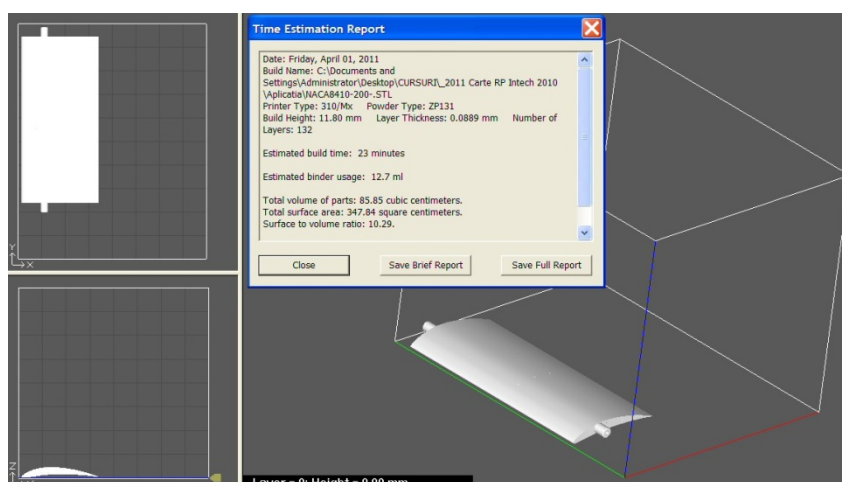


Fig.1.14 Orientarea piesei pe platforma de construcție a sistemului de fabricație aditivă Z310 Plus cu cea mai mare dimensiune in lungul axei Y [21]

Tab. 2 Estimarea parametrilor de fabricație pentru tehnologia 3DP [21]

| | Consum pulbere | Consum liant | Timp de fabricație |
|------------------|-----------------------|----------------|--------------------|
| Case A (fig. 15) | 85,85 cm ³ | 151,1 ml | 5 h 50 min |
| Case B (fig. 16) | 85,85 cm ³ | 13,1 ml | 34 min |
| Case C (fig. 17) | 85,85 cm ³ | 12,7 ml | 23 min |

Consumul de materiale și timpul de construcție au fost calculate pentru cele trei cazuri luate in considerare. Timpul minim de fabricare al piesei a fost determinat în cel de al treilea caz (Figura 1.14), prin plasarea dimensiunii mai mari a modelului in lungul axei Y. De asemenea, în acest caz a fost estimat atât consumul minim de pulbere și de liant (Tabelul 2).

A fost propusă o regulă privind orientarea pieselor in planul XY in tehnologia 3DP (pulverizare cu jet de liant), și anume „**regula XY-90°**” [22].

1.2.2 Cercetări privind fabricarea aditivă a rotorului unei turbine Pelton

În cadrul acestui subcapitol sunt prezentate o parte din rezultatele cercetărilor din contractul de cercetare nr. 6427/ 19.05.2009, diseminate în lucrări ISI [27, 28]. Acestea se referă la dezvoltarea rapidă a produsului și fabricarea aditivă a rotorului unei noi pico turbine de tip Pelton.

În literatura de specialitate [29, 30] există diverse abordări cu privire la aplicațiile privind prototiparea rapidă și fabricarea aditivă a turbinelor. Evoluția materialelor utilizate în procesul de fabricație aditivă precum și dimensiunea platformei de construcție a sistemelor de fabricație aditivă (imprimante 3D) sunt factori determinanți pentru fabricarea aditivă a turbinelor. Abordările cu privire la hidrocentralele de mici dimensiuni sunt concentrate în principal pe proiectarea și optimizarea turbinelor.

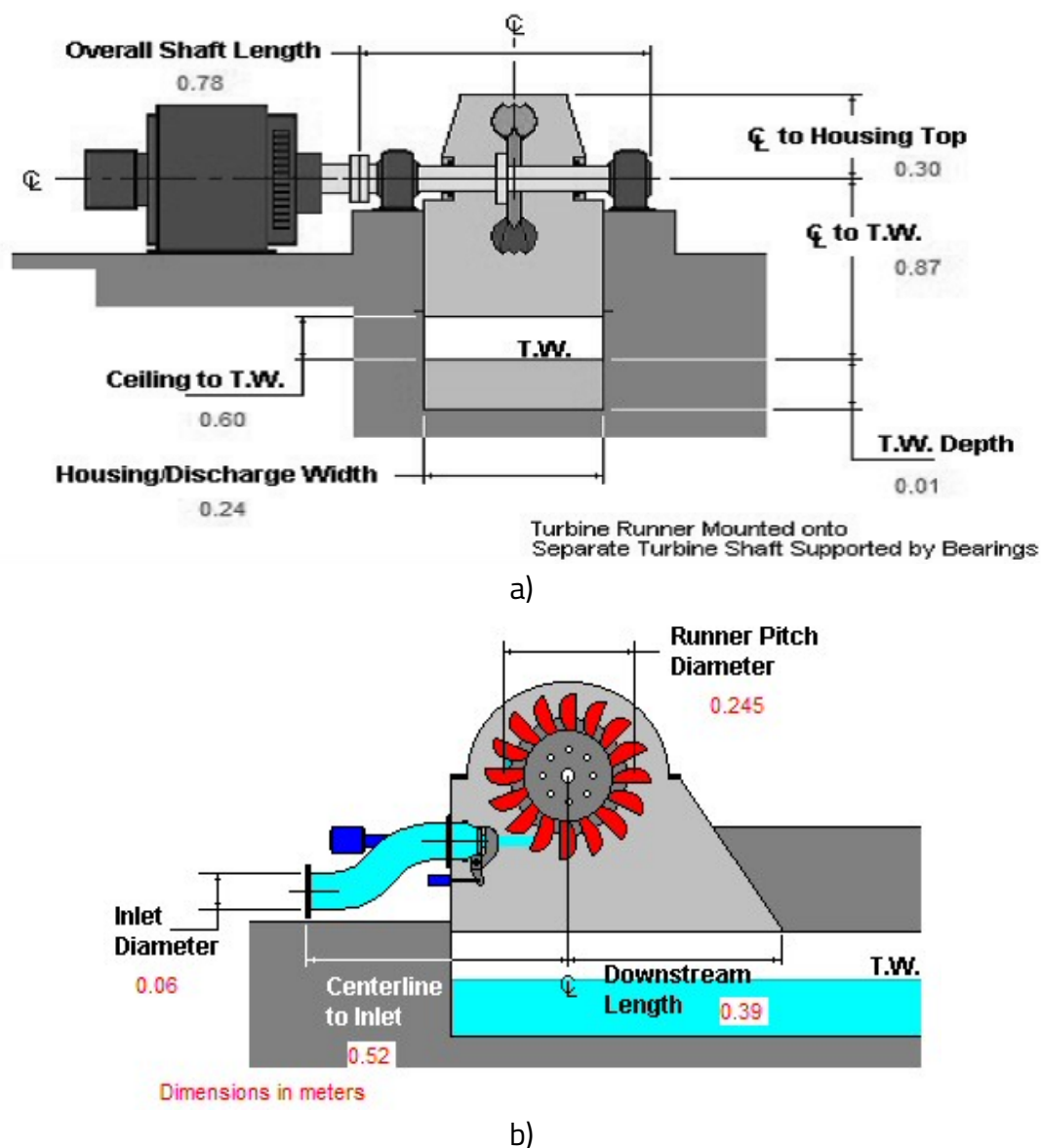


Fig.1.15 Caracteristicile turbinei Pelton [27, 28]

Mini, micro și pico hidrocentralele sunt soluții cheie în furnizarea energiei electrice regenerabile populațiilor rurale. Astfel, mini-hidrocentralele se referă de obicei la scheme sub 1 MW, micro-hidro sub 100 kW și pico-hidro sub 5 kW [31].

Caracteristicile dimensionale ale turbinei Pelton au fost calculate pe baza considerațiilor hidrodinamice, folosind software-ul TURBNPRO. Dispunerea turbinei Pelton este prezentată în Figura 1.15 [27].

Metodele clasice utilizate pentru fabricarea cupelor Pelton [27, 28] constau în realizarea cupelor turbinei prin frezare CNC și asamblarea acestora de porțiunea centrală, fie prin sudare sau cu șuruburi.

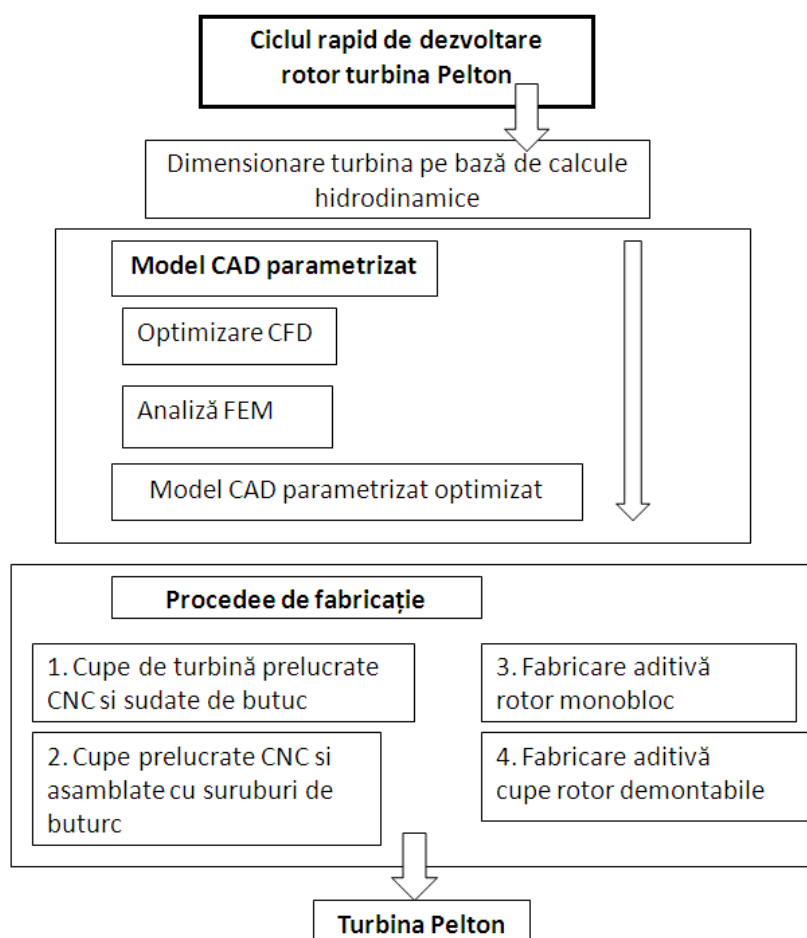


Fig.1.16 Ciclul de dezvoltare rapidă a unei turbine Pelton [27, 28]

O metodologie privind dezvoltarea rapidă a produselor de tip turbine Pelton din categoria pico a fost propusă de către autorul acestei lucrări, Figura 1.16. Aceasta constă din etapele principale următoarele [27, 28]:

- ✓ calcul de dimensionare a turbinelor din considerente hidrodinamice,
- ✓ modelarea 3D, analiza curgerii fluidelor (CFD) precum și analiza cu elemente finite (FEM) a modelului 3D al rotorului turbinei. În urma acestor calcule a rezultat un model CAD optimizat al rotorului turbinei.
- ✓ fabricarea rotorului turbinei Pelton prin metode clasice sau metode de fabricație aditivă.

Autorul acestei lucrări a propus două metode de fabricare a rotorului turbinei Pelton bazate pe tehnologii de fabricație aditivă. Prima varianta propusă constă în fabricarea aditivă a rotorului cu palete monobloc. A doua variantă constă în fabricarea aditivă a paletelor turbinei Pelton separat și asamblarea acestora cu șuruburi de butucul rotorului.

Pentru ambele variante au fost proiectate modele 3D parametrizate in software-ul SolidWorks (Figurile 1.17 și 1.18). Prima variantă propusă este limitată de dimensiunile platformei de construcție a sistemului de fabricație aditivă, prin diametrul rotorului. In cea de a doua variantă propusă, în care cupele Pelton sunt fabricate individual, pot fi realizate cupe de dimensiuni mai mari decât in primul caz ținând cont de dimensiunile platformei de construcție.

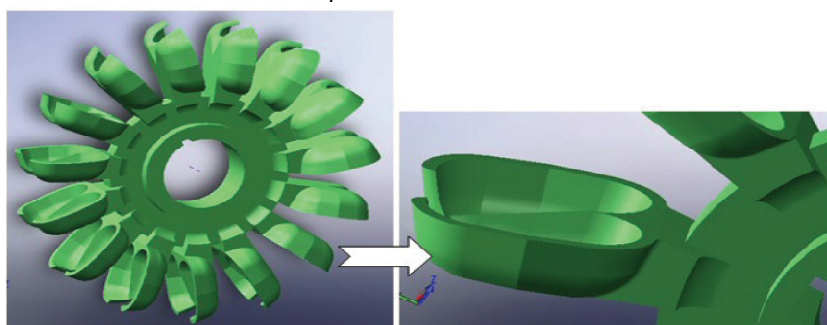


Fig.1.17 Studiul de caz 1. Palete de turbină monobloc cu butucul rotorului Pelton [27]

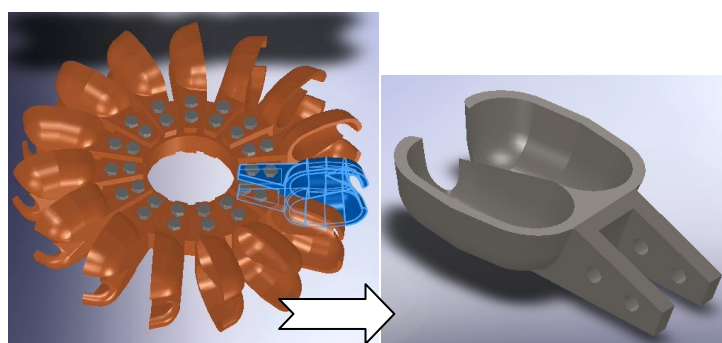


Fig.1.18 Studiul de caz 2. Palete de turbină detașabile asamblate cu șuruburi la butuc [27]

Fabricarea aditivă a rotorului monobloc a turbinei Pelton a fost realizată utilizând tehnologia PolyJet, din materiale polimerice.

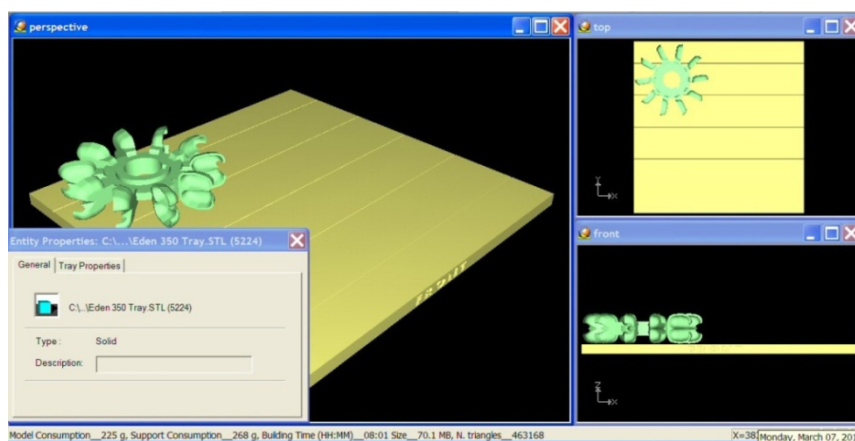


Fig.1.19 Poziția optimă a rotorului turbinei Pelton pe platforma de construcție a sistemului de fabricație aditivă EDEN 350

Trei etape principale au fost luate în considerare: pre-procesare, procesare și post-procesarea datelor. În prima etapă, modelul 3D al rotorului Pelton a fost exportat într-un fișier STL. Acest fișier STL a fost importat în software-ul Objet Studio pentru a simula procesul de fabricație aditivă, a estima consumul de materiale și a timpul de fabricație. Poziția optimă a rotorului pe platforma de construcție a imprimantei EDEN 350, este cea din figura 1.19 [27].

Materialele utilizate în fabricarea aditivă a rotorului Pelton au fost FullCure 720, ca material model și FullCure 705 ca material suport. În Figura 1.20 se observă un detaliu privind materialul suport care umple cavitatea cupelor rotorului Pelton. Postprocesarea a constat în înlăturarea materialului suport utilizând stația de curățire cu jet de apă sub presiune. Rotorul turbinei Pelton a fost realizat dintr-un material semitransparent (Figura 1.21).

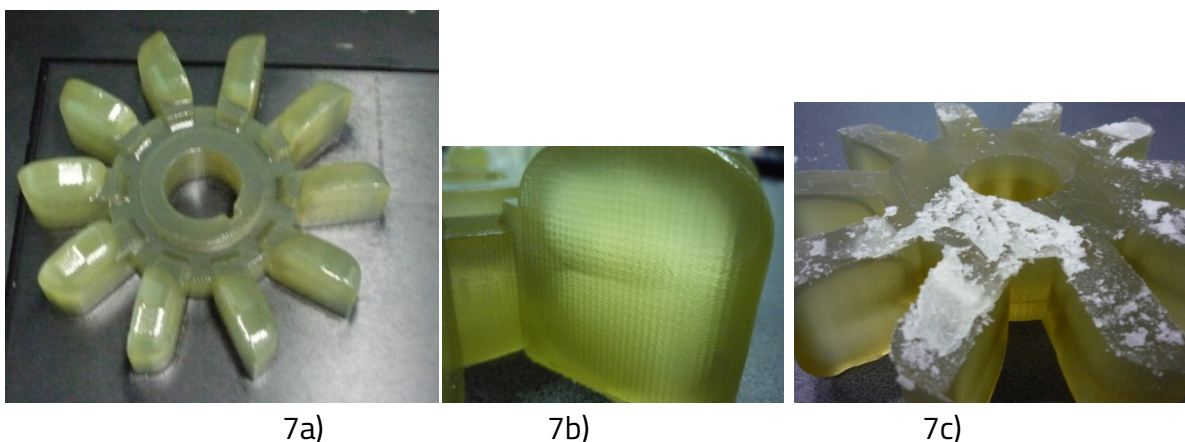


Fig.1.20 a) Rotorul turbinei Pelton pe platforma de construcție b) Detaliu privind o cupă a rotorului c) Detaliu privind partea inferioară a rotorului cu material suport [27]

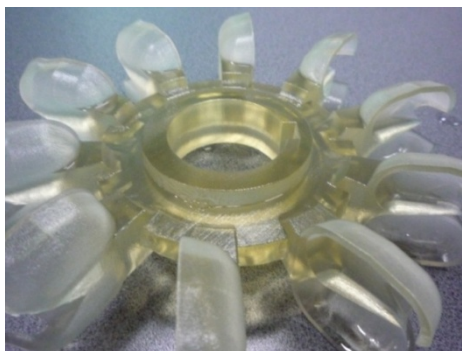


Fig.1.21 Rotorul turbinei Pelton după operațiile de postprocesare, fabricat în cadrul laboratorului de Tehnologii integrate de fabricație al Universității Transilvania din Brașov [27]

Rezultatele obținute în cadrul acestor cercetări sunt prezentate în continuare. Turbinele de tip pico reprezintă o sursă de energie ideală pentru standurile experimentale de cercetare și educaționale și, de asemenea, pentru îmbunătățirea serviciilor energetice rurale îndepărtate. Turbinele Pico sunt simple de instalat și operat. De asemenea, ele pot oferi o sursă adecvată de energie pentru gospodăriile rurale 24 de ore pe zi din pâraiele cu debit scăzut. În funcție de dimensiunea sa, un sistem de energie pico-hidro poate oferi unei comunități mici, îndepărtate, energie electrică adecvată pentru a alimenta becurile, televizoarele și alte aparate casnice.

Modelul 3D parametrizat al turbinei Pelton, prezentat în acest studiu de caz, este util pentru dezvoltarea unei familii CAD de turbine. Tehnologia de fabricație aditivă reduce semnificativ timpul de fabricație a produselor complexe, cum ar fi turbinele hidro. În cazul unui rotor Pelton cu diametrul exterior de 150 mm, timpul de fabricație a fost de aproximativ 10 ore. De asemenea, folosind tehnologia AM pot fi obținute forme complexe care nu pot fi realizate prin tehnologiile clasice precum forjarea și frezarea.

Turbina a fost realizată cu o precizie de aproximativ 0,1 mm prin depunerea de straturi de 16 micrometri. Valorile medii pentru rugozitatea suprafeței sunt $R_a=1,04$ micrometri și $R_z=5,6$ micrometri [32]. Testarea turbinei Pelton a fost efectuată într-un stand experimental de către beneficiarul acestui contract de cercetare. De asemenea metoda prezentată oferă proiectanților o cale de a realiza și alte tipuri de turbine prin procedee aditive de fabricație.

1.2.3. Cercetări privind optimizarea poziționării a două piese pentru teste de asamblare

În acest studiu de caz am considerat un ansamblu compus din două piese (partea inferioară și partea superioară) care sunt asamblate, folosind elemente de ghidare cu pini și cleme laterale flexibile de fixare [33, 34]. Ansamblul (Figura 1.22) a fost proiectat în software SolidWorks. În partea finală a subcapitolului sunt prezentate o serie de exemple privind testele de asamblare.

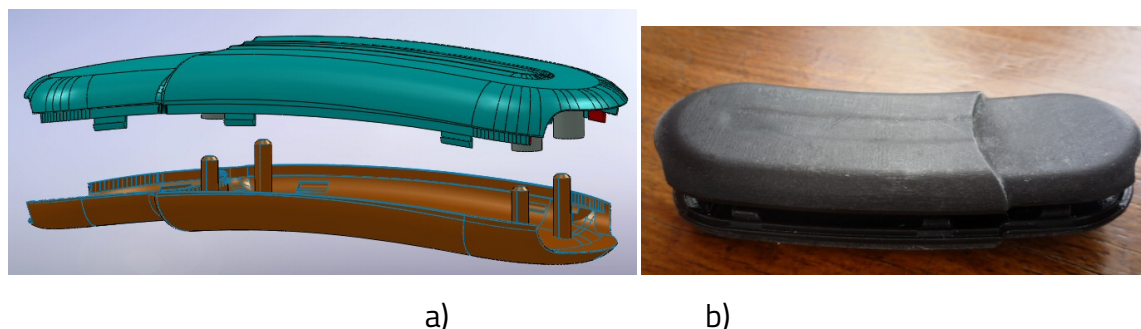


Fig.1.22 a) Modelele 3D ale celor două componente ale ansamblului; b) Produsul asamblat realizat prin pulverizare cu jet de materiale (PolyJet) [34]

Au fost studiate comparativ două procedee de fabricație aditivă și anume pulverizare cu jet de materiale și pulverizare cu jet de liant.

În primul studiu de caz s-a utilizat tehnologia PolyJet. Ținând cont de regulile de poziționare din paragraful 1.2.1, cele două piese ale ansamblului au fost orientate după regula XY-0° în mod de finisare lucios. Pentru a putea asambla facil cele două componente ținând cont de forma elementelor de asamblat, este de dorit evitarea postprocesării, adică obținerea unor suprafețe finale din fabricație, fără ajustări ulterioare [33, 34].

Ținând cont de cele de mai sus, și în urma unor teste preliminare, s-a considerat că cel mai bun mod de poziționare a pieselor, în cadrul tehnologiei PolyJet, este ca suprafețele care se vor asambla să fie orientate în sus în mod lucios. Piesele au fost orientate astfel încât să minimizeze cantitatea de material suport, să se obțină un timp minim de construcție și o suprafață de o calitate bună. Folosind modul de imprimare lucios, suprafețele externe sunt

netede, iar post-procesarea nu mai este necesara. Au fost luate in considerare două variante de poziționare care respectă regula XY-0°, așa cum reiese din figura 1.23. In urma analizei consumului de materiale și a timpului de fabricație, poziționarea optimă a celor două piese a rezultat in primul caz, adică **pieselor plasate in serie** (Figura 1.23 a).

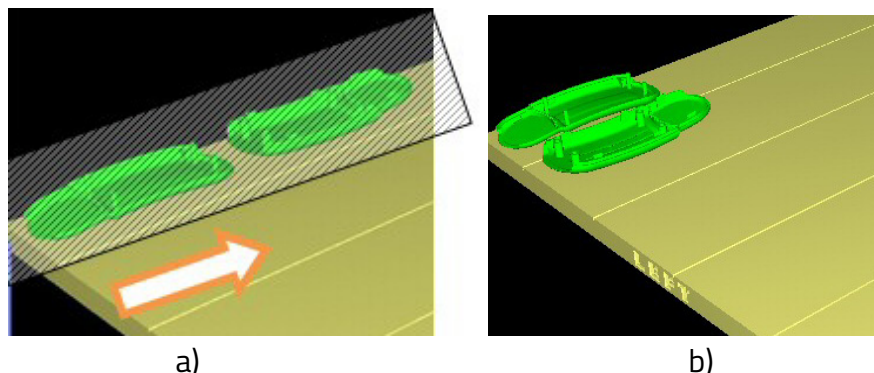


Fig.1.23 Poziționarea în serie și în paralel a pieselor în lungul axei X, regula "XY-0°" [21, 34]

In concluzie s-a propus o nouă regulă de orientare a componentelor unui ansamblu, pentru tehnologia PolyJet, denumită „**Suprafețele care se assemblează trebuie să fie printate în mod lucios, poziționate în sus și plasate în serie în direcția axei X**”. Aplicarea acestei reguli oferă o calitate foarte bună a suprafeței și permite o asamblare excelentă a pieselor.

În cel de al doilea studiu de caz, și anume al fabricării aditive **prin pulverizare cu jet de liant**, utilizând imprimanta ZCorp 310, aceste criterii nu pot fi aplicate deoarece piesa este susținută pe patul de pulbere. Trei cazuri de poziționare au fost analizate, așa cum rezultă din figurile 1.24, 1.25, și 1.26, și anume, piesele poziționate în serie în lungul axei X, piesele poziționate în serie în lungul axei Y și piesele poziționate în paralel în lungul axei Y.

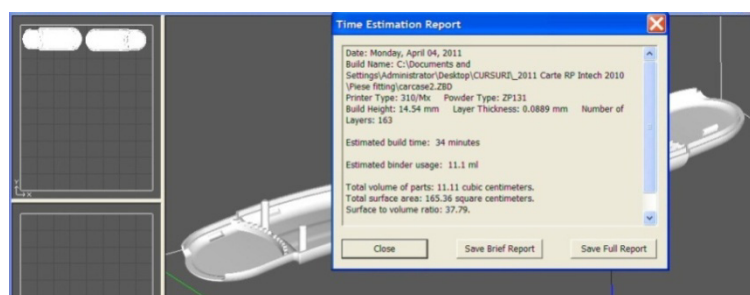


Fig.1.24 Piese poziționate în serie în lungul axei X în procesul de fabricație aditivă prin pulverizare cu jet de liant [21]

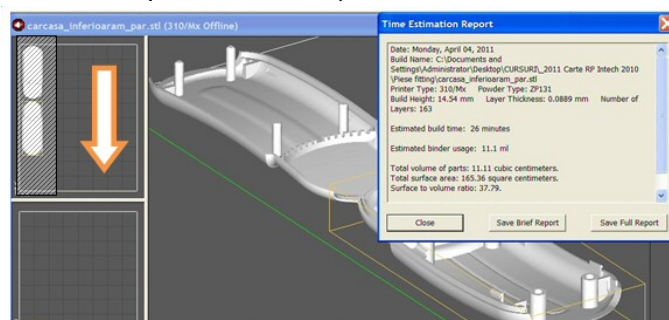


Fig.1.25 Piese poziționate în serie în lungul axei Y în procesul de fabricație aditivă prin pulverizare cu jet de liant [21]

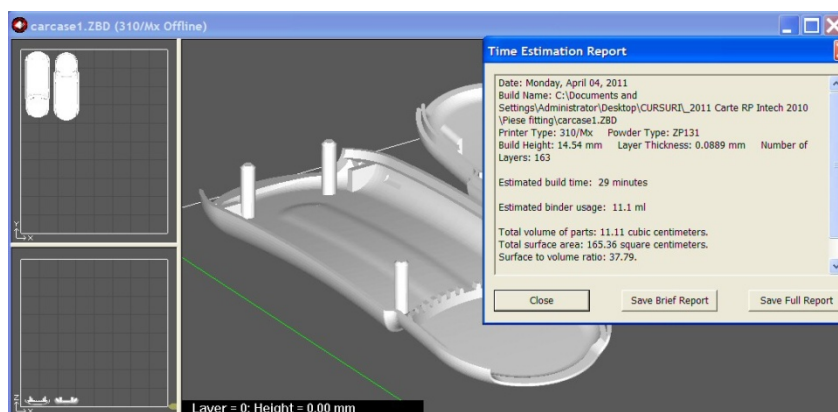


Fig.1.26 Piese poziționate în paralel în lungul axei Y în procesul de fabricație aditivă prin pulverizare cu jet de liant [21]

Tab. 3 Estimarea parametrilor procesului de AM pentru teste de asamblare [21]

| Orientare și poziționare piese | Proces de fabricație aditivă | | |
|---|------------------------------|---------------------------|--------------------|
| 1. ZPrint software (3DP) | | | |
| | Consum de pulbere | Consum de liant | Timp de fabricație |
| In direcția X, în serie (fig. 1.23) | 11,11 cm ³ | 11.2 ml | 34 min |
| In direcția Y, în serie (fig. 1.24) | 11,11 cm³ | 11.2 ml | 26 min |
| In direcția Y, în paralel (fig. 1.25) | 11,11 cm ³ | 11.2 ml | 29 min |
| 2. Objet studio software (PolyJet) | | | |
| | Consum de material model | Consum de material suport | Timp de fabricație |
| In direcția X, în serie (fig. 1.21a) | 28 g | 37 g | 1 h |
| In direcția X, în paralel (fig. 1.21b) | 30 g | 39 g | 1 h 54 min |

Rezultatele acestui studiu de caz sunt sintetizate în tabelul 3. În concluzie s-a propus o nouă regulă de orientare a componentelor unui ansamblu, pentru fabricația aditivă prin pulverizare cu jet de liant, denumită „**Suprafețele care se assemblează trebuie să fie poziționate în jos și plasate în serie în direcția axei Y**”. Aplicarea acestei reguli facilitează o postprocesare ușoară a pieselor dar nu asigură o asamblare fără ajustări a pieselor. Acest lucru se explică prin faptul că piesele rezultă poroase și fragile, iar după infiltrare cu rășina rezultă modificări dimensionale ale acestora în funcție de vâscozitatea și cantitatea de rășină folosită.

Pe baza rezultatelor din cele două studii de caz, în cazul fabricației aditive a pieselor pentru teste de asamblare, se recomandă utilizarea tehnologiei PolyJet. Validarea acestor cercetări și a regulilor de poziționare a fost realizată prin printarea 3D folosind tehnologia PolyJet a componentelor unui alt ansamblu din materialul VeroBlack, Figura 1.27.

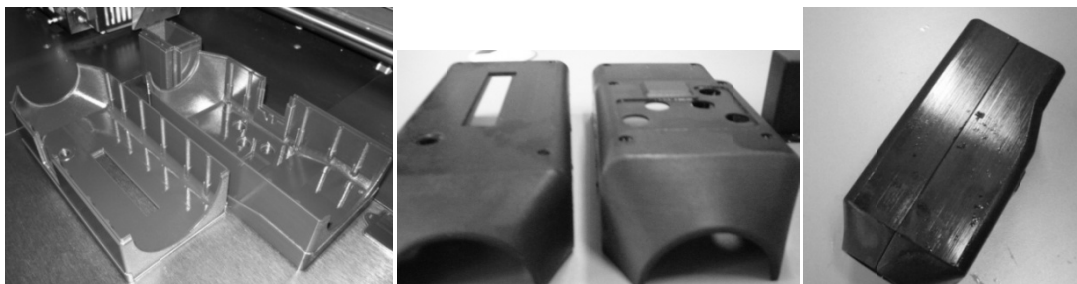


Fig.1.27 Piese realizate prin tehnologia PolyJet și asamblarea acestora [33]

O serie de carcase fabricate aditiv au fost realizate in cadrul unui contract de cercetare cu o companie in vederea realizării unor prototipuri pentru sistemele de e-ticketing folosite in transportul public din România (Figura 1.28 și 1.29). Carcasele au fost realizate utilizând tehnologia PolyJet din material VeroBlue, poziționarea lor pe platforma de construcție fiind realizată pe baza regulilor de poziționare propuse [35].

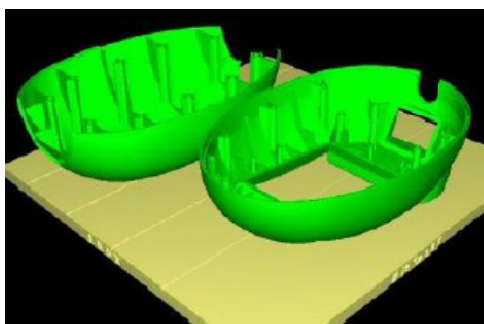


Fig.1.28 Platforma virtuală cu poziționarea carcaselor [35]



Fig.1.29 Piese realizate prin tehnologia PolyJet și asamblarea acestora [35]

Intr-un alt studiu de caz privind testele de asamblare am studiat asamblarea de tip "snap to fit" [34] intre două componente proiectate in SolidWorks, analizând trei tipuri de materiale VeroBlack, FullCure și Durus White. In cadrul asamblării pieselor prin "snap to fit", materialul piesei a trebuit sa permită o deplasare laterală de 2mm in timpul asamblării (Figura 1.30). Acest lucru este posibil doar prin utilizarea unui material flexibil. Doar in cazul testelor cu materialul DurusWhite asamblarea de tip "snap to fit" a fost posibilă. Elongația la rupere a materialului DurusWhite este mai mare decât a celorlalte două materiale, fiind de 44% in comparație cu 20% [34]. In celelalte două cazuri au rezultat fisuri in material in timpul asamblării.

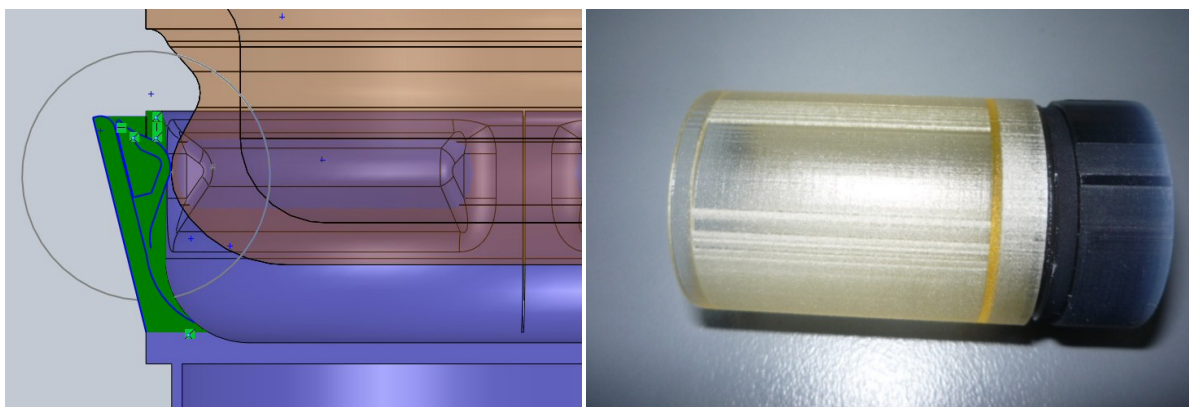


Fig.1.30 Piese proiectate in SolidWorks, fabricate prin tehnologia PolyJet și asamblate "snap to fit" [34]

1.2.4 Cercetări privind optimizarea poziționării mai multor piese fabricate aditiv in mod concomitent

În acest studiu de caz, a fost luată în considerare problema fabricării simultane a mai multor piese pe platforma de construcție [21, 23]. O serie de aspecte referitoare la fabricația aditivă a mai multor componente in același timp sunt luate in considerare, și anume: minimizarea timpul de printare 3D, simplificarea postprocesării, minimizarea timpului de post-procesare și minimizarea consumului de materiale.

Un ansamblu complex compus din mai multe componente a fost ales pentru analiză. Metoda propusă pentru optimizarea printării 3D a mai multor piese ale unui ansamblu presupune parcurgerea a două etape și anume, orientarea optimă a pieselor componente urmată de poziționarea optimă a acestora pe platforma de construcție a sistemului de fabricație aditivă.

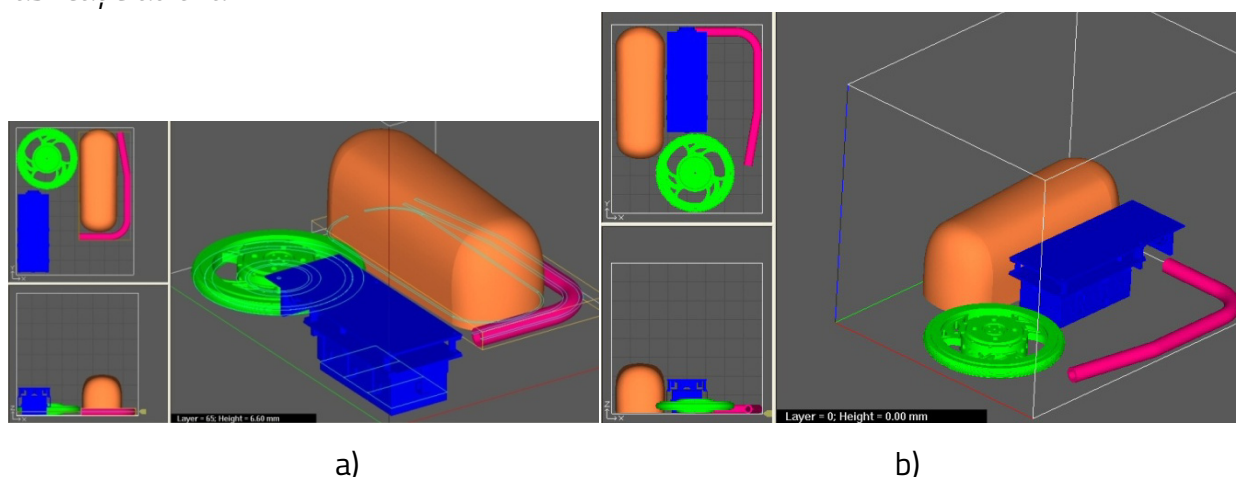


Fig.1.31 Piese poziționate pe direcția axei X, in ordine: a) crescătoare a înălțimilor pieselor; b) descrescătoare a înălțimilor pieselor [21]

În primul rând, se vor orienta toate piesele conform metodelor propuse in paragrafele anterioare, ținând cont de minimizarea consumului de materiale și a timpului printării, structura minimă de susținere (simplificare și minimizare postprocesare) și criteriile de calitate

a suprafeței. După orientarea optimă a pieselor, următorul pas se referă la poziționarea pieselor pe platforma de construcție în scopul minimizării timpului de printare.

Ținând cont de particularitățile proceselor de fabricație aditivă poziționarea pieselor pe platforma de construcție va fi studiată separat pentru fiecare tip de proces în parte.

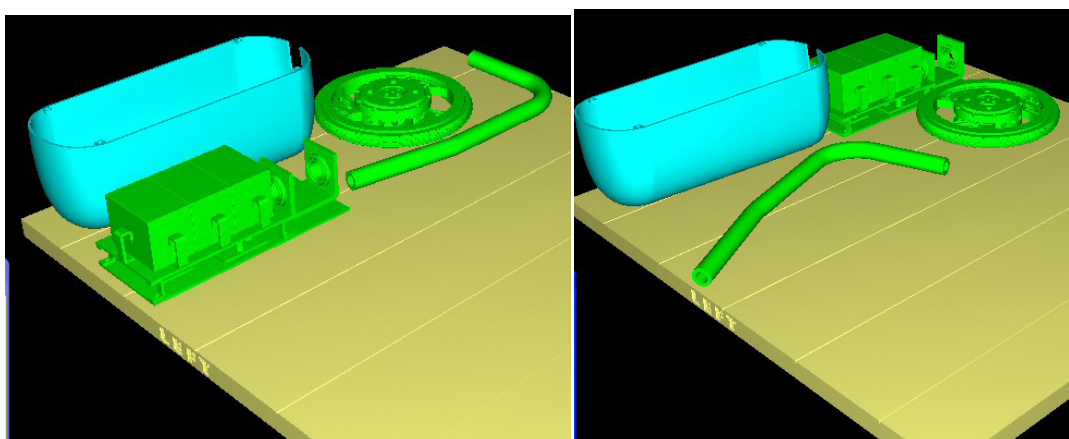
În cazul procesului de fabricație aditivă prin pulverizare cu jet de liant am considerat schemele de poziționare a pieselor ansamblului din Figura 1.31. În prima variantă de poziționare, piesele au fost aranjate în ordine crescătoare a înălțimii acestora, pe direcția axei X, iar în cel de al doilea caz în ordine descrescătoare a înălțimii. Pentru fiecare caz în parte a fost determinat timpul de fabricație și consumul de materiale.

Tab. 4 Estimarea parametrilor procesului de fabricație aditivă prin 3DP [21]

| | Consum de pulbere | Consum de liant | Timp de fabricație |
|----------------------|------------------------------|-----------------|--------------------|
| Cazul 1 (fig. 1.27a) | 269,11 cm ³ | 112,2 ml | 3 h 4 min |
| Cazul 2 (fig. 1.27b) | 269,11 cm³ | 112,2 ml | 2h 45 min |

Rezultatele au arătat același consum de materiale, dar timpul de fabricație a scăzut considerabil prin poziționarea pieselor în ordine descrescătoare a înălțimii pe direcția axei X. A fost propusă următoarea regulă de poziționare a componentelor unui ansamblu fabricat aditiv pe aceeași platformă de construcție prin pulverizare cu jet de liant, "**Poziționare componente ansamblu în ordine descrescătoare a înălțimii pe direcția axei X**".

În cazul procesului de fabricație aditivă prin pulverizare cu jet de materiale (PolyJet) am considerat următoarele scheme de poziționare a pieselor ansamblului așa cum se poate observa în Figura 1.32.



a)

b)

Fig.1.32 Poziționare piese în procesul PolyJet: a)Cazul 1. b)Cazul 2. [21, 23]

Rezultatele privind consumul de materiale și timpul de fabricație pentru cazurile prezentate anterior sunt în tabelul 5, de unde rezultă că **poziționarea pieselor în direcția X în ordine descrescătoare a înălțimii** este varianta optimă.

Tab. 5 Estimarea parametrilor procesului de fabricație aditivă prin PolyJet [23]

| | Obiect studio software (PolyJet) | | |
|----------------------|----------------------------------|------------------------|--------------------|
| | Consum material model | Consum material suport | Timp de fabricație |
| Cazul 1 (fig. 1.28a) | 530 g | 353 g | 12 h 56 min |
| Cazul 2 (fig. 1.28b) | 527 g | 350 g | 12 h 11 min |

Un studiu de caz privind **Proiectarea pentru fabricație aditivă (Design for additive manufacturing -DfAM)** a fost realizat pentru componenta de tip roată a ansamblului analizat. Pornind de la un design inițial al rotii compusă din trei componente, a fost realizată o optimizare a acesteia în scopul minimizării numărului de piese pe baza conceptului de Proiectare pentru asamblare. Prin fabricația aditivă a ansamblului de tip roată în stare asamblată s-a permis minimizarea numărului de componente. Designul rotii a necesitat realizarea unor elemente tehnologice de tip găuri, în scopul îndepărtării materialului suport.

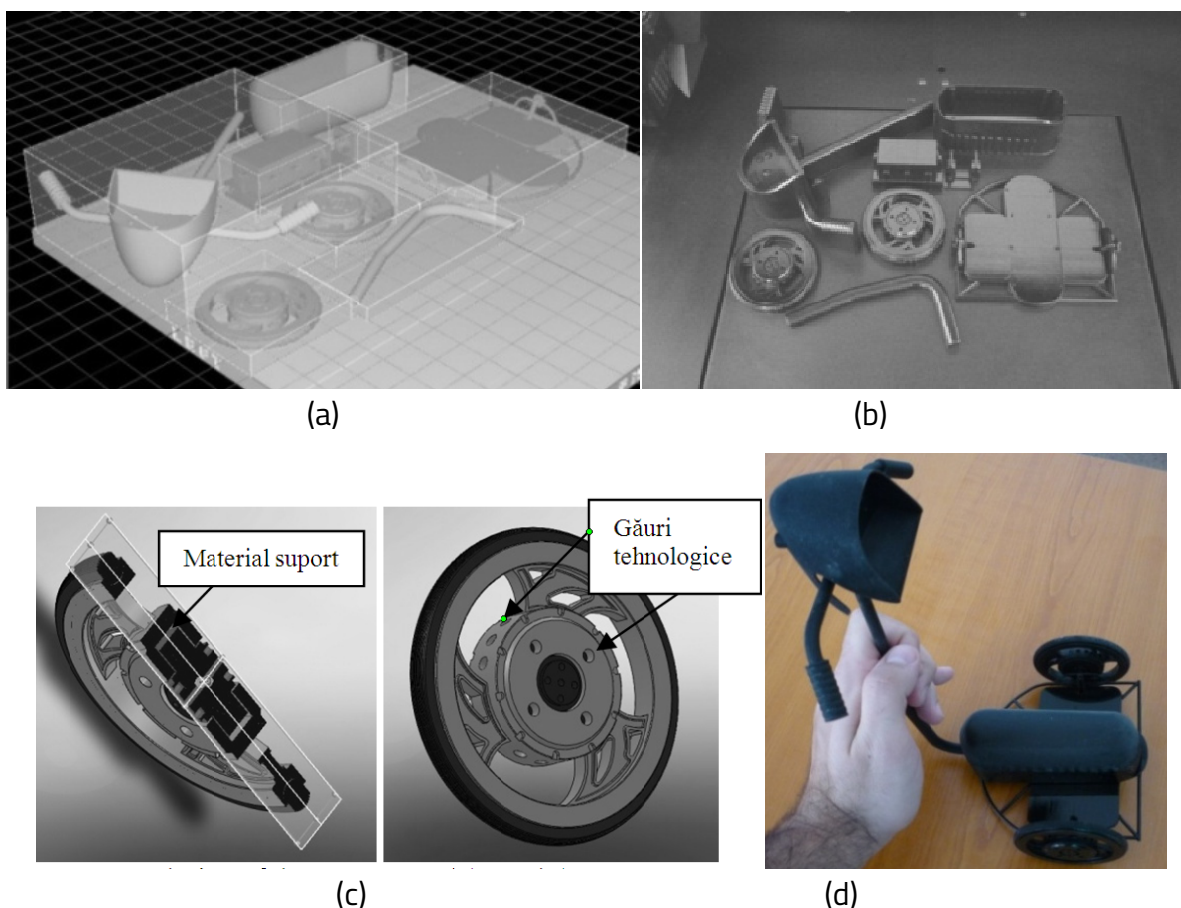


Fig.1.33 Produs realizat din mai multe componente: (a) simularea fabricației, (b) componentele fabricate aditiv, (c) designul rotii, (d) produsul asamblat [23].

Piesele componente ale unui produs complex, care a fost analizat în acest subcapitol, au fost fabricate aditiv prin tehnologia PolyJet din materialul model VeroBlack. Produsul asamblat este prezentat în Figura 1.33.

CAPITOLUL 2 CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND FABRICAREA RAPIDĂ A SCULELOR ȘI MATRITELOR PRIN PROCEDEE ADITIVE

Fabricarea rapidă a sculelor și matrițelor prin procedee aditive permite reducerea timpului și a costurilor față de fabricarea tradițională a acestora. Acest capitol se bazează pe articolele publicate de autorul acestei teze de abilitare în calitate de prim autor în [20], [22] și unic autor în [24]. Un alt articol reprezentativ publicat în domeniu este [36].

2.1. Introducere în Rapid Tooling (fabricarea rapidă a sculelor și matrițelor)

În mod tradițional, matrițele și calapoadele sunt realizate prin prelucrări CNC de frezare a unui semifabricat metalic sau din rășini epoxidice. Acest proces tehnologic necesită un timp relativ mare de dezvoltare precum și costuri asociate ridicate. În Figura 2.1 sunt prezentate trei variante tehnologice privind fabricarea matrițelor pornind de la un model 3D CAD. Pe măsura dezvoltării tehnologiilor rapide de realizare a produselor au apărut metode noi privind obținerea matrițelor focusate pe producția de serie mică.

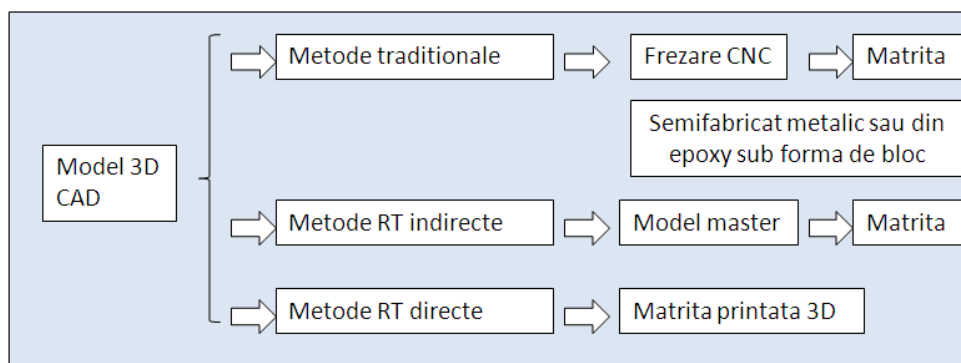


Fig.2.1 Metode pentru realizarea matrițelor

Dezvoltarea rapidă a produselor reunește sub umbrela de Rapid-X [20, 24] o serie de termeni specifici precum, Rapid Prototyping (RP), Rapid Tooling (RT) și Rapid Manufacturing (RM). Prototiparea rapidă [22] reprezintă un termen general, care descrie o varietate de sisteme care pot construi obiecte fizice tridimensionale direct din date electronice (date CAD) prin fabricație aditivă.

Rapid Tooling [20, 24] este tehnologia care adoptă tehnici de fabricație aditivă și le aplică la fabricarea sculelor și matrițelor. Tehnologiile RT se pot clasifica în tehnologii indirecte și tehnologii directe. În funcție de duritatea materialului sculei sau matriței rezultate, tehnologiile RT se pot clasifica în tehnologii pentru scule rigide și tehnologii pentru scule flexibile.

Tehnologiile RT directe permit realizarea sculei sau matriței în mod direct prin fabricație aditivă [20]. Tehnologiile RT indirecte [20], constau în principal în crearea unui model master prin fabricație aditivă care este folosit ulterior pentru realizarea matriței. Sculele flexibile sunt utilizate pentru serii de fabricație mici sau unicate, fiind realizate din materiale precum cauciucul siliconic sau rășini epoxidice. Pentru serii medii spre mari sunt utilizate scule rigide care sunt de obicei realizate din materiale metalice.

În literatura de specialitate există diverse abordări ale tehnologiilor RT atât directe cât și indirecte [20, 37, 38, 39]. Un studiu comparativ al tehnologiilor RT bazate pe durata de viață a sculei, timpul de dezvoltare a sculei și costul dezvoltării sculei este făcută în [39]. Ținând cont de diversitatea tehnologiilor de fabricație aditivă, diverse cercetări privind fabricarea rapidă a sculelor s-au focusat pe tehnici de fabricație aditivă cum ar fi FDM, PolyJet, SLS, SLM etc. Rodriguez și colab. a investigat utilizarea tehnologiei FDM pentru a crea matrițe folosind diferite tipuri de materiale, pentru procesul de termoformare [40] și a constatat că proprietățile matriței pot transfera defectele de suprafață ale tehnologiei FDM către foile de material termoformat. Hay și colab. a folosit o matriță de PLA imprimată cu FDM pentru a turna un implant personalizat de PMMA (metacrilat de polimetil) pentru o suprafață externă a unui craniu [41]. Sieminsky și colab. a analizat tehnologia FDM/FFF utilizată la fabricarea inserțiilor de matriță din PLA [42], pentru a crește durata de viață a inserțiilor și a reduce ciclul de producție, inserțiile trebuie răcite cu aer comprimat, după îndepărtarea piesei turnate. O nouă metodă de fabricație a pieselor CFRP cu aplicații la șaua de bicicletă a fost propusă în [36] bazându-se pe studii experimentale de fabricație a matrițelor prin procedeul FDM din materiale PLA și ABS. Piese și matrițele CFRP realizate au fost scanate 3D fără contact pentru a efectua evaluarea dimensională a rezultatelor și a le compara cu modelul CAD original. S-a constatat că tehnologia de fabricație utilizată pentru crearea matriței și a pieselor CFRP a permis obținerea unor rezultate bune.

În [43] au fost prezentate aplicații ale formării sub vid utilizând matrițe realizate prin tehnologia Fused Deposition Modeling (FDM). Singh [44] a investigat și a comparat printarea 3D PolyJet și turnarea în matrițe siliconice folosind materialul Alchemix VC3340. Companiile care furnizează sisteme de fabricație aditivă dezvoltă și aplicații RT bazate pe tehnicile lor AM. Astfel, Stratasys Ltd propune câteva soluții pentru fabricarea sculelor rapide [45] bazate pe tehnologia FDM și PolyJet.

Scopul acestui capitol este de a prezenta rezultatele cercetărilor autorului privind fabricarea rapidă a sculelor, având la bază tehnologiile de fabricație aditivă pulverizare cu jet de liant și PolyJet. Aceste aplicații industriale RP/RM cu accent pe obținerea sculelor rapide (RT) au fost dezvoltate, de către autor în cadrul Laboratorului de Tehnologii Industriale Inovative, Departamentul de Inginerie Fabricației din cadrul Universității Transilvania din Brașov, dar și în colaborare cu diverse companii industriale.

2.2. Cercetări privind fabricația rapidă a sculelor prin pulverizare cu jet de liant

În acest paragraf sunt prezentate o parte din rezultatele autorului obținute în cadrul contractului de cercetare nr. 5516/ 23.04.2008 privind fabricarea rapidă a unor scule pentru realizarea unor piese din cauciuc, având la bază procedeul de fabricație aditivă prin pulverizare cu jet de liant [20, 24].

Obiectivul principal al acestor cercetări a fost realizarea prin metode rapide a unor componente, pentru serii mici de fabricație și având costuri reduse, pentru simulatoarele de zbor ale diverselor tipuri de aeronave de transport. Ansamblul manșă a unei aeronave sau a unui simulator de zbor este un ansamblu complex compus din următoarele piese principale, manșa, burduf și componente interne (Figura 2.2). Pentru realizarea burdufului din cauciuc al ansamblului manșa au fost parcurse o serie de etape precum:

- ✓ Proiectarea asistată de calculator (CAD) a componentului pe baza datelor privind piesa originală;
- ✓ Proiectarea asistată de calculator a unui modelul 3D master al calapodului utilizat pentru fabricația indirectă;
- ✓ Fabricația rapidă a sculelor utilizând tehnologia pulverizare cu jet de liant.

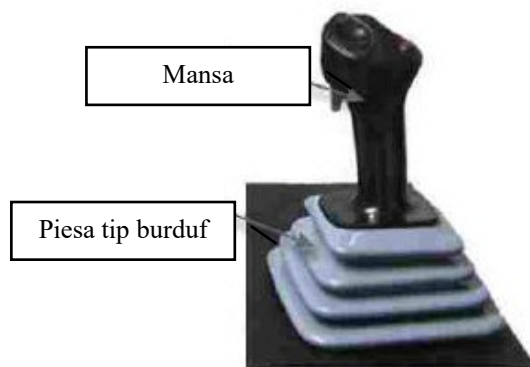


Fig.2.2 Ansamblu manșă a simulatorului de zbor [24]

În prima etapă a fost proiectat modelul 3D al piesei tip burduf, pe baza unor măsurători și desene ale unei piese originale. Pornind de la acest model 3D al piesei a fost proiectată o sculă denumită calapod (Figura 2.3). Aceste modele 3D au fost realizate utilizând software-ul SolidWorks.

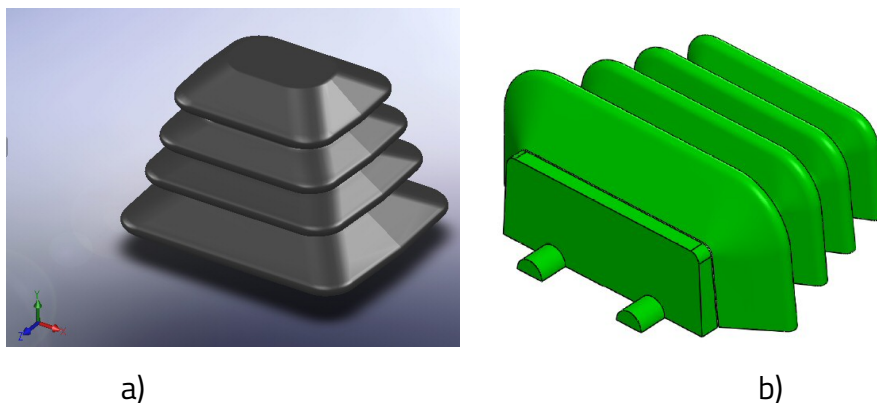


Fig. 2.3 a) Modelul 3D al burdufului manșei b) Modelul 3D al calapodului burdufului [24]

Fabricația componentelor calapodului pentru realizare burdufului s-a realizat pe sistemul de fabricație aditivă ZPrinter 310 Plus, din cadrul Departamentului de Inginerie fabricației, Universitatea Transilvania din Brașov. Materialele utilizate au fost pulbere compozită ZP 131, soluție de liant zb60 și rășină epoxidică Z-max pentru infiltrarea piesei. S-a utilizat un factor de scalare anizotropă ținând cont de caracteristicile materialului, pentru a corecta contracția piesei [24, 46]. Depunerea liantului pe straturile de pulbere având grosimea de 0.0875 mm a fost optimizată, conform Figurii 2.4. Astfel pe conturul piesei se observă o depunere continuă de liant, permițând realizarea unui înveliș rezistent, iar la interior depunerea liantului este sub forma unui patern pentru a conferi stabilitate. Piesa va avea caracteristici de rezistență mai bune de-a lungul axelor Y și X față de caracteristicile de rezistență de-a lungul axei Z. Acest lucru se datorează faptului că secțiunile transversale sunt imprimate în benzi continue de-a lungul axei Y și X și straturi laminate de-a lungul axei Z.

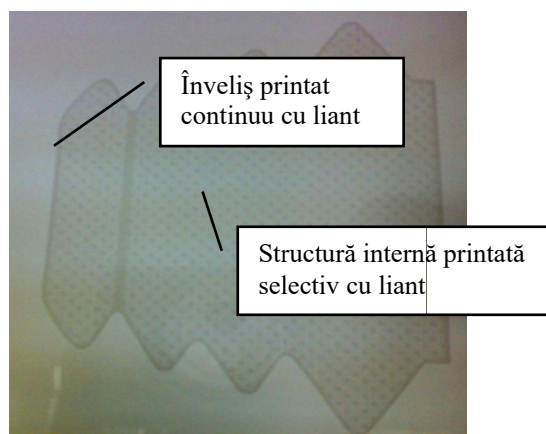


Fig. 2.4 Optimizarea depunerii de liant in tehnologia 3DP [24]

După finalizarea printării 3D, piesa a fost extrasă din patul de pulbere, desprăfuită în stația de postprocesare cu aer comprimat și infiltrată prin pensulare cu rășină epoxidică. Infiltrarea piesei conferă acesteia caracteristici de rezistență mecanică și duritate bună. Schematizat mecanismul procesului de infiltrare a piesei poroase este prezentat în Figura 2.5. După infiltrare rezulta o piesă compozită.

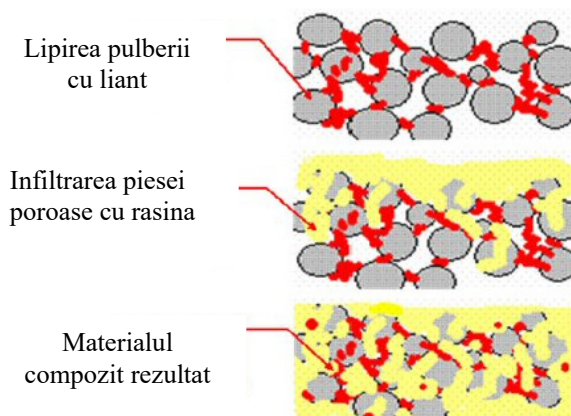


Fig. 2.5 a) Explicații privind formarea materialului compozit [24]

Piesa imprimată 3D, în stare crudă, având o structură poroasă, este prezentată în Figura 2.6. După infiltrare sunt necesare operații de finisare manuală cu hârtie abrazivă a suprafeței piesei pentru a îi oferi o calitate bună suprafeței.

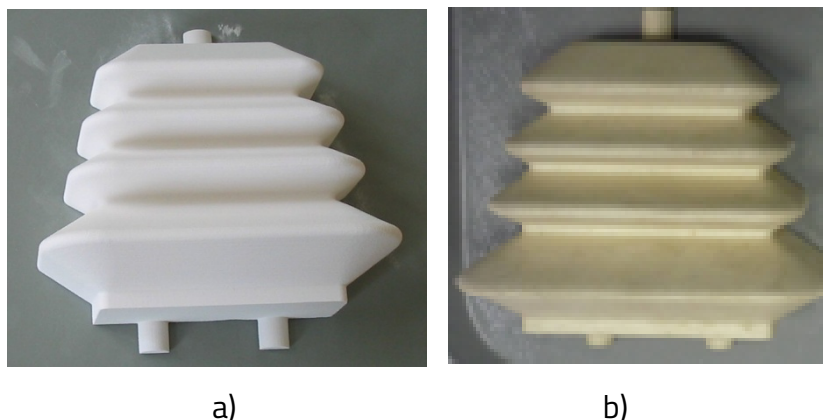


Fig.2.6 Calapodul burdufului: a) în stare crudă; b) după infiltrare cu rășină [24]

Rezultatele acestor cercetări privind fabricarea rapidă a sculelor prin tehnologia de fabricație aditivă de tip pulverizare cu jet de liant, arată ca printr-un proces inovativ, au fost realizate sculele necesare pentru fabricația indirectă a componentei de tip burduf din ansamblul manșei simulatoarelor de zbor pentru avioane. Doar o parte din aceste rezultate au fost prezentate în cadrul acestui subcapitol.

2.3. Cercetări privind fabricarea rapidă a matrițelor prin pulverizare cu jet de materiale PolyJet

2.3.1. Materiale și tehnologii specifice

Aplicațiile tehnologiilor RT indirecte bazate pe tehnologia PolyJet sunt: formarea matrițelor siliconice, realizarea modelelor ușor fuzibile folosite la turnare, modele pentru turnarea în nisip și formarea sub vid [20]. Toate acestea necesită un model master. Tehnologiile RT directe bazate pe tehnologia PolyJet permit fabricarea de matrițe, scule sau elemente active ale matrițelor pentru injecția materialelor termoplastice printate 3D. Aceste matrițe au aplicații în formarea prin injecție cu reacție în matriță (procedeul RIM), turnare gravitațională, termoformare etc. Aplicațiile tehnologiilor RT necesită diverse optimizări bazate pe cercetări experimentale.

Scopul acestui subcapitol este de a prezenta rezultatele cercetărilor și de a explica modul în care pot fi realizate scule sau matrițe bazate pe tehnologia PolyJet. Destul de puține cercetări au studiat problema fabricării sculelor și matrițelor prin metode directe și indirecte folosind tehnologia PolyJet. Pentru o producție de serie mică, printarea 3D oferă un cost eficient în comparație cu injecția maselor plastice în matrițe prelucrate CNC.

În prima parte sunt investigate tehnicile RT bazate pe un model master realizat prin printarea 3D PolyJet. A doua parte prezintă tehnici RT directe axate pe printarea 3D PolyJet a matrițelor. Aceste tehnologii pentru scule rapide au aplicații pentru turnarea rășinilor, procedeul RIM, realizarea modelelor din ceara în matriță și turnarea sub vid. Modele master

și matrițe printate, au fost fabricate aditiv prin tehnologia Polyjet pe mașina Objet Eden 350, din material FullCure™720 de la Objet Geometries (Statasys). Familia de materiale FullCure sunt fotopolimeri pe bază de acril.

Formarea prin injecție cu reacție în matrița (procedeul RIM) constă în amestecarea a doi polimeri termorigizi (rășină și întăritor) urmată de injectarea într-o matriță a amestecului, la presiune și temperatură scăzută [47].

Rășinile termorigide cu proprietăți similare ca cele ale materialelor termoplastice injectate au aplicații în tehnologia RIM precum și pentru turnarea rășinilor. O prezentare generală a acestor materiale atât pentru procedeul RIM cât și pentru turnare sunt prezentate în Figurile 2.7 și 2.8. O parte dintre aceste rășini au fost investigate experimental iar rezultatele cercetărilor sunt prezentate în cadrul acestui subcapitol. Caracteristicile mecanice ale rășinilor utilizate în procedeul RIM respectiv a rășinilor, precizate pe axa orizontală a graficelor din Figurile 2.7 și 2.8, sunt prezentate comparativ cu caracteristicile mecanice ale maselor plastice injectate utilizate în producția de serie.

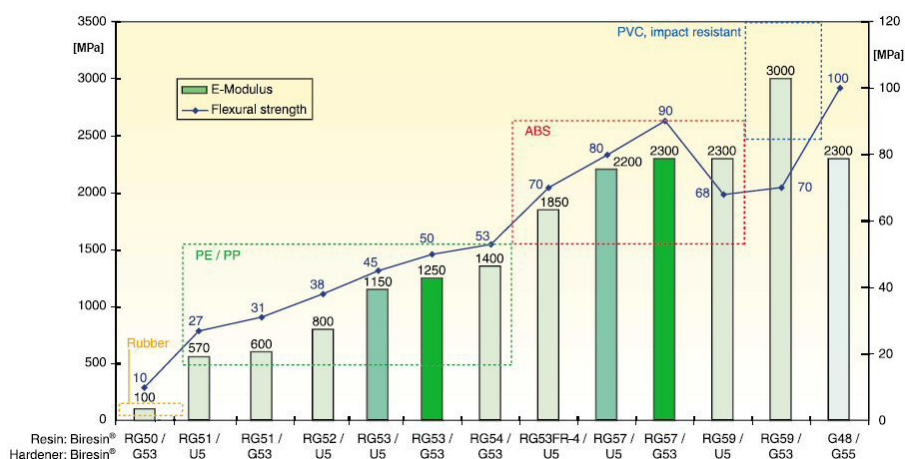


Fig. 2.7 Rășini utilizate în procedeul RIM [7, 20].

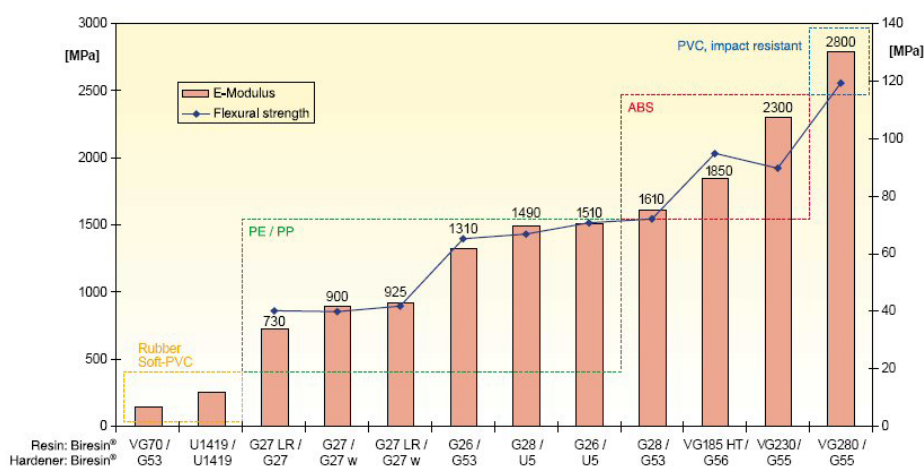


Fig.2.8 Rășini pentru turnare [7, 20]

Procedeul RIM este utilizat în etapele de dezvoltare și preproducție a componentelor din plastic, permițând simularea materialelor termoplastice pentru producția de serie. Aplicațiile

procedului RIM sunt concentrate pe domeniul aerospațial, auto etc. Avantajele tehnologiei RIM comparativ cu alte tehnologii de formare a pieselor din plastic sunt următoarele [20, 47]:

- ✓ un ciclu rapid comparativ cu materialele polimerice injectate prin procedee clasice;
- ✓ amestecul bicomponent are o vâscozitate mult mai mică decât cea a polimeriilor termoplastici;
- ✓ sunt necesare forțe de strângere mai mici comparativ cu injecția plasticului în matriță, ceea ce duce la echipamente de mici dimensiuni.

2.3.2. Procedee RT indirecte bazate pe tehnologia PolyJet

Procedeele RT indirecte studiate în cadrul acestui subcapitol se referă la formarea matrițelor siliconice și aplicațiile acestora. Utilizând aceste matrițe siliconice au fost experimentate trei procedee tehnologice de realizare a pieselor polimerice și anume,

- ✓ turnarea gravitațională a rășinilor termorigide;
- ✓ injecția cu ajutorul unei seringi a rășinii;
- ✓ formarea prin injecție cu reacție RIM a rășinii.

Procedeele de formare a pieselor în matrițe siliconice constă în următoarele etape principale: fabricarea modelului master, fabricarea matrițelor, turnarea sau injecția pieselor și postprocesarea sau finisarea pieselor.

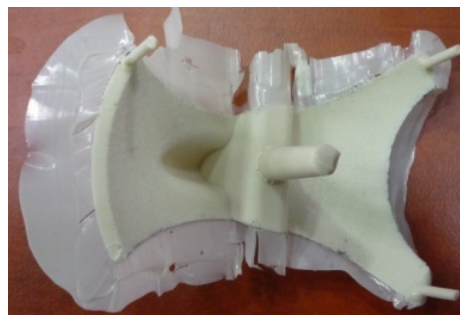
În prima etapă a fost fabricat aditiv prin procedeul PolyJet un model master. Acesta reduce semnificativ timpul de fabricație și permite realizarea unei forme complexe. Pe baza modelului master sunt realizate matrițele.

Matrița siliconică (Figura 2.9a) a fost fabricată urmând pașii următori:

- ✓ Fabricarea unei cutii rigide din plastic (sau lemn);
- ✓ Pregătirea modelului master marcând cu un marker permanent liniile de separație pentru a fi vizibile prin cauciucul semitransparent al matriței. Aplicarea unui demulant pe suprafața modelului master;
- ✓ Suspendarea modelului master într-o cutie de formare și adăugarea unor sârme cu rol de orificii de aerisire;
- ✓ Prepararea siliconului amestecând cele două componente ale kitului siliconic și degazarea prin vidare a amestecului;
- ✓ Turnarea cauciucului siliconic lichid peste modelul principal până când se umple cutia de formare și degazarea prin vidare a siliconului;
- ✓ Întărirea siliconului prin polimerizare în cuptor;
- ✓ Îndepărtarea cutiei de formare, tăierea cu un cuțit pe suprafața de separație marcată a matriței de silicon, deschiderea celor două semi-matrițe și extragerea modelului master.



a)



b)

Fig.2.9 a) Matrița siliconică, b) Piesa turnată din poliuretan [20]

În cadrul cercetărilor experimentale s-a folosit cauciuc siliconic bicomponent (A + B) de la Alpina Technische Produkte GmbH, având o contracție liniară foarte mică, de aproximativ 0,1%. Cele două semi-matrițe siliconice obținute au fost pregătite pentru turnare, prin aplicarea unui agent demulant pe suprafețele interne. Semi-matrițele au fost asamblate și solidarizate prin capsare pentru a preveni separarea.

Fabricarea pieselor polimerice. Au fost experimentate trei procedee tehnologice de realizare a pieselor polimerice, prin umplerea în trei moduri diferite a matriței siliconice: turnare gravitațională (Figura 2.9a), injectarea rășinii cu o seringă și injecția rășinii prin procedeul RIM. Rășina este introdusă în matriță până când începe să iasă prin orificiile de ventilație. În primele două variante de formare, a fost utilizată o rășină poliuretanică G26 / G53, similară cu polietilena de înaltă densitate. Timpul de utilizare a rășinii bicomponente este de aproximativ 7-10 minute iar întărirea piesei se realizează în aproximativ 20-30 minute. Etapa finală constă în extragerea piesei din matriță și efectuarea operațiunilor de post-procesare, constând în îndepărtarea pâlniei de turnare, a tijelor de plastic rezultate în găurile de ventilație și a suprafeței de separație (Figura 2.9b).

În cea de a treia variantă de fabricație a pieselor, o rășină poliuretanică RG53/ G53 de la Sika, având caracteristici similare cu materialul termoplastice utilizat în injecție plastic precum HDPE (polietilenă de înaltă densitate), a fost injectată prin reacție sub presiune joasă în matriță folosind un sistem UNIDOS 100 RIM. Sistemul RIM conține două recipiente separate, alimentate de două pompe și un cap de amestec. Raportul de amestec între rășina A și întăritorul B este ajustat prin reglarea volumului pompei. După ce rășina și întăritorul au fost amestecate, într-un interval de timp scurt, materialului a fost injectat în matriță. După aproximativ 15-20 minute piesa poate fi extrasă din matriță.

2.3.3. Fabricarea matrițelor prin metode RT directe utilizând tehnologia PolyJet

Metodele directe de RT constau dintr-un proces direct de fabricare a sculelor prin fabricație aditivă. În acest studiu de caz, matrițele au fost fabricate din materiale polimerice prin tehnologia de printare 3D PolyJet. Matrița a fost proiectată folosind software-ul SolidWorks. Printarea 3D a matriței permite scurtarea timpului de fabricare a matriței și scăderea costurilor de producție, comparativ cu frezarea CNC a matriței.

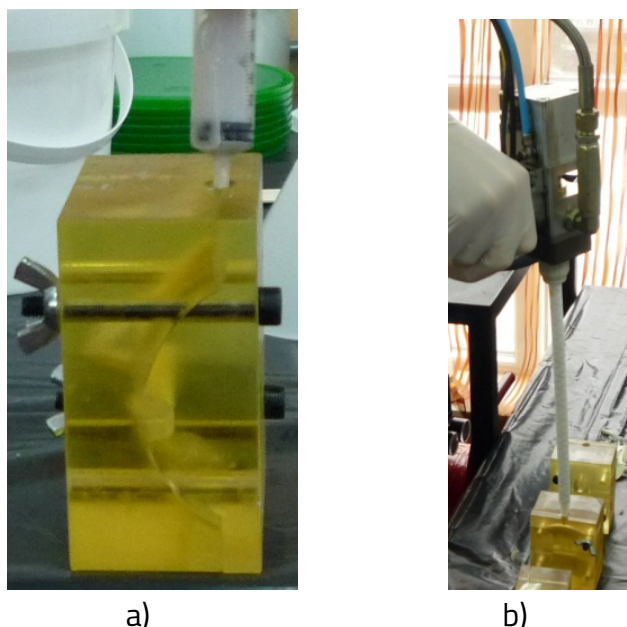


Fig. 2.10 a) Injecția cu ajutorul unei seringi, b) Formarea prin injecție RIM în matriță. [20]

Ambele componente ale matriței (Fig. 2.10a) au fost printate 3D prin tehnologia PolyJet din materialul transparent FullCure 720. Cavitățile semi-matrițelor au fost orientate cu suprafețele interne în sus folosindu-se un finisaj de suprafață lucios. Se obțin suprafețe cu rugozitatea medie (R_a) de $3,8 \mu\text{m}$ [32]. Cavitățile matriței nu au necesitat operații de post-procesare. Componentele matriței (Fig. 2.10a) sunt asamblate cu două șuruburi.

O etapă importantă de pregătire, înainte de asamblarea componentelor matriței, este aplicarea unui agent decofrant pe toate suprafețele cavității matriței.

Folosind mașina UNIDOS 100 RIM, a fost injectată cu presiune scăzută rășina poliuretanică RG53/G53 de la Sika în matrița printată 3D (Figura 2.10b). Folosind tehnica RIM se pot fabrica până la 50 de piese în matrițe siliconice, și până la 200 de piese în matrițe printate 3D. Productivitatea procesului RIM este mai mică decât cea a procesului de formare prin injecție a maselor plastice în matriță, dar costul sculelor este mai mic [20].

CAPITOLUL 3. METODOLOGIE ȘI CERCETARI EXPERIMENTALE PRIVIND ANALIZA CALITATII SUPRAFETELOR PLANE FABRICATE PRIN PROCEDEE ADITIVE

Implementarea tehnologiilor de fabricație aditivă în cadrul producției industriale, cu beneficii asupra reducerii costurilor și scurtării timpului de comercializare a produselor, depinde de calitatea suprafeței pieselor și de repetabilitatea proprietăților. Calitatea suprafețelor pieselor este puternic influențată de tipul procedeeului de fabricație aditivă, fiecare procedeu având o serie de particularități proprii. În cadrul acestui capitol sunt prezentate cercetări privind analiza calității suprafețelor plane a pieselor realizate prin fabricație aditivă. Acest capitol se bazează pe articolele publicate de autorul acestei teze de abilitare în calitate de prim autor și autor corespondent în [6] și [32].

3.1. Calitatea suprafeței pieselor obținute prin procese AM: sinopsis și motivație

Calitatea suprafeței pieselor obținute prin tehnologiile AM este un parametru important, care influențează acuratețea produsului, poate minimiza operațiile de post-procesare și poate îmbunătăți funcționalitatea produsului. În literatura de specialitate, o serie de studii s-au concentrat pe studiul rugozității suprafeței [8, 9, 11, 13-15, 48-50] pieselor realizate prin fabricație aditivă. Unele studii au investigat influența orientării piesei pe platforma de construcție asupra rugozității suprafeței [10, 51], pentru diferite tehnologii de fabricație, cum ar fi FDM, SLS, LOM și SLA. O orientare optimă a piesei permite obținerea unor rezultate bune privind rugozitate suprafeței. Canellidis și colab. [51], luând în considerare timpul de construcție, rugozitatea suprafeței și timpul de post-procesare, a propus o procedură de optimizare privind orientarea optimă pe platforma de construcție a pieselor în procedeul SLA. Perez și colab. [9] au investigat factorii critici în procesele FDM pentru reducerea rugozității suprafeței și au ajuns la concluzia că înălțimea stratului și grosimea peretelui sunt factori dominanți pentru rugozitatea suprafeței. DebRoy și colab. [12], analizând procedeele de fabricație aditivă a pieselor metalice, au arătat că rugozitatea suprafeței este influențată de tipul materialului, designul pieselor, tipul procesului, parametrii procesului de fabricație aditivă și de etapa de post-procesare.

Rugozitatea suprafeței are valori diferite pentru procese AM diferite. Principalul factor care afectează rugozitatea suprafeței în AM este grosimea stratului de depunere. În cazul procedeeleor de fabricație aditivă care permit depunerea unor straturi cu grosimi foarte mici se obțin valori mici ale rugozității suprafeței, astfel rezultând piese cu o bună calitate a suprafețelor. Procedeul de fabricație PolyJet, depunând straturi subțiri de 16 micrometri [15,50], fiind unul din procedeele AM în care se poate reduce în mod eficient rugozitatea suprafeței.

Intr-un studiu bazat pe piese test personalizate, s-a investigat și comparat proprietățile proceselor de fabricare aditivă a materialelor polimerice (SLA, PolyJet, SLS, LOM, FDM și 3DP) [48]. S-a concluzionat că rugozitatea specimenului fabricat pe imprimanta 3D EDEN 500V crește odată cu creșterea unghiului de inclinare a suprafeței de la 0° la 90°. O investigație experimentală a rugozității suprafeței procesului PolyJet, în direcțiile X și Y, pe baza unei piese prismatice printate în șapte exemplare, pe aceeași platformă de construcție a fost efectuată în [50]. Rezultatele au indicat că cea mai bună valoare a rugozității a fost obținută pentru suprafețe inclinate la 0° și cea mai slabă la 90°. Experimentele pe o mașină EDEN 350V, cu mostre din materiale FullCure 720 și VeroBlue 840, orientate de-a lungul axei x, au fost efectuate pentru a investiga influența grosimii stratului, orientării locale a suprafeței și a tipului de finisaj asupra calității suprafeței [15] dar, nu au fost analizate diverse orientări ale pieselor pe tava de construcție. Acest studiu a raportat că rugozitatea maximă a suprafeței a fost obținută pentru unghiul de inclinare a suprafeței de 90°.

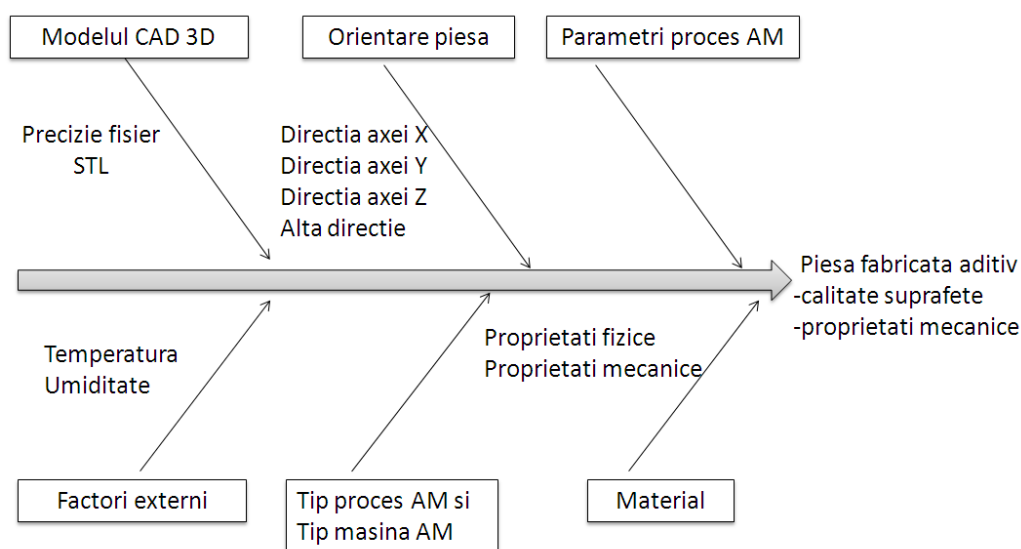


Fig.3.1 Factori care influențează calitatea și proprietățile mecanice ale pieselor obținute prin fabricație aditivă

Majoritatea pieselor obținute prin diferite tehnologii de fabricație aditivă necesită selectarea unei tehnici de post-procesare adecvate (prelucrare mecanică CNC pentru ajustări, prelucrare abrazivă, prelucrare cu laser, tratamente chimice etc.) pentru a îmbunătăți calitatea suprafeței [52]. Cazon și colab. [14] au inclus în studiile lor efectul post-procesării asupra proprietăților mecanice și rugozității suprafeței specimenelor plane realizate prin tehnologia PolyJet pe o mașină EDEN Objet 330. Studiul a concluzionat că orientarea piesei are un efect asupra proprietăților mecanice și cea mai bună rugozitate este obținută pentru direcția de imprimare XY. Un sondaj privind aplicațiile industriale, care a inclus 50 de intervieuați, a evaluat capacitățile tehnice și economice ale AM [53]. Studiul a concluzionat că post-procesarea constituie o etapă obligatorie pentru a îndeplini cerințele industriale referitoare la rugozitatea suprafeței pieselor.

Din studiul și analiza literaturii de specialitate au rezultat următoarele concluzii:

- ✓ Calitatea suprafeței pieselor obținute prin procedee aditive de fabricație este influențată de diverși factori, în toate cele trei etape incluzând pre-procesarea, procesarea și post-procesarea (Figura 3.1).
- ✓ Factorii care afectează calitatea suprafeței sunt pregătirea și acuratețea fișierului STL, proprietățile materialului, grosimea stratului depus, orientarea piesei, parametrii de scanare (strategie, viteză etc.), unghiul de inclinare a suprafeței, tipul de post-procesare.
- ✓ Variația de la o mașină AM la alta poate influența calitatea suprafeței.
- ✓ Efectul de scară, bavurile structurii de susținere și erorile din procesul de depunere sunt cele mai frecvente defecte de suprafață.
- ✓ Există puține studii dezvoltate pe mașini AM diferite bazate pe tehnologia PolyJet (Stratasys Ltd, SUA și Objet Geometries Ltd., Israel).
- ✓ Având ca principale beneficii reducerea costurilor și scurtarea timpului de comercializare a produselor, implementarea tehnologiilor AM în cadrul producției în serie de pre-producție și în seria mică depinde de repetabilitatea proprietăților și de calitatea suprafeței pieselor.

3.2. Designul unui artefact de test pentru analiza calității suprafețelor în fabricația aditivă

Pentru investigarea calității suprafețelor pieselor obținute prin diferite procese de fabricație aditivă au fost propuse diverse tipuri de artefacte de testare. Un artefact de testare standardizat permite estimarea și compararea performanțelor diferitelor sisteme AM sau pentru același sistem AM estimarea performanței în timp [17] și poate identifica posibilitățile de reglare a parametrilor procesului AM pentru îmbunătățirea calității suprafeței.

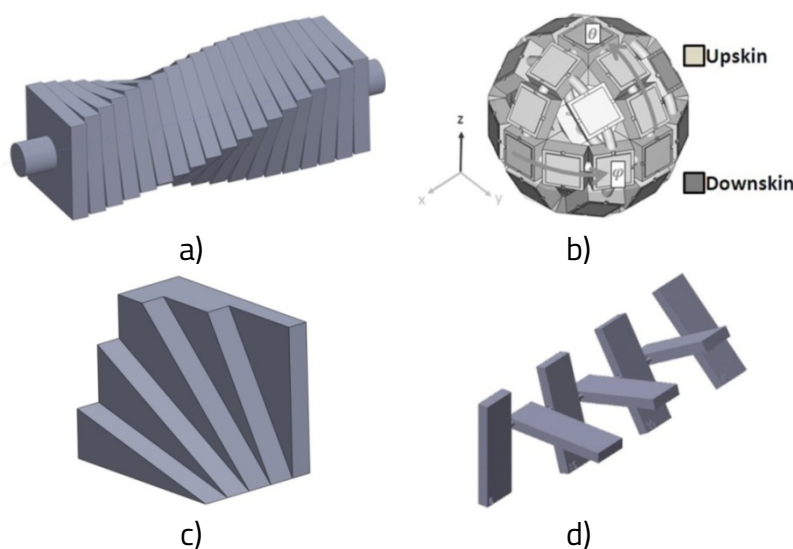


Fig.3.2 Artefacte de test: (a) trunchion; (b) sferă fațetată [26]; (c) piesă cu suprafețe inclinate; (d) artefact standard de test (STAR) [17, 55].

O piesa test de tip truncheon [8, 11,15, 49, 54] (Figura 3.2a) este una dintre cele mai utilizate modele pentru măsurarea rugozității suprafeței în cadrul unui proces AM, în ciuda formei sale masive. Acest artefact a fost utilizat în studii privind investigarea rugozității suprafeței pentru următoarele tehnologii AM: SLA (fotopolimerizare cuva) [8, 49, 54], FDM (extrudarea materialului) [8], PolyJet (jet de material) [15], SLM (fuziune în pat de pulbere) [11] și LOM (laminare foi) [8]. Acest artefact se obține prin rotirea unei secțiuni pătrate în jurul unei axe centrale, de la 0° la 90° , în trepte de 3° sau 5° , permițând investigarea rugozității suprafețelor plane inclinate de la 0° la 360° [49, 54].

Un alt model de piesă de test constă dintr-o sferă cu fațete (Figura 3.2b) care acoperă o gamă largă de orientări plane ale suprafeței pe o singură piesă [55, 56]. Un model revizuit cu caracteristici noi, bazat pe un specimen propus de Kim et al. [48], este prezentat în Figura 3.2c. Standardul ISO/ASTM NP 52902 care se concentrează pe artefacte de testare pentru AM este în curs de dezvoltare. O serie de artefacte au fost propuse de grupul ASTM F42/ISO TC 261 pentru a investiga performanțele sistemelor AM, și anume precizia liniară și circulară, rezoluția nervurilor, a pinilor, a găurilor și fantelor și textura suprafeței [17]. Grupul STAR a propus un artefact pentru testarea texturii suprafeței [17, 55] care constă dintr-o serie de șapte plăcuțe construite la unghiuri diferite față de planul orizontal, incluzând unghiurile de inclinare 90° , 0° , 75° , 15° , 60° , 30° și 45° (Figura 3.2d).

Studiile axate pe investigarea calității suprafețelor pieselor obținute prin fabricație aditivă nu au folosit un artefact comun de inspecție a suprafeței care să permită compararea măsurărilor. Mai mult, nu a fost efectuată o cercetare mai profundă bazată pe un artefact standardizat de inspecție a suprafeței, luând în considerare orientările relevante de construcție pe platforma de construcție și operațiile de post-procesare.

Scopul principal al acestui capitol este de a defini o metodologie de bază care să permită evaluarea performanțelor unui proces AM și caracterizarea materialului în ceea ce privește calitatea suprafeței, pe baza unui nou artefact de testare și investigarea factorilor principali care afectează calitatea suprafeței. Un studiu de caz asupra unui proces de fabricare aditivă a polimerilor prin tehnologia PolyJet validează metodologia de bază propusă.

Principalele cerințe privind proiectarea unui artefact de inspecție al suprafeței sunt următoarele:

- ✓ O adaptare ușoară la diferite procese AM și la diverse dimensiuni ale mașinilor AM;
- ✓ Măsurătorile să fie efectuate cu ușurință în diferite moduri, folosind metode cu contact sau fără contact;
- ✓ O geometrie editabilă a modelului 3D al artefactului;
- ✓ Timp scurt de fabricație;
- ✓ Consum minim de materiale și energie.

Un nou artefact de inspecție a suprafeței a fost proiectat, de către autor, folosind software-ul SolidWorks versiunea 2013 (Dassault Systèmes, Massachusetts, SUA), pe baza cerințelor de proiectare de mai sus. Acesta constă din plăcuțe dreptunghiulare rotite în jurul

unei axe orizontale, și construite la unghiuri diferite, pornind de la 0° la 90° față de planul orizontal, în trepte de θ° . Au fost realizate opt configurații de design ale artefactului de testare, ținând cont de faptul că incrementul θ este un divizor a lui 90° (Tabelul 3.1).

Grosimea plăcuțelor trebuie aleasă astfel încât să nu permită artefactului să se deformeze în timp, fiind limitată de caracteristicile materialului. Dimensiunile plăcuțelor (lungime și lățime) trebuie alese astfel încât rugozitatea suprafeței să poată fi măsurată cu ușurință atât prin metode de contact, cât și fără contact.

Tab. 3.1 Configurații de design ale artefactului de inspecție [6]

| Configurație de design a artefactului | Increment θ ($^\circ$) | Număr de plăcuțe |
|---------------------------------------|---------------------------------|------------------|
| Configurația 1 a artefactului | 2 | 46 |
| Configurația 2 a artefactului | 3 | 31 |
| Configurația 3 a artefactului | 5 | 19 |
| Configurația 4 a artefactului | 6 | 16 |
| Configurația 5 a artefactului | 10 | 10 |
| Configurația 6 a artefactului | 15 | 7 |
| Configurația 7 a artefactului | 30 | 4 |
| Configurația 8 a artefactului | 45 | 3 |

Artefactul este destinat să fie utilizat pentru a evalua calitatea suprafeței rezultate în urma unui proces de fabricație aditivă și pentru a testa precizia unei mașini de fabricație aditivă. În principal, artefactul a fost conceput pentru a investiga calitatea suprafețelor orientate în sus. Fețele orientate în jos depind puternic de tipul structurii de susținere din procesul AM, care influențează calitatea suprafeței. Acest artefact permite o bună accesibilitate pentru investigarea suprafeței plăcilor.

Două variante ale artefactului de testare construit la unghiuri de la 0° la 90° în pași de 15° și în pași de 5° sunt prezentate în Figura 3.3.

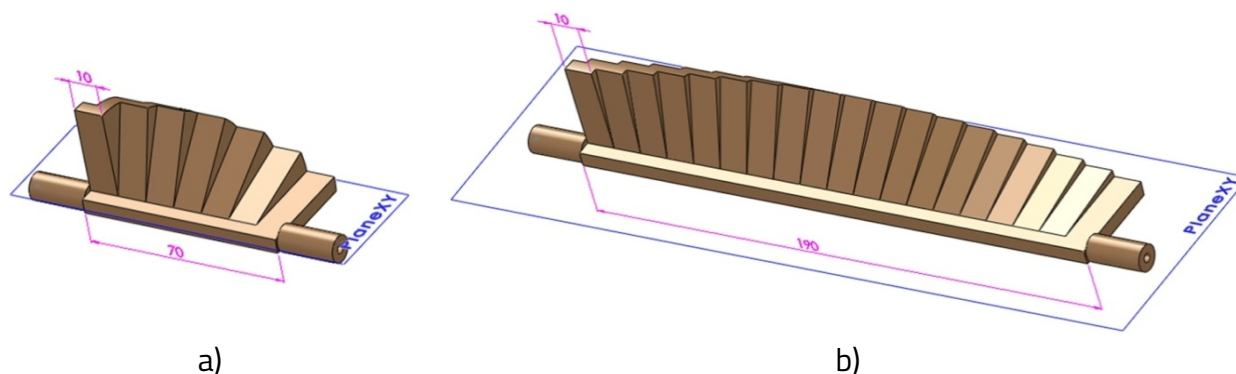


Fig.3.3 Modele 3D ale noului artefact de testare a calității suprafețelor obținute prin procedee aditive de fabricație: (a) configurația 3; (b) configurația 6 [6].

3.3. Metodologie privind analiza calității suprafețelor plane fabricate aditiv

Obiectivul metodologiei propuse este de a evalua performanța unui proces de fabricație aditivă pe o mașină de fabricație aditivă din punct de vedere al calității suprafeței. Această metodologie include experimente exploratorii și de confirmare, urmate de analiza și interpretarea rezultatelor. Metodologia propusa constă în opt pași (Figura 3.4).

Etapa 1: Analiza procesului de fabricație aditivă și a materialelor. Există o mare diversitate de materiale utilizate în procesele de fabricație aditivă [57]: materiale plastice (termoplastice și termorigide), metale, ceramică și compozite (compozite cu matrice polimerică, compozite cu matrice metalică și compozite cu matrice ceramică). Astfel, tehnologiile de fabricație aditivă includ fabricarea aditivă pe bază de polimeri, AM pe bază de metale, AM pe bază de ceramice și AM pe bază de materiale compozite. Scopul analizei procesului de fabricație aditivă este înțelegerea principiilor de bază ale procesului și selectarea unor potențiali parametri care influențează procesul de fabricație și pot afecta calitatea suprafeței.

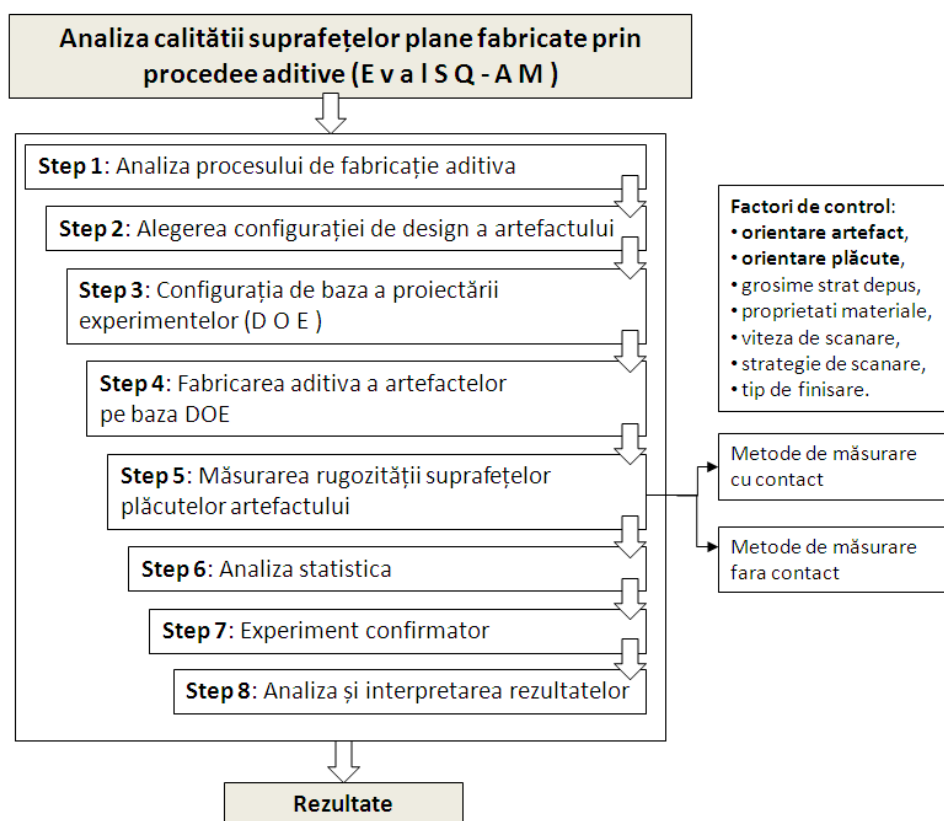


Fig.3.4 Schema etapelor metodologiei EvalSQ-AM [6].

Etapa 2: Alegerea configurației artefactului . Configurația de proiectare a artefactului de inspecție a suprafeței este aleasă din Tabelul 3.1. O configurație a artefactului este definită de un număr de plăci în trepte de θ° pornind de la un unghi de inclinare de la 0° la 90° . Fiecare configurație a artefactului datorită dimensiunii și volumului său influențează timpul

de fabricație, consumul de materiale și cantitatea de date de măsurare utilizate în pasul 6 pentru analiza statistică.

Etapa 3: Configurația de bază a proiectării experimentelor (DOE). În etapa a 3-a a metodologiei, pe baza caracteristicilor procesului de fabricație aditivă, este proiectat planul experimental [58] prin alegerea factorilor de control care afectează calitatea suprafeței și a nivelurilor acestora. Principalii factori de control care afectează calitatea suprafeței sunt grosimea stratului depus, orientarea artefactului, orientarea plăcuței, proprietățile materiei prime a materialului, viteza de scanare, strategia de scanare sau strategia traseului sculei, densitatea de energii și tipul de finisare, bazate pe anumite caracteristici de fabricație aditivă sau post-procesare. Selectarea factorilor de control depinde de particularitățile procesului de fabricație aditivă. Principalii factori, care ar trebui utilizați pentru toate procedeele de fabricație aditivă, sunt orientarea artefactului și orientarea plăcuței.

Impactul poziționării și orientării pieselor care sunt inserate pe platforma de construcție asupra vitezei de producție, costurilor materialelor și costurilor legate de timpul de procesare pentru diferite procese AM (ME, VP, BJ, MJ, SL și PBF) au fost investigat în [59]. Cu toate acestea, calitatea suprafeței pieselor nu a fost estimată. Studiul a concluzionat că cel mai accesibil mod de fabricare a pieselor nu garantează o calitate constantă sau similară.

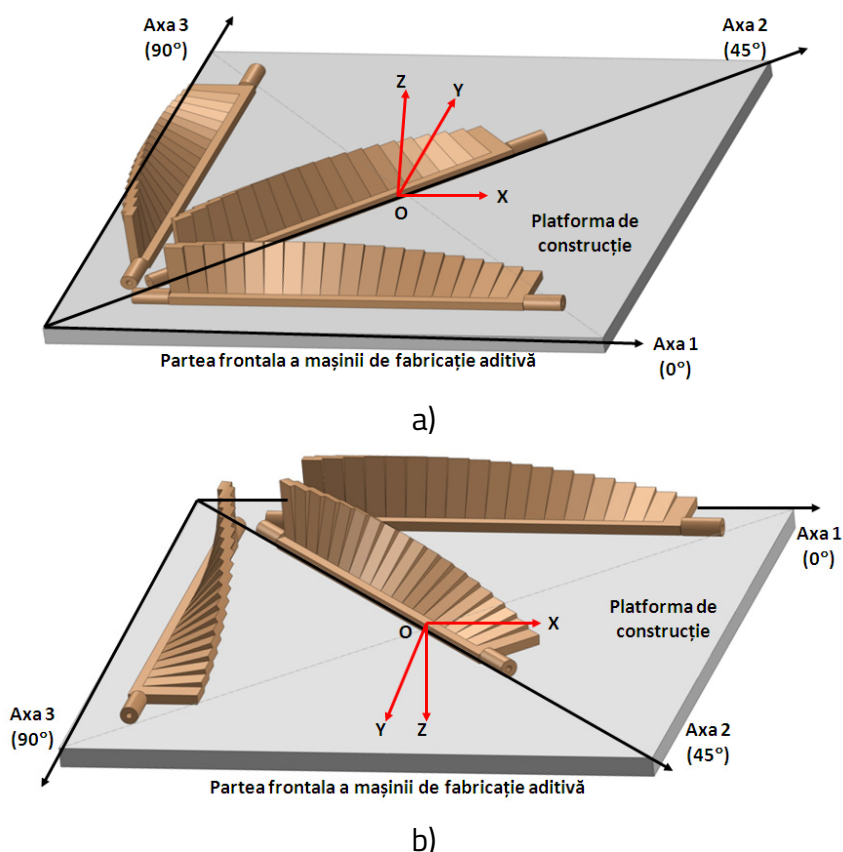


Fig.3.5 Configurație de bază privind orientarea artefactelor: a) sisteme de AM care construiesc piesa în jos; b) sisteme de AM care construiesc piesa în sus [6].

Orientarea sistemului de coordonate a platformei de construcție AM depinde de direcția de construcție. Astfel, sistemele de coordonate ale mașinilor AM care construiesc piesa în jos

sau în sus sunt definite pe baza standardului din Referința [60] și sunt prezentate în Figura 3.5. Orientarea artefactului pe platforma de construcție a fost considerată un factor cu trei niveluri, cu orientări de bază paralelă, perpendiculară și la 45° față de direcția de scanare (numite axa 1, 2, respectiv 3). Modul de dispunere după aceste trei orientări ale artefactului pe platforma de construcție este denumit configurație de bază privind orientarea artefactelor.

Nivelurile factorului orientarea plăcuțelor depind de configurația de proiectare a artefactului, așa cum se arată în Tabelul 3.1 [6].

Factorul privind grosimea stratului depus depinde de caracteristicile tehnologiei AM. De asemenea, acest factor de control influențează puternic calitatea suprafeței. Materia primă folosită în fabricația aditivă poate fi de tip lichid, pulbere, combinație de pulbere și sârmă, folie sau filament depinzând de tipul procesului de fabricație aditivă [16,57]. Materia primă poate afecta calitatea suprafeței.

În ceea ce privește factorul viteză de scanare, doar unele tehnologii AM permit modificări ale valorilor acesteia. Astfel, se pot menționa tehnologiile de formare în pat de pulbere și tehnologiile de depunere cu energie direcționată, care permit variația factorului viteză de scanare.

În funcție de caracteristicile tehnologiei de fabricație aditivă, unele tehnologii AM permit modificări ale strategiei de scanare, iar altele nu. Factorul strategie de scanare este luat în considerare în principal în tehnologiile cu pat de pulbere [61, 62] și depunerea de energie direcționată [63]. Factorul strategie de scanare este important și în tehnologiile de extrudare termoplastica a materialelor [9].

Densitatea de energie este un factor specific în tehnologiile de fabricație aditivă a metalelor care trebuie controlată cu atenție [12].

Cei doi factori de control de bază (orientarea artefactului și orientarea plăcuțelor) și factorii de proces suplimentari trebuie să fie aleși în funcție de tehnologia AM, pentru a analiza influența efectelor și interacțiunilor lor asupra rugozității suprafeței.

Etapa 4: Fabricarea aditivă a artefactelor pe baza DOE. Fabricația aditivă a artefactelor bazate pe DOE reprezintă a patra etapă a acestei proceduri. Configurația de bază este prezentată în figura 3.5. Minim trei artefacte orientate într-o configurație $0^\circ / 45^\circ / 90^\circ$ ar trebui să fie printate 3D într-o singură etapă de printare. În etapa de pre-procesare, modelul CAD al artefactului test este transformat într-un fișier standard STL și încărcat în software-ul specific AM pentru a gestiona procesul de fabricație. Precizia modelului STL trebuie aleasă în concordanță cu grosimea stratului depus de mașina AM. Metoda de post-procesare depinde de tipul de tehnologie AM și de materiile prime utilizate [52].

Etapa 5: Măsurarea rugozității suprafețelor plăcuțelor artefactului. Măsurarea rugozității suprafeței poate fi efectuată în diferite moduri folosind metode cu contact sau fără contact. Doar suprafața plăcuțelor orientate în sus este măsurată, deoarece suprafețele orientate în jos sunt puternic influențate de materialul suport.

Etapa 6: Analiza statistică a datelor. Analiza statistică a datelor permite investigarea și caracterizarea efectelor factorilor de control și a interacțiunilor acestora asupra rugozității experimentale a suprafeței. Deoarece există doi sau mai mulți factori de control, trebuie utilizate metoda ANOVA (two-way) sau modele liniare generalizate (GLM). Modelul liniar generalizat este o abordare mai generală pentru efectuarea unei analize variaționale (ANOVA) [64]. Analiza statistică ar trebui să conțină cinci etape după cum urmează: introducerea datelor; efectuarea analizei datelor; determinarea factorilor semnificativi din tabelul ANOVA; validarea presupunerilor ANOVA; interpretarea rezultatelor ANOVA.

Modelul GLM este utilizat pentru a analiza rezultatele calculând mediile fiecărui nivel pentru fiecare factor. Din tabelul ANOVA, valoarea p indică semnificația rezultatelor. În plus, este necesar să se compare semnificația relativă a valorii F atunci când valoarea p este aproape de zero.

Etapa 7: Dovada ca ipoteza experimentală este corectă prin repetarea experimentelor

Experimentele de confirmare ar trebui să fie efectuate într-un mediu cât mai asemănător cu experimentul inițial. Un proces industrial este de dorit să fie stabil. Scopul experimentului de confirmare este de a valida concluziile trase în faza de analiză și de a confirma un proces stabil.

Etapa 8: Analiza și interpretarea rezultatelor. Rezultatele experimentale sunt analizate și interpretate în această etapă. Este determinată predicția rugozității pentru un proces AM dat și influența factorilor de control precum și interacțiunile acestora asupra rugozității suprafeței.

3.4. Investigații experimentale privind tehnologia PolyJet

Metodologia propusă pentru evaluarea calității suprafeței a fost validată pentru o u proces de fabricare aditivă pe bază de polimeri. Sistemul de fabricare aditivă utilizat a fost EDEN 350 de la Objet (Stratasys, Rehovot, Israel) folosind tehnologia PolyJet.

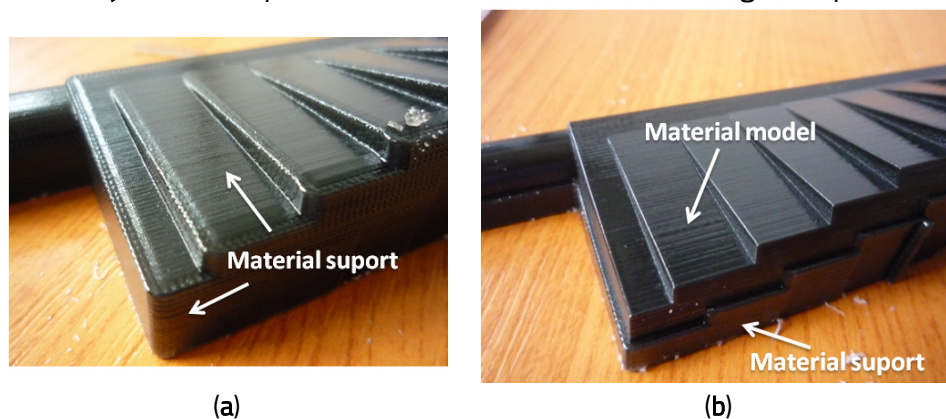


Fig.3.6 Tipuri de finisare pentru tehnologia PolyJet: a) finisare de tip mat; b) finisare de tip lucios [6].

Configurația artefactului 3 (Figura 3.3b), constând din 19 plăcuțe construite la unghiuri de la 0° la 90° în pași de 5°, a fost aleasă pentru a investiga efectul orientării plăcuțelor asupra rugozității suprafeței.

Proiectarea experimentelor a fost realizată în funcție de factorii de control. Au fost selectați trei factori de control, și anume orientarea artefactului cu trei niveluri, orientarea plăcuței cu 19 niveluri și tipul de finisare cu două niveluri, așa cum se arată în Tabelul 3.2.

Tipul de finisare a fost considerat pe două niveluri: mat și lucios. Finisajul mat (Figura 3.6a) semnifică faptul că un strat subțire de material suport este depus pe toată piesa. Utilizarea unui finisaj lucios (Figura 3.6b), presupune ca pe suprafețele superioare ale modelului nu se depune material suport. Punctele de tranziție dintre zonele mate și cele lucioase necesită de obicei operații de finisare și curățire suplimentară.

Tab. 3.2 Factorii de control și nivelurile lor [6]

| Nivel | Orientarea artefactului | | Orientarea plăcuței | | Tip de finisare | |
|-------|-------------------------|-------------|---------------------|-------------|-----------------|-----------------|
| | Simbol | Valoare (°) | Simbol | Valoare (°) | Simbol | Valoare |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | Mat (Matte) |
| 2 | 2 | 45 | 2 | 5 | 2 | Lucios (Glossy) |
| 3 | 3 | 90 | 3 | 10 | - | - |
| 4 | - | - | 4 | 15 | - | - |
| 5 | - | - | 5 | 20 | - | - |
| 6 | - | - | 6 | 25 | - | - |
| 7 | - | - | 7 | 30 | - | - |
| 8 | - | - | 8 | 35 | - | - |
| 9 | - | - | 9 | 40 | - | - |
| 10 | - | - | 10 | 45 | - | - |
| 11 | - | - | 11 | 50 | - | - |
| 12 | - | - | 12 | 55 | - | - |
| 13 | - | - | 13 | 60 | - | - |
| 14 | - | - | 14 | 65 | - | - |
| 15 | - | - | 15 | 70 | - | - |
| 16 | - | - | 16 | 75 | - | - |
| 17 | - | - | 17 | 80 | - | - |
| 18 | - | - | 18 | 85 | - | - |
| 19 | - | - | 19 | 90 | - | - |

Parametrii procesului de fabricare aditivă prin PolyJet au fost stabiliți conform specificațiilor producătorului, așa cum se arată în Tabelul 3.3. Rugozitatea suprafeței a fost factorul de răspuns al experimentelor. Este necesar să se precizeze de ce au fost aleși doar trei factori de control. Unii parametri ai acestei mașini Objet EDEN 350 PolyJet nu pot fi

modificați, fiind setați de furnizor. Aceștia sunt viteza de scanare, strategia de scanare și grosimea stratului. Acești factori ar trebui luați în considerare pentru alte procese AM, care permit modificarea grosimii depunerii stratului sau a vitezei de scanare. Cu toate acestea, tehnologia Polyjet utilizată pe mașina EDEN 350 permite doar depunerea de straturi subțiri de 0,016 mm.

Experimentele și măsurătorile au fost efectuate la temperatura de laborator și umiditate relativă controlată, așa cum se arată în Tabelul 3.3.

Tab. 3.3 Parametri de proces pentru sistemul de fabricație aditivă EDEN 350 [6].

| Parametri procesului PolyJet | Valoare |
|---|----------|
| Grosimea stratului de depunere | 0.016 mm |
| Temperatura capetelor de depunere a materialului suport | 72 °C |
| Temperatura capetelor de depunere a materialului model | 72 °C |
| Temperatura de încălzire a materialului model și suport | 68 °C |
| Temperatura camerei | 20 °C |
| Umiditate relativă | 30% |

Software-ul folosit pentru pregătirea platformei de construcție și pentru calculul timpului de printare 3D și a consumului de materiale a fost software-ul Objet Studio versiunea 8.0.1.3 (Rehovot, Israel) [65].

Cinci artefacte codificate ca în Tabelul 3.4 au fost fabricate pe o mașină Objet EDEN 350 PolyJet din materialul model Objet FullCure 870 VeroBlack [65], folosind o singură platformă de construcție (Figura 3.7). Compoziția materialului model a constat din monomer acrilic, acrilat de uretan, acrilat epoxidic și un fotoinițiator. Materialul FullCure 705 [65] a fost folosit ca material suport. Materialul suport a fost îndepărtat cu jet de apă sub presiune. Probele au fost imersate într-o soluție de hidroxid de sodiu și apoi au fost spălate cu apă sub presiune.

Tab. 3.4 Codificarea artefactelor printate 3D [6].

| Simbolizarea artefactelor | Orientarea artefactelor (°) | Tipul finisării |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------|
| 1m | 0 | Mat |
| 1g | 0 | Lucios |
| 2m | 45 | Mat |
| 3m | 90 | Mat |
| 3g | 90 | Lucios |

În tehnologia PolyJet, ar trebui aplicate unele reguli privind orientarea pieselor în cadrul platformei de construcție pentru a minimiza timpul de fabricație și consumul de materiale și pentru a îmbunătăți calitatea suprafeței [21]. Artefactele de testare au fost construite în trei orientări diferite (Figura 3.7), și anume cea mai lungă dimensiune paralelă cu direcția de scanare (Axa 1), perpendiculară pe direcția de scanare (Axa 2) și la 45° față de ambele direcții

(Axa 3). Probele orientate după Axa 1 și Axa 3 au fost fabricate cu un finisaj mat și lucios. Eșantionul aliniat cu Axa 2 a fost fabricat cu un finisaj mat. O mostră lucioasă aliniată cu Axa 2 nu a fost aleasă pentru a fi fabricată, deoarece finisajul lucios aplicat unei piese nealiniată cu axele imprimantei poate genera defecte de suprafață, mai ales dacă proba are pereți liniari.

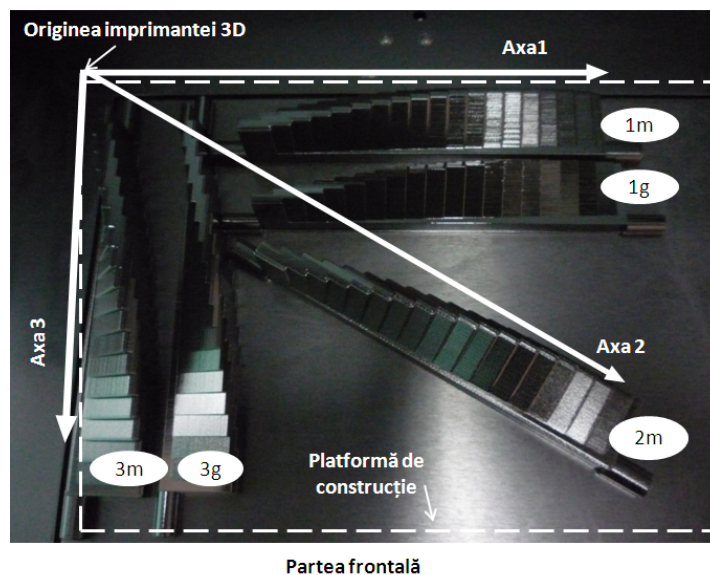


Fig. 3.7 Artefactele pe platforma de construcție a sistemului EDEN 350 [6].

Un dispozitiv modular utilizat pentru inspecția artefactelor a fost proiectat pentru a investiga cu ușurință plăcutele artefactelor.

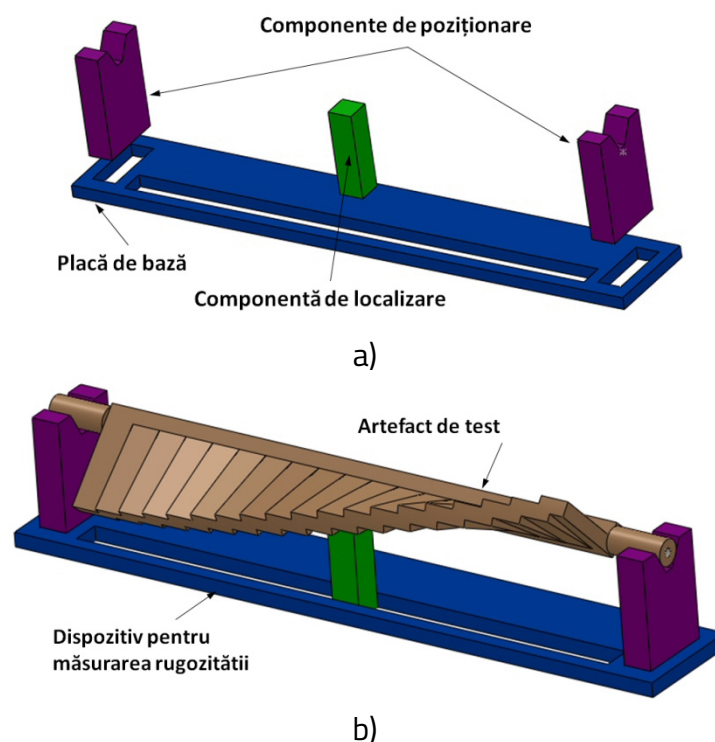


Fig. 3.8 a) Componentele dispozitivului; b) Poziționarea artefactului in dispozitiv [6].

Acest dispozitiv de fixare a constat din patru componente plate, așa cum se arată în Figura 3.8a, o placă de bază, o componentă de localizare și două componente de poziționare. Ținând cont de etapele de post-procesare și de costurile proceselor AM pentru principalele categorii de materiale (plastice, metale și ceramică), noul dispozitiv de fixare se propune a fi fabricat în special pentru un proces AM pe bază de polimeri.

Componentele dispozitivului de inspecție a artefactelor au fost fabricate aditiv pe mașina Objet EDEN 350 PolyJet în același timp, din material FullCure 720. Toate aceste componente au fost construite cu un finisaj lucios. Artefactul de testare se poziționează în dispozitivul de fixare, ca în Figura 3.8b.

Rugozitatea fiecărui specimen a fost măsurată folosind rugozimetrul Surtronic 25 de la Taylor Hobson, conform standardului DIN EN ISO 4288 [66], așa cum se arată în Figura 3.9a. Acesta este un rugozimetru portabil care, din punct de vedere tehnic, face ca determinarea rugozității să fie fezabilă pentru această cercetare. Rugozimetru a fost calibrat înainte de efectuarea măsurătorilor. Standardul DIN EN ISO 4288 oferă informații pentru procesele de fabricație convenționale. În plus, ar trebui furnizate linii directe privind modul de utilizare a standardului pentru măsurarea componentelor AM. Parametrii setați ai rugozimetrului au fost următorii: o lungime de evaluare de 4 mm și o lungime de undă "cut-off" de 0,8 mm pentru artefactele imprimate într-un finisaj lucios, respectiv o distanță de evaluare de 12,5 mm și o lungime de undă "cut-off" de 2,5 mm pentru artefactele imprimate cu finisaj mat.

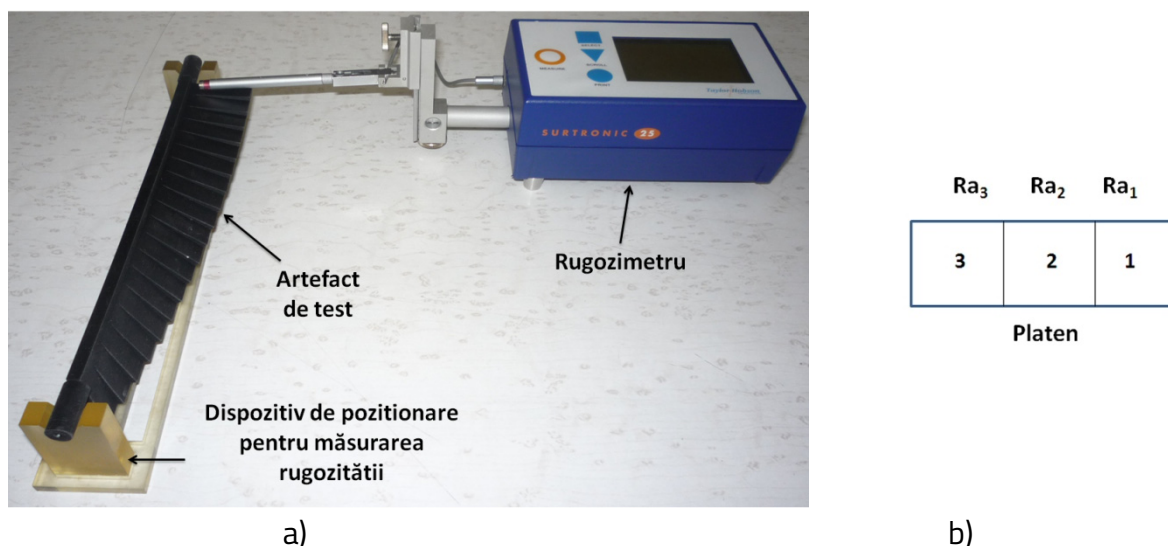


Fig. 3.9 a) Măsurarea rugozității; b) Detaliu privind procedura de măsurare [6].

A fost evaluată rugozitatea suprafeței, determinându-se parametrul Ra (abaterea medie aritmetică). Trei măsurători au fost efectuate pentru fiecare orientare a plăcutelor fiecărui specimen. Astfel, fiecare plăcuță a fost împărțită în trei zone, așa cum se arată în Figura 3.9b. Măsurătorile Ra_1 , Ra_2 și Ra_3 au fost efectuate în zonele 1, 2 și, respectiv, 3. Prin urmare, s-au efectuat 57 de măsurători pentru fiecare artefact, obținându-se 285 de măsurători.

Același număr de măsurători a fost efectuat pentru experimentul de confirmare. În final, rugozitatea medie Ra a fost calculată pentru fiecare plăcuță pe baza celor trei măsurători.

Pentru a evalua sistemul de măsurare și pentru a vedea dacă acesta este acceptabil, a fost investigată variabilitatea cauzată de dispozitivul de măsurare a rugozității pentru a înțelege cât de mare a fost variația sistemului de măsurare în comparație cu variația piesei. Deoarece a fost folosit un singur evaluator, au fost făcute câte trei măsurători pentru fiecare din cele 19 plăci ale artefactului. Datele au fost procesate utilizând software-ului Minitab 17 (Coventry, Anglia) folosind studiul Gage R&R, iar interpretarea datelor s-a bazat pe [67].

Analiza statistică investighează efectele factorilor de influență și interacțiunea acestora asupra măsurătorilor rugozității suprafeței. Un plan factorial complet cu 114 combinații de factori, a fost realizat pentru a putea investiga influența orientării artefactului, a orientării plăcutelor și a tipului de finisare asupra rugozității suprafeței. Contribuția celor trei factori asupra rugozității suprafeței a fost determinată folosind analiza modelului liniar generalizat (GLM) în software-ul Minitab 17 [68]. Pe baza analizei GLM, contribuția factorilor și a interacțiunilor dintre aceștia a fost calculată prin selectarea sumei secvențiale a pătratelor (Tipul I). Valorile F și p au fost analizate pentru a lua o decizie cu privire la semnificația statistică. Este necesar să se compare semnificația relativă prin indicarea valorilor F experimentale și critice atunci când valoarea p este aproape de zero. Valoarea critică este numărul pe care testul statistic în verificarea ipotezei trebuie ca să îl depășească pentru a respinge ipoteza. Contribuția procentuală (PC%) a fiecărui factor și al interacțiunilor acestora a fost calculată prin împărțirea fiecărei sume secvențiale a pătratelor (SeqSS) la suma secvențială totală a pătratelor înmulțite cu 100.

Experimentul de confirmare a fost efectuat în condiții similare experimentului inițial (temperatura, umiditate, parametrii mașinii Objet EDEN 350 PolyJet). De asemenea, au fost folosite aceleași materiale. Pe baza analizei modelului liniar generalizat, contribuțiile factorilor și a interacțiunilor lor au fost calculate și pentru experimentul de confirmare.

3.5. Rezultate

Rezultatele metodologiei propuse pentru procesul PolyJet pe mașina Objet EDEN 350 au fost analizate luând în considerare următorii factori:

- ✓ Repartiția experimentală a rugozității suprafeței plăcutelor orientate în sus;
- ✓ Compararea rugozității suprafeței experimentale cu modelele teoretice;
- ✓ Probleme privind calitatea suprafeței probelor PolyJet;
- ✓ Rezultatele analizei statistice.

Cele cinci artefacte au fost fabricate în 10 ore și 42 min, folosind 452 g de material model și 414 g de material suport. Timpul de procesare pentru componentele dispozitivului de inspecție a artefactului a fost de 46 de minute, iar consumul a fost de 99 g material model și 24 g material suport. Un studiu comparativ realizat prin suprapunerea modelelor CAD ale

artefactului propus și ale artefactului truncheon, cu aceleași dimensiuni ale suprafeței plane de măsurat, este prezentat în Figura 3.10. Noul artefact de testare a permis reducerea consumului de material model cu 83% în comparație cu artefactul truncheon.

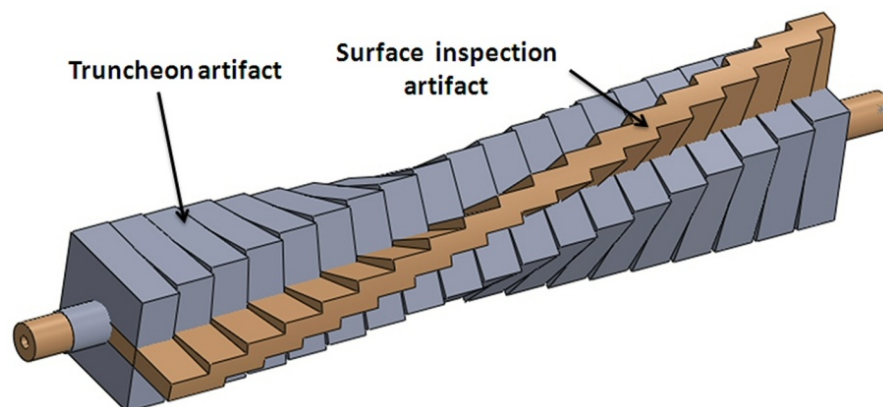


Fig. 3.10 Compararea artefactului propus cu artefactul truncheon [6].

3.5.1. Distribuția rugozității determinate experimental

Valorile rugozității suprafeței determinate experimental au fost analizate pentru a realiza o predicție a acestora (Tabelul 3.5).

Tab. 3.5 Predicție detaliată a rugozității experimentale (Ra) [6].

| Tip de finisare | Orientarea artefact (°) | Orientare plăcuța (°) | Tendința pentru Ra (μm) |
|-----------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Mat | 0 | 0–75 | tendința de creștere de la 1.5 la 15 |
| | | 75–90 | tendința de scădere spre 9 |
| | 45 | 0–45 | tendința de creștere de la 1.8 la 6 |
| | | 45–75 | menținere în jurul valorii de 6 |
| | | 75–85 | tendința de creștere la 10 |
| | 90 | 85–90 | scădere spre 7 |
| 0–85 | | tendința de creștere de la 0.8 la 13 | |
| Lucios | 0 | 85–90 | ușoara scădere la 12 |
| | | 0–65 | variații mici în intervalul 2 la 4 |
| | | 65–80 | creștere accentuată la 10 |
| | 90 | 80–90 | descreștere la 1.3 |
| | | 0–80 | variații mici în jurul valorii de 2 |
| | | 80–90 | creștere ușoară la 4 |

Valorile experimentale ale rugozității (Ra) ale artefactelor printate în finisaj mat au avut valori mici (0,5–4 μm) pentru un domeniu de orientare a plăcutelor de 0–25°, urmata de o tendința de creștere la valori maxime de 10–15 μm pentru orientarea plăcuțelor de 75–85° iar apoi o tendința de scădere pentru unghiul de suprafață de 90°, așa cum se arată în Figura 3.11a.

Rugozitatea artefactelor imprimate în finisaj lucios a prezentat tendințe diferite (Figura 3.11b). Mai exact, rugozitatea specimenului 1g a arătat o fază de platou în domeniul orientării plăcuțelor de 0-65°, crescând până la 80° și apoi scăzând la 90°. Rugozitatea Ra a specimenului 3g a arătat mici oscilații în domeniul orientării 0-80° a plăcuțelor și apoi a crescut spre 90°.

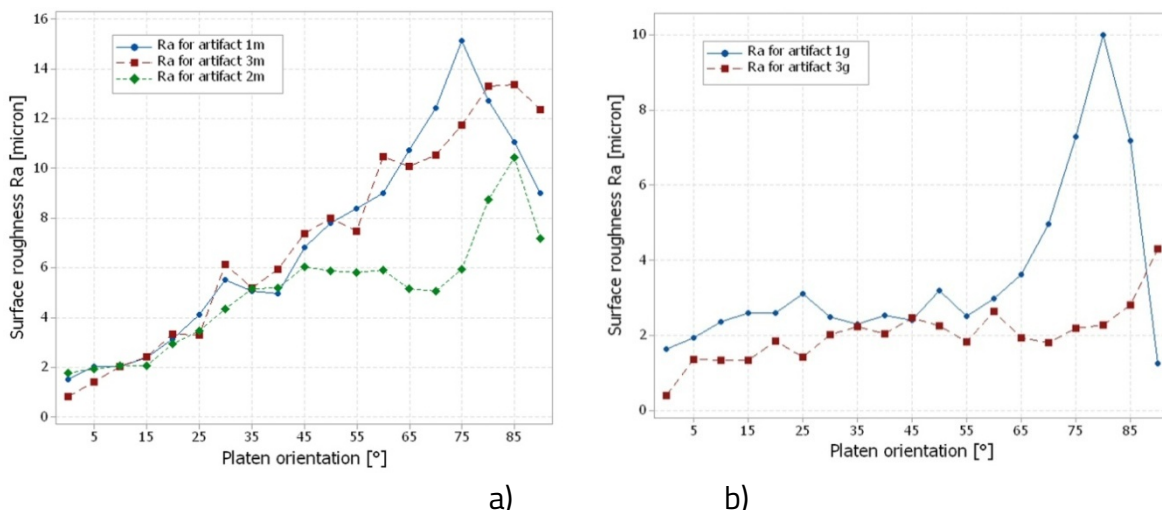


Fig. 3.11 Tendințe ale valorilor rugozității experimentale (Ra): a) artefacte printate in mod mat; b) artefacte printate in mod lucios [6].

3.5.2. Rugozitatea experimentală versus modele teoretice

Predicțiile teoretice ale rugozității suprafeței (Ra) în funcție de unghiul suprafeței au fost analizate de o serie de autori [8, 15], luând în considerare diferite tehnologii AM. În cadrul fabricației aditive, studiile teoretice au estimat rugozitatea suprafeței Ra, pe baza trigonometriei [54], interpolarea datelor măsurate [49], baze de date cu valori ale rugozității determinate experimental analizate prin algoritmi specifici și metode bazate pe algoritmi genetici de optimizare [8]. Cercetările [8, 49, 54] realizate pentru tehnologiile SLA, FDM și LOM arată că, în general, rugozitatea suprafețelor superioare scade de la o valoare maximă pentru un unghi de 0° -4°, la o valoare minimă atinsă în jurul valorii de 90°.

Un model teoretic pentru tehnologia de pulverizare cu jeturi de material, incluzând PolyJet, ar trebui să ia în considerare impactul picăturilor cu platforma construită. Kumar și colab. [15] au determinat un model teoretic pentru tehnologia PolyJet în cazul finisajului mat, descris de ecuația (3.1). Ei au determinat un unghi de contact optim a picăturilor de 12°, în cazul rășinii Vero Blue 840.

$$R_a = t/4 \cdot |\sin(\theta + \psi) / \sin(\psi)|. \quad (3.1)$$

Un model teoretic care să țină cont de post-procesare a fost propus de către autorul acestei teze, în ecuația (2). Parametrii ecuațiilor (1) și (2) sunt grosimea stratului (t), orientarea plăcuței (θ), unghiul de contact al picăturilor de rășină (ψ) și coeficientul de corecție post-procesare (K1). Coeficientul de corecție K1 are o valoare mai mică decât 1, indicând influența post-procesării asupra rugozității suprafeței.

$$R_a = t/4 \cdot |\cot\psi \cdot \sin\theta + \cos\theta| \cdot K_1; K_1 < 1. \quad [6] \quad (3.2)$$

Curbele teoretice ale distribuției rugozității suprafeței (Figura 3.12, 3.13 și 3.14), determinate cu ecuația (2), au fost comparate cu curbele experimentale ale rugozității. S-a realizat un studiu de optimizare a coeficientului de corecție K_1 , pentru toate orientările artefactelor, în cazul tipului de finisaj mat. Valorile coeficientului de corecție K_1 , care au dat cea mai mică eroare standard medie, sunt prezentate în Tabelul 3.6.

Tab. 3.6 Estimarea teoretică a coeficientului de corecție K_1 [6].

| Orientare artefact (°) | K_1 | Deviație standard (μm) | Eroare standard medie (μm) |
|------------------------|-------|-------------------------------------|---|
| 0 | 0.6 | 1.87 | 0.43 |
| 45 | 0.4 | 1.69 | 0.27 |
| 90 | 0.6 | 1.19 | 0.27 |

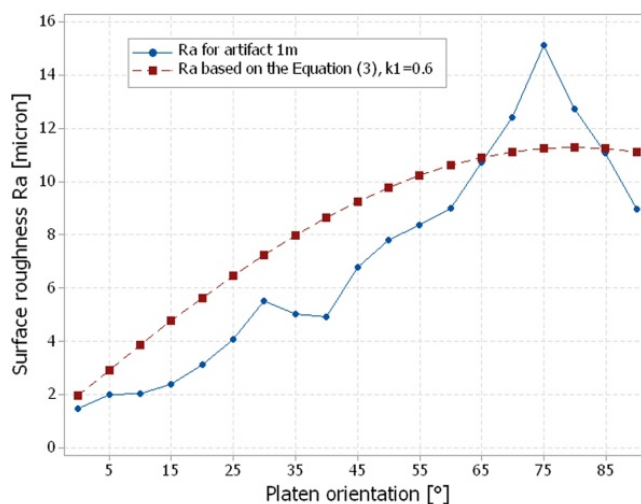


Fig.3.12 Comparație între tendința experimentală și cea teoretică a rugozității R_a a artefactului aliniat cu Axa 1 [6]

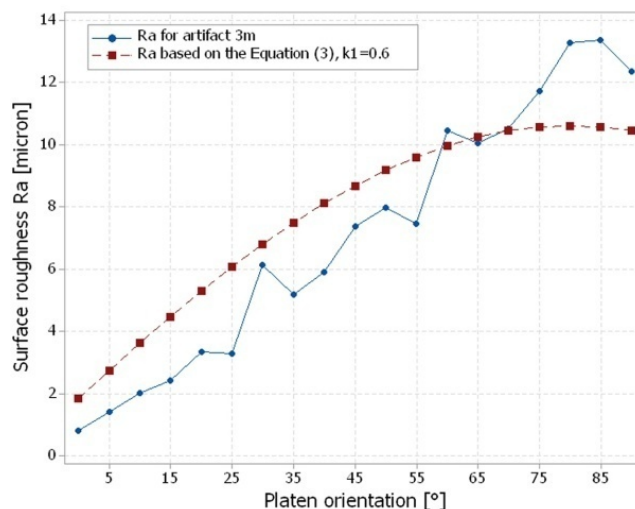


Fig.3.13 Comparație între tendința experimentală și cea teoretică a rugozității R_a a artefactului aliniat cu Axa 2 [6]

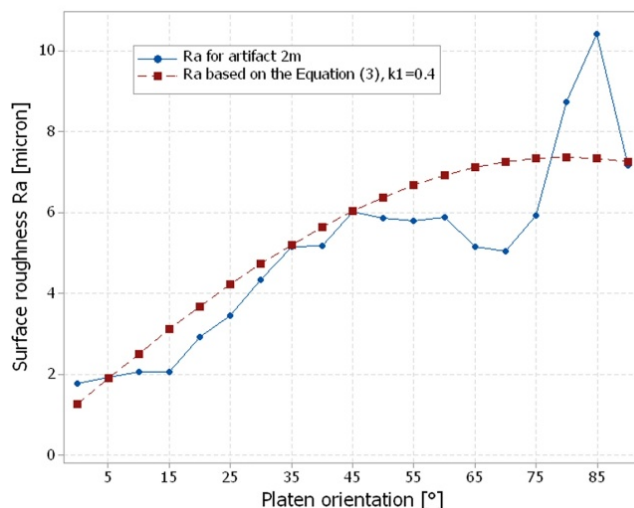


Fig.3.14 Comparație între tendința experimentală și cea teoretică a rugozității Ra a artefactului aliniat cu Axa 3. [6]

3.5.3. Defecte de suprafață a pieselor fabricate prin PolyJet

Chen și colab. [13] au analizat calitatea suprafeței pieselor cilindrice printate pe Obiect EDEN 350 și a observat defecte (suprafețe aspre) pe direcția perpendiculară pe direcția de scanare. Acestea au fost cauzate de rezoluția mai mică de 600 de puncte per inch (DPI) (0,042 mm) în direcția X și Y, comparativ cu 1600 DPI (0,016 mm) în direcția Z.

Defecte de tip striații (Figura 3.15) au fost observate vizual pe artefactele printate în modul lucios, pentru orientarea plăcuțelor începând de la 75° la 85°. Densitatea striațiilor de pe plăcuțe a scăzut odată cu creșterea unghiului. Dar, înălțimea striațiilor a crescut. Cele mai mari striații au fost observate pentru 85°. Pereții verticali imprimati în stil lucios au avut o calitate excelentă a suprafeței, fără niciun defect vizual. Un defect de tranziție de la lucios la mat (Figura 3.15) a fost determinat pe zona cilindrică imprimată în modul lucios.

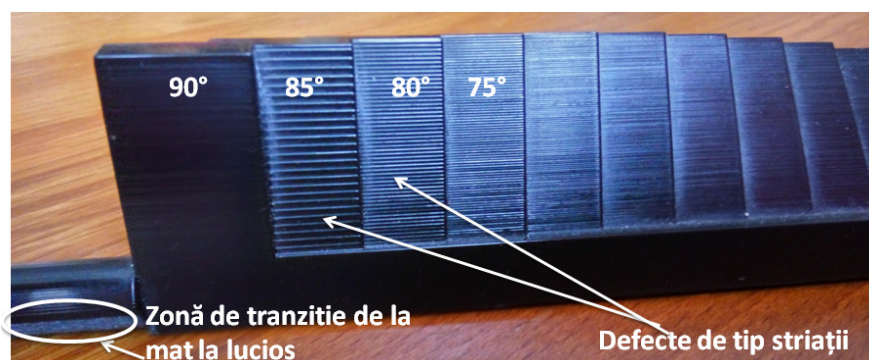


Fig.3.15 Defecte de suprafață pentru speciamele imprimate in stilul lucios [6]

3.5.4. Rezultatele analizei statistice

Rezultatele studiului Gage R&R au arătat că sistemul de măsurare este acceptabil deoarece procentul componentelor de varianță este mai mic de 1% [67]. Această condiție a fost îndeplinită pentru fiecare artefact măsurat, cu o repetabilitate dovedită, prin care variația dispozitivului de măsurare a rugozității a fost mult mai mică decât variația rugozității

suprafeței pieselor fabricate prin procesul AM, așa cum se arată în Tabelul 3.7. În acest studiu, doar un evaluator a înregistrat datele, făcând inutilă reproductibilitatea.

Tab.3.7 Contribuția procentuală a variației sistemului de măsurare [6].

| Sursa | Artefact 1m | Artefact 2m | Artefact 3m | Artefact 1g | Artefact 2g |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Repetabilitate | 0.33% | 0.69% | 0.53% | 0.56% | 0.47% |
| Piesa la piesa | 99.67% | 99.31% | 99.47% | 99.44% | 99.53% |
| Variație totala | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% |

Rezultatele analizei ANOVA sunt prezentate în Tabelul 8. Din tabelul ANOVA, se poate observa că orientarea plăcutelor și tipul de finisare au avut o influență semnificativă mai mare asupra Ra, atâta timp cât valoarea p a fost mai mică decât nivelul de semnificație 0,05 (chiar mai mic de 0,001). De asemenea, factorii orientarea plăcuței, tipul de finisare și interacțiunea lor au arătat valori F_{exp} mai mari decât valoarea F critică de 0,1% la $\alpha = 0,001$. Se poate concluziona că rezultatele au fost semnificative la un nivel de semnificație de 0,1%.

Factorul cel mai semnificativ asupra parametrului rugozitate (Ra) a fost orientarea plăcuței, care a explicat contribuția de 46,65% din variația totală. Următoarea contribuție pentru Ra a fost data de tipul de finisare, cu o contribuție de 29,50%.

Orientarea artefactului nu a avut un efect important asupra Ra, cu un PC% în jur de 0,81%. Interacțiunea orientării plăcuței cu tipul de finisare a avut un efect semnificativ asupra parametrului rugozitate, cu un procent PC% de 14,50%. Interacțiunea orientării artefactului cu orientarea plăcuței nu a avut un efect semnificativ asupra parametrului de rugozitate ($p > 0,05$).

Tab.3.8 Contribuția procentuală a factorilor pe baza modelului liniar generalizat (GLM) [6].

| Sursa | DF | Seq SS | Seq MS | F_{exp} | $F_{0.1\%}$ | p | PC (%) |
|--|----|---------|---------|-----------|-------------|--------|--------|
| Orientare artefact | 2 | 9.66 | 4.828 | 2.79 | 10,15 | 0.086 | 0.81% |
| Orientare plăcuța | 18 | 554.13 | 30.785 | 17.81 | 4.52 | <0.001 | 46.65% |
| Tip de finisare | 1 | 350.36 | 350.365 | 202.65 | 15.08 | <0.001 | 29.50% |
| Orientare artefact × Orientare plăcuța | 36 | 68.47 | 1.902 | 1.10 | 4.04 | 0.424 | 5.77% |
| Orientare plăcuța × Tip de finisare | 18 | 172.18 | 9.565 | 5.53 | 4.52 | <0.001 | 14.49% |
| Erori | 19 | 32.85 | 1.729 | | | | 2.76% |
| Total | 94 | 1187.64 | | | | | 100% |

Validarea modelului GLM a fost realizată folosind diagrame de probabilitate normale ale rezidurilor, față de valorile ajustate și histograme [69].

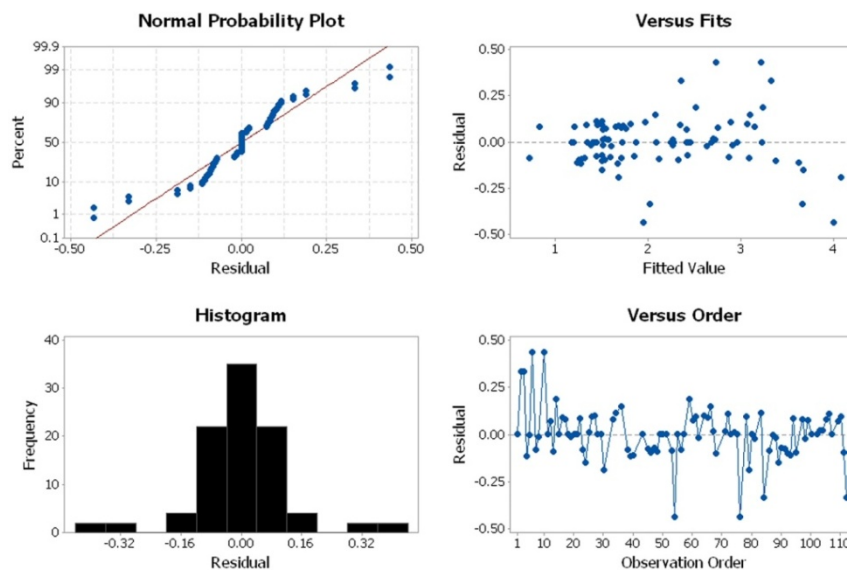


Fig.3.16 Diagrama reziduală pentru rugozitatea suprafeței (Ra) [6].

După cum se poate observa din graficul probabilității normale (Figura 3.16), normalitatea diagramelor reziduale a fost dovedită deoarece reziduurile au o tendință liniară. În cele din urmă, ipoteza de independență a fost satisfăcută prin verificarea modelelor din graficul de reziduuri versus ordine, prin care nu a fost detectată nici o corelație pozitivă sau negativă.

Pentru **analiza influenței nivelului factorilor de control asupra rugozității suprafeței** au fost utilizate metode grafice. Rezultatele statistice au fost reprezentate grafic, rezultând următoarele grafice: graficul efectelor principale, graficul efectelor interacțiunilor și diagramele intervalului cu bare de eroare standard ale fiecărui factor versus Ra.

Din Figura 3.17, se poate observa că principalele influențe asupra rugozității suprafeței au fost orientarea artefactului la nivelul 1 (0°), orientarea plăcutei la nivelul 17 (80°) și tipul de finisare la nivelul 1 (mat). Este evident că factorii orientarea plăcutei, tipul de finisare și interacțiunea lor au avut o influență semnificativă asupra rugozității suprafeței, așa cum se arată în figurile 3.17 și 3.18.

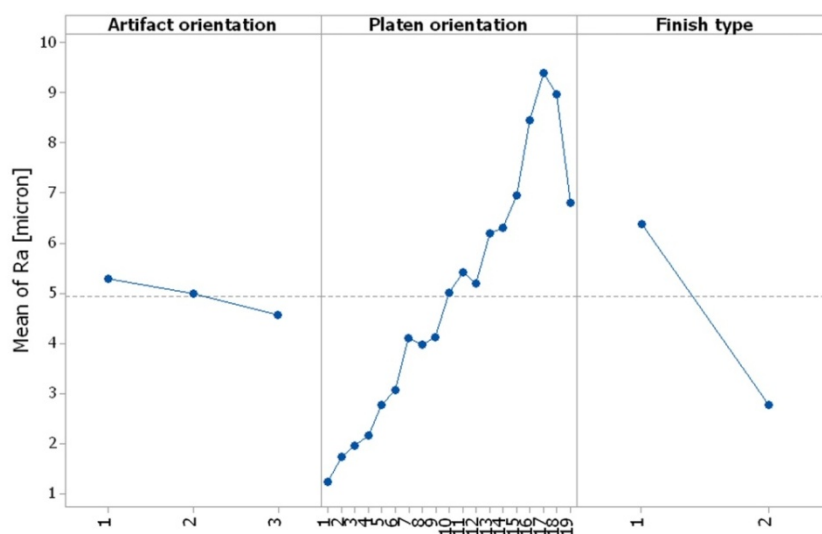


Fig.3.17 Diagrama efectelor principale pentru rugozitatea Ra [6].

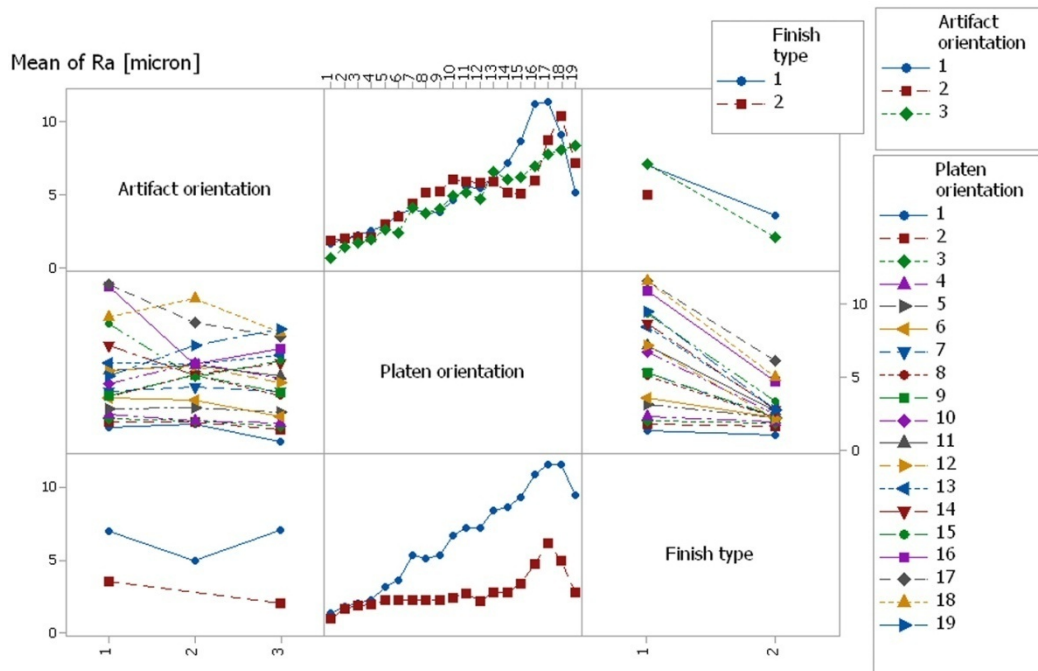


Fig.3.18 Diagramele efectelor interacțiunii pentru rugozitatea Ra [6].

În Figura 3.19 sunt arătate diagramele intervalelor cu bare de eroare standard ale fiecărui factor în funcție de rugozitate (Ra). Deși mediile par a fi diferite, diferența pentru Ra în orientarea artefactului nu a fost probabil semnificativă, deoarece toate barele intervalelor s-au suprapus ușor (Figura 3.19). Orientarea plăcuței (Figura 3.20) a avut o influență asupra rugozității suprafeței și se pare că, la orientarea plăcuței de 0° , media lui Ra a fost mai mică, în timp ce, pentru orientarea plăcuței de 80° , media a fost mai mare. Există posibilitatea de a reduce suprapunerea barelor intervalelor dacă numărul de măsurători crește, rezultând ca diferența dintre mediile orientării plăcuțelor de la 40° la 80° să fie semnificativă statistic. Graficul din Figura 3.21 arată că diferența dintre mediile pentru Ra în tipul de finisare a fost semnificativă deoarece barele de interval nu s-au suprapus.

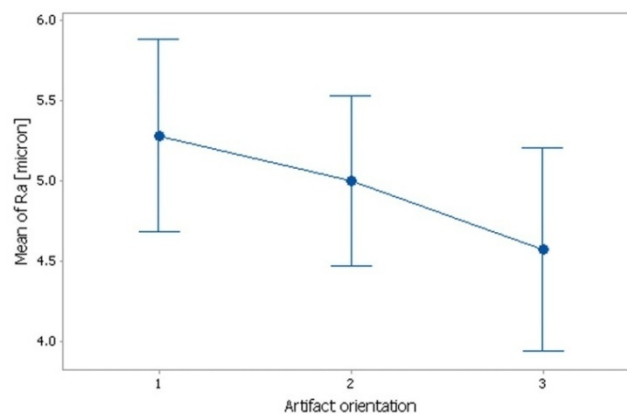


Fig.3.19 Diagrame de interval cu bare de erori standard ale factorului orientare artefact [6].
Barele reprezintă erori standard ale mediei.

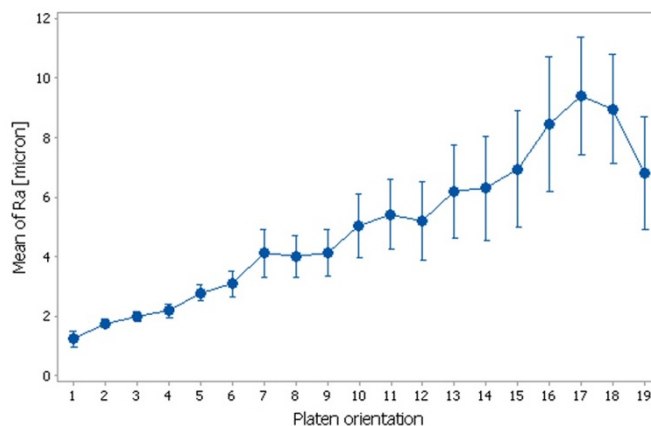


Fig.3.20 Diagrame de interval cu bare de erori standard ale factorului orientare plăcuțe [6].

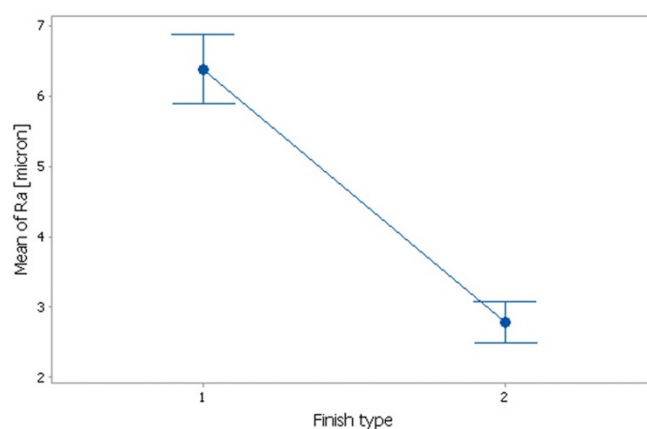


Fig.3.21 Diagrame de interval cu bare de erori standard ale factorului tip de finisare [6].

Experimentul confirmator a arătat ca diferențele mediilor au fost dovedite din nou cu semnificație mare pentru factorii orientarea plăcuței și tipul de finisare. Deoarece F_{exp} a fost mai mare de $F_{0,1\%}$ pentru factorii orientarea plăcuței, tipul de finisare și interacțiunea lor, toate aceste rezultate au fost semnificative la un nivel de semnificație de 0,1%. Mai mult, valoarea p pentru Ra în analiza varianței orientării artefactului ($p = 0,113$) a condus la aceeași concluzie ca în prima rulare a experimentelor (adică, probabil nu este semnificativ) (Tabelul 3.9).

Tab.3.9 Contribuția procentuală a factorilor pentru experimentul confirmator [6].

| Sursa | DF | Seq SS | Seq MS | F_{exp} | $F_{0.1\%}$ | p | PC (%) |
|--|----|---------|---------|-----------|-------------|--------|--------|
| Orientare artefact | 2 | 8.04 | 4.019 | 2.45 | 10,15 | 0.113 | 0.67% |
| Orientare plăcuța | 18 | 561.54 | 31.197 | 19.01 | 4.52 | <0.001 | 46.94% |
| Tip de finisare | 1 | 352.90 | 352.903 | 215.00 | 15.08 | <0.001 | 29.50% |
| Orientare artefact × Orientare plăcuța | 36 | 70.17 | 1.949 | 1.19 | 4.04 | 0.352 | 5.86% |
| Orientare plăcuța × Tip de finisare | 18 | 172.26 | 9.570 | 5.83 | 4.52 | <0.001 | 14.40% |
| Erori | 19 | 31.19 | 1.641 | | | | 2.60% |
| Total | 94 | 1196.10 | | | | | 100.0% |

CAPITOLUL 4 METODOLOGIE ȘI CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND ANALIZA CALITĂȚII SUPRAFEȚELOR AERODINAMICE FABRICATE PRIN PROCEDEE ADITIVE

Performanțele componentelor de formă aerodinamică sunt influențate semnificativ de calitatea suprafețelor acestora. În cadrul acestui capitol este prezentată o metodologie și cercetări experimentale privind analiza suprafețelor aerodinamice realizate prin fabricație aditivă. Capitolul se bazează pe articolele publicate de autorul acestei teze de abilitare în calitate de unic autor în [25] și [26], De asemenea, în cadrul acestui capitol sunt prezentate o parte din rezultatele cercetărilor autorului, din contractul de cercetare nr. 6427 / 2009-2012.

4.1. Suprafețe aerodinamice realizate prin fabricație aditivă: sinopsis și motivație

Aplicațiile AM pentru studii aerodinamice experimentale au atras mult interes în special pentru sectoarele aerospațial, auto, sport de performanță și eolian. Astfel, piese de formă aerodinamică obținute prin AM sunt folosite pentru teste în tunel aerodinamic sau ca și componente finale pentru UAV-uri (vehicul aerian fără pilot), autovehicule, turbine eoliene etc. Principalele cerințe ale unei piese aerodinamice sunt suprafața care permit obținerea unei rezistențe mici la înaintare, greutatea ușoară, și caracteristicile mecanice bune.

Rugozitatea suprafeței este un factor important în aerodinamică care poate influența semnificativ dinamica fluidelor și transferul de căldură [70]. Rugozitatea învelișului unui corp aerodinamic influențează rezistența la înaintarea datorată frecării suprafeței (skin friction drag) cu fileurilor de aer. Aceasta este una dintre componentele rezistenței la înaintare parazite [71]. Trei factori concură la rezistența la înaintare parazită a unui corp aerodinamic și anume, forma corpului, tipul de construcție și materialul. Astfel, rezistența la înaintare parazită a unui corp conține trei componente: rezistența la înaintare datorată formei corpului, rezistența la înaintare datorată interferențelor aerodinamice dintre părțile componente ale corpului și rezistența la înaintare datorată frecării. Gradul de finisare constructivă a învelișului corpului și lustruirea ajută la netezirea suprafeței și la reducerea rezistenței de frecare a suprafeței. Coeficienții de frecare a suprafeței se determina uneori pe baza datelor experimentale pentru plăci plate având rugozități diferite.

Diverse studii privind rugozitatea suprafețelor aerodinamice au fost realizate pentru diverse tipuri de aeronave. Astfel, o distribuție neomogenă a rugozității suprafeței pe aripa unei aeronave fără pilot după multe ore de zbor a fost determinată în [72]. S-a menționat că rugozitatea inițială a aripii fabricată printr-o metodă clasică nu prin fabricație aditivă a fost de 2 μm . Influența anizotropă a vântului în timpul zborului, asupra geometriei aripii și interferențele dintre fuselaj și aripă au fost factori care au crescut rugozitatea.

Studii preliminare despre fabricarea aditivă prin procesul PolyJet a profilurilor aerodinamice pentru teste aerodinamice au fost efectuate în [25], dar calitatea suprafeței profilului aerodinamic nu a fost investigată. În [73] au fost determinați coeficienții experimentali de portanță și de rezistență la înaintare a profilului aerodinamic NACA 2412, realizat prin tehnologia de sinterizare selectivă cu laser (SLS), dar studiul rugozității suprafeței nu a fost efectuat. Olasek și colab. [74] au evaluat un model de profil aerodinamic simetric NACA0018 realizat din diferite materiale și metode de printare 3D și au concluzionat că rugozitatea suprafeței influențează caracteristicile aerodinamice ale profilului aerodinamic. Ei au menționat, de asemenea, că a rezultat o rugozitate a suprafeței mica în cazul procedurii multi-jet (MJM), una moderată pentru SLS și alta ridicată pentru procedura de depunere de material topit prin extrudare termoplastica (FDM), dar nu au fost menționate valori ale rugozității. Paletele rotorului unei turbine eoliene printate 3D prin tehnologia FDM au fost testate în tunelul aerodinamic de către [75], dar caracterizarea rugozității suprafeței nu a fost determinată. Un model de UAV a fost dezvoltat și fabricat folosind procesul de pulverizare cu jet de aditiv de către Junka și colab. [76] pentru teste în tunel aerodinamic. Acest model aerodinamic a fost construit din pulbere de plastic și liant și apoi post-procesat pentru a obține o suprafață de bună calitate, dar nu a fost investigată rugozitatea suprafeței. Aceste cercetări au demonstrat că printarea 3D schimbă semnificativ abordarea aerodinamicii experimentale.

În literatura de specialitate au fost identificate studii și cercetări privind tehnologia PolyJet care au investigat caracterizarea materialelor, parametrii procesului, caracterizarea dimensională și geometrică, dar a fost găsită o lipsă de cunoștințe despre corpurile aerodinamice, cum ar fi profilele aerodinamice. De asemenea, este nevoie de o scară universală de rugozitate care să poată descrie fiecare tip de rugozitate pentru diferite materiale utilizate în studiile aerodinamice. Astfel, calitatea printării 3D prin rugozitatea suprafeței reprezintă un aspect important atunci când piesele sunt destinate testelor aerodinamice. Pe baza standardelor AM, nu există reguli de "bună practică" pentru a efectua măsurători în AM, în special pentru suprafețele aerodinamice.

Obiectivul principal al acestui capitol este definirea unei metodologii pentru evaluarea calității suprafețelor aerodinamice. Un alt obiectiv este identificarea capacității procesului PolyJet de a realiza suprafețe aerodinamice (de exemplu, profile aerodinamice). Un studiu de caz privind procesul PolyJet și materialele acestuia validează metodologia propusă.

4.2. Metodologie privind analiza calității suprafețelor aerodinamice fabricate prin procedee aditive

Obiectivul principal al metodologiei propuse este de a evalua performanța unui proces de fabricație aditivă pentru a produce artefacte aerodinamice. Această metodologie include proiectarea experimentelor (DOE) pentru un artefact aerodinamic cu o lungime mică și

experimente de confirmare folosind un artefact aerodinamic cu o lungime mare (aripa), care este urmată de analiza și interpretarea rezultatelor, așa cum se arată în Figura 4.1. Artefactele aerodinamice care au fost analizate în această lucrare au fost profile aerodinamice și aripi. Profilul aerodinamic este o formă în secțiune transversală a unui obiect a cărui mișcare printr-un fluid (de exemplu, aer) este capabilă să genereze o forță de portanță semnificativă și o forță de rezistență mică.

Scopul experimentelor este determinarea rugozității suprafeței modelelor aerodinamice obținute printr-un proces AM. Din considerente aerodinamice, rugozitatea suprafeței superioare și cea a suprafeței inferioare a unui profil aerodinamic ar trebui să aibă valori similare. Prin urmare, profilul aerodinamic ar trebui să fie poziționat optim pe platforma construită pentru a o realiza acest lucru. În plus, orientarea piesei pe platforma de construcție influențează timpul de printare 3D și consumul de materiale. Acești parametri influențează prețul total al piesei fabricate aditiv.

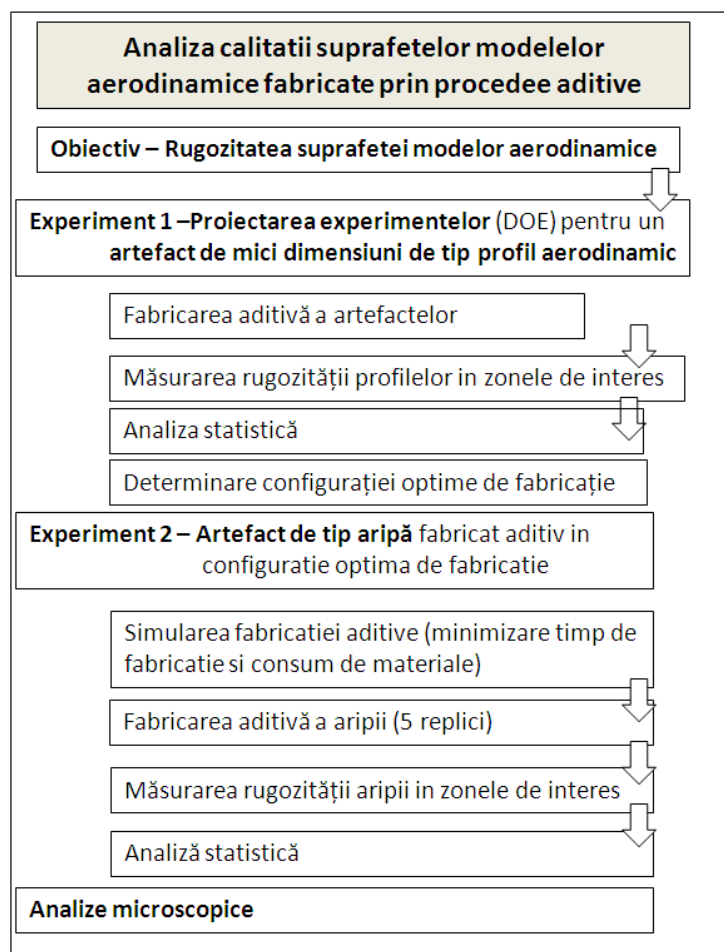


Fig.4.1 Etapele metodologie pentru investigarea calității suprafețelor modelelor aerodinamice realizate prin fabricație aditivă [25].

Două tipuri de artefacte aerodinamice au fost proiectate folosind software-ul SolidWorks versiunea 2016 (Dassault Systèmes, Waltham, MA, SUA), un model de aripă cu anvergura foarte mică (VS-SW) denumit **artefact de tip profil aerodinamic** și un model de aripă cu anvergura mare (L-SW) denumita in continuare **artefact de tip aripă**. Ambele

artefacte aerodinamice sunt proiectate folosind un profil aerodinamic asimetric, cum ar fi profilul aerodinamic NACA 8410, cu o lungime a corzii de 85 mm (Figura 4.2). Termenii de bază privitori la geometria unui profil aerodinamic sunt curba superioară, curba inferioară și linia corzii, așa cum se arată în Figura 4.2. Artefactele aerodinamice sunt proiectate cu o anvergură de 10 mm pentru modelul VS-SW (Figura 4.3) și 200 mm pentru modelul L-SW (Figura 4.4). Principalele caracteristici care permit definirea locațiilor pe aripă sunt suprafețele inferioare și superioare ale aripii, bordul de atac și bordul de fugă al aripii, rezultând trei zone distincte: zona bordului de atac, zona centrală și zona bordului de fugă.

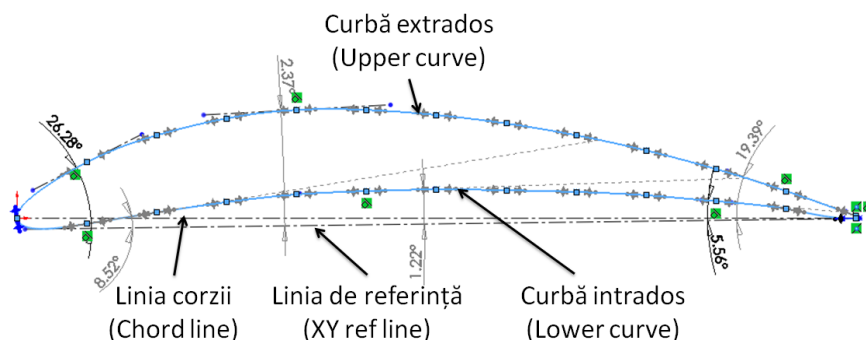


Fig.4.2 Terminologie pentru curba unui profil aerodinamic asimetric (NACA 8410) [25].

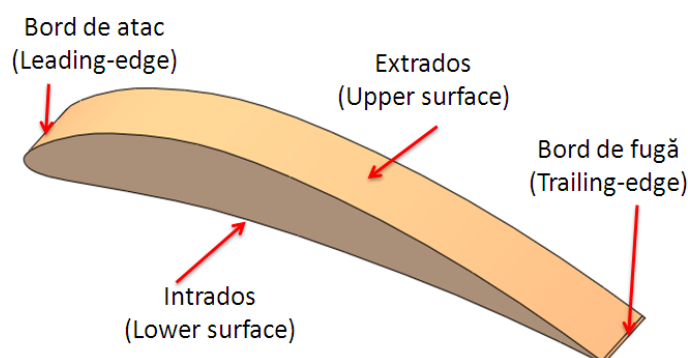


Fig.4.3 Artefact de tip profil aerodinamic [25].

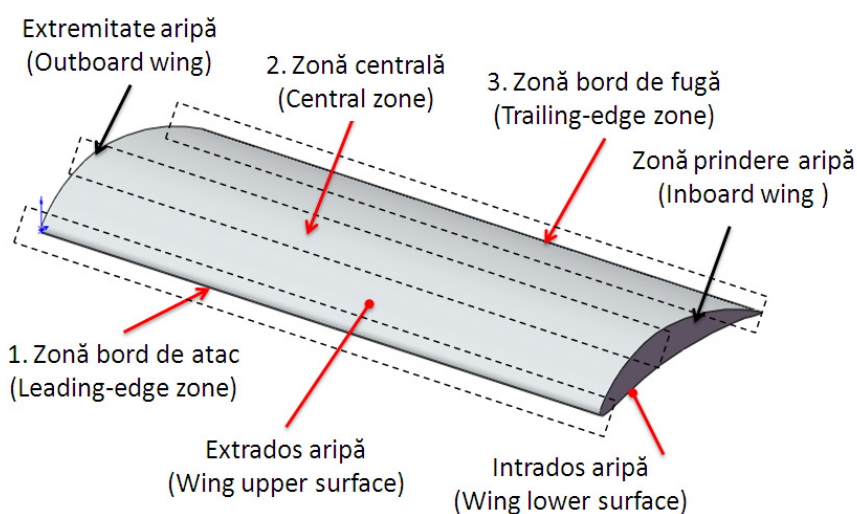


Fig.4.4 Artefact de tip aripă [25].

4.3. Simulări și investigații experimentale privind tehnologia PolyJet

Artefactul VS-SW a fost utilizat pentru teste preliminare de proiectare a experimentelor de screening (Screening Designs sau screening DOE sau Design of Experiments for Screening) [77]. Proiectarea de screening a experimentelor (proiectarea preliminară a experimentelor) este utilizată pentru a reduce un set mare de factori și, de obicei, nu sunt utilizate replici multiple. Dacă se caută un model de predicție, utilizarea mai multor replici poate crește precizia modelului. În acest caz, de obicei sunt utilizate minim cinci replici. În plus, resursele pot dicta numărul de replici dacă experimentul este costisitor.

Planul experimental preliminar privind investigarea rugozității suprafeței profilului aerodinamic a fost conceput prin alegerea factorilor de control care afectează calitatea suprafeței și nivelurile acestora. Există mulți factori care afectează rugozitatea suprafeței în fabricația aditivă [6]. Selectarea factorilor de control depinde de particularitățile procesului de fabricație aditivă și de geometria artefactelor. Au fost luați în considerare următorii factori de control care afectează calitatea suprafeței: orientarea profilului aerodinamic, tipul de finisare al suprafeței, suprafața profilului aerodinamic și locația de interes. Detalii despre factorii de control și nivelurile acestora sunt prezentate în Tabelul 4.1.

Tab.4.1 Factorii de control și nivelurile lor [25].

| Nivel | Target | Orientare artefact ¹ | | Tipul finisării | | Suprafața profilului | | Locație de interes | |
|-------|--------|---------------------------------|---------|-----------------|---------|----------------------|------------|--------------------|-----------------------|
| | Simbol | Simbol | Valoare | Simbol | Valoare | Simbol | Valoare | Simbol | Valoare |
| 1 | | 1 | XY | 1 | Mata | 1 | superioară | 1 | Zona bordului de atac |
| 2 | Ra | 2 | YX | 2 | Lucios | 2 | inferioară | 2 | Zona centrală |
| 3 | | - | - | - | - | - | - | 3 | Zona bordului de fugă |

¹Doar orientări ale artefactului care permit obținerea unor distribuții similare ale rugozității pe suprafața superioară și cea inferioară au fost luate în considerare.

Orientarea profilului aerodinamic pe platforma de construcție este considerat un factor cu două niveluri cu orientări de bază paralele și perpendiculare pe direcția de scanare (numite XY și respectiv YX). Condiția de a păstra aceeași calitate a suprafeței pe suprafața superioară și inferioară a artefactului de tip profil aerodinamic a fost luată în considerare. Orientarea sistemului de coordonate a platformei de construcție AM a fost definită pe baza standardului ISO/ASTM 52921-13 [60]. Dispunerea artefactelor pe platforma de construcție este prezentată în Figura 4.5.

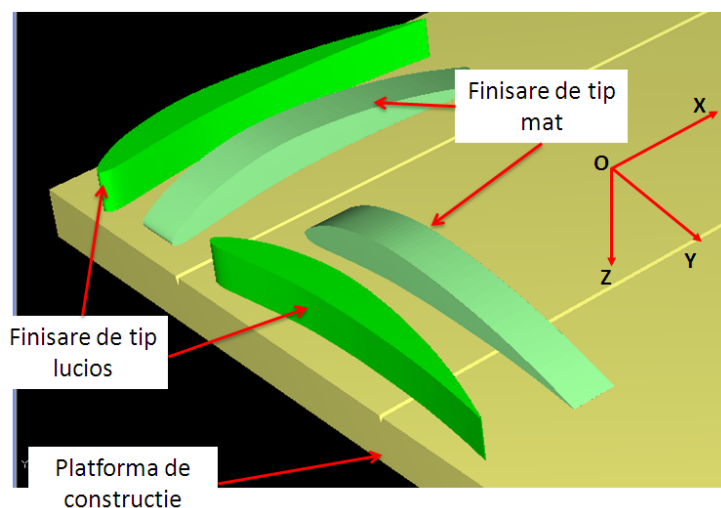


Fig.4.5 Orientările XY și YX ale artefactului de tip profil aerodinamic [25].

Din considerente aerodinamice, au fost propuse trei locații de interes pentru investigațiile privind calitatea suprafeței (rugozitatea), și anume zona din bordul de atac (Leading-edge zone), zona centrala (Central zone) și zona din bordul de fugă (Trailing-edge zone), atât pe suprafețele superioare (extrados) cat și pe cele inferioare (intrados) ale artefactului de tip profil aerodinamic.

Un factor distinctiv al tehnologiei PolyJet este tipul de finisare a suprafeței. Finisajul mat și lucios sunt nivelurile tipului de finisaj. Un strat subțire de material suport este aplicat în jurul suprafeței piesei în fabricarea cu finisaj mat. Acesta permite obținerea unei suprafețe uniforme a piesei. În cazul pieselor imprimate în finisajul lucios, materialul suport se depune doar pe suprafețele inferioare ale piesei, iar suprafețele superioare sunt lucioase.

Un plan general factorial complet cu 24 de combinații de factori a fost realizat pentru a putea investiga influența factorilor de control (Tabelul 4.1) asupra rugozității suprafeței artefactului de tip profil aerodinamic. Analiza statistică a datelor pentru profilul aerodinamic a fost efectuată, investigând și caracterizând efectele factorilor de control și interacțiunile acestora asupra rugozității suprafeței profilului aerodinamic. Analiza statistică a fost efectuată folosind software-ul Minitab 17 (Coventry, Marea Britanie). Indicatorii statistici p și F determinați în tabelul ANOVA indică semnificația rezultatelor.

Tab.4.2 Estimarea parametrilor de fabricare aditivă pentru artefactul de tip aripa [25].

| Orientare artefact | Tipul finisării | Timp de fabricație (ore:min) | Consum material model (g) | Consum material suport (g) |
|--------------------|-----------------|------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| XY | mat | 1:38 | 172 | 97 |
| | lucios | 1:34 | 170 | 81 |
| YX | mat | 3:16 | 177 | 102 |
| | lucios | 3:13 | 174 | 86 |
| ZX | mat | 10:59 | 187 | 99 |
| | lucios | 10:56 | 175 | 35 |
| ZY | mat | 22:46 | 215 | 127 |
| | lucios | 22:40 | 202 | 59 |

Pe baza celui mai bun scenariu obținut în urma testelor preliminare, a fost efectuat un experiment confirmator privind rugozitatea folosind artefactul de tip aripa L-SW. Dimensiunea denumita anvergura a acestui artefact este mai mare decât cea a artefactului VS-WS. Aceasta influențează timpul de fabricație al aripii în orientări diferite pe platforma de construcție. O serie de simulări ale procesului AM au fost necesare, pentru a minimiza timpul de fabricație și consumul de material. Timpul de construcție și cantitatea de material model și suport au fost determinate prin simulare în software-ul Objet Studio (Stratasys, Rehovot, Israel), așa cum se arată în Tabelul 4.2.

Din analiza simulărilor au rezultat următoarele:

- ✓ Cei mai mici timpi de construcție s-au obținut în cazul orientărilor XY mat și XY lucios. Cel mai mic timp a fost obținut în cazul XY lucios, dar s-a observat o calitate diferită a suprafeței superioare și inferioare a profilului aerodinamic pe baza influenței materialului suport asupra suprafeței inferioare.
- ✓ Un timp mediu s-a obținut în cazul orientărilor YX mat și YX lucios.
- ✓ Pentru orientările ZX și ZY s-a obținut un timp de construcție mare, cel mai mare obținându-se pentru orientarea ZY.
- ✓ Patru orientări ale artefactului de tip aripa pe platforma de construcție (Figura 4.6) au rezultat a fi viabile, deoarece doar acestea păstrează aceeași calitate a suprafeței pe extradosul și intradosul aripii.

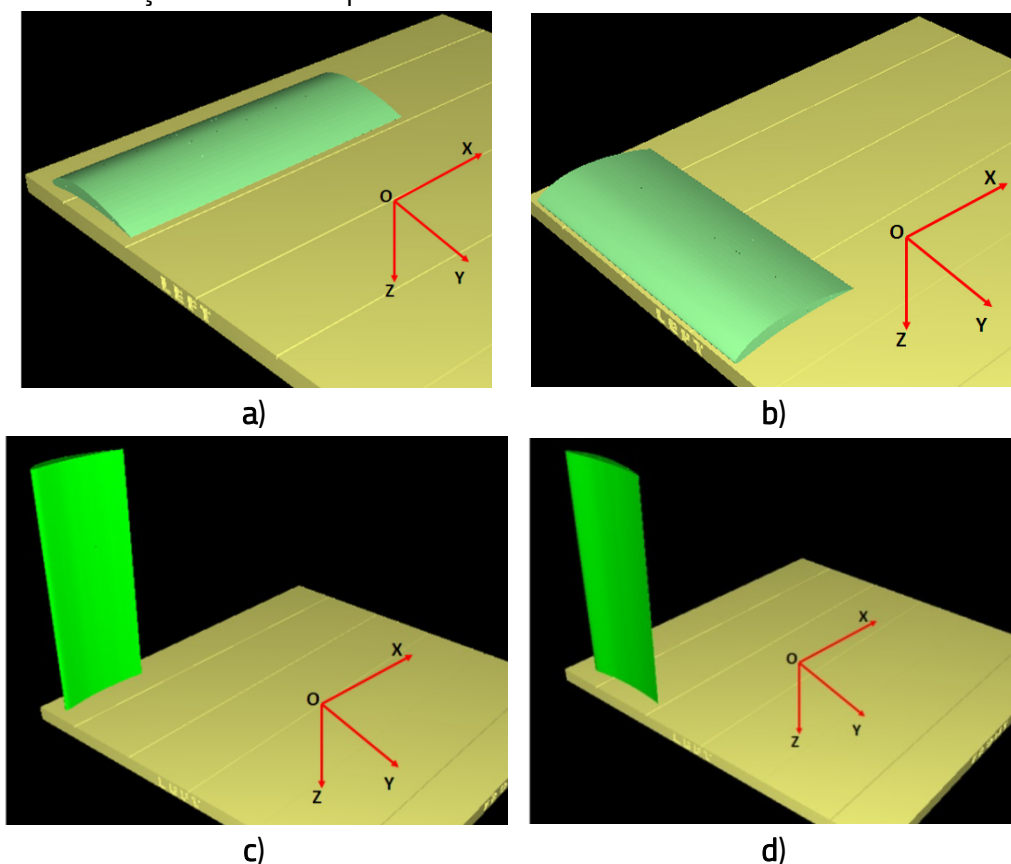


Fig.4.6 Diverse orientări pe platforma de construcție a artefactului tip aripa: (a) XY mat; (b) YX mat; (c) ZX lucios; (d) ZY lucios[25].

Pe baza simulărilor și a rezultatelor obținute din experimentul preliminar (screening DOE), a fost determinată o configurație optimă de printare 3D pentru artefactele de tip profil aerodinamic fabricate prin tehnologia Polyjet. Cinci probe de artefacte de tip aripi în această configurație optimă de printare 3D au fost fabricate. Distribuția experimentală a rugozității suprafeței în lungul anvergurii artefactului de tip aripă a fost analizată.

Toate mostrele, atât cele VS-SW cât și L-SW au fost convertite în fișiere STL, importate în software-ul Objet Studio versiunea 8.0.1.3 (Stratasys, Rehovot, Israel) și fabricate folosind mașina Objet EDEN 350 PolyJet (Stratasys, Rehovot, Israel).

Materialele cunoscute sub denumirea FullCure 720 ca material model și FullCure 705 ca material suport, furnizate de Stratasys, au fost folosite pentru a fabrica toate mostrele. Principalele proprietăți ale rășinii Objet Fullcure 720, cunoscută și ca RGD720, sunt prezentate în Tabelul 4.3 [45]. Oxidul de difenil (2,4,6-trimetilbenzoil) fosfină este fotoinițiatorul utilizat în polimerizarea UV, așa cum este menționat în [78].

Tab.4.3 Proprietățile materialului model Objet FullCure 720 [45].

| Proprietatea | ASTM | Metric |
|-----------------------------|---------------|-----------------------------|
| Rezistența la tracțiune | D-638-03 | 50–60 MPa |
| Alungire la rupere | D-638-05 | 15–25% |
| Rezistența la încovoiere | D-790-03 | 60–70 MPa |
| Duritate Rockwell | Scale M | 73–76 Scale M |
| Absorbție apă | D-570-98 24 h | 1.5–2.2% |
| Densitate după polimerizare | ASTM D792 | 1.18–1.19 g/cm ³ |

Experimentele au fost efectuate la o temperatură controlată de laborator de 20° Celsius și umiditate relativă de 30%.

Specimenele imprimate cu finisaj mat (Figura 4.7) au fost post-procesate prin curățire cu jet de apă sub presiune pentru a îndepărta materialul suport de pe suprafața acestora.

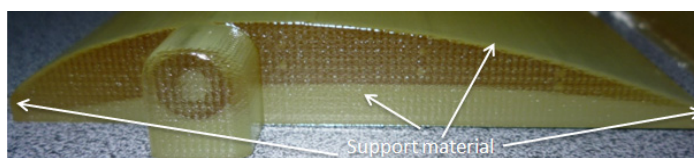


Fig.4.7 Specimen fabricat aditiv cu tipul de finisare mat [25].

Strategia de măsurare a rugozității pentru un artefact de tip profil aerodinamic constă în stabilirea zonelor de măsurare de interes și aplicarea filtrelor corespunzătoare conform standardului DIN EN ISO 4288 [42]. Măsurătorile filtrate Gauss au fost stabilite după cum urmează: o lungime de evaluare de 12,5 mm și o lungime de undă "cut-off" de 2,5 mm.

Autorul a propus o nouă strategie de măsurare a rugozității aripii, care constă în evaluarea rugozității suprafeței în trei locații de interes, adică zona bordului de atac, zona centrală și zona bordului de fugă, atât pe suprafețele superioare cât și pe cele inferioare ale

artefactului de tip aripa (Figura 4.8). Locațiile de interes au fost notate cu „A” pentru zona bordului de atac, „B” pentru zona centrală și „C” pentru zona bordului de fugă, așa cum se arată în Figura 4.8. În cazul artefactului de tip aripa, au fost luate în considerare trei secțiuni notate cu 1, 2 și 3 plasate de-a lungul anvergurii aripii. O singură secțiune de măsurare a fost luată în considerare pentru artefactele de tip profil aerodinamic VS-SW.

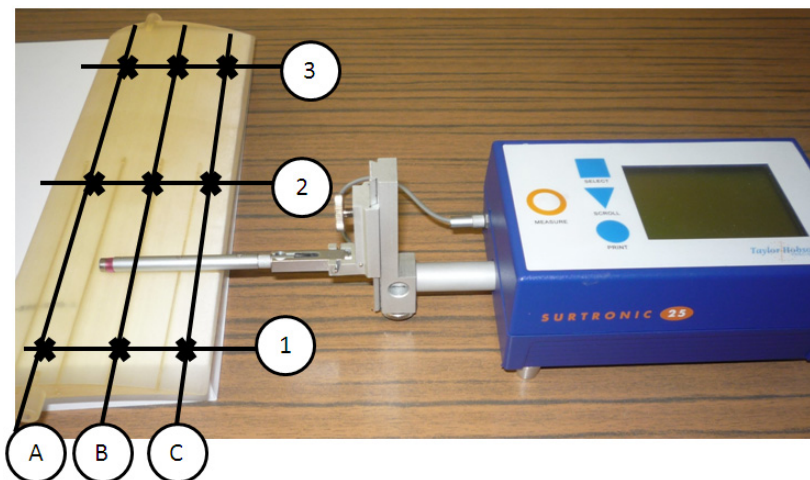


Fig.4.8 Schema privind măsurarea rugozității artefactului de tip aripa [25].

Măsurătorilor a fost efectuate folosind un rugozimetru de tip Surtronic 25 (Hoofddorp, Olanda) de la Taylor Hobson. Rugozimetru a fost calibrat înainte de efectuarea măsurătorilor. Măsurătorile profilului au fost repetate de cinci ori pentru fiecare locație a suprafeței profilului aerodinamic și a fost calculata valoarea medie. A fost determinată rugozitatea suprafeței R_a (abaterea medie aritmetică). Variabilitatea cauzată de dispozitivul de măsurare a rugozității a fost investigată, iar datele au fost procesate în software-ul Minitab 17 (Coventry, Marea Britanie) folosind studiul Gage R&R.

De asemenea, o evaluare calitativa a artefactelor aerodinamice a fost efectuată folosind un microscop optico-digital Mitutoyo TM-1005 B (Mitutoyo, Kawasaki, Japonia).

4.4. Rezultate

Performanta procesului PolyJet pe mașina Objet EDEN 350 PolyJet, privind fabricarea de artefacte aerodinamice a fost investigata ținând cont de următoarele analize:

- ✓ Analiza repartiției experimentale a rugozității pe suprafața superioară și cea inferioară a artefactului de tip profil aerodinamic, printat 3D în două moduri diferite de finisare a suprafeței și în orientări diferite pe platforma de construcție;
- ✓ Analiza defectelor de suprafață a artefactelor de tip profil aerodinamic;
- ✓ Analiza experimentală prin microscopie a artefactelor de tip profil aerodinamic;
- ✓ Analize statistice.

În continuare vor fi prezentate rezultatele cercetărilor experimentale privind investigarea artefactelor de tip profil aerodinamic, urmate de cele pentru artefactele de tip

aripa. Artefactele de tip profil aerodinamic au fost fabricate în 2 ore și 14 min, folosind 39 g de material model și 27 g de material suport. Timpul de procesare pentru fiecare artefact de tip aripă în orientare XY (cel mai bun scenariu) a fost de 1 oră și 38 de minute, iar consumul de materiale a fost de 172 g material model și 97 g material suport.

Repartiția rugozității suprafeței de-a lungul artefactului tip profil aerodinamic determinată experimental este prezentată în Figura 4.9.

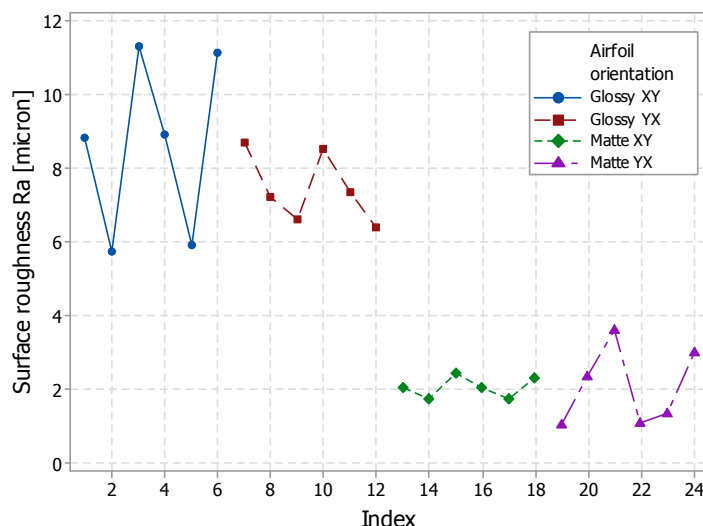


Fig.4.9 Rezultate privind rugozitatea (Ra) pentru artefactele de tip profil aerodinamic în diverse orientări și tipuri de finisare: XY lucios, YX lucios, XY mat, și YX mat [25].

Pentru artefactul de tip profil aerodinamic printat în finisaj mat au fost determinate valori experimentale ale rugozității (Ra) în intervalul 1,06-3,62 micrometri pentru orientarea YX și 1,74-2,46 micrometri pentru orientarea XY, așa cum se arată în Figura 4.9. Rugozitatea artefactelor printate în finisaj lucios au prezentat valori mai mari decât artefactul cu finisaj mat, în intervalul 5,72-11,3 micrometri pentru orientarea XY și 6,4-8,68 micrometri pentru orientările YX (Figura 4.9). O calitate similară a suprafeței superioare și inferioare a profilului aerodinamic a fost observată atât pentru mostrele printate în modul mat, cât și pentru cele lucioase. Valorile cele mai mici ale rugozității suprafeței (Ra) cu o distribuție relativ uniformă au fost obținute pentru artefactele de tip profil aerodinamic printate în modul mat în orientarea XY. Ținând cont de acest rezultat, artefactele de tip aripă (L-SW) au fost printate în modul de finisare mat.

Variabilitatea rugozimetrului bazată pe studiul Gage R&R [43] a fost mult mai mică decât variația rugozității suprafeței pieselor printate 3D, demonstrând repetabilitatea sistemului de măsurare.

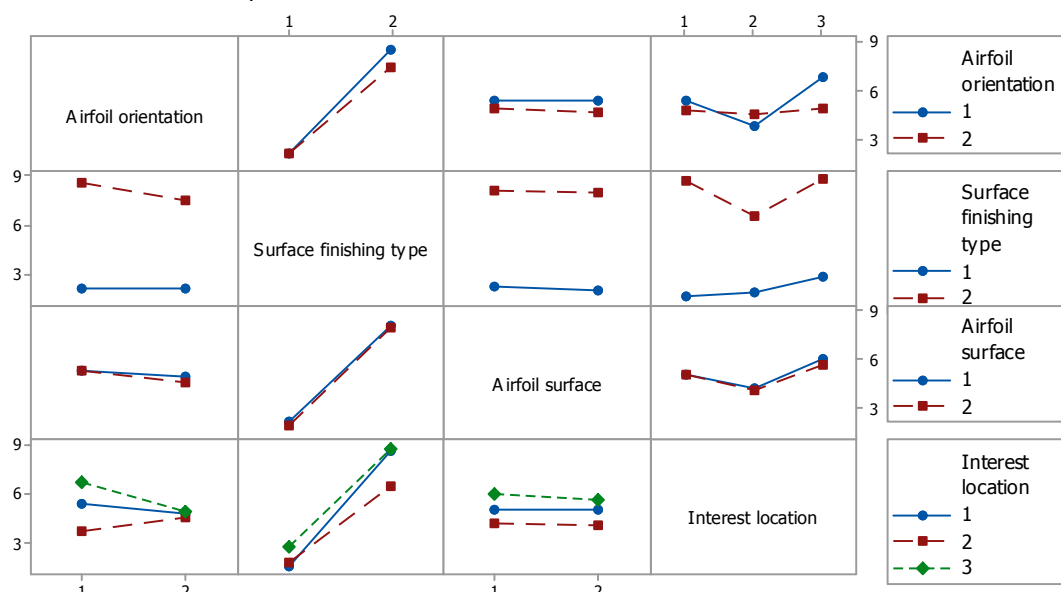
Din tabelul ANOVA (Tabelul 4.4), se observă că tipul finisării suprafeței și locația de interes sunt factorii care au o influență semnificativă asupra rugozității Ra a profilurilor aerodinamice, ținând cont de valorile p ale acestora. În plus, doar factorul tipul de finisare a suprafeței a avut valori F_{exp} mai mari decât valoarea F critică de 0,1% la $\alpha = 0,001$. Astfel, rezultatele au fost semnificative la nivelul de semnificație de 0,1%. Contribuții procentuale a

factorilor sunt prezentate în Tabelul 4.4. Cel mai semnificativ factor asupra parametrului de rugozitate (R_a) a fost tipul de finisare a suprafeței, care a explicat valoarea contribuției de 82,86% din variația totală. Următoarea contribuție pentru R_a a fost data de locația de interes, cu o contribuție de 4,46%. Orientarea profilului aerodinamic și suprafața profilului nu au un efect important asupra parametrului de rugozitate (R_a), deoarece au valori p mai mari și o contribuție procentuală scăzută (PC%).

Tab.4.4 Rezultate analiza ANOVA [25]

| Sursa | DF | Seq SS | Seq MS | F_{exp} | $F_{0.1\%}$ | p | PC (%) |
|----------------------|----|---------|---------|-----------|-------------|--------|--------|
| Orientare artefact | 1 | 1.955 | 1.955 | 1.15 | 15.37 | 0.299 | 0.07% |
| Tipul finisării | 1 | 214.503 | 214.503 | 125.66 | 15.37 | <0.001 | 82.86% |
| Suprafața profilului | 1 | 0.137 | 0.137 | 0.08 | 15.37 | 0.781 | 0.005% |
| Locație de interes | 2 | 11.548 | 5.774 | 3.38 | 10.38 | 0.057 | 4.46% |
| Erori | 18 | 30.726 | 1.707 | | | | 11.86% |
| Total | 23 | 258.869 | | | | | 100% |

Evaluarea influenței factorilor de control asupra rugozității suprafeței (R_a) s-a realizat prin analize grafică. Următoarele grafice au fost obținute pe baza rezultatelor statistice, diagrama efectelor principale, diagrama efectelor interacțiunii factorilor și diagramele intervalelor cu bare de eroare standard ale fiecărui factor. Principalele efecte ale factorilor asupra rugozității suprafeței au fost orientarea artefactului de tip profil aerodinamic la nivelul 1 (XY), tipul de finisare la nivelul 2 (lucioasă) și locația de interes la nivelul 3 (zona bordului de fugă), așa cum se arată în Figura 4.11. Este evident că factorii tipul de finisare a suprafeței, locația de interes și interacțiunea lor au avut o influență semnificativă asupra rugozității suprafeței, așa cum se arată în figurile 4.10 și 4.11.

Fig.4.10 Diagrama efectelor interacțiunii factorilor asupra rugozității R_a [25].

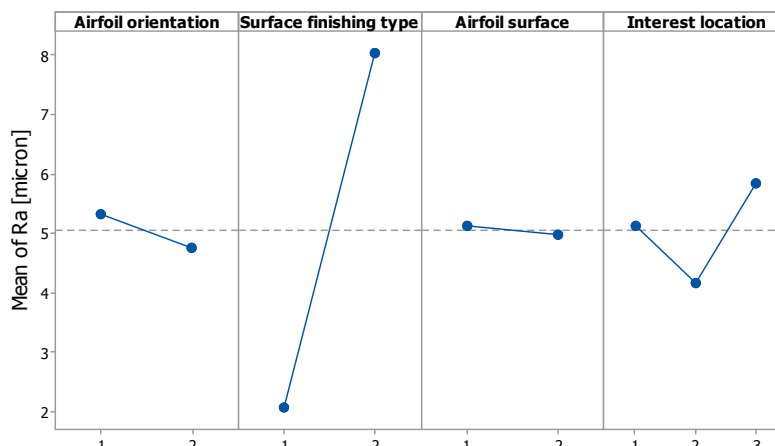
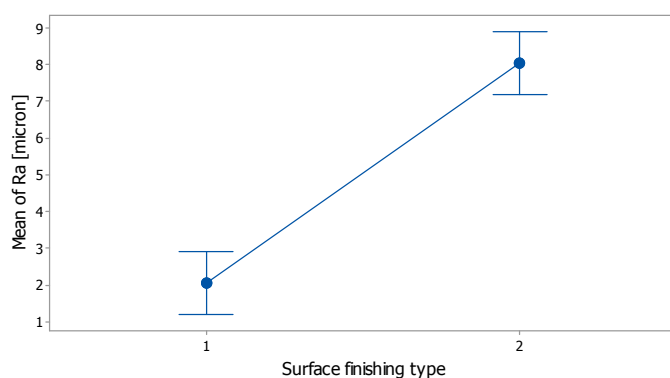
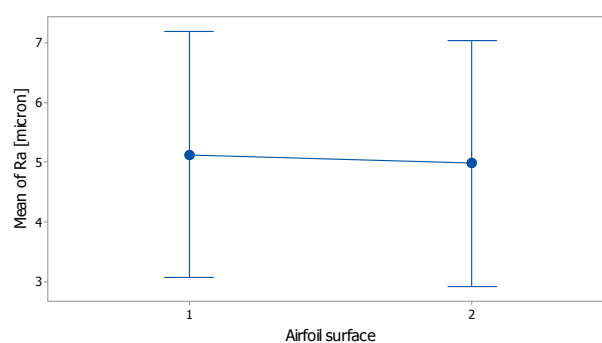


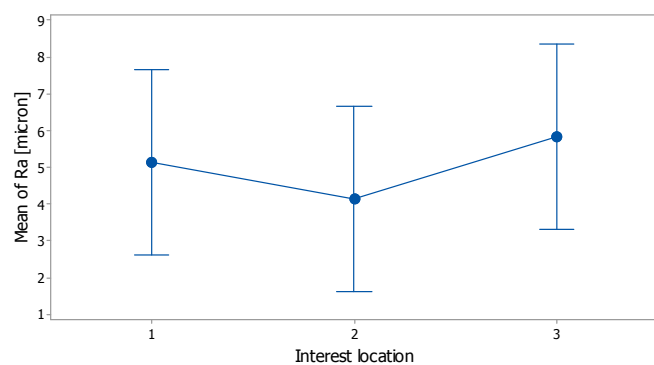
Fig.4.11 Diagrama efectelor principale asupra rugozității Ra [25].



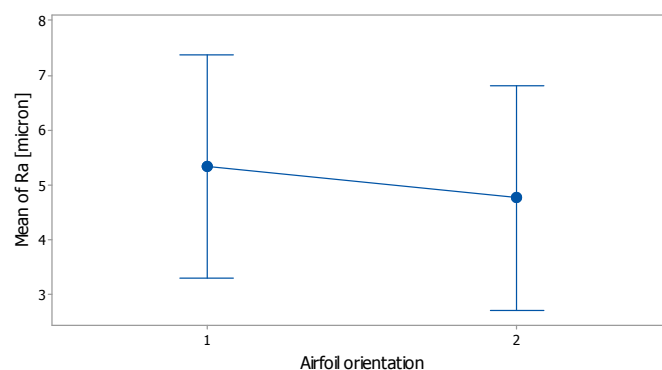
a)



b)



c)



d)

Fig.4.12 Diagrame de intervale cu bare de eroare standard ale fiecărui factor pentru rugozitate (a) tipul de finisare, (b) Suprafața profilului, (c) locație de interes, (d) orientare artefact; Barele reprezintă erori standard ale mediei [25].

Diagramele de interval cu bare de eroare standard ale fiecărui factor în funcție de rugozitate (Ra) sunt prezentate în graficele din Figura 4.12. Diferența dintre mediile pentru Ra pentru tipul de finisare a suprafeței a fost semnificativă deoarece barele de interval nu s-au suprapus, așa cum se arată în Figura 4.12a. În timp ce mediile par a fi diferite, diferențele pentru Ra în orientarea profilului aerodinamic și a suprafeței profilului aerodinamic nu au fost probabil semnificative, deoarece barele de interval s-au suprapus ușor (Figura 4.12b, d). Locația de interes (Figura 4.12c) are o influență asupra Ra și se pare că în zona centrală a

profilului aerodinamic, media lui Ra a fost mai mică, în timp ce pentru zonele de la bordul de atac și bordul de fugă, media a fost mai mare.

Rezultatele analizei statistice pentru artefactele de tip aripa arată că coeficienții de variație pentru toate regiunile aripii sunt mai mici de 10%, ceea ce asigură eterogenitatea datelor și exprimă repetabilitatea experimentelor, așa cum se arată în Tabelul 4.5. Coeficientul de variație (CV) este o măsură a împrăștierii care descrie variația datelor în raport cu media. Eroarea standard a mediei estimează variabilitatea dintre eșantioane, în timp ce abaterea standard măsoară variabilitatea într-un singur eșantion.

Tab.4.5 Rezultate statistice pentru rugozitatea Ra a artefactelor de tip aripa [25];
Notății: suprafața superioară (upper_surf), suprafața inferioară (lower_surf) .

| Regiune artefact | Media rugozității Ra [micron] | Deviația standard [micron] | Coeficient de variație [%] |
|------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| A_upper_surf | 2.47 | 0.225 | 9.08 |
| B_upper_surf | 1.86 | 0.089 | 4.82 |
| C_upper_surf | 2.22 | 0.131 | 5.9 |
| A_lower_surf | 2.43 | 0.221 | 9.09 |
| B_lower_surf | 1.80 | 0.090 | 5.02 |
| C_lower_surf | 2.22 | 0.094 | 4.25 |

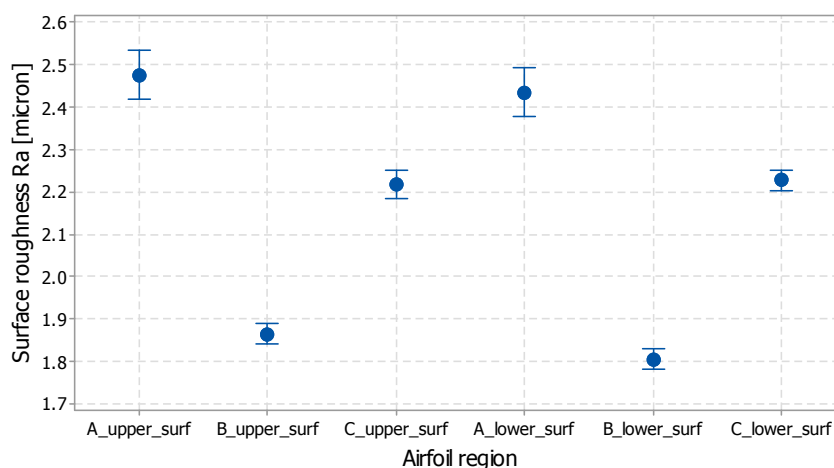


Fig.4.13 Diagrame de intervale cu bare de erori pentru regiunile artefactelor de tip aripa fabricate aditiv in orientarea XY mata. Barele reprezintă erori standard ale mediei [25]

Cele mai mari valori pentru rugozitatea suprafeței aripii au fost găsite pe marginea anterioară (bord de atac) a artefactului de tip aripa. Acest lucru poate fi explicat ținând cont de faptul că unghiul de inclinare dintre suprafața anterioară a aripii și planul orizontal este de aproximativ 25° , așa cum este confirmat de referința [6]. Cele mai mici valori Ra se găsesc pe zona centrală a artefactului de tip aripă.

Diagramele de interval ale rugozității suprafeței aripii sunt în intervalul $\pm 0,1$ micrometri pentru toate probele (Figura 4.13). Abaterile standard individuale au fost utilizate pentru a calcula diagramele de interval.

Etapa următoare privind investigarea suprafeței artefactelor a constat în **efectuarea de studii vizuală și microscopie**. Astfel prin aceste analize au fost caracterizate suprafețele artefactelor în diferitele lor zone.

Defecte de suprafață pe piesele printate cu PolyJet în modul lucios au fost determinate în unele studii [21,25]. Astfel, au fost observate zone cu suprafețe rugoase pe suprafața pieselor cilindrice imprimate pe Objet EDEN 350 perpendicular pe direcția de scanare [25]. În plus, striații orizontale au fost observate vizual pe fețe plane orientate la 75° și 85° față de planul XOY [6]. Dar nu au fost detectate defecte vizuale pe pereții plani verticali printați în modul lucios.

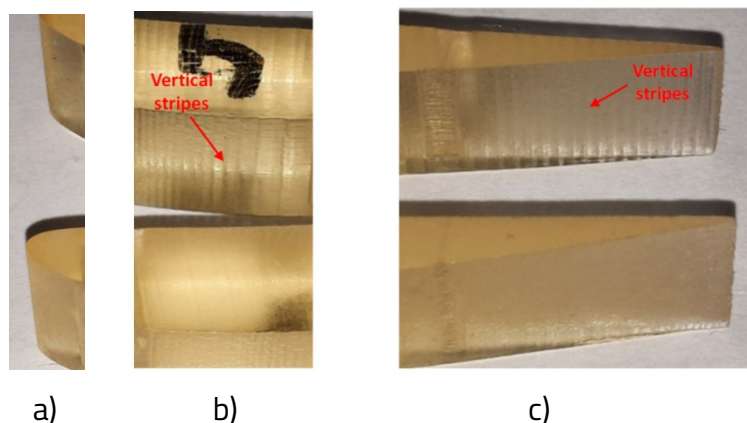


Fig.4.14 Inspecție vizuală a artefactelor de tip profil în diverse locații pentru variantele XY lucios și YX lucios: (a) bord de atac; (b) zona centrală; (c) bord de fuga [25].

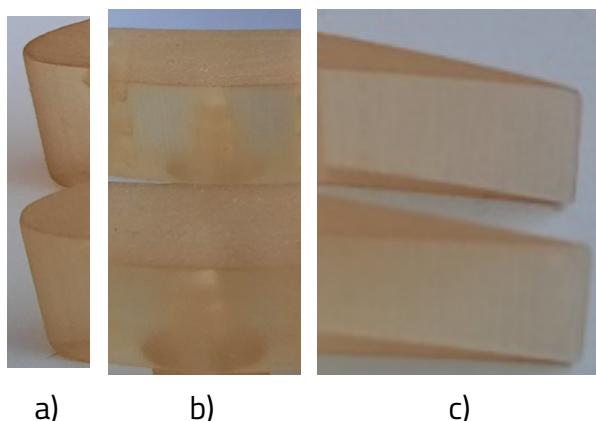


Fig.4.15 Inspecție vizuală a artefactelor de tip profil în diverse locații, XY mat și YX mat: (a) bord de atac; (b) zona centrală; (c) bord de fuga [25].

Pe baza inspecției vizuale, au fost determinate defecte pe pereții verticali ai artefactelor de tip profil aerodinamic (VS-SW) fabricate în modul lucios, așa cum se arată în Figura 4.14. Aceste defecte constând în striații verticale pe suprafața profilului aerodinamic au fost observate pe suprafața perpendiculară pe direcția de scanare (direcția axei X). Acestea sunt

cauzate de rezoluția mai scăzută de 0,042 mm în direcția X și Y în comparație cu 0,016 mm în direcția Z. Defecte de tip zone cu striaii verticale sunt predominante pe artefactul aerodinamic imprimat în orientarea XY. Proba lucioasa printata in direcția YX prezintă o suprafața cu o mare densitate de puncte, ceea ce are ca rezultat o textura omogena. Nu au fost detectate defecte pe suprafața artefactelor de tip profil aerodinamic imprimat în modul mat, așa cum se arată în Figura 4.15.

Au fost propuse o serie de **modele teoretice** privind artefactele de tip profil printate in mod lucios, pentru a înțelege și valida datele experimentale. În orientarea în direcția XY, sunt utilizate mai puține duze ale capului imprimantei în comparație cu orientarea YX, așa cum se arată în vederile parțiale din Figura 4.16. Fiecare duză depune o serie de picături de rășină grupate într-o formă de cilindru, cilindrii nivelului Z formând un strat. Cilindrii sunt similari cu fibrele lungi din materialele compozite. Se poate observa că în cadrul straturilor, speci­menele XY au fibre mai lungi, dar mai puține decât speci­menele YX.

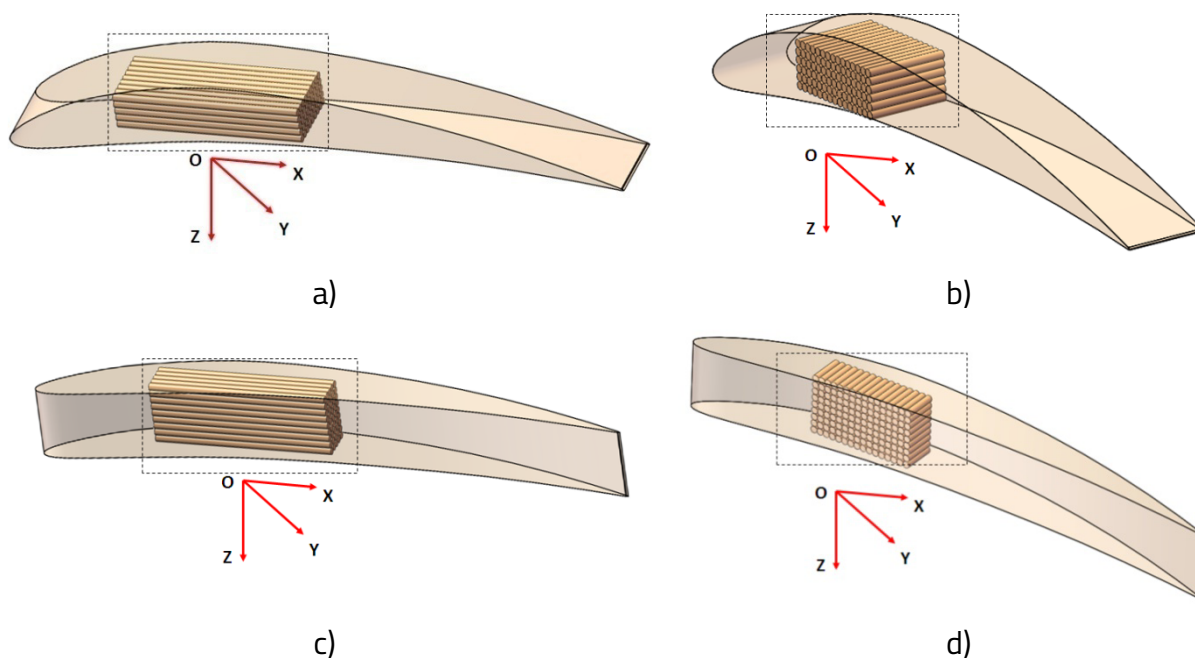


Fig.4.16 Modelle teoretice pentru artefactele de tip profil aerodinamic in diverse orientări, cu vederi parțiale indicând formarea straturilor depuse aditiv: (a) XY mat; (b) YX mat; (c) XY lucios; (d) YX lucios [25].

In orientarea YX există mai multe intersecții între cilindri din straturi și suprafața profilului aerodinamic. În plus, fiecare intersecție ar putea fi aproximată ca o formă circulară de dimensiuni foarte mici, care conferă o textură omogena, confirmând observațiile experimentale (Figura 4.17b). În cazul orientărilor XY, intersecțiile dintre straturile simulate (de exemplu, suprafața laterală a cilindrilor) și suprafața profilului aerodinamic duce la striaii verticale drepte (Figura 4.17a). Aceste striaii verticale sunt mai pronunțate în modul printat lucios bazat pe o expunere crescută la UV. În finisarea mată, un model 3D teoretic este dificil

de reprezentat grafic deoarece, pe suprafața profilului aerodinamic se depune un strat suplimentar de material suport, ceea ce permite obținerea unei texturi uniforme.

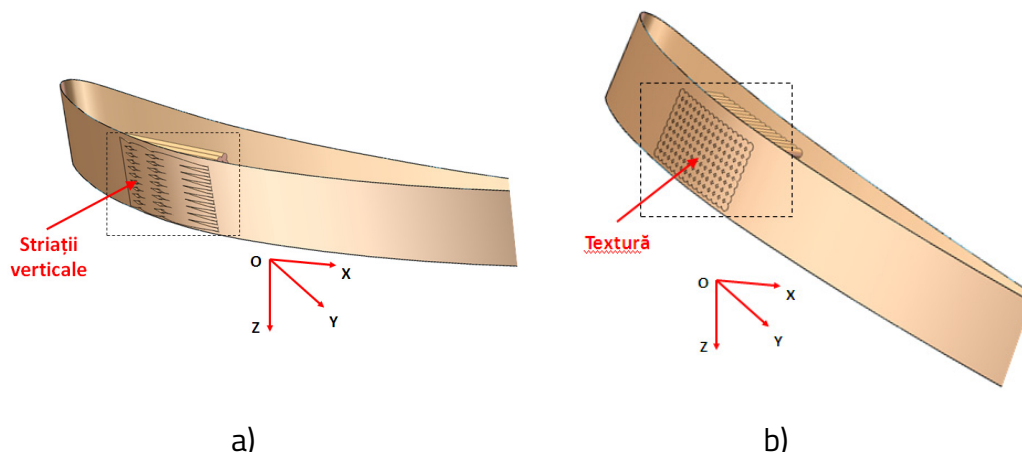


Fig.4.17 Model teoretic de textura pe suprafața artefactelor de tip profil aerodinamic: (a) XY lucios; (b) YX lucios [25].

O analiza microscopică a fost realizata in scopul investigării calității suprafețelor artefactelor de tip profil aerodinamic. Toate suprafețele specimenelor mate sunt afectate de materialul suport. Pe suprafața acestor specimene au fost detectate incluziuni foarte mici ale materialului suport chiar și după post-procesare prin curățare cu jet de apă sub presiune.

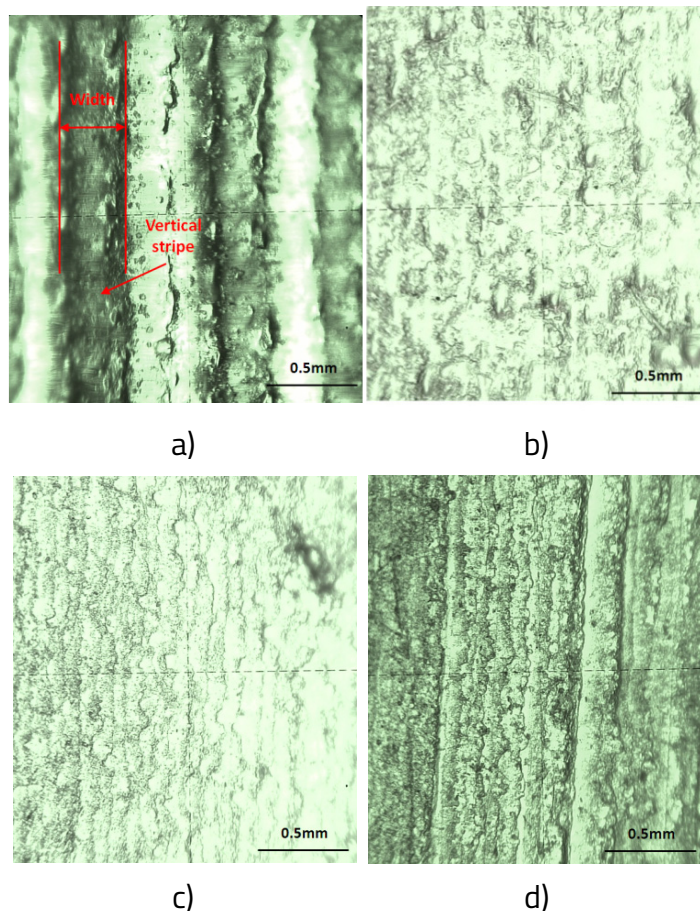


Fig.4.18 Textura suprafeței artefactelor: (a) XY lucios; (b) YX lucios; (c) XY mat; (d) YX mat [25].

Textura specimenelor mate este prezentată în Figura 4.18c, d. Probele printate în modul lucios prezintă diferite tipuri de texturi în funcție de orientarea lor. Se poate observa o suprafață omogenă a profilului aerodinamic pentru specimenul lucios YX (Figura 4.18). Valorile lățimii striatiilor verticale (Figura 4.18a) măsurate în cadrul analizei microscopice pe specimenul lucios XY au fost în intervalul 0,213 - 0,386 mm.

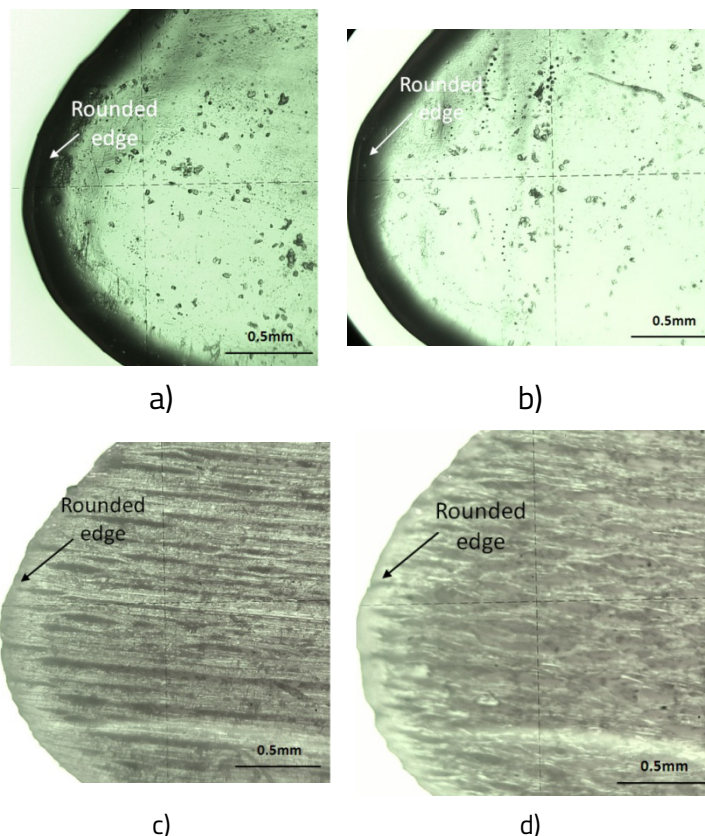


Fig.4.19 Detalii privind zona bordului de atac al artefactelor tip profil aerodinamic: (a) XY lucios; (b) YX lucios; (c) XY mat; (d) YX mat [25].

Au fost detectate suprafețe semi-transparente pentru speciemele printate în modul lucios. A fost analizată forma laterală a profilului aerodinamic, în special pe marginea anterioară (bord de atac) și marginea bordului de fugă a artefactului tip profil aerodinamic (Figurile 4.19 și 4.20). O muchie rotunjită a fost detectată în lungul curbei profilului aerodinamic. Aceasta este reprezentată printr-o graniță neagră (Figurile 4.19 a,b și 4.20 a,b) în cazul tipului lucios. În plus, marginile profilelor aerodinamice printate în modul mat sunt rotunjite, așa cum se arată în figurile 4.19 c,d și 4.20 c,d. Curba profilului aerodinamic pentru speciemenelor printate în mod lucios prezintă unele abateri de la profilul teoretic în partea inferioară a muchiei bordului de fugă, așa cum se arată în Figura 4.20a.

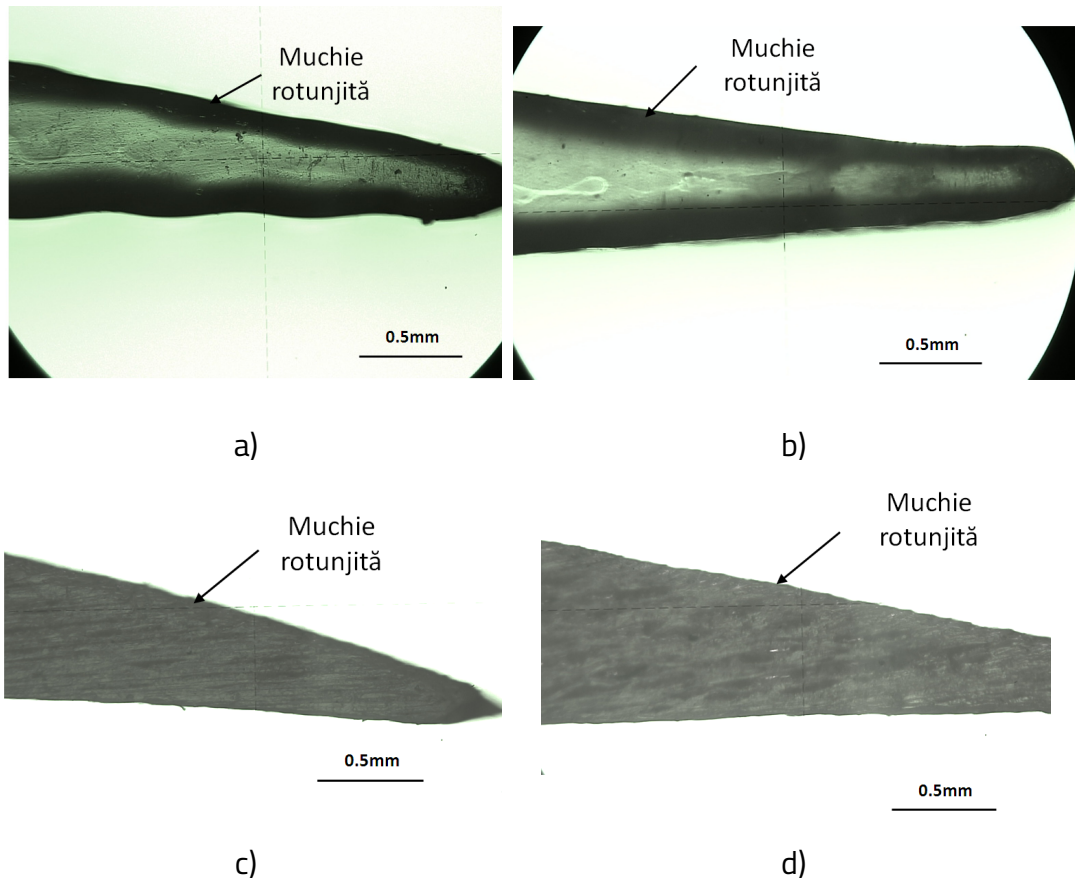


Fig.4.20 Detalii privind zona bordului de fugă al artefactelor de tip profil aerodinamic: (a) XY lucios; (b) YX lucios; (c) XY mat; (d) YX mat [25].

O scară universală de rugozitate, care să poată descrie fiecare tip de rugozitate pentru diferite tipuri de materiale utilizate în studiile aerodinamice, este necesar să fie definită. Acest capitol contribuie la caracterizarea calității suprafeței (rugozității) artefactelor aerodinamice realizate prin procesul de fabricare aditivă, pulverizare cu jet de material. Noua metodologie bazată pe locații de interes aerodinamic și DOE poate fi utilizată pentru a caracteriza componentele aerodinamice fabricate prin alte procedee AM.

Capitolul 5. METODOLOGIE ȘI CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND ANALIZA CAPABILITĂȚII SISTEMELOR ȘI PROCESELOR IN FABRICAȚIA ADITIVĂ

În cadrul acestui capitol este prezentată o metodologie de analiză a performanței unui sistem de fabricație aditivă și a capabilității proceselor de fabricație aditivă, folosind controlul statistic. Capitolul se bazează în principal pe rezultate din articolul publicat de autorul acestei teze de abilitare în calitate de prim autor și autor corespondent în [80].

5.1. Introducere: sinopsis și motivație

Performanța sistemelor AM trebuie analizată pentru a determina capacitatea acestora de a produce piese pentru industrie. Artefactele de test sau piesele de test sunt utilizate în primul rând pentru a evalua cantitativ performanța geometrică a sistemelor AM [79]. În plus, caracterizarea produselor obținute prin procedee aditive de fabricație necesită efectuarea unor teste, cum ar fi caracterizarea materialelor prime, teste privind proprietățile mecanice și caracterizarea texturii suprafeței [80]. Artefactele de test sunt menite să identifice punctele forte și punctele slabe ale diferitelor procedee de fabricație aditivă. Mai mult, ele permit compararea performanțelor diferitelor sisteme AM și ale aceluiași sistem AM în timp [17]. Conform [79], trei caracteristici principale și anume, acuratețea, rezoluția și textura suprafeței sistemelor AM pot fi estimate pe baza unor artefacte standardizate.

Standardele actuale privind toleranțele și controlul dimensional au fost dezvoltate pentru proceselor tradiționale de fabricație, precum metodologiile de fabricație substractivă și de fabricație privind repartizarea materialului [80]. Este necesar ca noi standarde privind toleranțele și controlul dimensional să fie implementate pentru diferitele procese AM care utilizează o mare varietate de materiale (plastice, metale, compozite, ceramică etc.). Puține cercetări experimentale au fost realizate în această direcție. Proprietățile fizice și chimice ale polimerilor sunt relevante pentru precizia dimensională, necesitând o evaluare și cuantificare diferită a toleranțelor geometrice în comparație cu materialele metalice. Prin urmare, standardele de toleranță și control dimensional aplicabile pieselor metalice nu pot fi adoptate pentru structurile din plastic sau pot fi aplicate doar într-o măsură foarte limitată.

În procesul de producție, variațiile și fluctuațiile preciziei de fabricație sunt influențate de mulți factori cum ar fi mașina unealta, piesa de prelucrat, metode, operatori și mediu etc. Fluctuațiile inerente au un impact mai mic asupra calității produsului [81]. Variațiile anormale au un impact mare asupra calității produsului [82]. Cele mai cunoscute metode utilizate pentru controlul și reducerea variației procesului de fabricație sunt controlul statistic al procesului, analiza sistemului de măsurare, metoda six sigma și proiectarea experimentelor [83].

Controlul statistic al proceselor (SPC) folosește metode statistice în controlul calității pentru a monitoriza, menține și îmbunătăți capacitatea proceselor de fabricație și de a asigura conformitatea produsului [84]. Akande și colab. [85] au analizat caracteristicile de calitate ale rezistenței, rigidității la încovoiere, densității și preciziei dimensionale ale pieselor construite prin procesul SLS folosind diagrame de control SPC. Ei au ajuns la concluzia că SPC asigură consecvența calității produsului pentru producția pe termen lung.

Orice proces de control al calității trebuie să cuantifice, în primul rând, **capabilitatea mașinii** (studiu pe termen scurt sau performanța mașinii) într-o serie de producție continuă și **capabilitatea procesului de fabricație** (studiu pe termen lung) în producția de serie [84, 86]. Capabilitatea tehnologică definește potențialul pe care îl are un procedeu de fabricație sau o mașină unealtă pentru a asigura un anumit nivel de precizie pentru o piesă fabricată. **Capabilitatea procesului de măsurare** oferă dovada pentru conformitatea sau neconformitatea procesului de măsurare cu specificațiile standardului ISO 14253:2017 [87].

Studii experimentale și teoretice au fost efectuate pentru a caracteriza performanța proceselor AM și s-au concentrat în special pe controlul calității în fabricarea aditivă. În plus, standardele axate pe sistemele AM sunt în curs de dezvoltare. Utilizarea procedeelelor AM în producția de masă depinde de calitatea pieselor obținute. O serie de probleme privind inconsecvența repetabilității și reproductibilității sistemelor AM au fost identificate în literatura de specialitate.

Singh și colab. [83] au analizat repetabilitatea unor piese fabricate prin procesul FDM din acrilonitril butadien stiren (ABS) urmate de postprocesare chimică, dar repetabilitatea și reproductibilitatea nu au fost determinate. Baturynska [88], folosind analiza statistică, a încercat să îmbunătățească acuratețea dimensională a pieselor polimerice realizate prin sinterizare selectivă cu laser. Acesta a determinat modele de regresie liniară pentru a prezice valoarea grosimii, lățimii și lungimii specimenelor dreptunghiulare și pentru a compensa efectul de contracție. George și colab. [89] a revizuit acuratețea și reproductibilitatea modelelor medicale printate 3D din polimeri, folosind extrudarea materialului (FDM), sinterizarea selectivă cu laser (SLS), pulverizare cu jet de liant și pulverizare cu jet de material. Ei au ajuns la concluzia că testarea regulată a acurateții sistemelor AM și întreținerea preventivă sunt pași necesari pentru asigurarea calității. Preissler și colab. [90] a investigat capacitatea procesului pentru procedeul de fabricare cu filament topit (FFF) folosind material PLA, bazat pe un obiect piramidal personalizat fabricat în 25 de mostre. Rezultatele pentru o dimensiune de 30 mm și toleranță de $\pm 0,2$ mm prin diagrama de control al calității arată că procesul nu a fost în controlul statistic.

Singh [91] a investigat capabilitatea de proces a dimensiunilor liniare ale unei componente prismatice construite prin tehnologia PolyJet pe o mașină EDEN 260. Rezultatele acestui studiu au sugerat că procesul se află în limita de $\pm 4,5$ sigma în ceea ce privește acuratețea dimensională a specimenului ales. Totuși, variabilitatea sistemului de

măsurare nu a fost realizată. De asemenea numărul de 16 replici folosite pentru determinarea capabilității procesului a fost prea mic, conform standardelor ISO [92].

Kitsakis și colab. [93] au investigat clasele IT (Toleranță internațională) pentru dimensiunile a opt mostre printate cu straturi de 30 de microni pe imprimanta 3D Objet Eden 250 și i-au atribuit treapta de toleranță IT11. Variabilitatea sistemului de măsurare utilizat în acest studiu nu a fost realizată. Yap și colab. [94] a investigat capabilitatea de proiectare și acuratețea de fabricare a procesului de imprimare 3D PolyJet pe o imprimantă Objet500 Connex3 utilizând artefacte cu caracteristici personalizate și a concluzionat că acuratețea pieselor printate în modul lucios a fost mai bună decât cea pentru finisarea mată. Minetola și colab. [95] a evaluat acuratețea dimensională a trei sisteme AM pentru materiale polimerice folosind clasele ISO IT ale unui artefact din biblioteca GrabCAD, fabricând două replici. Ei au ajuns la concluzia că o grosime mai mică a stratului depus oferă o precizie dimensională mai mare a piesei.

Din literatura de specialitate rezulta următoarele concluzii:

- ✓ Artefactele de test au scopul de a investiga punctele forte și punctele slabe ale procedurilor de fabricație aditivă și permit compararea performanțelor diferitelor sisteme AM.
- ✓ Controlul procesului AM are un rol important asupra calității pieselor, dar există o lipsă de metode și standarde adecvate de control pentru AM. Încă nu există un standard AM pentru caracterizarea performanței imprimantelor 3D și a sistemelor de fabricație aditivă și determinarea capabilității de proces în producția de masă.
- ✓ Foarte puține studii s-au concentrat pe repetabilitatea proceselor AM, clasele ISO IT și capabilitatea procesului AM pe bază de polimeri.
- ✓ Având beneficii în ceea ce privește reducerea costurilor și scurtarea timpului de comercializare a produselor, implementarea tehnologiilor AM pe bază de polimeri în cadrul producției depinde de capabilitatea și controlul procesului.
- ✓ Scopul principal al acestui capitol este definirea unei noi metodologii pentru analiza statistică a performanțelor sistemului AM și controlul procesului AM. Un studiu de caz privind sistemul de fabricație aditivă EDEN 350 și procesul de fabricație cu pulverizare cu jet de polimeri a validat metodologia propusă.

5.2. Metodologie privind analiza capabilității sistemelor și proceselor în fabricația aditivă

Principalele obiective ale noii metodologii în AM sunt definirea instrumentelor de control statistic bazate pe standarde și pe artefacte de test pentru evaluarea variabilității sistemului de măsurare, a repetabilității fabricației aditive, a capabilității sistemului AM și a capabilității procesului AM. Această metodologie include experimente, analiză statistică și interpretarea rezultatelor. Instrumentele SPC sunt folosite pentru a oferi mijloacele de identificare a

posibilelor schimbări în proces [81]. Noua metodologie de control statistic al fabricației aditive constă dintr-o etapă preliminară, urmată de șase etape, așa cum se arată în Figura 5.1.

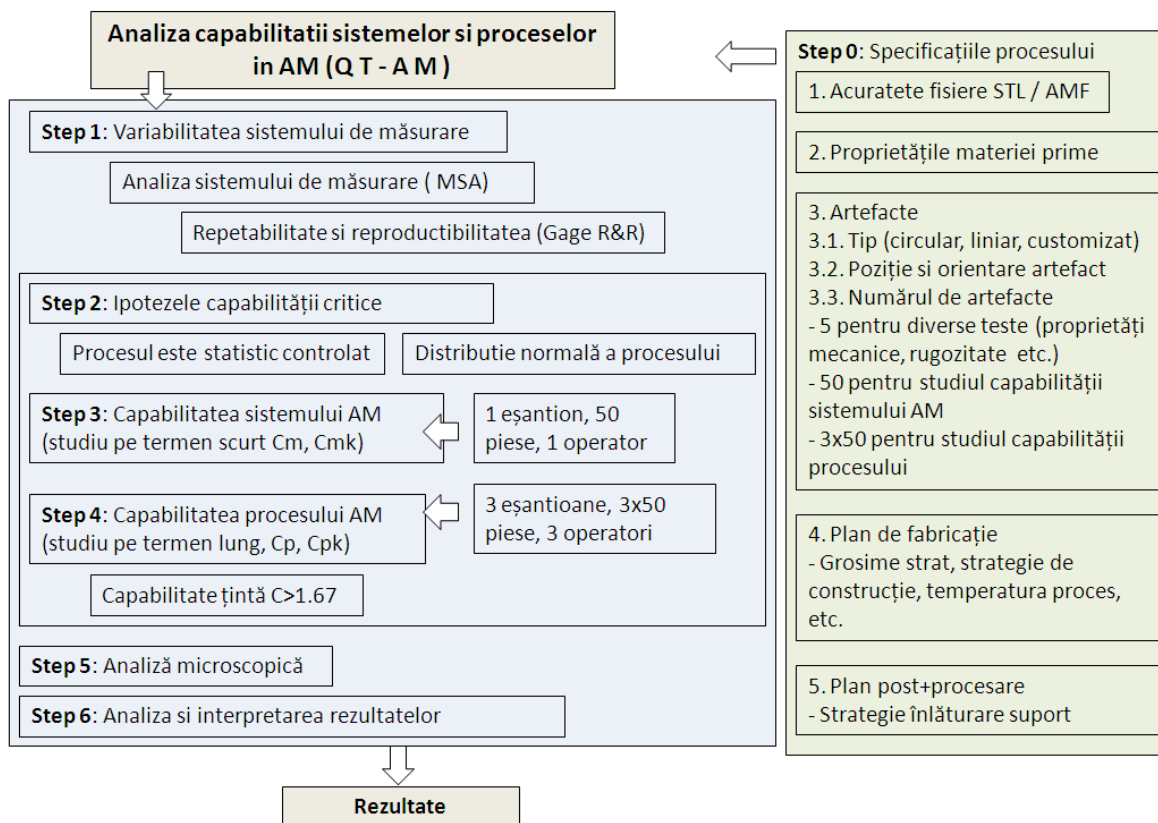


Fig.5.1 Schema metodologiei de control statistic în fabricația aditivă [80].

Etapa pregătitoare definește specificațiile procesului AM după cum urmează: conversia fișierelor STL (Standard Triangulation Language) sau AMF (Fișier de fabricație aditivă) și acuratețea acestora, proprietățile materiei prime, tipul artefactului, orientarea și poziția piesei pe platforma de construcție, dimensiunea eșantioanelor, planul de fabricare aditivă și cel de post-procesare. Conform standardului ISO/ASTM 52901:2017 [96], definiția unei piese realizată prin AM, în scopul comercializării, ar trebui să includă următoarele caracteristici: geometria piesei, toleranțe, textura suprafeței, materia primă, orientarea piesei, imperfecțiuni sau abateri acceptabile. și informații despre controlul procesului (de exemplu, repetabilitate).

În fabricația tradițională, cerințele specifice (dimensiuni, toleranțe, gradul de finisare a suprafeței etc.) ale modelului specificate pe desenele de execuție sunt stabilite pe baza standardelor în funcție de materialul produsului. Astfel, standardul ISO 286 este folosit de obicei pentru piesele metalice [97] și DIN 16742 pentru piesele din mase plastice [98]. În AM, toleranțele generale pentru dimensiunile liniare sunt specificate conform standardului general ISO 2768-1 [99], pe baza recomandării ISO/ASTM 52901:2017.

Proprietățile materialelor folosite ca materii prime trebuie să fie conforme cu specificațiile furnizorilor. Fabricarea artefactelor de test trebuie efectuată conform unui plan de fabricație care să includă alegerea și definirea unor parametri de proces cum ar fi

grosimea stratului depus, strategia de construcție, temperatura procesului etc. Modelul CAD al artefactului este convertit într-un format de fișier STL. Parametrii de conversie utilizați în cadrul diverselor software CAD, precum și abaterile maxime (înălțimea corzii și toleranța unghiulară) trebuie corelate cu grosimea stratului depus. În zonele unde suportul pentru susținerea piesei nu poate fi evitat, trebuie stabilită o strategie de realizare a acestuia. Aceasta include geometria suportului, materialul suport, tehnica de îndepărtare și tratamentele specifice post-procesării. Materialul suport poate fi realizat din același material ca și materialul artefactului sau poate fi diferit. Aplicarea structurilor de susținere trebuie redusă la minimum pe zonele critice ale piesei.

În **etapa 1** a metodologiei propuse se determină variabilitatea sistemului de măsurare. Variabilitate indusă în măsurători de către sistemul de măsurare în sine ar trebui determinată înainte de efectuarea oricărui studiu de capabilitate (Figura 5.1). Măsurătorile au fost efectuate folosind o metodă de măsurare de gradul „A” conform standardului ASTM 52902-19 [79]. Prin urmare, pentru aceste măsurători care sunt ușor de efectuat și implică costuri minime, se recomandă utilizarea unui șubler digital.

În **etapa 2** a metodologiei, sunt analizate ipotezele capabilității critice, așa cum se arată în Figura 5.1. Capabilitatea mașinii AM sau performanța sistemului AM are ca scop principal verificarea imprimantelor 3D existente, argumente obiective în cazul defectelor imprimantei 3D și specificații țintă la achiziționarea unei noi imprimante 3D. Capabilitatea reprezintă capacitatea unui sistem sau proces de a realiza un produs care va îndeplini anumite cerințe. Condițiile de capabilitate a procesului includ următoarele, conform standardului ISO 22514-1:2014 [100]:

- ✓ Metode aplicate pentru a demonstra că procesul este sub control;
- ✓ Condiții tehnice (loturi de intrare, operatori, scule etc.);
- ✓ Procesul de măsurare (acuratețe, repetabilitate, reproductibilitate etc.);
- ✓ Aspecte privind colectarea datelor (durata, frecvența).

Analiza capabilității trebuie efectuată pentru un proces de producție nou sau pentru unul modificat precum și în cazul controlului periodic al procesului conform standardului ISO/TS 16949 [101]. Analiza capabilității este rezumată în indici care arată capacitatea sistemului de a-și îndeplini cerințele. Capabilitatea mașinii și cea a procesului oferă rezultate cu privire la cât de bine funcționează o mașină și un proces în raport cu limitele de toleranță definite. Acestea diferă deoarece sunt determinate în condiții diferite, dar se calculează în principal indici similari. Indicii de capabilitate țintă utilizați în mod obișnuit în industria auto sunt mai mari de 1,67, ceea ce corespunde unui parametru de siguranță pentru un nou proces [81]. Condiția pentru a obține piese de calitate bună este ca indicii de capabilitate să fie cuprinși între 1,67 și 2 [81, 102].

În a cincea etapă a metodologiei se realizează o inspecție a suprafețelor printr-un studiu de microscopie. Microscopia optică a fost efectuată folosind o mașină de măsurat Zeiss O-Inspect (Carl Zeiss Industrielle Messtechnik, Oberkochen, Germania).

5.3. Investigații experimentale

5.3.1. Artefact de test, materiale și proces de fabricație

În acest studiu de caz, a fost luată în considerare o piesă utilizată în pre-producția pieselor din mase plastice. Piesa prezintă caracteristici geometrice de bază similare cu **artefactul de test de formă circulară** prezentat în Figura 5.2a. Artefactul circular proiectat de către autor constă dintr-o suprafață superioară circulară și o suprafață inferioară care se termină cu o muchie (Figura 5.2). Două dimensiuni critice în ceea ce privește asamblarea și funcționalitatea artefactului, înălțimea $H = 12$ mm și diametrul $D = 14,5$ mm, au fost selectate pentru studiul capabilității mașinii și a procesului. A fost selectată o clasă de toleranță fină de $\pm 0,1$ mm, ținând cont de intervalele de lungimi nominale între 6–30 mm conform standardului ISO 2768-1.

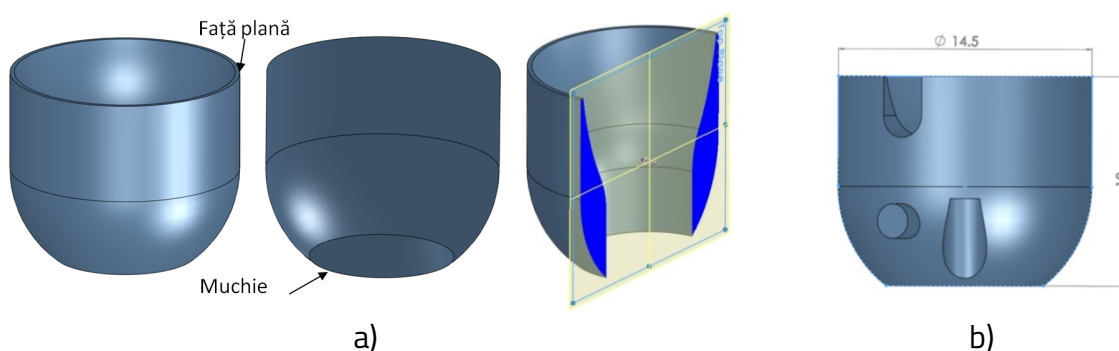


Fig.5.2 a) Artefact cilindric propus in acest studiu; b) Piesa din preproductie [80].

Modelul 3D al piesei test a fost realizat în software-ul SolidWorks versiunea 2013 (Dassault Systèmes, Massachusetts, MA, SUA). Modelul 3D al piesei a fost convertit într-un fișier STL, care este formatul de fișier folosit ca data de intrare pentru mașina Objet EDEN 350 PolyJet (Stratasys, Rehovot, Israel) [65].

Materialele utilizate în acest studiu au fost rășina Objet VeroBlue RGD840 folosită ca material model și FullCure 705 ca material suport. Compoziția rășinii Objet VeroBlue RGD840 constă dintr-un monomer acrilic, oligomer acrilat de uretan, acrilat epoxidic și fotoinițiator. Rășina FullCure 705 este realizată dintr-un monomer acrilic, polietilen glicol 400, propan-1, 2-diol, glicerol și fotoinițiator. Principalele proprietăți ale materialului Objet VeroBlue RGD840 sunt prezentate în Tabelul 5.1 [45]. Caracteristicile mecanice pot varia în funcție de orientarea probelor și condițiile de testare.

Tab.5.1 Proprietățile materialului Objet VeroBlue RGD840 [45].

| Proprietate | Standard ASTM | Standard ISO Metric |
|--------------------------|---------------|---------------------|
| Rezistența la tracțiune | D-638-03 | 50–60 MPa |
| Alungire la rupere | D-638-05 | 15%–25% |
| Rezistența la încovoiere | D-790-03 | 60–70 MPa |
| Duritate Rockwell | Scale M | 73–76 Scale M |
| Absorbție apă | D-570-98 24hr | 1.5%–2.2% |

Orientarea speci­menelor pe tava de construcție influențează timpul de fabricație și calitatea pieselor [21]. Artefactele circulare au fost printate în poziție verticală pe platforma de construcție, așa cum se arată în Figura 5.3. Este avantajoasă printarea unui model circular care are găuri în poziție verticală pe platforma de construcție, astfel încât materialul de sprijin să nu umple găurile [65]. Valorile experimentale ale rugozității (R_a) pentru procesul cu jeturi de material PolyJet sunt specificate în funcție de tipul de finisare, după cum urmează: pentru finisaj mat în intervalul 0,5-15 μm și pentru finisajul lucios în intervalul 0,5-4 μm [6]. Precizia dimensională și calitatea suprafeței unui artefact circular construit în poziție verticală nu sunt influențate semnificativ de orientarea și poziționarea pe platforma de construcție.

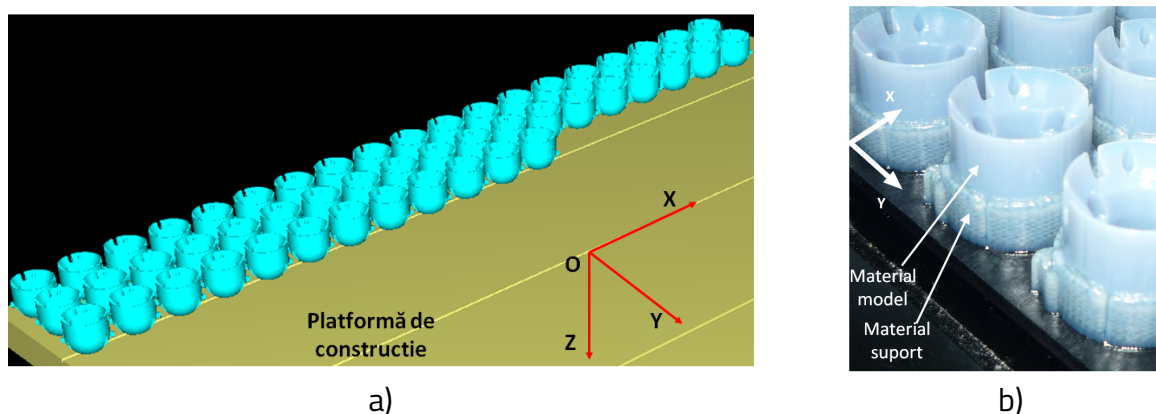


Fig.5.3 a) Platforma de construcție a sistemului de fabricație aditivă EDEN 350 conținând 50 de piese; b) Detaliu privind piesele fabricate aditiv [80].

Pregătirea platformei de construcție (Figura 5.3) și generarea codului G au fost efectuate folosind software-ul client/server Objet Studio (Objet Geometries, Rehovot, Israel). Piese­le au fost printate 3D într-un stil de finisaj lucios. Doar suprafețele inferioare ale speci­menului au fost afectate de materialul suport. Materialul suport a fost îndepărtat cu un jet de apă sub presiune de pe suprafața inferioară a speci­menelor.

Densitatea materialului printat 3D a fost determinată folosind metoda densității lui Arhimede [103, 104] prin calculul volumului a cinci speci­mene, pe lângă determinarea masei pieselor folosind un cantar electronic de precizie. Rezultatele au arătat o densitate medie măsurată a materialului printat 3D de 1,15 g/cm³.

Un lot de 50 de piese a fost printat 3D pentru studiul capabilității sistemului AM și trei loturi conținând fiecare 50 de piese pentru studiul capabilității procesului AM [80]. Timpul de fabricație al unui lot de 50 de artefacte a fost de 1 oră și 40 min, folosind 78 g de material model și 54 g de material suport.

5.3.2. Variabilitatea sistemului de măsurare

Atât în cadrul proceselor de producție, cât și în cadrul sistemelor de calitate, există variații. Un proces robust de control statistic (SPC) necesită date precise pentru a avea un impact benefic asupra calității produsului. Astfel, trebuie determinat procentul de

variabilitate datorat sistemului de măsurare. Sistemul de măsurare poate fi afectat de diverse surse de variație, denumite factori [40]: instrumentul de măsurare, operatori, metodă de măsurare, specificații (toleranța inginerescă) și tipul piesei.

Variabilitatea sistemului de măsurare a fost determinată prin metoda de repetabilitate și reproductibilitate Gage R&R. Repetabilitate se datorează variațiilor instrumentului de măsurare, iar reproductibilitatea se datorează variațiilor în măsurare ale operatorului. Studiul Gage R&R a fost realizat folosind metoda de analiză a varianței (ANOVA) [105]. Metoda ANOVA Gage R&R estimează:

- ✓ Cantitatea variației sistemului de măsurare în comparație cu variația procesului;
- ✓ Cantitatea variației sistemului de măsurare care se datorează influenței operatorului;
- ✓ Capacitatea sistemului de măsurare de a face distincție între piese diferite.

Sistemul de măsurare utilizat în analiză a inclus un șubler digital Mitutoyo 500-196-30 cu senzor AOS, având un domeniu de măsurare de la 0 la 150 mm și precizie de 0,001 mm, precum și metoda care descrie modul de ținere în mână a piesei și zona de măsurat pentru înălțime și pentru diametru. Un eșantion de 10 piese a fost măsurat de către trei operatori, de două ori, pentru fiecare caracteristică, înălțime și diametrul. Piesele au fost măsurate aleatoriu. În laborator a fost păstrată o temperatură de 20° C și umiditate relativă de 30%.

Analiza Gage R&R a fost efectuată în software-ul Minitab 19 (Minitab, Ltd., Coventry, Regatul Unit), pe baza celor 60 de măsurători.

5.3.3. Capabilitatea sistemului și procesului de fabricație aditivă PolyJet

Două ipoteze critice trebuie luate în considerare atunci când se efectuează analiza capabilității mașinii și procesului cu date continue, și anume, procesul este în control statistic și are o distribuție normală. Procesul este considerat stabil dacă valorile măsurătorilor se află între limitele stabilite. Graficele de control sunt utilizate pentru controlul statistic al proceselor [81].

Studiile de performanță pe termen scurt sunt de obicei efectuate pe mașini în care piesele sunt produse consecutiv în condiții de repetabilitate, iar dimensiunea eșantionului produsă este de cel puțin 50 de piese de lucru care trebuie fabricate într-un singur schimb [92]. Capabilitatea sistemului AM a fost evaluată în următoarele condiții [80]:

- ✓ 50 de piese sunt fabricate aditiv în mod simultan;
- ✓ Un singur operator gestionează procesul de fabricație aditivă;
- ✓ Variația lotului de material și variației operatorului nu este inclusă în variația totală a procesului;
- ✓ Piesele sunt măsurate iar datele analizate statistic.

Capabilitatea procesului de printare 3D este un studiu pe termen lung asupra unui proces stabil și a fost evaluată în următoarele condiții [80]:

- ✓ Piesele sunt fabricate aditiv în trei loturi, fiecare lot conținând câte 50 de bucăți;

- ✓ Operatori diferiți gestionează procesul de fabricație a celor trei loturi;
- ✓ Piesele sunt măsurate și datele transpuse în software-ul DESTRA (Q-DAS GmbH, Weinheim, Germania), ordinea măsurărilor nefiind importantă.

Dimensiunile D și H ale pieselor au fost măsurate folosind un șubler Mitutoyo 500-196-30 digital (Mitutoyo Corporation, Kawasaki, Japonia). Capabilitatea procesului este determinată prin calculul coeficienților de capabilitate descriși în ecuația (5.1), utilizând cuantilele corespunzătoare intervalului de încredere de 99,73%. Limita de specificație inferioară (LSL) și limita de specificație superioară (USL) sunt valorile țintă ale procesului. Indicii potențiali C_m , C_p reprezintă numărul de ori în care intervalul de împrăștiere a procesului se încadrează în intervalul de toleranță. Un indice mare de capabilitate nu garantează că procesul este aproape de valoarea țintă. Indicii de capabilitate critica C_{mk} și C_{pk} arată dacă intervalul de împrăștiere este în intervalul de toleranță specificat.

$$\left\{ \begin{array}{l} C_i = \frac{USL - LSL}{x_{i_{99,865\%}} - x_{i_{0,135\%}}} \\ C_{ik} = \min \left\{ \frac{USL - x_{i_{50\%}}}{x_{i_{99,865\%}} - x_{i_{50\%}}}, \frac{x_{i_{50\%}} - LSL}{x_{i_{50\%}} - x_{i_{0,135\%}}} \right\}, i = \{m - machine, p - process\} \\ C_{target} = 1.67 \text{ (1.33)} \end{array} \right. \quad (5.1) [80]$$

Locația (centrarea) și dispersia (împrăștierea) procesului au fost calculate folosind metoda $M_{1,6}$ conform standardului ISO 22514-2: 2017 [86]. Indicii 1 și 6 se referă la calculul estimatorului pentru locație și, respectiv, dispersie pentru un caz general. Aceasta înseamnă că media aritmetică a valorilor este setată pentru locația asumată iar distanța dintre cuantilele $X_{0,135\%}$ și $X_{99,865\%}$ pentru dispersie [100]. $X_{50\%}$ reprezintă locația cuantilei de distribuție 50%.

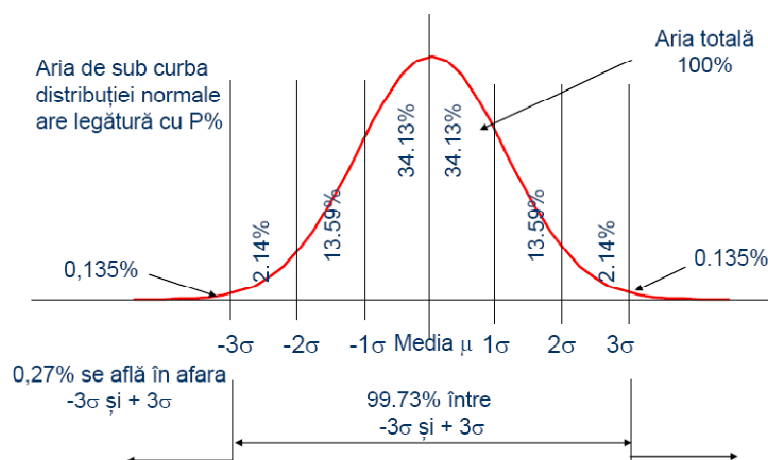


Fig.5.4. Densitatea repartiției teoretice a valorilor experimentale [106]

Aria cuprinsă sub curba lui Gauss-Laplace conține totalitatea populației [106], având o arie considerată prin convenție egală cu 1. Teoretic, o valoare egală cu 1 a indicelui potențial

Cp ar garanta prelucrarea caracteristicii cu precizia impusă, ținând cont ca 0,27% dintre valori se găsesc în afara intervalului $(-3\sigma, +3\sigma)$. Dar, nu poate fi garantată suprapunerea mediei procesului peste valoarea țintă T , preferându-se să se adopte valori de referință pentru indicele de capabilitate de 1,33, 1,66 sau chiar 2.

Rezultatele capabilităților pe termen scurt și pe termen lung au fost analizate pe baza cerințelor din Manualul de referință SPC, de la Grupul de acțiuni al industriei auto (AIAG) [84]. Software-ul Q-DAS Destra [107] a fost utilizat pentru a efectua studiul de capabilitate. Capabilitatea poate fi evaluată grafic prin histograme și grafice de capabilitate. Cerința pentru indicii C_m , C_{mk} , C_p și C_{pk} este obținerea unor valori minime de 1,67.

5.3.4. Calculul toleranței capabile pentru procedeul de fabricație aditivă PolyJet

Specificațiile privind intervalul de toleranță (limite inferioară și superioară) pentru dimensiunile piesei circulare printate 3D au fost alese pe baza standardelor de toleranță generale [99] și toleranțelor pieselor din mase plastice injectate [98]. Astfel, a fost selectată o toleranță de $\pm 0,1$ mm. Pe baza acestei specificații, au fost calculate capabilitățile sistemului de fabricație aditivă și a procesului PolyJet.

În loc să se estimeze capabilitatea procesului pentru o anumită toleranță, o toleranță capabilă și abaterea sa limită au fost calculate pe baza unui indice de capabilitate țintă. Indicele de capabilitate țintă a fost setat la 1,67. Indicele K al procesului a fost calculat folosind relația (5.2) și descrie nivelul la care procesul este în afara valorii țintă, reprezentând o măsură adecvată de centrare a procesului [102,108]. Limitele de specificație inferioară (LSL_T) și superioară (USL_T) ale toleranței capabile au fost calculate pe baza ecuației (5.3). Abaterea limită superioară (ULD) și abaterea limită inferioară (LLD) de la dimensiunea nominală au fost apoi determinate pe baza relației (5.3).

$$K = \frac{(USL + LSL) - 2x_{mean}}{USL - LSL} \quad (5.2) [80]$$

Media procesului este poziționată între punctul de mijloc al specificațiilor și una dintre limitele cerute dacă $0 < K < 1$. $K > 1$ indică faptul că media procesului este situată în afara limitelor cerute.

$$\begin{cases} \text{if } K > 0 \text{ then} \\ \left\{ \begin{array}{l} LSL_T = X_{50\%} - C_{Pk}(X_{50\%} - X_{0.135\%}) \\ LLD = T_m - LSL_T \\ USL_T = LSL + C_p(X_{99.865\%} - X_{0.135\%}) \\ ULD = USL_T - T_m \end{array} \right. \\ \\ \text{if } K < 0 \text{ then} \\ \left\{ \begin{array}{l} USL_T = X_{50\%} + C_{Pk}(X_{99.865\%} - X_{50\%}) \\ ULD = USL_T - T_m \\ LSL_T = USL - C_p(X_{99.865\%} - X_{0.135\%}) \\ LLD = T_m - LSL_T \end{array} \right. \end{cases} \quad (5.3) [80]$$

Abaterea limitei inferioare capabile și abaterea limitei superioare capabile au fost determinate pe baza relațiilor $LLD_c < LLD_T$ și $ULD_c > ULD_T$. Toleranța capabilă se calculează

după cum urmează: $T_c = ULD_c - LLD_c$. O analiză de confirmare a capabilității procesului AM a fost efectuată utilizând toleranța capabilă determinată.

5.4. Rezultate

5.4.1. Rezultate privind variabilitatea sistemului de măsurare

Componentele varianței (VarComp) compară variația de la fiecare sursă de eroare de măsurare cu variația totală. Coloana Contribuție din Tabelul 5.2 arată că variația de la o piesa la alta piesa (Part-To-Part) pentru dimensiunile H și D a fost de 99,46% / 99,12%, ceea ce este mult mai mare decât totalul R&R Gage, care a fost de 0,54% / 0,88. %. Astfel, cea mai mare parte a variației s-a datorat diferențelor dintre piese. Aceasta înseamnă că sistemul de măsurare poate face o distincție clară între piese.

Tab.5.2 Variația componentelor pentru dimensiunile D și H [80].

| Sursa | VarComp ¹ | Contribuție ¹ | VarComp ² | Contribuție ² |
|--------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|
| Total Gage R&R | 0.0000032 | 0.88% | 0.0000029 | 0.54% |
| Repetabilitate | 0.0000031 | 0.86% | 0.0000028 | 0.52% |
| Reproductibilitate | 0.0000001 | 0.02% | 0.0000001 | 0.01% |
| Operatori | 0.0000001 | 0.02% | 0.0000001 | 0.01% |
| Piesa-la-Piesa | 0.0003585 | 99.12% | 0.0005336 | 99.46% |
| Variație Totală | 0.0003617 | 100% | 0.0005365 | 100% |

Variația sistemului de măsurare în comparație cu variația totală este prezentată în Tabelele 5.3 și 5.4. Totalul R&R Gage a fost egal cu 7,33% / 9,37% din variația studiului pentru dimensiunile H și D. Pentru a evalua capabilitatea sistemului de măsurare de a evalua piesele versus specificație, se folosesc valorile %Toleranță, aceste valori fiind calculate pentru fiecare caracteristică ca raport între variația de studiu pentru fiecare sursă și toleranța procesului.

Repetabilitatea și reproductibilitatea, care arată variația echipamentului (EV) și respectiv variația evaluatorului (AV), au fost mai mici de 10%. Pe baza cerințelor specificate în MSA 4 [40], sistemul de măsurare poate fi acceptat. Numărul de categorii distincte a fost mai mare de cinci (Tabelul 3 și 4), rezultând un sistem de măsurare acceptabil [40].

Tab.5.3 Evaluarea sistemului de măsurare pentru caracteristica diametru (D) [80].

| Sursa | StdDev (SD) | Study Var (6 × SD) | %Study Var (SV) | %Tolerance (SV/Toler) |
|-----------------------------------|-------------|-----------------------|--------------------|--------------------------|
| Total Gage R&R | 0.0017829 | 0.010698 | 9.37% | 5.35 |
| Repetabilitate | 0.0017611 | 0.010566 | 9.26% | 5.28 |
| Reproductibilitate | 0.0002783 | 0.00167 | 1.46% | 0.83 |
| Operatori | 0.0002783 | 0.00167 | 1.46% | 0.83 |
| Piesa-la-Piesa | 0.0189344 | 0.113606 | 99.56% | 56.8 |
| Variație Totală | 0.0190181 | 0.114109 | 100% | 57.05 |
| Număr de categorii distincte = 14 | | | | |

Tab.5.4 Evaluarea sistemului de măsurare pentru caracteristica înălțime (H) [80].

| Sursa | StdDev (SD) | Study Var (6 × SD) | %Study Var (SV) | %Tolerance (SV/Toler) |
|--------------------|-------------|-----------------------|--------------------|--------------------------|
| Total Gage R&R | 0.0016968 | 0.010181 | 7.33% | 5.09 |
| Repetabilitate | 0.0016783 | 0.01007 | 7.25% | 5.03 |
| Reproductibilitate | 0.00025 | 0.0015 | 1.08% | 0.75 |
| Operatori | 0.00025 | 0.0015 | 1.08% | 0.75 |
| Piesa-la-Piesa | 0.0231008 | 0.138605 | 99.73% | 69.3 |
| Variație Totală | 0.0231631 | 0.138978 | 100% | 69.49 |

Număr de categorii distincte = 16

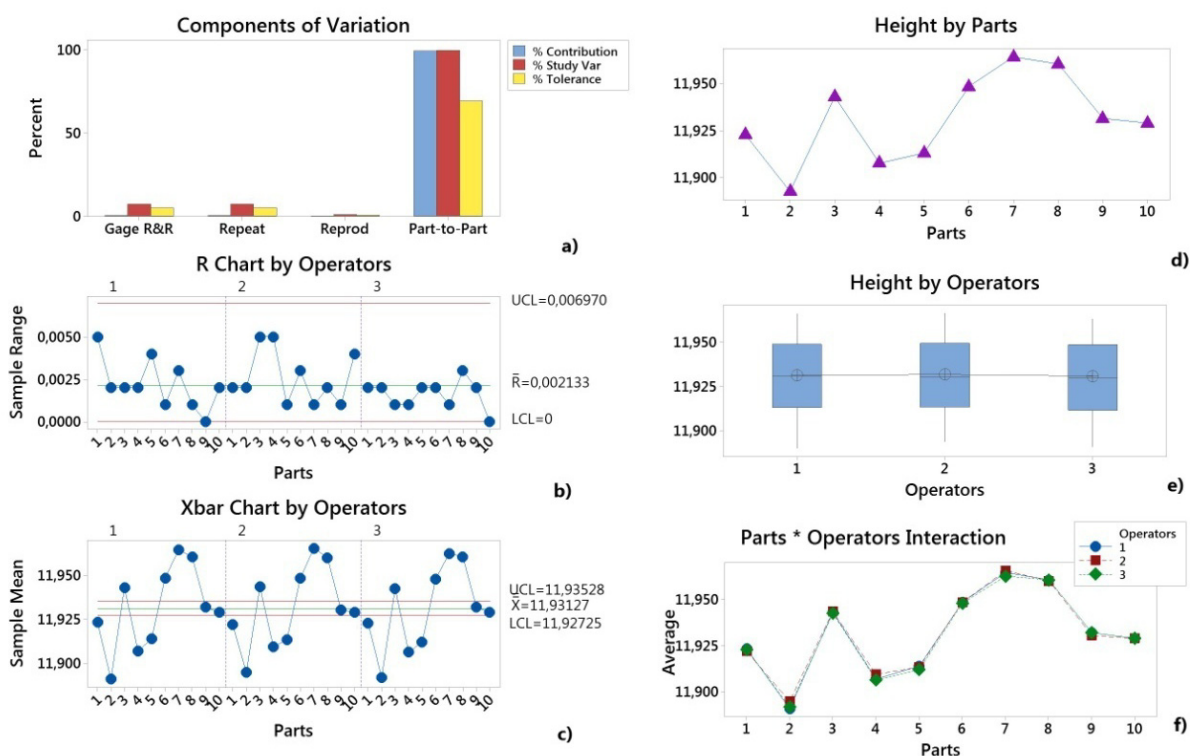


Fig.5.5 Studiul Gage R&R (ANOVA) pentru "înălțime" (H): a) Graficul componentelor variației; b) Diagrama amplitudinii pe Operatori; c) Diagrama X_{mediu} pe Operatori; d) Grafic înălțime după piese; e) Grafic înălțime după Operatori; f) Interacțiunea "piese-Operatori" [80].

Rezultatele variabilității sistemului de măsurare sunt prezentate grafic în figurile 5.5 și 5.6. În graficul Componentele variației (Components of Variation), contribuția procentuală a variației de la piesa la piesa este mai mare decât cea a Gage R&R. Astfel, o mare parte din variație se datorează diferențelor dintre piese. Diagrama R după operator arată că operatorii au măsurat piesele în mod constant. În graficul Xbar pe operatori (Xbar Chart by Operators), majoritatea punctelor au fost în afara limitelor de control. Astfel, o mare parte din variație se datorează diferențelor dintre piese.

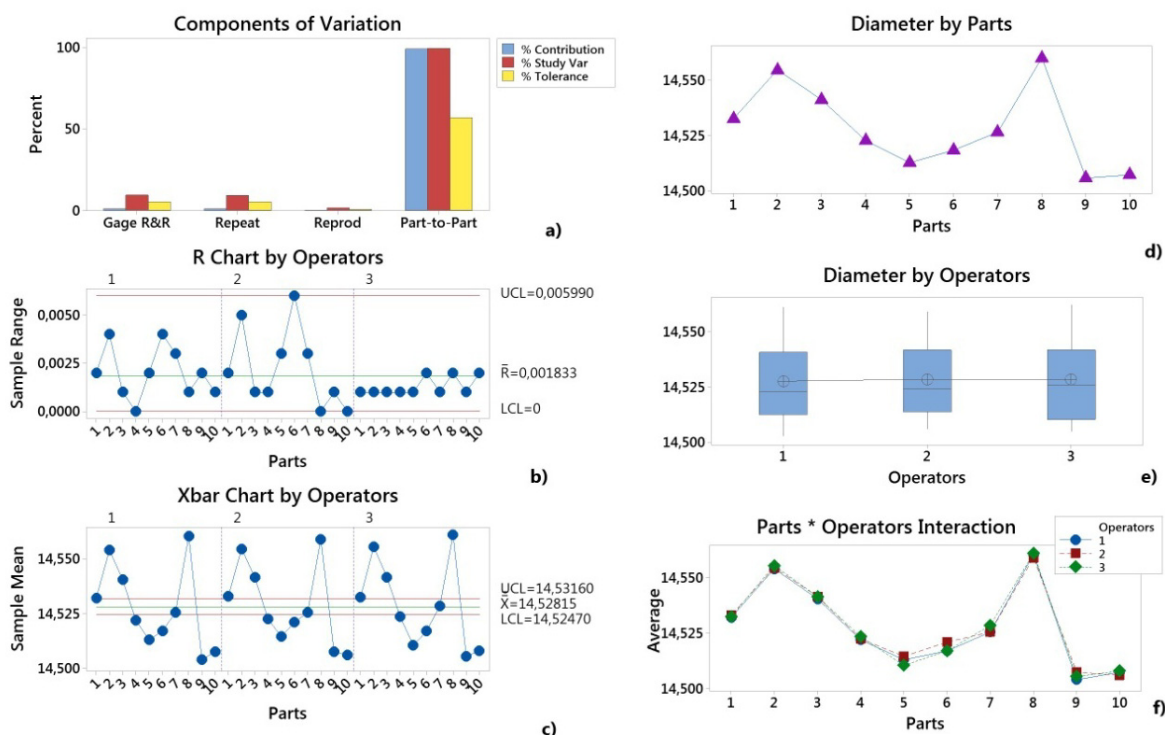


Fig.5.6 Studiul Gage R&R (ANOVA) pentru "diametru" (D): a) Graficul componentelor variației; b) Diagrama amplitudinii pe Operatori; c) Diagrama X_{mediu} pe Operatori; d) Grafic diametru după piese; e) Grafic diametru după Operatori; f) Interacțiunea "piese-Operatori" [80] .

Graficele By Operators (Figurile 5.5e și 5.6e) arată că diferențele dintre operatori au fost mai mici decât diferențele dintre piese. În graficele de interacțiune Piese * Operatori (Figurile 5.5f și 5.6f), liniile au fost aproximativ paralele, iar valoarea p pentru interacțiunea Piese * Operatori a fost 0,779 / 0,195 pentru dimensiunile H și D. Acest lucru indică faptul că nu există nici o interacțiune semnificativă între piesă și operator.

Rezultatul Gage R&R arată că atât pentru înălțime, cât și pentru diametru, variația datorată sistemului de măsurare a fost mult mai mică decât variația de la piesă la piesă (part-to-part), ca urmare, următoarele studii se pot baza pe aceste măsurători.

5.4.2. Rezultate privind capabilitatea /performanța sistemului de fabricație aditivă Obiect EDEN 350 PolyJet

În primul rând, au fost verificate grafic ambele ipoteze critice pentru efectuarea analizelor privind capabilitatea mașinii (performanța sistemului). Diagramele de control din figurile 5.7 și 5.8 arată informațiile privind procesul de fabricație pentru eșantionul de 50 de măsurători ale dimensiunilor D și H. Distribuțiile au fost stabile pe parcursul perioadei de studiu, așa cum se arată în figurile 5.7 și 5.8.

Valorile dimensionale se află în câmpul de toleranță LSL și USL, indicând faptul că procesul este în control statistic pentru ambele dimensiuni. O distribuție normală a fost

detectată pe baza testului de normalitate Anderson-Darling. Figura 5.9 prezintă histogramele și modelele de distribuție.

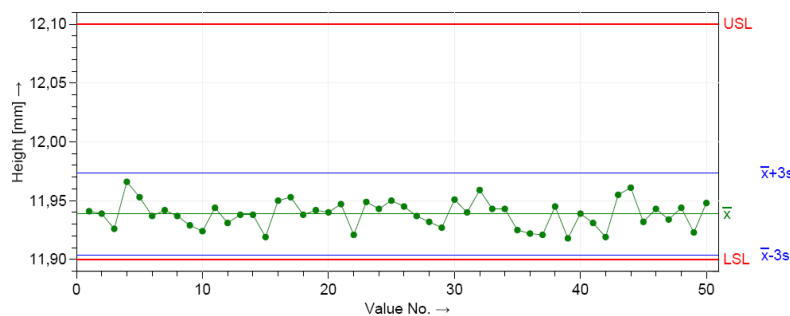


Fig.5.7 Diagrame de control pentru studiul capabilității mașinii de fabricație aditivă pentru dimensiunea înălțime H [80].

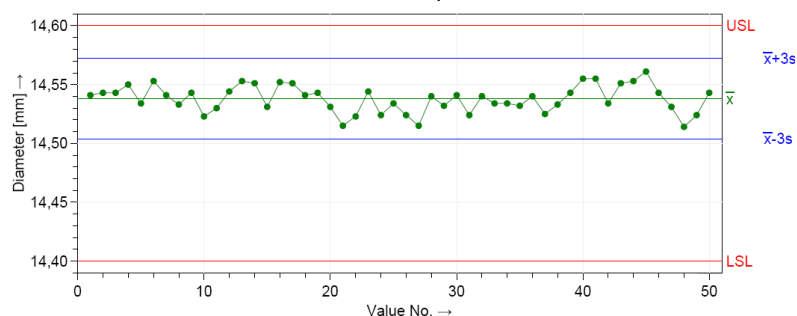


Fig.5.8 Diagrama de control pentru studiul capabilității mașinii de fabricație aditivă pentru dimensiunea diametru D [80].

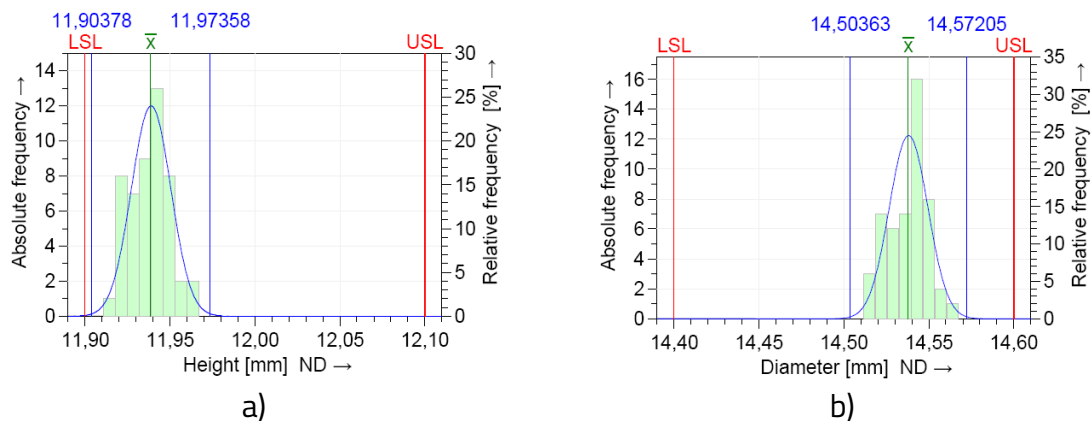


Fig.5.9 Histograma valorilor individuale și modelul de distribuție pentru studiul capabilității pe termen scurt: (a) pentru dimensiunea H; (b) pentru dimensiunea D [80].

Valorile diametrului (D) au fost situate în vecinătatea limitei superioare de specificație (USL) iar valorile înălțimii (H), lângă limita inferioară de specificație (LSL).

Rezultatele numerice ale analizei capabilității mașinii sunt prezentate în tabelele 5.5 și 5.6 pentru ambele dimensiuni ale artefactului circular, unde T_m este valoare nominală, T este câmpul de toleranță, n este dimensiunea eșantionului, x_{min} valoarea minimă, x_{max} este valoarea maximă, x_{mean} este mediana tuturor valorilor, $StDev$ este abaterea standard, $X_{0,135\%}$ este cuantila de distribuție de 0,135%, $X_{50\%}$ este cuantila de distribuție de 50% și $X_{99,865\%}$ este cuantila de distribuție de 99,865%.

Indicele capabilității potențiale și critice (Figura 5.10) pentru intervalul de încredere de 99,73% prezintă trei valori: limita inferioară de încredere, valoare estimată și limita superioară de încredere.

Tab.5.5 Analiza capabilității sistemului de fabricație aditivă pentru dimensiunea H [80].

| Valori nominale | | Valori colectate | | Valori statistice | |
|-----------------|------|-------------------|--------|----------------------|----------|
| Tm | 12 | n | 50 | StDev | 0.0116 |
| LSL | 11.9 | X _{min} | 11.918 | X _{0.135%} | 11.90378 |
| USL | 12.1 | X _{max} | 11.966 | X _{99.865%} | 11.97358 |
| T | 0.2 | X _{mean} | 11.939 | X _{50%} | 11.93868 |

Tab.5.6 Analiza capabilității sistemului de fabricație aditivă pentru dimensiunea D [80].

| Valori nominale | | Valori colectate | | Valori statistice | |
|-----------------|------|-------------------|--------|----------------------|----------|
| Tm | 14.5 | n | 50 | StDev | 0.0114 |
| LSL | 14.4 | X _{min} | 14.514 | X _{0.135%} | 14.50363 |
| USL | 14.6 | X _{max} | 11.561 | X _{99.865%} | 14.57205 |
| T | 0.2 | X _{mean} | 14.54 | X _{50%} | 14.53784 |

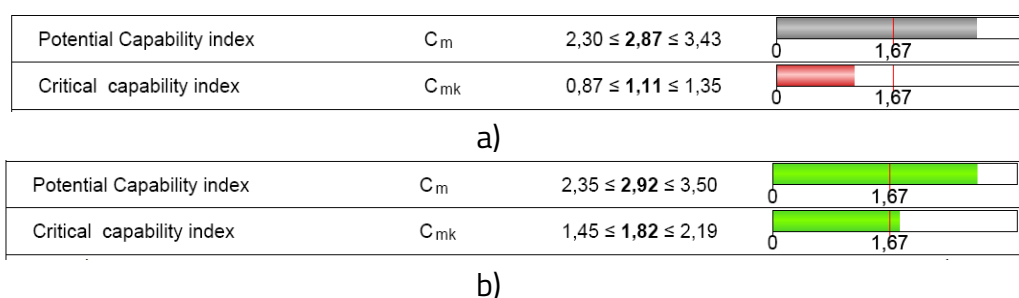


Fig.5.10 Raport de analiză a capabilității sistemului de fabricație aditivă: a) H; b) D [80].

Cerințele pentru indicii C_m și C_{mk} au fost îndeplinite în cazul dimensiunii D (Figura 5.10b). Pe baza pieselor măsurate, indicele capabilității critice a fost mai mic decât ținta pentru caracteristica H. Prin urmare, capabilitatea imprimantei 3D nu a fost dovedită pentru înălțimea pieselor H (Figura 5.10a).

5.4.3. Rezultate privind capabilitatea procesului de fabricație PolyJet

Diagramele de control ale capabilității procesului pentru ambele dimensiuni luate în considerare și anume diametrului și înălțimea artefactului circular sunt prezentate în figurile 5.11 și 5.12. Diagramele de control Xbar-S pentru subgrupurile cu dimensiunea eșantionului de cinci piese au fost alese pentru a verifica dacă procesul este în control. Valoarea mediei și a abaterii standard a arătat că nici unul dintre puncte nu se afla în afara limitelor de control (UCL, limita superioară de control, LCL, limita inferioară de control), iar punctele au arătat un model aleator. Astfel, variația procesului a fost sub control.

Distribuția datelor pentru dimensiunile H și D a rezulta ca fiind o distribuție normală, așa cum se arată în Figura 5.13. Întregul proces de producție a fost stabil și controlabil.

Locația distribuției procesului (Figura 5.14) a fost aproape de limita superioara de toleranță pentru dimensiunea diametrului (D) și, respectiv, aproape de limita inferioara de toleranță pentru dimensiunea de înălțime (H).

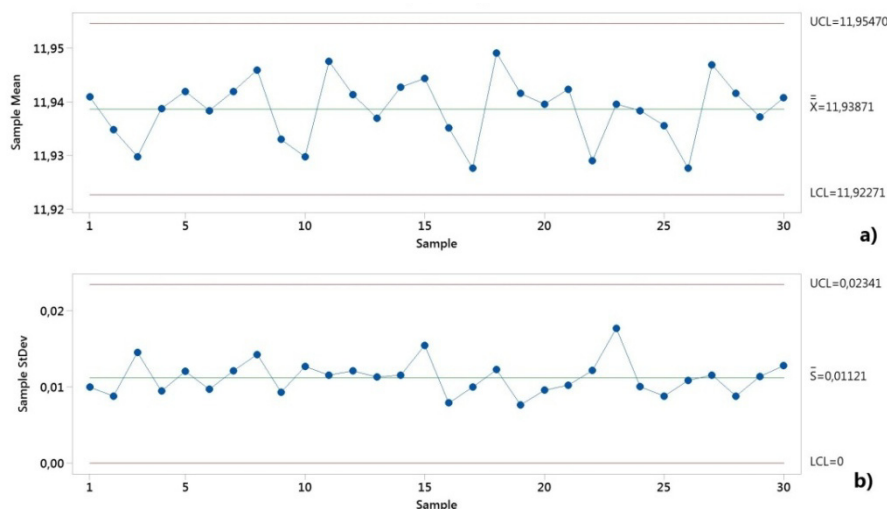


Fig.5.11 Diagrame de control pentru studiul capabilității procesului de fabricație aditivă pentru dimensiunea înălțime H: (a) medii; (b) deviații standard [80].

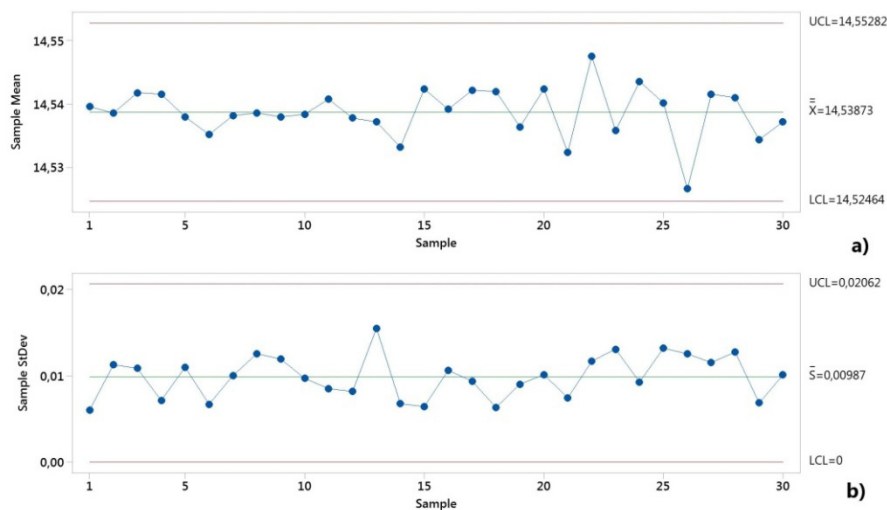


Fig.5.12 Diagrame de control pentru studiul capabilității procesului de fabricație aditivă pentru dimensiunea diametrul D: a) medii; b) deviații standard [80].

Rezultatele numerice ale analizei capabilității procesului sunt prezentate în Tabelele 5.7 și 5.8 pentru ambele dimensiuni considerate, diametrului și înălțimea artefactului circular. Abaterea standard a înălțimii a fost puțin mai mare decât cea a diametrului.

Pe baza cerințelor, ținta pentru Cpk este foarte adesea stabilită la un minim de 1,67. Unii dintre producătorii din industrie acceptă valori mai mici de 1,33 pentru Cp și Cpk [109]. Chiar și așa, rezultatul pentru caracteristica de înălțime în termeni de Cpk a fost mai mic decât 1,67 sau 1,33. Cerințele pentru indicii Cpm și Cpk au fost îndeplinite pentru dimensiunea diametrului (Figura 5.15), dar nu au fost îndeplinite pentru dimensiunea înălțimii.

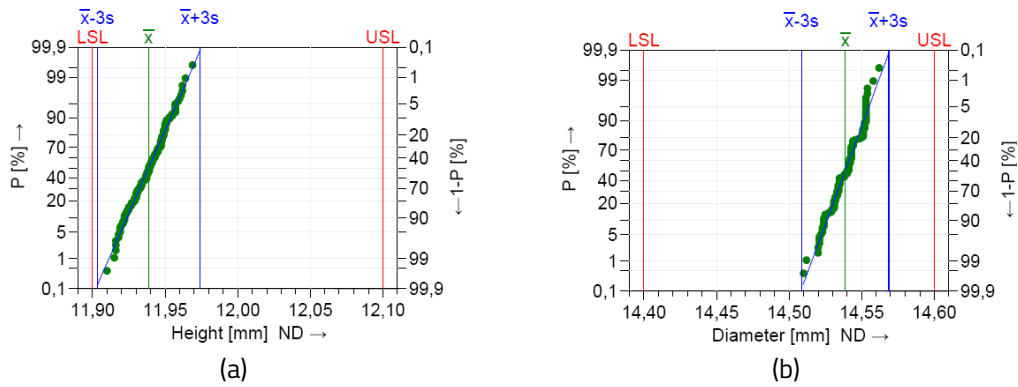


Fig.5.13 Graficul de probabilitate normal pentru studiul de capabilitate pe termen lung: (a) înălțime (H); (b) diametru (D) [80].

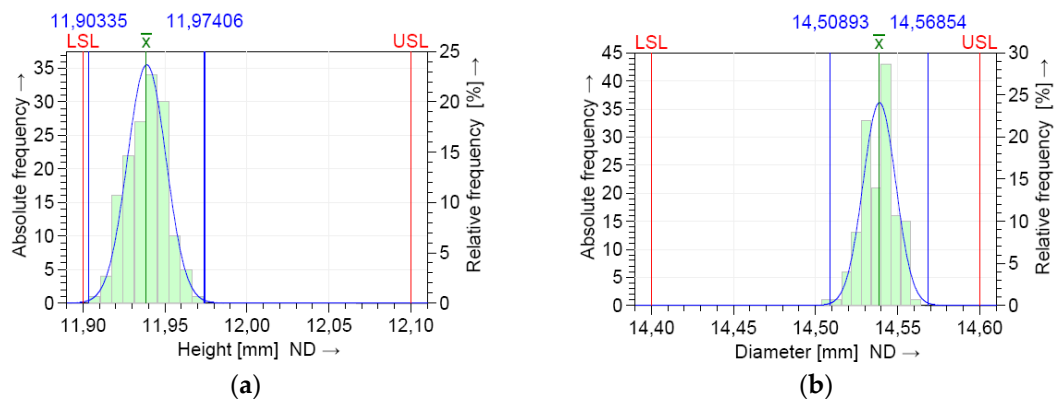


Fig.5.14 Histograma valorilor individuale și modelul de distribuție pentru capabilitatea pe termen lung: (a) înălțime (H); (b) diametru (D) [80].

Tab.5.7 Analiza capabilității procesului de fabricație aditivă pentru dimensiunea H [80].

| | Valori nominale | Valori colectate | Valori statistice |
|-----|-----------------|-------------------|-------------------|
| Tm | 12 | n | 150 |
| | | StDev | 0.0118 |
| LSL | 11.9 | x_{\min} | 11.910 |
| | | $X_{0.135\%}$ | 11.90335 |
| USL | 12.1 | x_{\max} | 11.969 |
| | | $X_{99.865\%}$ | 11.97406 |
| T | 0.2 | x_{mean} | 11.939 |
| | | $X_{50\%}$ | 11.93871 |

Tab.5.8 Analiza capabilitatii procesului de fabricatie aditivă pentru dimensiunea D [80].

| | Valori nominale | Valori colectate | Valori statistice |
|-----|-----------------|-------------------|-------------------|
| Tm | 14.5 | n | 150 |
| | | StDev | 0.00994 |
| LSL | 14.4 | x_{\min} | 14.510 |
| | | $X_{0.135\%}$ | 14.50893 |
| USL | 14.6 | x_{\max} | 14.562 |
| | | $X_{99.865\%}$ | 14.56854 |
| T | 0.2 | x_{mean} | 14.540 |
| | | $X_{50\%}$ | 14.53873 |

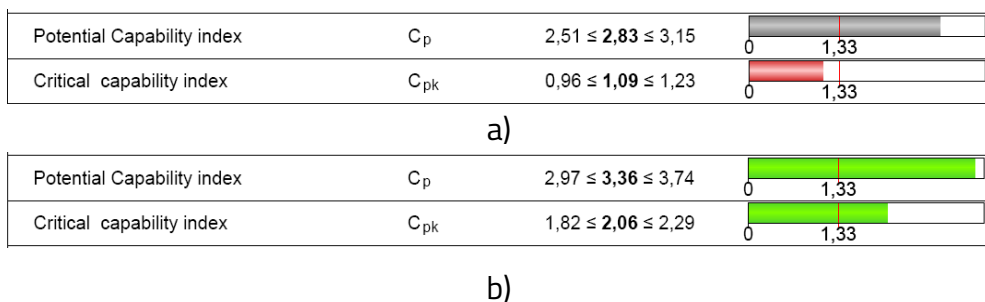


Fig.5.15 Raport de analiză a capabilității procesului de fabricație aditivă: (a) H; (b) D [80].

5.4.4. Rezultate privind toleranța capabilă și abateri capabile pentru procesul PolyJet

Calculul indicilor de capabilitate s-au bazat pe localizarea și dispersia valorii caracteristice în raport cu toleranța specificată. x_{mean} indică locația procesului. Din graficele capabilității procesului (Figura 5.14) se poate observa că media a fost mai mică decât valoarea nominală pentru caracteristica H și, respectiv, mai mare pentru caracteristica D.

Toleranța capabilă și abaterile sale limită au fost calculate pe baza unui indice de capabilitate țintă de 1,67 pentru ambele dimensiuni pentru înălțime și diametru. S-a calculat indicele procesului K, iar rezultatele au arătat valoarea de 0,62 pentru înălțime și, respectiv, -0,38 pentru diametru. Abaterea limita inferioară capabilă și abaterea limita superioară capabilă au fost determinate pentru ambele dimensiuni.

Abaterile limită capabile ale specimenului circular au fost găsite ca fiind $ULD = \max\{ULD_D, ULD_H\}$ și $LLD = \min\{LLD_D, LLD_H\}$, unde indicele H și D reprezintă înălțimea și, respectiv, diametrul caracteristic. Rezultatele arată că abaterea limită inferioară capabilă și abaterea limită superioară capabilă a artefactului circular au fost $LLD = -0,13$ mm și, respectiv, $ULD = +0,09$ mm. Intervalul de toleranță capabil al artefactului circular a fost $TC = 0,22$ mm.

O analiză de confirmare a capabilității procesului AM a fost efectuată utilizând toleranța capabilă determinată a artefactului circular. Rezultatul capabilității procesului a fost „prea mare” ($C_{pk} > 1,67$), așa cum se arată în Figura 5.16. Astfel, cerințele au fost îndeplinite.

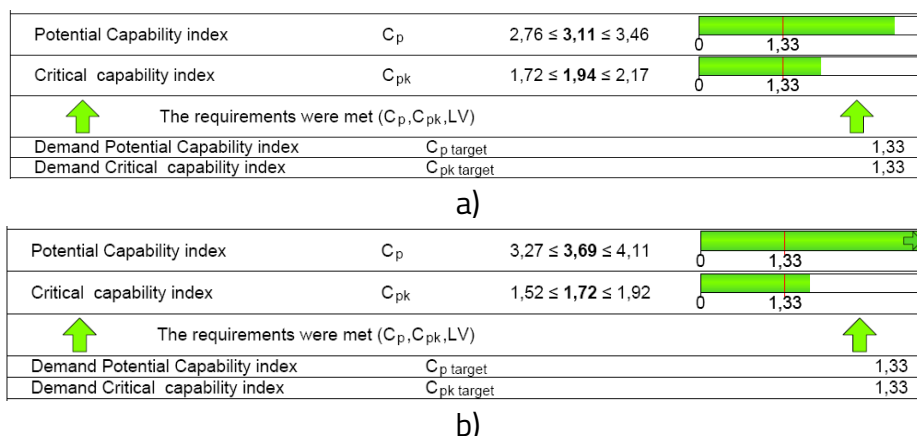


Fig.5.16 Raport de analiză a capabilității de proces bazat pe toleranța capabilă a artefactului circular: a) H; b) D [80].

5.4.5. Determinarea treptei de toleranță pentru PolyJet (ISO IT grade)

Treptele de toleranță indică gradul de precizie al unei dimensiuni. Deoarece treptele de toleranță IT oferă informații cu privire la cât de precisă ar trebui să fie fabricată o piesă la o anumită dimensiune, acestea pot fi utilizate pentru a compara procese diferite de fabricație [110]. O valoare mai mică a treptei de toleranță IT semnifică o mai mare acuratețe dimensională. În procesul de fabricare aditivă, mărimea toleranței depinde de următorii factori principali:

- ✓ precizia imprimantei 3D sau a sistemului de fabricație aditivă;
- ✓ procedeul tehnologic de fabricație aditivă;
- ✓ mărimea dimensiunilor pieselor realizate;
- ✓ calificarea executantului este importantă doar în etapele de pre-procesare a datelor (precizie fișier STL) și cea de postprocesare, procesul de fabricație efectuându-se în mod automat.

În cadrul acestor cercetări, treptele de toleranță IT au fost calculate luând în considerare un eșantion de 50 de bucăți ale artefactului circular, pe baza specificațiilor standardului ISO 286 [97]. Precizia dimensională și treptele de toleranță IT depind de mărimea dimensiunii considerate. Au fost analizate două dimensiuni ale artefactului circular, înălțimea și diametrul. Aceste dimensiuni s-au încadrat în intervalul de dimensiuni (D_{\min} , D_{\max}) de bază ISO având valorile între (10, 18 mm).

Tab.5.9 Toleranțe fundamentale pentru artefactul circular [80]

| Trepte de toleranță (Standard ISO 286) | IT8 | IT9 | IT10 | IT11 | |
|---|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Mărimea maximă a toleranței | 25 i | 40 i | 64 i | 100 i | |
| Interval de dimensiuni (10–18 mm), $i = 1.083 \mu\text{m}$ | 27 μm | 43 μm | 70 μm | 109 μm | |
| Valori determinate experimental | | | | | |
| n | Dimensiune liniară (H = 12 mm) | - | (32–42) μm | (44–69) μm | (73–75) μm |
| | Dimensiune diametru (D = 14.5 mm) | (19–24) μm | (28–41) μm | (47–57) μm | - |

Toleranțele fundamentale sunt determinate în funcție de dimensiunea caracteristică a unui interval de dimensiuni, adică media geometrică a limitelor intervalului, și treapta de toleranță. Toleranțele fundamentale pentru un interval de dimensiuni, corespunzătoare unei trepte de toleranță este calculată în raport cu unitatea de toleranță standard i . Unitatea de toleranță standard este $i = 1,083 \mu\text{m}$ pentru intervalul de dimensiuni de bază ISO de la $D_{\min}=10$ mm până la $D_{\max}=18$ mm. Unitatea de toleranță „n” a fost calculată folosind ecuația (4), unde „D” este media geometrică a intervalului de dimensiuni de bază ISO; DN este dimensiunea nominală; iar DM este dimensiunea măsurată.

$$n_i = 1000 * \frac{|D_N - D_{M_i}|}{0.45(\sqrt{D_{min}D_{max}})^{\frac{1}{3}} + 0.001\sqrt{D_{min}D_{max}}}, i = \{1, \dots, 50\} \quad (5.4) [80]$$

În Tabelul 5.9 sunt prezentate treptele de toleranță pentru înălțimea (H) și diametrul (D) specimenului circular. Toleranțele fundamentale pentru procesul de fabricație aditivă prin procedeul PolyJet au fost determinate pe baza unității de toleranță n.

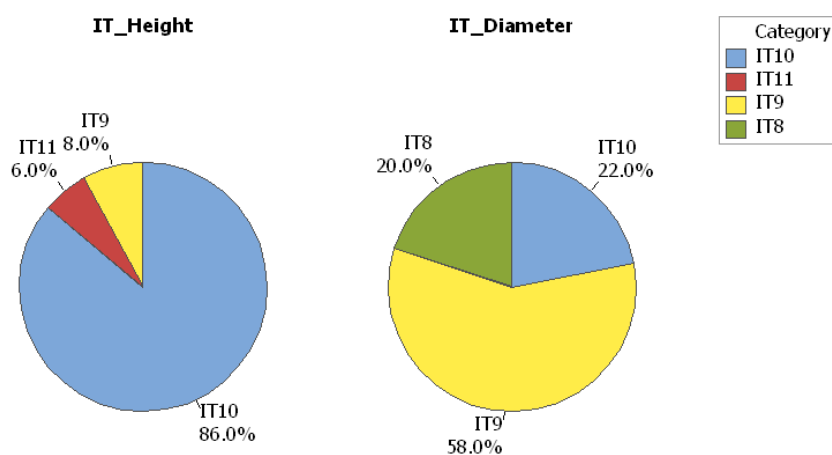


Fig.5.17 Treptele de toleranță determinate pentru înălțimea și diametrul artefactului circular în intervalul de dimensiuni (10–18 mm) [80].

Rezultatele arată că treptele de toleranță al dimensiunii înălțime a fost IT10 pentru 86% dintre specimene (Figura 5.17). O variație semnificativă a procentului IT Grade a fost detectată pentru dimensiunea diametru cu o distribuție IT10 de 58%, așa cum se arată în Figura 5.17 [80].

Folosind aceasta procedură, se pot determina treptele de toleranță IT, care reprezintă acuratețea dimensională a diferitelor sisteme de fabricație aditivă, pentru fiecare interval de dimensiuni de bază ISO.

5.4.6. Rezultate privind analiza microscopică

O analiză microscopică a fost efectuată pentru caracteristicile critice ale artefactului circular. Dimensiunea H a fost măsurată între suprafața superioară și inferioară a piesei și, respectiv, dimensiunea D pe suprafața superioară a piesei. Calitatea acestor suprafețe a fost investigată. În procesul de fabricație, nu a fost depus nici un material suport pe suprafețele superioare ale modelului printat 3D în modul lucios, doar pe suprafețele inferioare, așa cum se arată în figurile 5.18 și 5.19.

Suprafața inferioară a specimenului circular a fost afectată de suportul material. Bucăți mici de material suport au fost detectate pe suprafața inferioară a specimenului, chiar dacă specimenul a fost curățat cu un jet de apă sub presiune după printarea 3D (Figura 5.18).

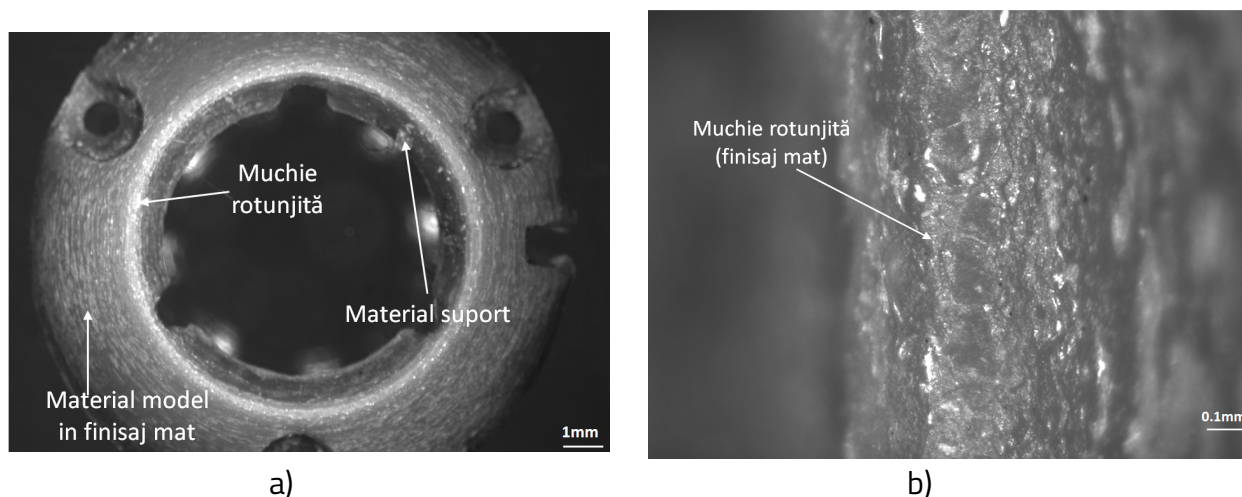


Fig.5.18 Analiza microscopică a suprafeței inferioara a artefactului fabricat pe Objet EDEN 350 PolyJet. a) Suprafața inferioara afectata de materialul suport; b) detaliu referitor la muchia inferioară [80].

Calitatea muchiilor inferioare și superioare ale artefactului circular poate influența dimensiunea înălțimii artefactului. Pe muchia superioară a specimenului a fost identificata o suprafață de bună calitate, fără defecte de material. Marginile suprafeței superioare printate în modul lucios au fost rotunjite, așa cum se arată în Figura 5.19b. În plus, muchia ascuțită a suprafeței inferioare afectate de materialul suport a fost rotunjită, așa cum se arată în Figura 5.18. Această rotunjire a muchiei poate explica de ce distribuția măsurătorilor pentru înălțime a fost situată în apropierea limitelor inferioare de toleranță și a fost mai mică decât valoarea nominală.

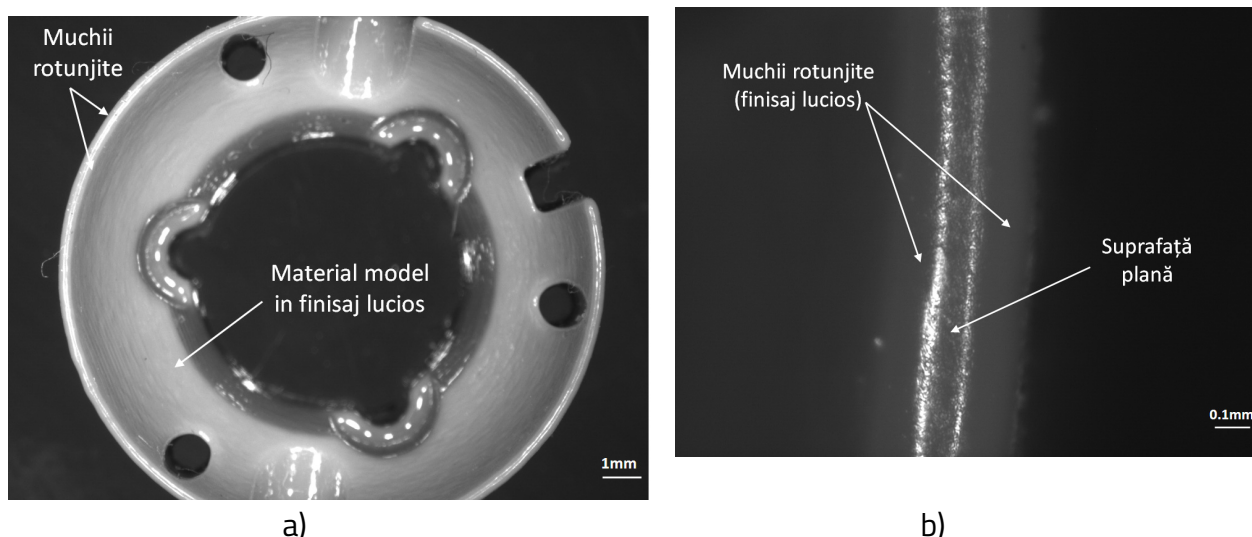


Fig.5.19 Analiza microscopica a suprafeței superioare a artefactului fabricat pe Objet EDEN 350 PolyJet. a) Suprafața superioară în modul lucios; b) Detaliu al muchiei superioare [80].

Atât pentru finisajele lucioase, cât și pentru cele mate, investigațiile microscopice pe suprafața laterală a artefactului circular au fost efectuate pe o direcție perpendiculară și paralelă pe axa X (Figurile 5.20 și 5.21). Se observă o suprafață curată și netedă în direcția

axei X (Figura 5.20a) pentru un finisaj lucios. Au fost detectate zone rugoase pe direcția perpendiculară pe axa X (Figura 5.20b). Suprafața inclinată afectată de materialul suport indică un material omogen care conținea mici incluziuni de material suport FullCure 705 (Figura 5.21).

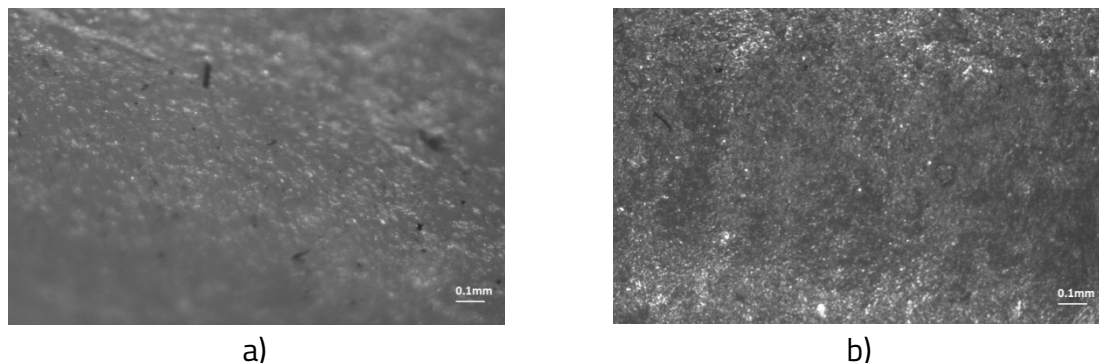


Fig.5.20 Analiza microscopică a suprafeței laterale în mod lucios, în diverse arii: a) paralel cu axa X (0°); b) paralel cu axa Y (90°) [80].

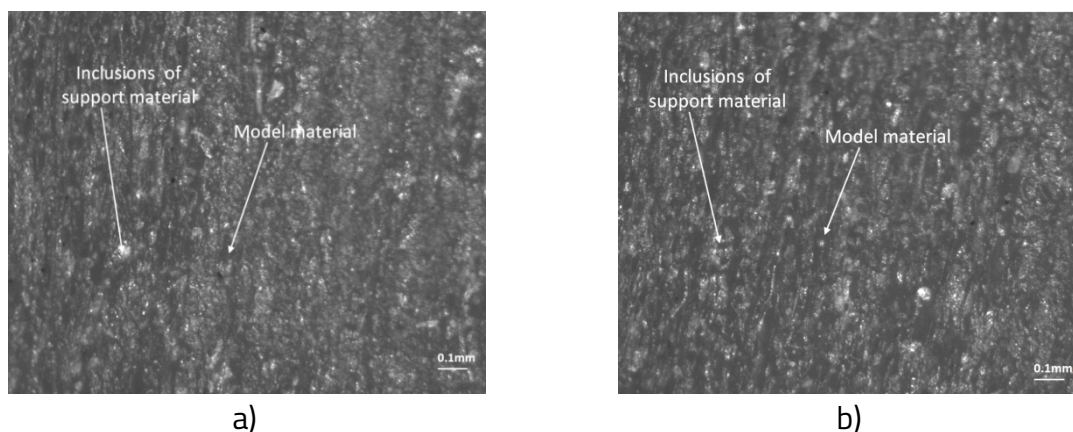


Fig.5.21 Analiza microscopică a suprafeței laterale în mod mat, în diverse arii: a) paralel cu axa X (0°); b) paralel cu axa Y (90°) [80].

Acest capitol contribuie la caracterizarea acurateții dimensionale, a repetabilității, a performanței sistemului AM și a capacității proceselor AM care folosesc polimeri. Metodologia utilizată pentru controlul calității în fabricația aditivă permite implementarea proceselor AM pe bază de polimeri în producție. În plus, această metodologie poate fi utilizată ca tehnică de monitorizare a mașinilor AM.

Capitolul 6 METODOLOGIE ȘI CERCETARI PRIVIND ANALIZA STRUCTURII INTERNE A PIESELOR DE TIP MULTI-MATERIAL PRIN CONTROL NEDISTRUCTIV

Capitolul prezintă o metodologie privind determinarea și analiza defectelor interne de tip porozitate pentru un multi-material prin tomografie computerizată cu raze X, precum și investigații experimentale privind caracterizarea porozității unui multi-material compozit. Acest capitol se bazează pe o parte din cercetările publicate de către autorul acestei teze de abilitare în calitate de autor principal în articolul [104].

6.1. Introducere

Porozitatea materialelor poate produce un efect favorabil în realizarea unor materiale relativ ușoare, dar pe de altă parte porii pot fi considerați defecte interne în alte materiale. Cele mai frecvent metode utilizate pentru determinarea porozității sunt metode optice, porozimetrie de intruziune cu mercur și metode de tomografie computerizată. Metoda porozimetriei de intruziune cu mercur [111] se concentrează pe determinarea volumului porilor și a distribuției porilor în sol și rocă, într-un interval tipic de diametre ale porilor 0,0025 - 400 microni. Aceasta metodă recomandă ca porii mai mari să fie mășurați printr-o metodă diferită. În plus, nu oferă nici o informație despre volumul porilor închiși și implică aplicarea unor presiuni mari asupra eșantionului, care poate avea ca rezultat o distorsionare temporară sau permanentă a geometriei porilor. Majoritatea metodelor de determinare a porozității permit doar determinarea porozității unui material, dar doar câteva metode permit și analiza morfologică a porilor. Utilizarea tomografiei computerizate cu raze X (CT) este o modalitate precisă de a analiza porozitatea materialului precum și morfologia porilor. Precizia mașinilor CT industriale moderne poate fi comparată cea a unor mașini de măsurat în coordonate (CMM) [112].

CT este o tehnică de examinare radiografică a materialelor care generează imagini digitale tridimensionale ale structurii interne. Această tehnică permite caracterizarea fizică nedistructivă a structurii interne a materialelor [113]. CT cu raze X [114–117] a devenit populară printre tehnicile de inspecție nedistructivă datorită aplicațiilor sale de caracterizare a materialelor și analizei evoluției caracteristicilor critice în timp [118]. Principalele aplicații industriale ale tehnicii CT includ, dar nu se limitează la detectarea defectelor [116] precum incluziuni și fisuri, analiza deteriorării materialelor [119], caracterizarea internă a materialelor, inspecția pieselor greu accesibile și a structurilor flexibile [117]. Nikishkov și colab. [120] au concluzionat că măsurătorile porilor prin CT oferă capacitatea de a cuantifica cu precizie incluziunile critice. Interfața dintre materialele componente ale unui multi-material fabricat prin fabricație aditivă (AM) a fost analizată CT de Guessasma și colab. [121],

care a concluzionat că aceasta este un factor determinant în îmbunătățirea performanțelor mecanice ale multi-materialelor.

Din studiul bibliografic, rezultă că analiza CT este cea mai des utilizată procedură pentru caracterizarea structurii interne a obiectelor de dimensiuni limitate. Obiectele mari ar trebui investigate folosind CT pe baza unei metodologii de eșantionare. Cu toate acestea, foarte puține studii de cercetare au investigat porozitatea obiectelor mari din materiale multiple.

6.2. Metodologie privind determinarea defectelor interne de tip porozitate pentru un multi-material prin tomografie CT

În cadrul acestor cercetări am considerat un multi-material compus din mai multe materiale stratificate, care poate fi fabricat fie prin tehnologii specifice materialelor compozite, dar și prin tehnologii aditive [104]. O reprezentare schematizată a multi-materialului este prezentată în Figura 6.1. Scopul principal al acestor cercetări a fost analiza defectelor/ porozității structurii interne a acestui multi-material și caracterizarea separată a fiecărui material component.

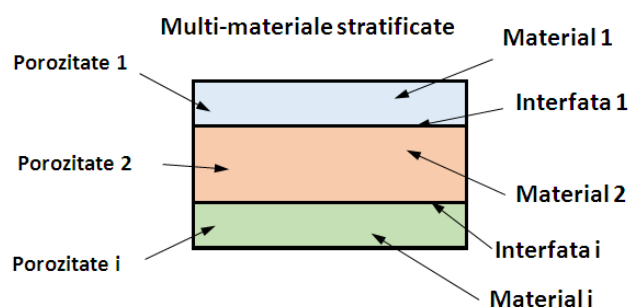


Fig.6.1 Reprezentare schematizată a unui multi-material stratificat.

O metodologie privind analiza porozității multi-materialelor prin controlul nedistructiv, luând în considerare procedeul de tomografie computerizată (CT) cu raze X, a fost propusă de către subsemnatul (Figura 6.2). Această metodologie constă din următoarele etape principale [104]:

- ✓ Etapa 1. Scanarea CT a minim 5 probe din multi-materialul supus analizei;
- ✓ Etapa 2. Determinarea volumelor defectelor/ porilor prin analiza morfologică 3D a multi-materialului considerat ca un singur volum;
- ✓ Etapa 3. Determinarea porozității fiecărui material component al multi-materialului prin aplicarea unei metode corelate de analiză a fișierelor STL și CSV rezultate din CT;
- ✓ Etapa 4. Analiza statistică a caracteristicilor porilor.

În cadrul celei de-a doua etape a metodologiei, volumele voxelilor materialului au fost obținute prin reconstrucția proiecțiilor efectuate cu ajutorul software-ului Metrotom OS (Compania ZEISS, Germania). În continuare, sunt atribuite informații 3D de morfologie

volumetrică porilor, [122] utilizând modulul de analiză a porozității din software-ul VGStudio Max v3.0 (Volume Graphics GmbH, Heidelberg, Germania). Fiecărui voxel al structurii interne a materialului i se atribuie o intensitate de nuanțe de culoare gri de la alb la negru, valoarea "culorii de gri" corespunzând densității materialului [123]. Suprafața materialului este determinată automat prin analiza valorilor de gri, incluziunile de aer fiind reprezentate cu negru și materia cu alb [124]. Din analiza porozității pot fi identificați două categorii de pori, și anume pori închiși denumiri micropori și structuri de pori deschiși interconectați denumiți macropori.

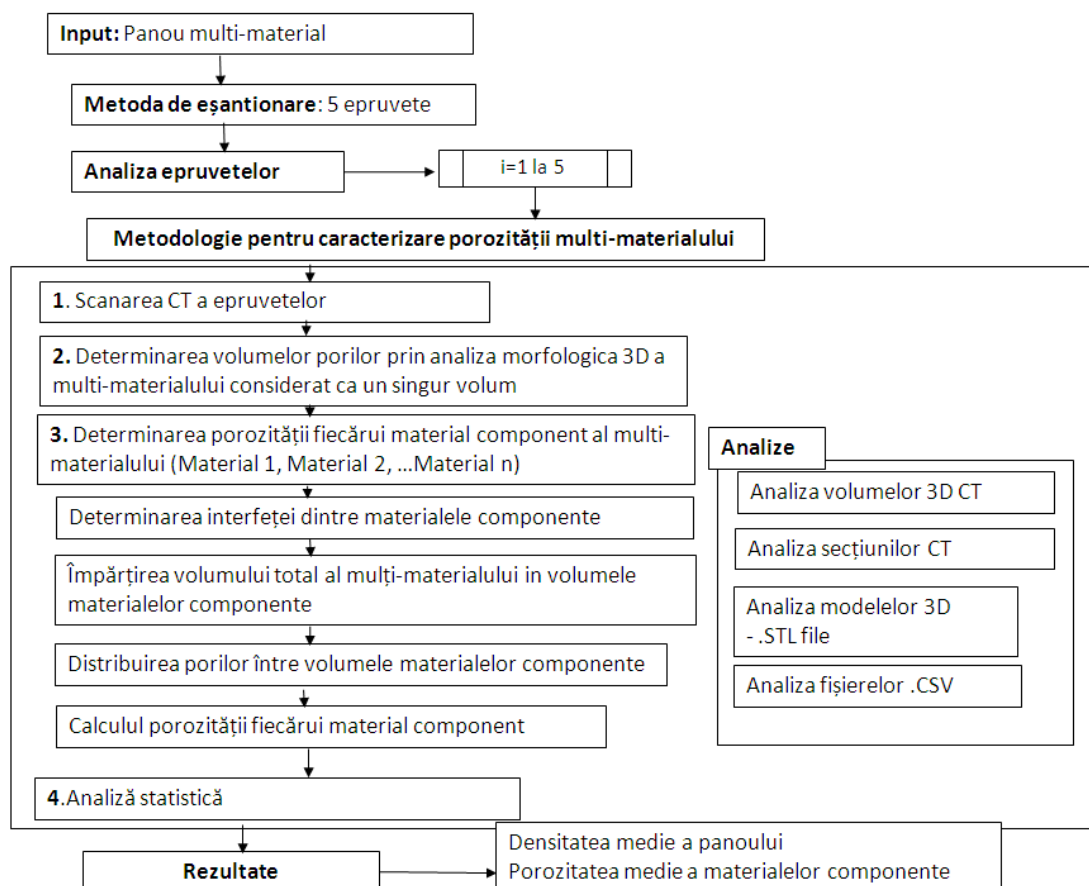


Fig.6.2 Metodologie de analiză a defectelor interne prin analiza CT a unui multi-material propusă de către subsemnatul [104].

În cazul detecției unei porozități deschise a materialului, aceasta se va închide cu o suprafață de tip graniță exterioară, în scopul pregătirii analizei morfologice a porilor. Astfel se creează o regiune 3D de interes (ROI). Se analizează porozitatea regiunii de interes cu algoritmul VGDefx [122] având setați ca parametri principali, pragul de probabilitate „1” și un volum minim al porului de $0,01\text{mm}^3$. Pragul de probabilitate reprezintă certitudinea că un por este într-adevăr un por și nu un artefact.

În urma acestei analize cu algoritmul VGDefx se obține un raport care conține informații despre poziția, dimensiunea, suprafața și volumul porilor. Acest raport poate fi salvat într-un

fișier de tip CSV (valori separate prin virgulă). De asemenea, modelul 3D al regiunii de interes scanate CT a fost exportat ca fișier STL [104].

Porozitatea globală a multi-materialului poate fi calculată folosind VGStudio Max v3.0, ca raportul dintre volumul total al porilor și volumul ROI [122], dar porozitatea individuală a fiecărui material component al multi-materialului nu poate fi determinată cu acest software.

$$P = \frac{V_{porilor}}{V_{ROI}} \quad (6.1)$$

În etapa a treia a metodologiei, pe baza datelor de intrare constând în fișierul 3D STL și a fișierului CSV, sunt determinate porozitățile fiecărui material component. Aceasta presupune parcurgerea următorilor pași (Figura 6.2):

- ✓ Determinarea interfeței, dintre materialele stratificate;
- ✓ Împărțirea volumului total al multi-materialului în volumele materialelor componente;
- ✓ Distribuirea porilor între volumele materialelor componente;
- ✓ Calculul porozității fiecărui material component.

Interfața dintre materialele componente se estimează prin analiza modelului 3D STL al multi-materialului rezultat din analiza CT. Suprafețele de separație între materialele componente (material1, material 2, material i) se pot determina prin analiza CAD în software-ul Magics (Materialise, Leuven, Belgia). O limitare a acestei metode a constat în aproximarea suprafeței de separație cu un plan. Poziția acestui plan este determinată în raport cu un sistem de coordonate, preluat din modelul 3D al piesei scanate CT. În continuare, volumul multi-materialului a fost împărțit în volumele materialelor stratificate componente. Procedura privind distribuția porilor, între volumele materialelor componente, s-a bazat pe sortarea după coordonata Z a caracteristicilor porilor, stocate în fișierul CSV, având un prag Z a suprafeței de separație, ca reper de delimitare [104].

6.3. Investigatii experimentale privind caracterizarea porozității unui multi-material

Pentru validarea metodologiei propuse privind analiza defectelor interne a unui multi-material, a fost analizat un multi-material compozit constând dintr-un panou sintetic ornamental realizat din doua materiale pe baza de GFRP [104, 125]. Acest multi-material compozit a fost fabricat la Universitatea Tehnica din Cluj-Napoca de către membrii unui colectiv de cercetători dr. ing. Bere Petru Paul și dr. ing. Sabău Emilia cu care am colaborat în cadrul elaborării unei lucrări ISI [104]. De asemenea, în cadrul acestei colaborări, o analiză CT a multi-materialului compozit a fost realizată la Universitatea de Tehnologie din Slovacia sub coordonarea dr. ing. Ivan Buranský. Toate probele au fost scanate CT folosind o mașină METROTOM 1500 (Compania ZEISS, Germania).

Cinci epruvete au fost prelevate din panoul compozit multi-material pe baza schemei de eșantionare din Figura 6.3, prelevând material din cele patru colturi ale panoului și din mijlocul acestuia. Fiecare epruvetă a fost analizată conform metodologiei de analiză a defectelor interne propuse de către subsemnatul (Figura 6.2) iar rezultatele analizate statistic. Din analiza rezultatelor CT au rezultat următoarele:

- ✓ Identificarea a două categorii de pori, și anume o structură de macropori interconectați (Figura 6.4) și o multitudine de pori închiși (Figura 6.5);
- ✓ structura de macropori deschiși și porii închiși sunt situați în zone diferite, bine delimitate ale multi-materialului indicând prezența a două materiale cu porozități diferite;
- ✓ identificarea unei interfețe bine delimitată între materiale, care poate fi aproximată cu o suprafață plană.

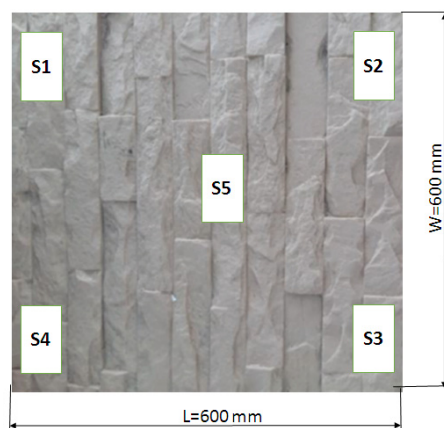


Fig.6.3 Metoda de prelevare a epruvetelor din panoul multi-material [104]

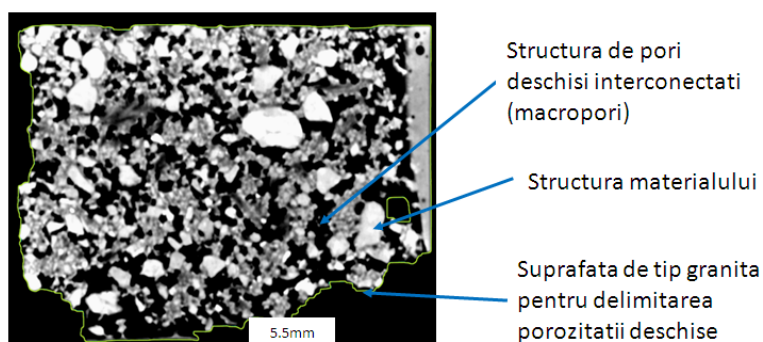


Fig.6.4 Secțiune prin materialul care prezintă macro-porozitate [104].

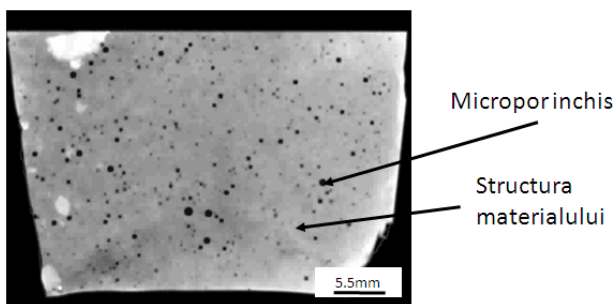


Fig. 6.5 Secțiune prin materialul care prezintă micro-porozitate [104].

Pentru fiecare specimen considerat, volumul STL al multi-materialului a fost împărțit în două volume de materiale, folosind software-ul Magics (Figura 6.6), pe baza metodologiei propuse. Porii au fost repartizați între cele două volume ale materialelor componente pe baza procedurii de sortare din metodologia propusă. Caracteristicile porilor, cum ar fi raza, diametrul, coordonate centrul porului, volumul și suprafața au fost salvate într-un fișier Microsoft Excel. Structura de macropori deschiși a fost tratată ca un singur por iar porii închiși (micropori) au fost caracterizați separat.

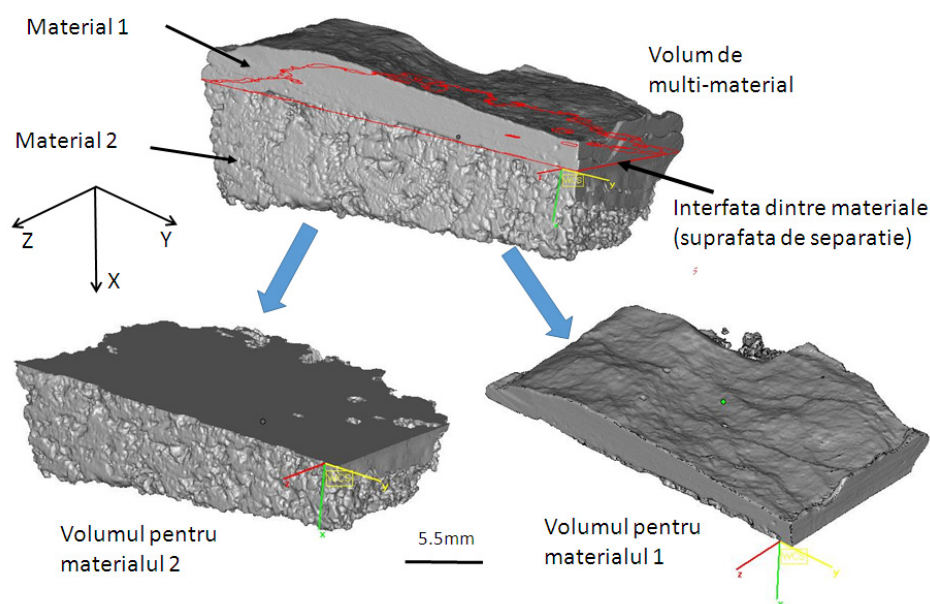


Fig.6.6 Procedura de împărțire a volumului multi-material (fișier STL) în volume de materiale constitutive, într-un sistem de coordonate local. [104]

Analiza statistică privind caracterizarea porilor închiși (distribuția, dimensiunea și forma) pentru materialele componente a fost efectuată folosind software-ul Minitab 17 (Minitab Ltd., Coventry, Marea Britanie).

6.4.Rezultate

O parte din rezultatele cercetărilor, mai exact rezultatele referitoare la determinarea porozității fiecărui material component al multi-materialului și analiza statistică a porilor sunt prezentate în continuare.

Pentru multi-materialul analizat au fost determinate distribuția 3D porilor, dimensiunile porilor, numărul porilor și forma porilor. Distribuția microporilor în funcție de volumul acestora, în spațiul tridimensional este prezentat în Figura 6.7, pentru proba 1. Distribuții similare au fost obținute pentru toate cele 5 probe analizate.

Pe baza dimensiunii volumului microporilor aceștia au fost clasificați în patru clase de dimensiune C1 (0,01-0,02 mm³), C2 (0,02-0,05 mm³), C3 (0,05-0,09 mm³) și C4 (0,09-1,33 mm³) [104].

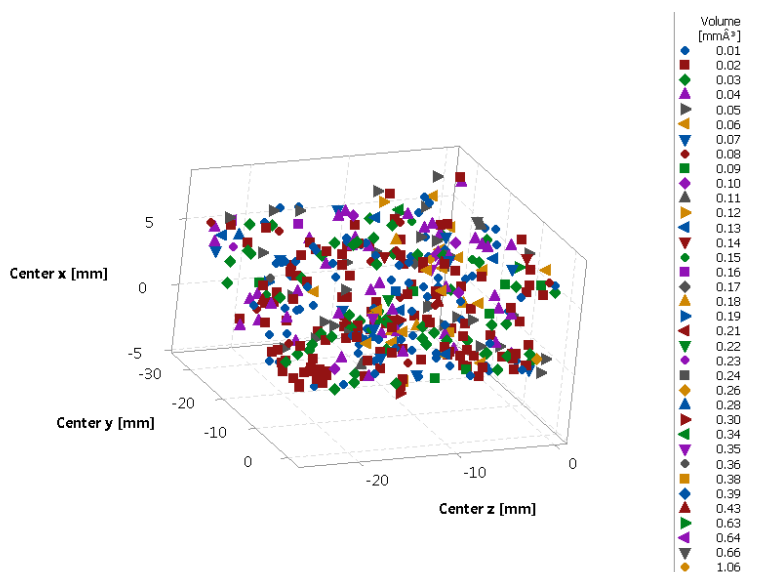


Fig.6.7 Distribuția în spațiu 3D a microporilor indicând volumul acestora pentru proba 1 ; x, y, z sunt coordonatele centrului sferei circumscrise porului.

Pe baza datelor numerice din scanarea CT pentru panelul compozit, din care s-au prelevat 5 probe, s-au determinat următorii parametri: volumul total al multi-materialului ($V_{\text{multi-material}}$), volumurile celor două materiale componente ($V_{\text{material1}}$ și $V_{\text{material2}}$), volumul porilor ($V_{\text{micropori1}}$ și $V_{\text{macropor2}}$), și porozitatea celor două materiale componente ($P_{\text{material1}}$, $P_{\text{material2}}$).

Rezultatele analizei statistice pentru probele analizate arată că coeficienții de variație ai parametrilor analizați sunt mai mici de 14%, ceea ce asigură eterogenitatea datelor și exprimă repetabilitatea experimentelor, așa cum se arată în Tabelul 6.1. Coeficientul de variație este o măsură a împrăștierii care descrie variația datelor în raport cu media.

Densitatea medie a multi-materialului a rezultat de $1,7 \text{ g/cm}^3$ [104].

Tab.6.1 Caracterizarea multi-materialului (completat și revizuit pe baza [104])

| Parametri | Media | Deviația standard | Coeficientul de variație |
|------------------------------|---------------------|-----------------------|--------------------------|
| $V_{\text{multi_material}}$ | 7606 mm^3 | 475 mm^3 | 6% |
| $V_{\text{material 1}}$ | 2597 mm^3 | 415 mm^3 | 6,25% |
| $V_{\text{material 2}}$ | 5008 mm^3 | 387 mm^3 | 7,7% |
| $V_{\text{micropori 1}}$ | $3,77 \text{ mm}^3$ | $0,5 \text{ mm}^3$ | 13% |
| $V_{\text{macropor 2}}$ | 1581 mm^3 | 181 mm^3 | 11,4% |
| $P_{\text{material 1}}$ | 0,0015 (0,15%) | 0.0002 mm^3 | 13% |
| $P_{\text{material 2}}$ | 0,31 (31%) | 0.024 mm^3 | 7,74% |

Diagramele de interval cu bare de eroare (Figura 6.8, 6.9 și 6.10), arată intervalele pentru numărul, diametrul și suprafața microporilor în funcție de clasele de dimensiune ale acestora. Abaterile standard individuale au fost utilizate pentru a calcula aceste diagrame.

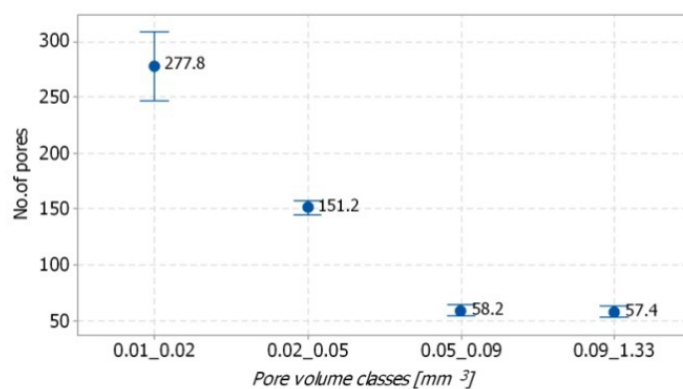


Fig.6.8 Diagramele de interval cu bare de eroare pentru numărul microporilor [104].

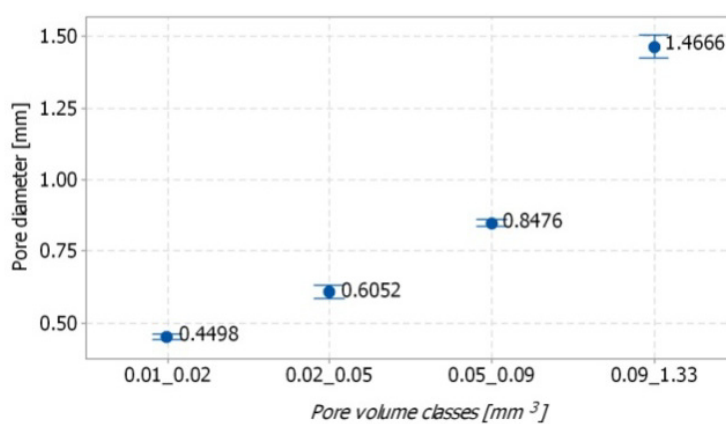
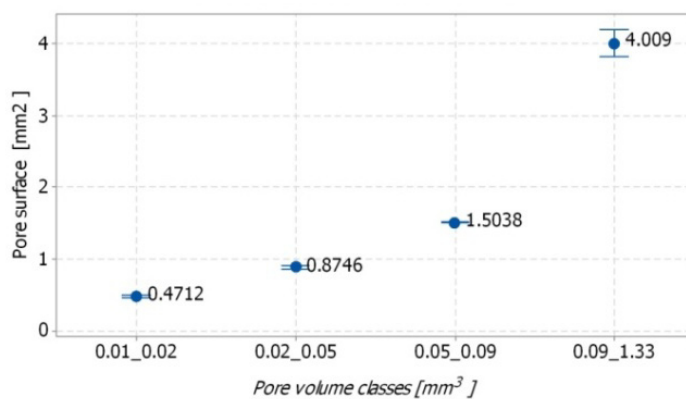


Fig.6.9 Diagramele de interval cu bare de eroare pentru diametrul microporilor [104].



c)

Fig.6.10 Diagramele de interval cu bare de eroare pentru suprafața microporilor [104].

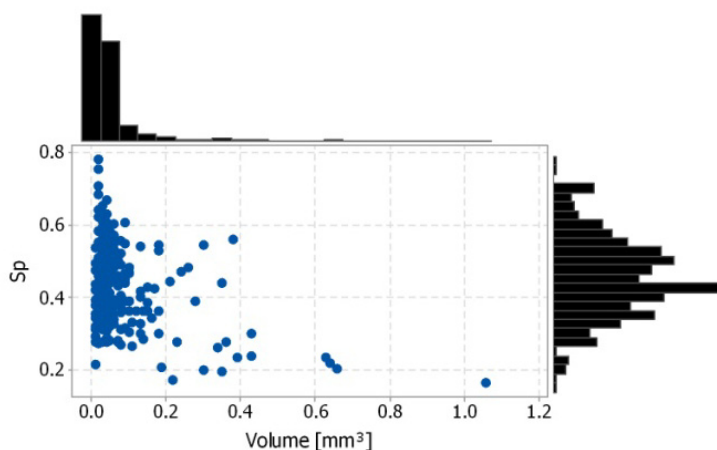


Fig.6.11 Repartiția coeficientului de sfericitate (Sp) în funcție de volumul microporilor pentru proba P1 [104].

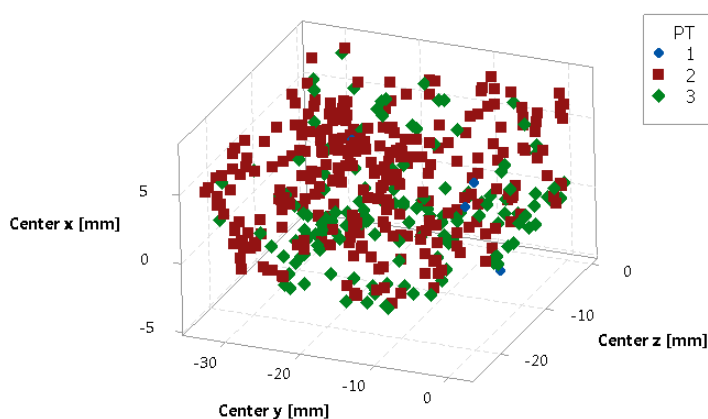


Fig.6.12 Distribuția în spațiu 3D a microporilor în funcție de forma acestora determinate prin coeficientului de sfericitate (Sp) pentru proba P1. Codificările din legenda semnifica 1-por alungit, 2-por neregulat, 3-por regulat.

Forma microporilor a fost caracterizată pe baza coeficientului de sfericitate Sp [126] calculat pe baza relației (1) în care $V_{micropor}$ este volumul microporului și $A_{micropor}$ aria suprafeței microporului [127].

$$Sp = 6\sqrt{\pi} \frac{V_{micropor}}{\sqrt{A_{micropor}^3}} \quad (6.2)$$

Valoarea coeficientului de sfericitate furnizează informații referitoare la forma porilor, astfel pentru valori mai mici de 0,2 microporiile au forma alungită, pentru valori în intervalul (0,2; 0,5) microporiile au forma neregulată iar pentru valori mai mari decât 0,5 microporiile au forma regulată.

Cea mai frecventă clasă de micropori este C1 având volume cuprinse în intervalul 0,01-0,02 mm³ (Figura 6.11). Majoritatea microporilor au forma neregulată, dar au fost identificați și micropori cu forma regulată (Figura 6.12).

CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Cercetările teoretice și experimentale efectuate după susținerea tezei de doctorat și până în prezent, permit evidențierea unor concluzii generale privind cercetările, pe baza cărora rezultă contribuțiile științifice ale autorului în domeniul ingineriei industriale.

Concluzii generale privind cercetările

Rezultatele obținute sunt sintetizate în prezenta teză de abilitare, permițând evidențierea următoarelor concluzii:

A. Cercetări privind optimizarea proceselor de fabricației aditivă pentru teste funcționale (Capitolul 1) permite evidențierea următoarelor concluzii:

- Determinarea unor reguli de poziționare a pieselor pe platforma de construcție pentru optimizarea timpului de fabricație și a consumului de materiale, în cazul fabricației aditive prin procedeele de pulverizare cu jet de materiale (PolyJet) și pulverizare cu jet de liant (Binder Jetting). Aceste reguli de poziționare conduc la reducerea timpului de fabricație, reducerea consumului de materiale și îmbunătățirea calității suprafețelor.
- Cercetările privind optimizarea orientării unei singure piese au evidențiat :
 - ✓ Pentru pulverizare cu jet de material s-a propus "Regula XY-0° în mod lucios";
 - ✓ Pentru pulverizare cu jet de liant, s-a propus "Regula XY-90°";
- Fabricația aditivă permite realizarea în câteva ore a rotorului unei turbine Pelton de tip pico, utile ca sursă de energie pentru standuri experimentale de cercetare și educaționale și pentru îmbunătățirea serviciilor energetice rurale îndepărtate.
- Cercetări privind optimizarea poziționării a două piese din cadrul asamblurilor pentru teste de asamblare. Reguli de poziționare propuse:
 - ✓ "Suprafețele care se assemblează să fie printate în modul lucios, poziționate în sus și plasate în serie în direcția axei X", pentru tehnologia PolyJet.
 - ✓ , regula „Suprafețele care se assemblează să fie poziționate în jos și plasate în serie în direcția axei Y”, pentru pulverizare cu jet de liant.
- Cercetări privind optimizarea poziționării mai multor piese fabricate aditiv în același timp au permis determinarea unor reguli pentru procedeul de pulverizare cu jet de liant și pulverizare cu jet de materiale (PolyJet).

B. Cercetările experimentale privind fabricarea rapidă a sculelor și matrițelor prin procedee aditive (Capitolul 2) permit evidențierea următoarelor concluzii:

- În cadrul direcției de cercetare privind fabricarea rapidă a sculelor utilizând tehnologia de fabricație aditivă prin pulverizare cu jet de liant:

- ✓ Cercetările experimentale au condus la realizarea unor sculele necesare pentru fabricarea indirectă a componentei de tip burduf din ansamblul unei manșe a simulatoarelor de zbor.
- În cadrul direcției de cercetare Cercetări privind fabricarea rapidă a sculelor utilizând procesul de pulverizare cu jet de material prin tehnologia PolyJet:
 - ✓ Fabricarea rapidă a sculelor bazată pe fabricarea aditivă este o metodă importantă utilizată în producția de serie mică, unde sculele convenționale, cum ar fi matrițele prelucrate CNC sunt costisitoare.
 - ✓ Soluțiile prezentate sunt utile pentru realizarea prototipurilor polimerice și testarea funcțională a acestora. Au fost experimentate două tehnici diferite de realizare a matrițelor pe baza tehnologiei PolyJet și anume obținerea matrițelor flexibile prin metode indirecte și metode directe prin printare 3D.
 - ✓ Cercetările experimentale au condus la obținerea pieselor polimerice prin turnare gravitațională, injecția cu ajutorul unei seringi și formarea prin injecție cu reacție RIM. Materialele RIM au proprietăți mecanice comparabile cu materialele termoplastice folosite în procedeul de injecție plastic.

C. Metodologie și cercetări experimentale privind analiza calității suprafețelor plane fabricate prin procedee aditive (Capitolul 3)

Acest capitol a investigat performanța unui proces AM de tip pulverizare cu jeturi de materiale și a caracterizat materialele AM în ceea ce privește calitatea suprafeței pe baza unei metodologii noi, rezultând următoarele concluzii:

- ✓ Piese fabricate aditiv pentru aplicații industriale necesită o calitate a suprafeței corespunzătoare cerințelor din industrie.
- ✓ Implementarea AM pentru pre-producție și serie scurtă depinde de repetabilitatea calității suprafeței pieselor cuantificate de rugozitatea acestora.
- ✓ O familie de artefacte pentru investigarea calității suprafețelor a fost propusă ținând cont de diversele dimensiuni ale platformelor de lucru ale sistemelor AM și pentru a satisface cerințele diverșilor clienți. Folosind tehnici de proiectare parametrizată au fost propuse opt configurații diferite de design ale artefactului.
- ✓ Unul dintre principalele avantaje ale noului artefact față de alte artefacte masive este volumul său mic, ceea ce duce la un consum mai mic de materiale, rezultând costuri de producție mai mici.
- ✓ Forma artefactului este cât se poate de simplă pentru a reduce timpul de fabricație și consumul de materiale. De asemenea, simplitatea formei artefactului cu plăcuțe plane ajută la reducerea posibilităților de erori umane la efectuarea măsurărilor.
- ✓ Orientările de bază ale artefactelor permit caracterizarea performanțelor de calitate ale suprafeței pieselor realizate pe un anumit sistem AM în trei direcții de bază.

- ✓ Metodologia propusă permite evaluarea calității suprafețelor obținute printr-un procedeu de fabricație aditivă și poate testa precizia mașinilor AM.
- ✓ Valorile experimentale ale rugozității suprafeței (Ra) pentru procesul PolyJet având finisajul mat au fost determinate în intervalul 0,5–15 micrometri, cu o valoare maximă pentru orientarea plăcuței la 75–85° și o tendință de scădere la 7 micrometri pentru 90°. Artefactul imprimat în finisaj lucios, orientat perpendicular pe direcția de scanare, a dat cele mai bune rezultate în ceea ce privește rugozitatea, cu valori în intervalul 0,5–4 micrometri.
- ✓ Dezavantajele finisajului lucios includ unele probleme de calitate a suprafeței, cum ar fi striații la orientări ale plăcuțelor între 75° și 85° și o tranziție de frontieră între zonele mate și lucioase.
- ✓ Din cercetările experimentale a rezultat că cei mai influenți factori asupra rugozității suprafeței pentru procesul PolyJet sunt orientarea plăcuțelor, tipul de finisare și interacțiunea lor.

Alegând cu atenție configurația de design a artefactului de inspecție a suprafeței și selectând factorii de control care afectează calitatea suprafeței, se pot proiecta experimente, pe baza metodologiei propusă, pentru alte procese AM folosind diferite tipuri de materiale. Astfel, **metodologia poate fi utilizată pentru a evalua și compara performanța aceleiași mașini AM în timp sau a efectua un studiu comparativ al performanțelor între diverse sisteme AM.**

D. Metodologie și cercetări experimentale privind analiza calității suprafețelor aerodinamice fabricate prin procedee aditive (Capitolul 4)

O scară universală de rugozitate care să poată descrie suprafețele pieselor, în funcție de procedeu de fabricație aditivă și materialul folosit, este necesară în studiile aerodinamicii experimentale pentru teste în tunele aerodinamice și investigații privind curgerea fluidelor. Acest capitol contribuie la caracterizarea calității suprafeței (rugozitate) artefactelor tip profil aerodinamic și a aripilor realizate prin procesul de fabricație aditivă de pulverizare cu jet de materiale. Noua metodologie bazată pe locații de interes aerodinamic pe artefacte și DOE poate fi utilizată pentru a caracteriza componentele aerodinamice fabricate prin diverse procedee AM. Pe baza cercetărilor din acest capitol rezulta următoarele concluzii:

- ✓ Metodologia propusă permite evaluarea calității suprafeței aerodinamice într-un mod simplu, pe baza unei scheme de măsurare a rugozității pe profiluri aerodinamice.
- ✓ O distribuție neomogenă a rugozității suprafeței pe profile aerodinamice a fost determinată în cazul tehnologiei PolyJet folosind sistemul de fabricație aditivă EDEN 350. Aceasta se explică prin prezența a diferitelor inclinații ale suprafeței pe zonele profilului aerodinamic, cum ar fi marginea anterioară (bordul de atac), zona centrală și marginea posterioară (bordul de fugă).
- ✓ Valorile experimentale ale rugozității (Ra) ale artefactului tip profil aerodinamic printat cu finisaj mat au fost determinate în intervalul 1,06 până la 3,62 micrometri

pentru orientarea YX și 1,74 până la 2,46 micrometri pentru orientarea XY. Rugozitatea artefactelor tip profil aerodinamic printate în finisaj lucios a prezentat valori mai mari decât a profilului cu finisaj mat, în intervalul de la 5,72 până la 11,3 micrometri pentru orientarea XY și 6,4 până la 8,68 micrometri pentru orientarea YX.

- ✓ Un dezavantaj al finisajului lucios include apariția unor defecte de suprafață, cum ar fi suprafețele rugoase, determinate prin inspecție vizuală, microscopie și studii teoretice.
- ✓ Factorul cu influența cea mai mare asupra rugozității suprafeței profilului aerodinamic pentru procesul PolyJet a fost tipul de finisare a suprafeței.
- ✓ Pe baza simulărilor și a rezultatelor obținute în urma screening-ului DOE, s-a stabilit că o configurație optimă de printare 3D pentru profilele aerodinamice fabricate prin tehnologia PolyJet este XY mată. În plus, studiile de microscopie au arătat că artefactele aerodinamice printate în modul mat prezintă o suprafață omogenă.

E. Metodologie și cercetări experimentale privind analiza capacității sistemelor și proceselor în fabricația aditivă (Capitolul 5) contribuie la caracterizarea acurateții dimensionale, a repetabilității, a performanței sistemelor AM și a capacității proceselor AM care folosesc polimeri. Metodologia utilizată pentru controlul calității în fabricația aditivă permite implementarea proceselor AM pe bază de polimeri în producție. În plus, această metodologie poate fi utilizată ca tehnică de monitorizare a mașinilor AM. Se desprind următoarele concluzii:

- ✓ Proprietățile polimerilor utilizați în procesele de fabricație aditivă sunt relevante pentru precizia dimensională a pieselor și necesită o evaluare și cuantificare diferită a toleranțelor geometrice în comparație cu materialele metalice și materialele plastice.
- ✓ Implementarea AM pentru seria de pre-producție și producția de serie scurtă depinde în principal de repetabilitate, capacitatea mașinii și capacitatea procesului.
- ✓ Valorile indicilor de capacitate a sistemului și a procesului (C_m , C_{mk} , C_p și C_{pk}) ai pieselor circulare produse din materialul Objet VeroBlue RGD840 prin tehnologia PolyJet au fost mai mari de 1,67 în intervalul de toleranță capabil de 0,22 mm. Abaterea limită inferioară capabilă și abaterea limită superioară capabilă a artefactului circular au fost -0,13 mm și, respectiv, +0,09 mm.
- ✓ Din analiza statistică efectuată asupra dimensiunilor geometrice ale artefactelor circulare, distribuția măsurătorilor a arătat că acestea nu erau centrate pe valoarea nominală. Acestea au fost situate în apropierea limitelor superioare de toleranță pentru dimensiunea diametrului (D) și, respectiv, în apropierea limitelor inferioare de toleranță pentru dimensiunea înălțimii (H).

- ✓ Marginile rotunjite ale artefactului determinate prin investigațiile microscopice explică de ce distribuția măsurătorilor de înălțime a fost situată în apropierea limitelor inferioare de toleranță și a fost mai mică decât valoarea nominală. În plus, valorile înălțimii rezultate din măsurători au fost mai mici decât valoarea nominală.
- ✓ S-a determinat gradul internațional de toleranță pentru artefactele circulare fabricate din polimeri între IT8 și IT10, conform standardului ISO-286. Gradul IT al dimensiunii înălțimii a fost IT10 pentru 86% dintre specimene și, respectiv, 58% pentru caracteristica diametru.
- ✓ O piesa de dimensiuni mici, fabricata în lot de minimum 50 de bucăți, trebuie utilizată pentru determinarea capabilității sistemului AM, în scopul minimizării consumului de materiale și a costurilor aferente. Trei loturi de 50 de specimene trebuie fabricate pentru studiul capabilității procesului.
- ✓ Metodologia propusă permite caracterizarea capabilității altor mașini și procese AM care utilizează alte tipuri de materiale.

F. Cercetările experimentale privind analiza structurii interne a multi-materialelor prin control nedistructiv (Capitolul 6) contribuie la caracterizarea defectelor interne de tip pori a unui panou format din mai multe materiale stratificate. Se desprind următoarele concluzii:

- ✓ Metodologia propusă de analiza a defectelor interne prin CT a unui multi-material a indicat pentru panoul multi-material analizat o valoare medie de 0,146% pentru porozitatea compozitului 1 și, respectiv, 31.3% pentru compozitul 2.
- ✓ Porozitatea medie a unui panou de dimensiuni mari poate fi obținută ca o medie aritmetică a porozităților determinate pentru cinci eșantioane tăiate din panou, pe baza unei metode de eșantionare.
- ✓ S-a determinat o distribuție omogenă a porilor în compozitul multi-material pentru toate probele. Majoritatea porilor detectați prin analiza CT s-au dovedit a fi de formă neregulată.

Contribuții personale

În urma cercetărilor prezentate în cadrul acestei teze de abilitare, autorul și-a adus o serie de contribuții personale originale în domeniul fabricație aditive, și anume următoarele:

- 1) Realizarea unei sinteze privind fabricația aditivă prin procedeul de pulverizare cu jet de materiale PolyJet (material jetting) și a unei schematizări complete a funcționării în detaliu a sistemului de fabricație aditivă aferent EDEN 350;
- 2) Realizarea unei sinteze privind fabricația aditivă prin procedeul de pulverizare cu jet de liant (binder jetting) și a unei schematizări complete a funcționării în detaliu a sistemului de fabricație aditivă aferent ZCorp 310 Plus;

- 3) Proiectarea și fabricarea a două artefacte de test pentru investigarea calității suprafețelor pieselor fabricate prin procedee aditive, precum și proiectarea unui dispozitiv modular utilizat pentru măsurarea rugozității artefactelor care excelează prin simplitate și eficiență;
- 4) Proiectarea și fabricarea unui artefact de test pentru determinarea capabilității sistemelor de fabricație aditivă și a proceselor de fabricație aditivă;
- 5) Realizarea unei metodologii de cercetare experimentală, în 8 etape pentru investigarea calității și determinarea rugozității suprafețelor plane inclinate, pe baza unui artefact de test parametrizat;
- 6) Realizarea unei metodologii de cercetare experimentală pentru investigarea calității suprafețelor și determinarea rugozității suprafețelor aerodinamice utilizând un artefact de test de tip profil aerodinamic;
- 7) Realizarea unei metodologii în 7 etape, care integrează instrumente privind controlul calității bazate pe standarde, pentru evaluarea variabilității sistemului de măsurare, a repetabilității și reproductibilității fabricației aditive, determinarea capabilității sau performanței unui sistem AM și a capabilității unui proces de fabricație aditivă;
- 8) Determinarea pe cale experimentală a rugozității suprafețelor pieselor fabricate aditiv prin procedeul PolyJet;
- 9) Determinarea pe cale experimentală a gradului internațional de toleranță pentru artefactele circulare fabricate din rășini polimerice prin procedeul PolyJet;
- 10) Determinarea indicilor de capabilitate ai sistemului de fabricație și ai procesului (C_m , C_{mk} , C_p și C_{pk}) pentru piese circulare precum și a intervalului de toleranță capabil în cazul procedeei de fabricație aditivă PolyJet.
- 11) Determinarea unor reguli de orientare și poziționare a pieselor pe platforma de construcție pentru optimizarea timpului de fabricație și a consumului de materiale, în cazul fabricației aditive prin procedeele de pulverizare cu jet de materiale și pulverizare cu jet de liant.
- 12) Determinarea unui model matematic a distribuției rugozității suprafeței pentru procesul PolyJet care să țină cont de post-procesare, și validarea modelului prin încercări experimentale.
- 13) Realizarea unei metodologii privind analiza calității structurii interne, și anume analiza porozității, prin control nedistructiv CT a multi-materialelor stratificate.
- 14) Determinarea porozității fiecărui material component al unui multi-material stratificat prin aplicarea unei metode corelate de analiză a fișierelor STL și CSV rezultate din CT.

B1.2. REALIZĂRI PROFESIONALE

B.1.2.1. Studii și experiență profesională

Studii universitare de licență (5 ani): 1990-1995, Universitatea Transilvania din Brașov, Facultatea Tehnologia Construcțiilor de Mașini, Diplomă de licență seria N, nr. 000945, Specializarea Construcții Aeronautice, absolvită cu **media anilor de studii 9,02, media 10 la examenul de diplomă** (3 probe scrise la materii diferite și susținerea proiectului de diplomă) și **media de absolvire 9,51**.

Studii aprofundate universitare și titlul de Magister/Master: 1995-1996, Universitatea Transilvania din Brașov, Facultatea Tehnologia Construcțiilor de Mașini, Diplomă de studii aprofundate seria B nr. 0004357, Specializarea Inginerie tehnologică asistată de calculator, absolvită cu **media 9,90 și 10 la examenul de dizertație**.

Studii de doctorat: 1997-2003, la Universitatea Transilvania din Brașov. Diplomă de doctor, seria C, nr. 0004774, distincția CUM LAUDE, confirmată de CNATDCU, prin Ordinul Ministrului Educației și Cercetării nr. 5663 din 15.12.2003, în domeniul fundamental Științe Inginerești, domeniul Inginerie industrială. Titlul tezei de doctorat: Concepția și fabricația pieselor de formă complexă (conducător științific prof. dr. ing. Nicolae Valentin Ivan).

Stagii de pregătire doctorală în străinătate:

- ✓ 1998, (5 săptămâni), Quality in engineering design, Stagiul de documentare doctorală și perfecționare, Programul TEMPUS, JEP 11284, South Bank University, London, U.K.;
- ✓ 2000, (6 luni), Stagiul doctoral, Bursă Socrates, finalizat prin Rapport de stage - "Conception et fabrication des pieces de formes complexes", Institute Universitaire de Technologie, Groupe de Recherche en Production Integree, Université Paris 13, Saint Denis, Paris, Franta, 2000, directeur de recherche Prof. R. Ponsonnet, îndrumător conf.dr.ing Kwamivi Mawusi.

Certificatul de pregătire pedagogică a personalului didactic nr. 3250/8.12.1992 a fost obținut în timpul studiilor de licență în urma participării la modulul de cursuri respective și a absolvirii prin examen a acestora.

Specializări și calificări în domeniul Tehnologiilor asistate de calculator (Computer aided Technologies), incluzând Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing / Product Data Management / Rapid Prototyping / Rapid Manufacturing / Rapid Tooling / Additive Manufacturing (CAD/CAM/PDM/RT/AM):

- ✓ 1995 (2 săpt.), Curs de specializare în Proiectare asistată de calculator cu AutoCAD, Certificate of Complementation AutoCAD R12 - Level 2, Centrul ATC-TCM Brașov, Facultatea de Inginerie Tehnologică, Universitatea Transilvania din Brașov, diploma UTCM-BV-001209;
- ✓ 1996, (2 săpt.), Curs de specializare în Proiectare asistată de calculator cu AutoCAD, Certificate of Complementation AutoCAD R12 - Level 1, Centrul ATC-TCM Brașov,

Facultatea de Inginerie Tehnologică, Universitatea Transilvania din Braşov, diploma UTCM-BV-001222;

- ✓ 1996, (2 săpt.) Curs de specializare în Programare / proiectare asistată de calculator cu limbajul AutoLISP, Certificate of Complementation AutoCAD R12 – AutoLISP, Centrul ATC-TCM Braşov, Facultatea de Inginerie Tehnologică, Universitatea Transilvania din Braşov, diploma UTCM-BV-001222;
- ✓ 2000, (2 luni), Curs de specializare în softul CATIA v4.4, Institut Universitaire de Technologie de Saint Denis, Groupe de Recherche en Production Intégrée, Université Paris 13, Saint Denis, Paris, Franţa;
- ✓ 2001, (1 săpt.), Curs de specializare pentru softul CAD: PowerShape DELCAM, Catedra TCM, Universitatea Transilvania Braşov;
- ✓ 2001, (1 săpt.), Curs de specializare pentru softul CAM: PowerMill DELCAM, Catedra TCM, Universitatea Transilvania Braşov;
- ✓ 2002, (2 săpt.), Curs de specializare pentru softul CAD: SolidWorks, CADWorks S.R.L.; 2007, Diplomă "Certified SolidWorks Professional", <http://www.solidworks.com>, USA.
- ✓ 2008, Curs de specializare pentru softul PDM (Product Data Management): PDM Works şi PDM Enterprise, Aerofina Bucureşti;
- ✓ 2010 (1 săpt.), Curs de specializare in Rapid prototyping şi rapid tooling, Objet Geometries, Budapesta, Ungaria;
- ✓ 2008 (2 zile), Curs de specializare in fabricație aditivă prin procedeul de pulverizare cu jet de materiale (Polyjet) pentru sistemul EDEN350, Departamentul de Ingineria Fabricației, Universitatea Transilvania din Braşov;
- ✓ 2007 (2 zile), Curs de specializare in fabricație aditivă prin procedeul de pulverizare cu jet de aditiv (3DP) pentru sistemul ZPrinter 310 Plus, Departamentul de Ingineria Fabricației, Universitatea Transilvania din Braşov;
- ✓ 2012 (1 săpt.), Curs de specializare in fabricație aditivă prin procedeul de topire selectivă a pulberilor metalice (Selective laser melting) pentru sistemul SLM250HL, Institutul de cercetare al Universității Transilvania din Braşov;
- ✓ 2020 (1 zi), Curs de specializare in Printare 3D prin extrudare termoplastica (Fused Filament Fabrication) pentru imprimanta 3D BCN3D Sigma X, Departamentul de Ingineria Fabricației, Universitatea Transilvania din Braşov;
- ✓ 2021 (1 săpt.), Curs Web de "Design in Additive manufacturing", Gen3D, certificate nr. A000185.

Specializări in domeniul Managementului calității:

- ✓ 2005, (2 săpt.), 1ère Ecole d'ete Franco-roumaine sur La Qualite Dans L'industrie, L'Université Transilvania de Braşov (Roumanie) en partenariat avec L'Université de Technologie Belfort-Montbéliard (France);

- ✓ 2012 (1 săptăm.), Curs de specializare in Tehnici de scanare 3D – Reverse Engineering și Metrologie, pentru scannerul 3D COMET – Steinbichler, Geomagic, Universitatea Transilvania din Brașov;

Experiență profesională:

- ✓ In anul 1996 (9 luni) am activat ca inginer la firma SC COMOPREX SRL din Brașov, având activități privind proiectarea asistată de calculator;
- ✓ In anul 1996 am ocupat prin concurs postul de preparator universitar titular in cadrul Catedrei Tehnologia Construcțiilor de Mașini din Facultatea de Inginerie Tehnologică, Universitatea Transilvania din Brașov, urmând treptele carierei universitare și obținând prin concurs titlurile universitare de asistent universitar (1999-2002), șef de lucrări universitar (2002-2008) și conferențiar universitar (2008-prezent), având activități de curs, laborator și proiect prestate in cadrul Catedrei TCM și in prezent Departamentul de Ingineria Fabricației, facultatea de Inginerie Tehnologică și Management Industrial;
- ✓ Intre anii 2006-2008, in paralel cu activitatea desfășurată la Universitate, am ocupat postul de inginer de cercetare și dezvoltare la ELDON Group (fracțiune de normă), având ca principale activități dezvoltarea de noi produse, proiectarea asistată de calculator de piese și ansambluri din tabla, activități de recrutare de ingineri si formarea nucleului noului colectiv CAD al companiei in Romania.
- ✓ Intre anii 2012-2014, suplimentar față de activitatea desfășurată la Universitate, am ocupat postul de Senior Product Development Engineer la Route 66 S.R.L. (fracțiune de normă), având ca principale activități cercetare, proiectare, dezvoltare, prototipare, testare și elaborare brevete. Am coordonat activitățile privind întocmirea documentației de suport și activitățile de testare pentru a asigura conformitatea cu specificațiile și cerințele clienților precum și activitatea de management in dezvoltarea de noi produse.

B.1.2.2. Activitatea didactică

Activitatea didactică se desfășuare în cadrul departamentul de Ingineria fabricației al Facultății de Inginerie Tehnologică și Management Industrial, Universitatea Transilvania din Brașov in următoarele direcții principale:

- susținerea de **cursuri și ore de aplicații (laborator și proiect), coordonare proiecte de diplomă pentru programele de licență** Tehnologia Construcțiilor de Mașini, Construcții aerospațiale și **programul de masterat** Ingineria Fabricației Inovative, toate acestea in cadrul catedrei Tehnologia Construcțiilor de Mașini și ulterior in departamentul de Ingineria fabricației.
- susținerea **activităților de practică tehnologică a studenților și îmbunătățirea bazei materiale** a laboratoarelor din cadrul departamentului printr-o colaborare strânsă cu partenerii din mediul economic, prin încheierea de contracte cadru de colaborare,

contracte de practica, contracte de sponsorizare, vizite in întreprinderi și coordonare stagii de practică.

- susținerea, in anii anteriori, de **cursuri de formare continuă pentru mediul industrial și mediul universitar** (Proiectare 3D avansată utilizând SolidWorks, Proiectare in CATIA) in cadrul Centrului de Formare Continuă al Universității Transilvania din Brașov.
- susținerea, in anii anteriori, de **cursuri și ore de aplicații pentru mediul preuniversitar** in calitate de Expert pe termen scurt - Formator in cadrul programului / proiectului POS DRU/87/1.3/S/62339, BACOV-IA, 2010–2012.
- implicarea, in anii anteriori, in **organizarea unei școli de vară și susținerea de cursuri și ore de aplicații pentru studenți** in cadrul acestora. Astfel, am susținut cursuri și ore de aplicații la școala de vară Aircraft: There's no flying without wings (1-10 iulie 2018) desfășurată în cadrul departamentului de Ingineria fabricației a Universității Transilvania din Brașov, la care au participat 27 de studenți din 11 țări.

Prima direcție a activității didactice este cea de baza desfășurată in cadrul departamentul de Ingineria fabricației, unde susțin **cursuri și ore de aplicații (laborator și proiect)** la următoarele discipline:

- Licența: Sisteme CAD/CAM/CAPP (an 3 TCM și CA), Materiale compozite. Tehnologii și aplicații (an 3 CA), Fabricarea pieselor din mase plastice și compozite (an 3 TCM și IMC) și Tehnologia structurii aeronavelor (an 4 CA).
- Master: Tehnologii performante de fabricație (an 1), programul de studii de masterat Ingineria Fabricației Inovative.

În anii anteriori am predat cursuri și am susținut activități didactice de proiect, laborator, seminar la disciplinele:

- Licența: Sisteme CAD-II (in limba franceza, an 3, 2008), Medii avansate de proiectare (an 5, 2008).
- Master: Inginerie concurenta (in limba franceza, an 1, 2008).

Am elaborate **17 cărți / capitole de specialitate / suporturi de curs / îndrumare ca autor și 2 cărți ca editor**, astfel:

- **7 capitole de specialitate** (din care 5 capitole ca prim autor) **publicate in edituri internaționale** [4, 21, 128-133];
- **4 cărți de specialitate** (1 prim autor) publicate la edituri naționale [47, 133, 134, 135];
- **2 cărți in calitate de editor la editură internațională** [136, 137];
- **6 suporturi de curs și îndrumare** (2 ca prim autor) publicate la edituri naționale [138-143].

Coordonarea proiectelor de diplomă și de dizertație a studenților din cadrul departamentului de Ingineria fabricației, dar și a unor studenți ERASMUS. Astfel, in perioada 2000 pana in prezent am coordonat 137 de lucrări de diplomă / disertație, din care unele au fost in colaborare cu firme. De asemenea, am coordonat activitatea de pregătire a proiectelor

de diplomă pentru studenți ERASMUS, veniți în cadrul departamentului nostru, de la Politehnica din Torino, Italia (în anul 2004) și Politehnica din Madrid, Spania (în anul 2018).

Am **coordonat activitățile de practică tehnologică** a studenților, încheind contracte de practică anuale începând cu anul 2008 până în prezent. Prin atragerea de contracte de sponsorizare din partea companiilor am contribui la îmbunătățirea bazei materiale a laboratoarelor din cadrul departamentului de Ingineria fabricației, cu structuri compozite și structuri metalice ale unor produse complexe. Astfel, o structură de elicopter evaluată la 95214 lei a fost obținută pe baza unui contract de sponsorizare nr. 1830 / 20.02.2019.

Organizare de seminarii naționale bianuale CAD/CAM/CAE/PDM/RP –SolidWorks (2000-2017) în parteneriat cu compania CAD Works SRL și Universitatea Transilvania din Brașov. Tematica acestor seminarii naționale este în **concordanță cu disciplinele predate** și de asemenea **în concordanță cu tematica activității de cercetare**. La aceste seminarii au participat reprezentanți ai companiilor din zona Brașovului, precum și cadre didactice și cercetători din Universitatea Transilvania din Brașov. Scopul acestor seminarii naționale este de:

- ✓ a crea legături între mediul economic și mediul universitar,
- ✓ a crea legături în mediul universitar între diverse departamente cu profil tehnic ale facultăților Universității Transilvania din Brașov, precum și
- ✓ a prezenta cele mai noi soluții de proiectare, fabricație asistată de calculator, fabricație aditivă și tehnologii de scanare 3D.

B.1.2.3. Activitatea de cercetare științifică

Activitatea de cercetarea științifică reprezintă o componentă importantă a activității mele desfășurată în cadrul departamentului de Tehnologia construcțiilor de mașini și ulterior Ingineria fabricației, a Universității Transilvania din Brașov. Am avut în vedere patru componente principale privind cercetarea:

- ✓ cercetare științifică **în cadrul granturilor;**
- ✓ cercetare științifică **în cadrul contractelor/proiectelor cu mediul socio-economic;**
- ✓ cercetare științifică **cu studenții în cadrul proiectelor interne câștigate prin competiție.**
- ✓ cercetare științifică în cadrul unor **proiecte externe în cadrul unor companii.**

Am obținut **diploma de doctor cu distincția Cum Laude** în domeniul Inginerie Industrială la aceeași universitate în anul 2003 cu teza „Concepția și fabricația pieselor de forme complexe” sub coordonarea științifică a domnului prof.dr.ing. Nicolae Valentin Ivan. În cadrul acestei teze am propus noi concepte și strategii ingineresti privind concepția și fabricația produselor. Astfel, a fost propus un nou concept ingineresc, și anume cel de "entitate constructiv-tehnologică" element integrator în ingineria pieselor de formă complexă din prisma inginerie simultane.

Activitatea de cercetare științifică după susținerea tezei de doctorat a continuat în direcția noilor strategii ingineresti privind concepția și fabricația produselor industriale prin utilizarea

tehnicienilor CAD/CAM și a Fabricației aditive. Astfel activitatea mea de cercetare s-a focusat pe următoarele **direcții**:

- ✓ **Fabricația aditivă** incluzând conceptele de Rapid Prototyping, Rapid Manufacturing și Rapid Tooling;
- ✓ **Proiectarea asistată de calculator** incluzând utilizarea softurilor performante (CATIA, SolidWorks) în dezvoltarea de produse industriale personalizate, precum și aplicații de scanare 3D prin conceptul de Reverse Engineering;
- ✓ **Fabricația și analiza materialelor compozite** cu matrice plastice și matrice metalice.

Începând cu anul 2008 sunt coordonator al laboratorului de Tehnologii Industriale Inovative parte integrantă a Platformei pentru dezvoltări tehnologice inovative (PLADETINO). Activitatea acestui laborator este focusată pe fabricația aditivă, rapid tooling și reverse engineering.

Am desfășurat activități de cercetare în cadrul unor contracte de cercetare științifică, câștigate prin competiții naționale și internaționale, sau contracte de cercetare științifică cu mediul industrial, în calitate de director de proiect sau membru pentru anumite teme de cercetare în domeniul ingineriei industriale și management. De asemenea, în cadrul unor proiecte externe am desfășurat activitate de cercetare în cadrul unor companii, cum ar fi ELDON S.R.L. și ROUTE 66.

Am desfășurat activități de cercetare în cadrul a **34 granturi / proiecte câștigate prin competiție sau contracte cu mediul socio-economic**:

- ✓ **4 proiecte de cercetare științifică, în calitate de director de proiect, câștigate în competiție internațională.**
- ✓ **19 contracte naționale de cercetare cu mediul socio-economic, în calitate de director de proiect, câștigate cu 9 companii, și anume SC Autoliv SA Brașov, SANGARI Engineering SRL București, Eldon Romania SRL, SC Compozite SRL Brașov, SC Stabilus SA Brașov, SC RADCOM SA București, SC TATA Technologies SRL Brașov, SC WENGLOR SRL Sibiu, Airbus Helicopter Romania SRL și SC GLORIOSA SRL Brașov.**
- ✓ **11 granturi, proiecte, contracte științifice în calitate de membru al echipei de cercetare, dintre care: 1 contract Internațional, 5 contracte CNCSIS și 3 contracte de cercetare științifică cu mediul socio-economic.**

Proiectele de cercetare câștigate în competiții internaționale sunt următoarele:

1. Flux solar sintering of novel carbon fibre reinforced AlSi10Mg metal matrix composites, Agenția de finanțare: European Union's Horizon 2020, Tip proiect: Solar Facilities for the European Research Area - Third Phase (SFERA-III), Grant Agreement No. 823802, nr. de înregistrare: SURPF2101280004, anul 2021, centrul de cercetare: IMDEA Energy Institute, Madrid, Spania, valoare proiect: 12.658,8 Euro. Proiectul a vizat realizarea unor materiale compozite noi de înaltă rezistență și ușoare obținute prin sinterizare solară, pe bază de pulberi metalice din aluminiu și fibre scurte.

2. Flux solar sintering of 3D printed metal-polymer, Agenția de finanțare: European Union's Horizon 2020, Tip proiect: Solar Facilities for the European Research Area - Third Phase (SFERA-III), Grant Agreement No. 823802, nr. de înregistrare: SURPF2101280004, anul 2022, centrul de cercetare: IMDEA Energy Institute, Madrid, Spania, in curs de derulare. Proiectul vizează realizarea unor piese metalice printate 3D și sinterizate solar.
3. Microstructural analysis on advanced composites of Carbon Fiber reinforced PolyPhenylene Sulfide manufactured by Thermoforming, Agenția de finanțare: European Union's Horizon 2020, Tip proiect: Research and Innovation Program Transmission Electron Microscopy - Third Phase (ESTEEM3), Grant Agreement No. 823717, nr. de înregistrare: 456 - MiCFPPS-Therm, anul 2021, centrul de cercetare: JSI Ljubljana, Slovenia, valoare proiect: 4554 Euro. Proiectul a avut drept scop caracterizarea materialelor compozite pe baza de fibre de carbon și rășini termoplastice (CF-PPS) utilizate în industria transporturilor. Eșantioanele au fost realizate prin termoformare și tăiate cu jet de apă sub presiune. În urma cercetărilor a fost elaborat un protocol pentru prepararea eșantioanelor TEM (transmission electron microscope) și caracterizarea EDX (Energy Dispersive Spectroscopy) pentru această categorie specială de materiale. Proiectul a fost compus din mai multe etape, incluzând, pregătirea eșantioanelor la Universitatea Transilvania din Brașov, realizarea de cercetări experimentale la institutul JSI Ljubljana din Slovenia și teste ale materialelor la Institutul ICDT al Universității Transilvania din Brașov.
4. Transmission electron microscopy and statistics on advanced composites of Carbon-Fiber-reinforced PolyPhenylene Sulfide, Agenția de finanțare: European Union's Horizon 2020, Tip proiect: Research and Innovation Program Transmission Electron Microscopy - Third Phase (ESTEEM3), Grant Agreement No. 823717, nr. de înregistrare: 572 – TEM-S-CFPPS, anul 2022, centrul de cercetare: JSI Ljubljana, Slovenia, valoare proiect: 8778,56 Euro. Scopul acestui proiect a fost investigarea, analiza statistică și extinderea cunoștințelor despre interfața materialelor compozite avansate (structură, componentă chimică), dintre fibrele longitudinale și transversale ale țesăturilor de carbon și rășina termoplastică din compozitul CF-PPS pentru materiale pentru transport. Proiectul a constat din etape alternative la Universitatea Transilvania din Brașov și institutul JSI Ljubljana din Slovenia.

Contractele de cercetare cu mediul socio-economic au avut ca domenii de cercetare Fabricația aditivă și tehnologia Reverse engineering, o parte din cercetări bazându-se pe infrastructura Laboratorului de Tehnologii Industriale Inovative (grant Platformă pentru dezvoltări tehnologice inovative - PLADETINO, director prof.dr.ing. Nicolae Valentin IVAN), din cadrul departamentului de Ingineria fabricației iar o altă parte pe infrastructura Institutului ICDT. În cadrul platformei tehnologice PLADETINO, autorul acestei teze de abilitare a obținut un număr de 14 contracte de cercetare științifică, în calitate de director de contract. O parte

din rezultatele acestor contracte de cercetare științifică cu mediul socio-economic au fost publicate în articole în jurnale și la conferințe internaționale [22, 24, 25, 27, 28, 32, 35]. Contracte naționale cu mediul socio-economic obținute de către autor în calitate de director, au avut drept principal scop rezolvarea unor probleme din industrie prin soluții de fabricație avansată inovativă. Aceste proiecte sunt prezentate succint în continuare în funcție de compania beneficiară.

Contractul de cercetare cu firma **Autoliv S.A.** din Brașov (nr. 6428 / 2009), denumit "Cercetări teoretice și experimentale privind prototiparea rapidă a componentelor din sistemele de siguranță ale autovehiculelor" a vizat realizarea prin fabricație aditivă a unor ansambluri funcționale din sistemele de siguranță ale autovehiculelor. Aceste ansambluri fabricate prin tehnologia Polyjet au fost echipate cu componente mecanice și testate în funcționare (Figura B1.2-1). În urma finalizării proiectului, au fost predate beneficiarului un număr de produse iar o mică parte din rezultatul cercetărilor au fost publicate într-un articol în Buletinul Universității Transilvania din Brașov [22] și un capitol de carte într-o editură internațională [21].



Fig. B1.2-1 Ansamblu funcțional din sistemele de siguranță ale autovehiculelor

"Concepția și fabricația inovativă a produselor pentru sectorul educațional și științific" a fost un contract realizat cu firma **SANGARI Engineering S.R.L. din București** (nr. 6427 / 2009-2012) având ca principal scop concepția și fabricația aditivă a unor produse hidrodinamice și aerodinamice pentru teste funcționale în bazine de apă și tunele aerodinamice. Astfel au fost realizate turbine Pelton și profile aerodinamice NACA (Figura B1.2-2). Rezultatele cercetărilor au fost publicate în două articole în revista ISI [25,27], un articol la o conferință internațională [28] și un capitol într-o carte în editură internațională [21].

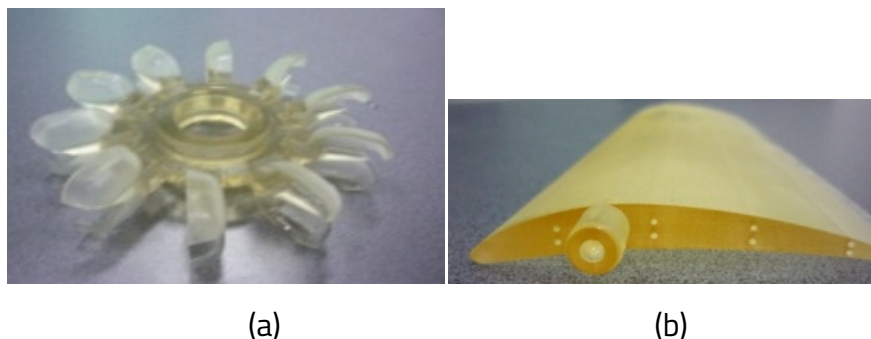


Fig. B1.2-2 Produse realizate în cadrul contractului

Cercetări privind fabricația aditivă a unor componente din plastic pentru sistemul de închidere al dulapurilor industriale, au fost realizate în cadrul a două contracte cu firma **Eldon S.R.L.** din parcul industrial Prejmer (nr. 9290/2010 și nr. 3349/2011). Denumirile acestor

contracte sunt: "Cercetări experimentale privind fabricația rapidă a componentelor din plastic ale dulapurilor industriale" și "Cercetări experimentale privind fabricația rapidă a sistemului de închidere a dulapurilor industriale".

Contractul de cercetare cu firma **SC Compozite SRL** din Brașov (nr. 5516 / 2009) a vizat concepția inovativă și fabricația aditivă a unor calapoade și matrițe pentru realizarea unor componente pentru simulatoarele de zbor ale avioanelor. Un calapod realizat în cadrul acestui contract este prezentat în Figura B1.2-3. O parte din rezultatele cercetărilor au fost publicate într-o lucrare la o conferință internațională [24].



Fig. B1.2-3 Calapod pentru piesa tip burduf

"Cercetări teoretice și experimentale privind fabricația rapidă prin metoda Polyjet a prototipurilor specificate de beneficiar" a fost un contract încheiat cu firma **Stabilus S.A.** din Brașov (nr. 1359/2010). Cercetările din cadrul acestui proiect au condus la realizarea unor produse specificate de beneficiar.

Colaborarea cu firma **RADCOM S.A. București** (2807/ 2011, 18203/ 2013, nr. 1986/ 2016) a fost materializată în 3 proiecte care au vizat cercetări experimentale privind fabricarea aditivă prin tehnologia Polyjet a unor carcase și componente pentru teste funcționale a unor produse folosite în transportul public urban (Figura B1.2-4).

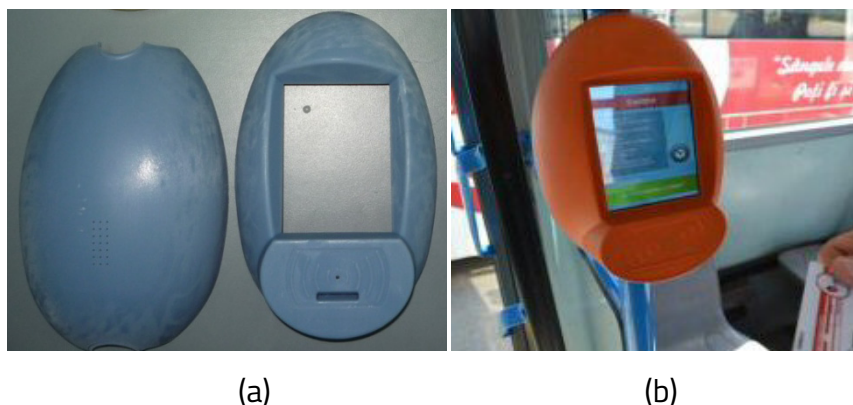


Fig. B1.2-4 Produse pentru transportul public

O parte din rezultatele cercetărilor au fost prezentate la o conferință internațională și publicate într-o revistă indexată BDI [35]. În final sistemul de e-ticketing a fost implementat de către firma respectivă în transportul public din România (Figura B1.2-4).

Trei contracte de cercetare având ca scop realizarea prin fabricație aditivă a unor componente din plastic pentru subsamblurile opto-electronice având încorporați senzori industriali, au avut ca beneficiar compania **SC WENGLOR S.R.L. din Sibiu** (nr. 5442/2010,

nr.9997/2010, nr.2151/13.02.2012): "Cercetări teoretice și experimentale privind prototiparea rapidă a componentelor din produsele electronice și optice", "Cercetări experimentale privind fabricația rapidă a subansamblurilor opto-electronice din componenta senzorilor industriali pentru teste funcționale" și "Cercetări experimentale privind fabricația rapidă pentru teste funcționale a componentelor din sisteme de senzori industriali" . Produsele realizate in cadrul acestor contracte, precum și rezultatele cercetărilor au fost predate beneficiarului.

"Cercetări privind tehnologii de fabricare rapidă pentru industria aeronautică" a fost un contract de cercetare având ca beneficiar firma **Airbus Helicopter Romania S.R.L.** (5319/13.05.2016), realizându-se calapoade pentru materiale compozite. Produsele realizate in cadrul acestor contracte, precum și rezultatele cercetărilor au fost predate beneficiarului.

Un contract de cercetare având ca obiectiv scanarea 3D și reconstrucție modelelor 3D complexe din componenta motoarelor cu ardere interna, a fost derulat cu firma **TATA Technologies S.R.L.** (17918/ 2016): "Cercetări privind tehnologia reverse engineering pentru motoare, rezultatele cercetărilor fiind predate beneficiarului.

Cinci contracte de cercetare privind fabricația aditivă in ingineria industrială a unor componente complexe prin tehnologiile de sinterizare selectiva cu laser (SLS) și depunere de material topit prin extrudare termoplastica (FDM) au fost realizate cu compania **SC GLORIOSA S.R.L.** (17163/2016, 15934/2016, 17894/2018, 7109/12.06.2018, 14397/19.11.2019). Contractele au avut faze in funcție de comenzile beneficiarului. Produsele realizate in cadrul acestor contracte, precum și rezultatele cercetărilor au fost predate beneficiarului.

Autorul tezei de abilitare a fost in calitate de **membru in echipă** în următoarele **11 granturi / proiecte:**

1. Performance improvement by heat treatment in solar furnance of ceramic reinforced aluminium alloy fabricated by friction stir processing, Director de proiect: Folea Milena; Agenția de finanțare: European Comission - Seventh Framework Programme (FP7), Tip proiect: Solar Facilities for the European Research Area - Second Phase (SFERA-II), Grant Agreement No. 312643, nr. de înregistrare: P1602070221, anul 2016, centrul de cercetare: CIEMAT-PSA, Almeria, Spania. Scopul proiectului a fost de a îmbunătăți prin tratament termic în cuptorul solar proprietățile acoperirii ceramice fabricate prin procesare prin "friction-stir processing" pentru aliaje de aluminiu.
2. Sisteme expert de optimizare a proceselor tehnologice (Expert System For Optimisation of Technological Processes-ESOP), Nr.contract:71-133 /18.09.2007, 2007-2010, Nr ani derulare: 3, Calitate: membru; Director de proiect: Prof.dr.ing. Ivan Nicolae-Valentin.
3. PLAtformă pentru DEzvoltări Tehnologice INOvative (PLADETINO). Program CNCSIS de tip platformă, Nr.contract:13/ 2008, Cod CNCSIS 78 perioada: 2006-2008, Nr ani derulare: 2, Calitate: membru; Director de proiect: Prof.dr.ing. Ivan Nicolae-Valentin.

4. IMAN-Inovative Manufacturing Network, Nr. Contract: Project CEEX/PCD, Nr. 41/7.10.2005 2005-2008, Nr ani derulare: 3, Calitate: membru; Director de proiect: Prof.dr.ing. Ivan Nicolae-Valentin
5. Tehnologii inovative pentru realizarea profilelor aerodinamice, Nr.Contract cu terti: 18543/2008 perioada:2008, Nr ani derulare:1, Calitate: membru; Director de contract: Prof.dr.ing. Mircea Viorel Dragoi
6. Optimizarea functionala a structurilor aerodinamice deportante de autovehicule Nr. Contract Idei: ID_758/2008 perioada:2008-2011 Nr ani derulare:3, Calitate: membru; Director de proiect: Prof.dr.ing. Angel Huminic.
7. Optimizări, testări și execuție de repere prototip din industria auto, Nr. contract cu mediul socio economic 16830/30.10.2012, 2012-2015, Nr ani derulare: 4, Calitate: membru; Director de contract: Prof.dr.ing. Gheorghe Oancea.
8. Profesionalizarea carierei didactice - noi competente pentru actorii schimbărilor în educație în județele Bacău și Covasna, Nr. Contract: POSDRU/87/1.3/S/62339, 2010-2013, Nr ani derulare: 3, calitate: membru; Director de proiect: Prof.dr.ing. Anisor Nedelcu
9. Retea nationala de cercetare in domeniul ingineriei integrate a produselor si proceselor - INPRO, Contract CEEX, Modulul I, P-CD, Nr.Contract:243/2006 perioada:2006-2008, Nr ani derulare:3, Calitate: membru; Director proiect prof. dr. ing. George Drăghici, responsabil UTBv prof. dr. ing. Nourăș Barbu Lupulescu.
10. Sisteme CAD/CAM pentru strunjire și frezare, faza 1 Modulul CAD, Nr. Contract: Nr. 33459/2002 -tema 11, Cod CNCISIS: 614 perioada:2002-2003, Nr ani derulare:1, Calitate: membru; Director de proiect: Prof.dr.ing. Nouras Lupulescu.
11. Sisteme CAD/CAM pentru strunjire și frezare, faza 2 Modulul CAM, Nr. Contract: Nr. 33253/2003 -tema 12, Cod CNCISIS: 609 perioada:2003-2004, Nr ani derulare:1, Calitate: membru; Director de proiect: Prof.dr.ing. Nouras Lupulescu.

Diseminarea rezultatelor științifice ale cercetării prin publicarea de articole științifice, în domeniul ingineriei:

- **10 articole științifice în reviste ISI /Clarivate Analitycs (8 articole in calitate de autor principal din care 5 articole ca prim autor și 3 articole ca autor corespondent);**
- **Din totalul articolelor științifice în reviste ISI /Clarivate Analitycs, 6 articole sunt in Q1, 3 articole in Q2 și 1 articol in Q3;**
- **16 articole științifice în volume de conferințe indexate ISI/Clarivate Analitycs;**
- **13 articole indexate BDI (5 articole în reviste; 9 articole în volume de conferințe internaționale);**
- **37 articole în reviste sau volume conferințe neindexate (8 articole în reviste; 29 articole în volume de conferințe);**
- **1 brevet de invenție [147] și 2 cereri de brevete depuse și in curs de evaluare [146, 148].**

Citărilor articolele publicate de către autorul aceste teze de abilitare au determinat următorii indici Hirsh:

- ✓ **h-index=10, i10-index=11** conform **Scholar Google (429 citări)**,
https://scholar.google.ro/citations?user=Q_kd6_wAAAAJ&hl=en
- ✓ **h-index=7** conform **Web of Science Core Collection (142 citări fără autocitări)**,
<https://www-webofscience-com.am.e-nformation.ro/wos/woscc/citation-report/08e5bbc4-fc7a-4988-870d-95e84d729188-41c3a02a>
- ✓ **h-index=7** conform **bazelor de date Scopus (148 citări)**,
<https://www-scopus-com.am.e-nformation.ro/authid/detail.uri?authorId=35325653300&origin=AuthorEval>.

Premierea rezultatelor cercetării:

1. PN-III-P1-1.1-PRECISI-2019-54117. Resurse Umane – Premiarea rezultatelor cercetării - Articole, Competiția 2019, Articol WOS: 000465025400057, rev. Materials, ISSN 1996-1944, ISI Impact Factor: 3.426; SRI: 1.173, zona Q2;
2. PN-III-P1-1.1-PRECBVT-2019-2016. Resurse Umane - Premiarea rezultatelor cercetării - Brevete, Competiția 2019, Titlu brevet: Suport motor turbopropulsor, OSIM Nr. RO129076 B1
3. PN-III-P1-1.1-PRECISI-2020-45042. Resurse Umane - Premiarea rezultatelor cercetării - Articole, Competiția 2020, Articol WOS: 000554639700001, rev. Polymers, ISSN 2073-4360, ISI Impact Factor: 4.329; SRI: 2.037, zona Q1;
4. PN-III-P1-1.1-PRECISI-2020-81265. Resurse Umane - Premiarea rezultatelor cercetării - Articole, Competiția 2020, Articol WOS: 000586198100001, rev. Polymers, ISSN 2073-4360, ISI Impact Factor: 4.329; SRI: 2.037, zona Q1;
5. PN-III-P1-1.1-PRECISI-2019-54117. Resurse Umane - Premiarea rezultatelor cercetării - Articole, Competiția 2020, Articol WOS: 000540220000093, rev. Materials, ISSN 1996-1944, ISI Impact Factor: 3,057; SRI: 2.113, zona Q2;
6. PN-III-P1-1.1-PRECISI-2020-45545. Resurse Umane - Premiarea rezultatelor cercetării - Articole, Competiția 2020, Articol WOS: 000540220000093, rev. Applied Sciences-Basel, ISSN 2076-3417, ISI Impact Factor: 2,679; SRI: 0,923, zona Q2;
7. PN-III-P1-1.1-PRECISI-2021-93031. Resurse Umane - Premiarea rezultatelor cercetării - Articole, Competiția 2021, Articol WOS: 0006901257000011, rev. Sensors, ISSN 1424-8220, ISI Impact Factor: 3.576; SRI: 1.309, zona Q1;
8. PN-III-P1-1.1- PRECISI-2021-91671. Resurse Umane - Premiarea rezultatelor cercetării - Articole, Competiția 2021, Articol WOS: 000660665200001, rev. Sensors, ISSN 1424-8220, ISI Impact Factor: 3.576; SRI: 1.309, zona Q1;

Membru in comitetul editorial a jurnalelor indexate ISI:

- ✓ **Polymers**, https://www.mdpi.com/journal/polymers/special_issues/Advances_Reinforced_Polymeric_Composites

In calitate de **membru in comitetul de recenzori**, am recenzat **64 de articole ISI** (<https://publons.com/wos-op/researcher/1362966/razvan-udriou/peer-review/>) pentru **16 jurnale indexate ISI** din următoarele edituri:

1. **Taylor&Francis**: International Journal of Production Research (Q1);
2. **Elsevier**: Measurement (Q1), Journal of Manufacturing Processes (Q1), Vacuum (Q1);
3. **IEEE Explore**: IEEE Access (Q1);
4. **MDPI**: Materials (Q2), Polymers (Q1), Metals (Q1), Energies (Q2), Applied Sciences (Q2), Coatings (Q2), Sensors (Q1), Drones (Q1), Fractal and Fractional, Crystals, Machines.

Membru în colectivele de recenzori ai revistelor indexate BDI:

1. Acta Innovations
2. Journal of Manufacturing and Materials Processing

Membru în comitetul științific ale unor manifestări științifice internaționale

- ✓ International Conference Modern technologies in manufacturing, MTeM 2019, 9-12 October, Cluj Napoca, 2019, indexata ISI WoS CPCI, MATEC Web of Conferences, ISSN: 2261-236X; <https://mtem.utcluj.ro/committees/>
- ✓ Membru in comitetul științific și recenzor la International Conference on Manufacturing Science and Education, June 2-4, Sibiu, Romania, 2020, indexata MATEC Web of Conferences; https://conferences.ulbsibiu.ro/mse/06.international_committee.html

Membru în colectivele de organizare ale unor manifestări științifice internaționale:

- ✓ International Conference Computing and Solutions in Manufacturing Engineering – CoSME '16, November 3÷4, Brașov, Romania, 2016, <http://old.unitbv.ro/cosme16/en/scope.html>;
- ✓ International Conference Computing and Solutions in Manufacturing Engineering – CoSME '12, September 16÷18, Brașov, Romania, 2012, <http://www.unitbv.ro/cosme12/en/index.html>;
- ✓ International Conference Computing and Solutions in Manufacturing Engineering – CoSME '08, September 25÷27, Brașov, Romania, 2008, http://www.cosme.ro/fisiere/Istoric/CoSME_papers_program08_final.pdf.

Membru, în asociații profesionale și științifice, internaționale și naționale:

- ✓ International Association of Engineers (IAENG)
- ✓ Asociația Universitară de Ingineria Fabricației (AUIF);

Membru in comisii de îndrumare a doctoranzilor. Astfel, am făcut parte din echipa de îndrumare a 2 doctoranzi coordonați de prof. dr.ing Gheorghe Oancea, și anume doctorand George Răzvan Buican in domeniul fabricației aditive prin topire selectiva cu laser a pieselor din otel inox 316L, și doctorand Emilian Ionuț Croitoru in domeniul materialelor compozite armate cu fibre de sticla, carbon și kevlar.

De asemenea, am colaborat științific cu doctoranzi și postdoctoranzi din cadrul departamentului de Ingineria fabricației, realizând pregătirea tehnologică de fabricație aditivă și fabricația aditivă a unor produse din cadrul tezelor de doctorat și postdoctorat, după cum urmează:

- ✓ In cadrul unei colaborări științifice cu doctoranda Folosea Roxana, autoare a tezei intitulată "Tehnica reverse engineering in dezvoltarea de produse" (2008), având conducător de doctorat pe prof.dr.ing. Nicolae Valentin Ivan, am fabricat aditiv prin tehnologia de pulverizare cu jet de liant un arbore in trepte.
- ✓ Colaborarea științifică cu doctorandul Manolescu Alex (2012), sub îndrumarea conducătorului de doctorat prof.dr.ing. Oancea Gheorghe, s-a concretizat in fabricația aditivă prin tehnologia PolyJet a unui prototip de compresor.
- ✓ In cadrul colaborării cu doctorandului Stamate Valentin (2009), având conducător de doctorat pe prof.dr.ing. Nicolae Valentin Ivan, am fabricat aditiv prin tehnologia PolyJet componentele unui ansamblu suport-model stomatologic.
- ✓ In cadrul colaborarii cu postdoctorandul Deaky Bogdan, sub conducerea prof.dr.ing. Nouraș Barbu Lupulescu, am fabricat aditiv patru roti dințate personalizate prin tehnologiile de pulverizare cu jet de aditiv și pulverizare cu jet de materiale (PolyJet).

Activități de cercetare cu studenții, in cadrul a 6 proiecte interne câștigate prin competiție internă (in anii 2015, 2016, 2019, 2020, 2022 și 2023), denumite "Proiectul meu de diplomă" și finanțate de către Universitatea Transilvania din Brașov cu suma de 10000 lei. Am abordat anumite teme de cercetare specifice iar rezultatele obținute s-au concretizat in prototipuri fizice ale unor produse concepute in cadrul acestor proiecte. O parte din rezultatele cercetărilor cu studenții au fost **publicate în jurnale indexate BDI** [144, 145] și a fost elaborată **propunerea unui brevet de invenție** înregistrată la OSIM [146].

De asemenea, studenții coordonați de mine, au participat la Sesiunile cercurilor științifice studentești (in medie 8 lucrări / an). De remarcat este faptul ca o lucrare a obținut premiul I pe facultatea ITMI, precum și premiul I la conferința Absolvenții în Fața Companiilor (AFCO), secțiunea Inginerie mecanică, Inginerie tehnologică, Inginerie economică, organizată de Universitatea Transilvania din Brașov.

B2. PLANURI DE EVOLUȚIE ȘI DEZVOLTARE ALE CARIEREI

Planurile de evoluție și de dezvoltare ale carierei se bazează pe experiența și rezultatele dobândite până în prezent și vizează trei direcții principale:

- Dezvoltarea activității didactice;
- Dezvoltarea activității de cercetare științifică;
- Dezvoltarea activității profesionale.

B2.1. Planuri de dezvoltare ale activității didactice

Activitatea didactică reprezintă o sarcină care trebuie să fie desfășurată în paralel cu activitatea de cercetare, existând o corelație între acestea.

Pentru îmbunătățirea performanțelor în activitatea didactică, voi avea în vedere următoarele patru aspecte importante, și anume:

- ✓ Dezvoltarea activităților individuale;
- ✓ Implicarea în activități colegiale;
- ✓ Parteneriat în activitățile cu studenții;
- ✓ Dezvoltarea activităților de formare continuă pentru mediul industrial.

Dezvoltarea activităților individuale presupune continuarea și aprofundarea activităților mele didactice având următoarele direcții:

- ✓ actualizarea permanentă și îmbunătățirea continuă a conținutului disciplinelor prin materiale didactice în concordanță cu dezvoltările actuale în domeniu și cu cerințele mediului industrial (cursuri, îndrumare de laborator și proiect);
- ✓ consultarea periodică a mediului industrial privind conținutul fișelor disciplinelor predate;
- ✓ dezvoltarea unor discipline noi ținând cont de cerințele și standardele actuale la nivel național, de schimbările viitoare pe piața muncii, precum și de noile calificări și elaborarea de noi materiale pentru acestea care să fie în concordanță cu noutățile din domeniu;
- ✓ integrarea rezultatelor din activitatea de cercetare în cadrul disciplinelor predate la licență, master și de asemenea prezentarea acestora doctoranzilor; Astfel, îmi propun integrarea tuturor rezultatelor cercetării în domeniul Fabricație aditive și a Printării 3D în cadrul cursului și a lucrărilor de laborator la disciplina Tehnologii performante de fabricație, master Ingineria fabricație inovative, o parte dintre rezultate fiind integrate deja.
- ✓ participarea la diverse mobilități de formare, cum ar fi stagii de specialitate, școli de vară sau workshopuri, organizate în țară și străinătate, în scopul îmbunătățirii continue a procesului didactic;
- ✓ implicarea în mobilități de predare în străinătate, în calitate de profesor invitat;

Implicarea in activități colegiale pentru îmbunătățirea activității didactice va cuprinde următoarele:

- ✓ Analiza continua a planurilor de învățământ și îmbunătățirea graduala a acestora, precum și a fiselor disciplinelor, ținând cont de cerințele ARACIS, de cerințele mediului industrial, de progresul tehnic din domeniu, și de standardele europene EUR-ACE (EUROpean-ACcredited Engineer);
- ✓ implicarea pentru înființarea în cadrul departamentului a unor programe de studii in de licență în limba engleză, in domeniul ingineriei industriale;
- ✓ promovarea imaginii departamentului de Ingineria fabricației, a facultății ITMI și a Universității Transilvania din Brașov în mediul International;
- ✓ identificarea și atragerea unor posibili candidați pentru consolidarea colectivului departamentului de Ingineria fabricației.

Parteneriat in activitățile cu studenții având următoarele priorități:

- ✓ Realizarea unui proces educațional centrat pe student, în concordanță cu cerințele pieței muncii, urmărind următoarele rezultate specifice ale învățării: cunoaștere și înțelegere, analiza ingineriasca, proiectare ingineriască, investigație profesională, practică ingineriasca, analiză critica, comunicare și lucrul in echipă;
- ✓ îmbunătățirea continuă a activității de predare prin utilizarea unor mijloace moderne de predare și transmitere / aprofundare a informațiilor utilizând platforma e-learning;
- ✓ realizarea unui echilibru între cunoștințele teoretice și aplicațiile practice;
- ✓ stimularea studiului și cercetării individuale sau în grupuri mici, prin alocarea de teme de casă care să completeze activitățile de predare;
- ✓ coordonarea unor proiecte de diplomă pentru programul de studii TCM și CA, precum și a unor proiecte de disertație la masterul Ingineria fabricației inovative, prin propunerea unor teme de actualitate;
- ✓ realizarea de acorduri de parteneriat și acorduri de practica cu mediul industrial pentru studenți și de asemenea organizarea de vizite in companii industriale;
- ✓ planificarea unor întâlniri periodice a studenților cu reprezentanți ai mediului industrial în scopul prezentării ofertelor de practica și intership, precum și a propunerii unor teme pentru proiecte de diplomă și disertații dezvoltate în parteneriat cu firme: SC Premium Aerotec, SC IAR SA, SC Siemens, SC Aerostar Bacău etc.;
- ✓ invitarea unor experți din cadrul mediului industrial pentru a ține prelegeri studenților;
- ✓ implicarea in organizarea unor scoli de vara pentru studenți, împreuna cu mediul economic. Astfel, începând cu anul 2022 se desfășoară o Școala de vară anuală, organizata împreuna cu firma Siemens, denumita "Simulare în Inginerie Curious Minds" care se adresează și studenților facultății de Inginerie Tehnologică și Management Industrial;

- ✓ implicarea și coordonarea studenților în concursul de proiecte interne pentru finanțarea proiectelor de diploma de către Universitatea Transilvania din Brașov;
- ✓ atragerea și coordonarea unui număr de studenți, anual, în activități extracuriculare, cum ar fi Sesiunile cercurilor științifice studențești și a conferinței studențești organizate de Universitatea Transilvania din Brașov, denumită AFCO (Absolvenți în fața companiilor);
- ✓ informarea și încurajarea studenților pentru efectuarea unor mobilități internaționale (ERASMUS);
- ✓ informarea și consilierea absolvenților privind posibilitățile de angajare din zona Brașovului.

Coordonarea activității doctoranzilor, se va baza pe experiența acumulată în coordonarea proiectelor de diploma și dizertație, calitatea de director și membru în diverse proiecte de cercetare, membru în comisii de îndrumare a doctoranzilor, membru în echipe de cercetare / dezvoltare din cadrul unor companii industriale. Voi avea în vedere următoarele aspecte privind îndrumarea doctoranzilor:

- ✓ desfășurarea unei activități de cercetare științifice etice;
- ✓ coordonarea și susținerea doctoranzilor pentru îndeplinirea planului de cercetare, elaborarea referatelor și a tezei de doctorat;
- ✓ corelarea obiectivelor temei de doctorat cu infrastructura existentă în universitate și după caz, îndrumarea pentru stagii în alte centre universitare pentru completarea cercetărilor;
- ✓ îndrumarea și susținerea doctoranzilor pentru diseminarea rezultatelor cercetării la conferințe internaționale și în reviste cotate ISI;
- ✓ continuarea activității de membru în comisii de îndrumare a doctoranzilor. În prezent sunt membru în comisia de îndrumare doctorală a ing. Liviu Ionuț Drăguș având ca subiect al tezei Proiectarea și fabricația inovativă a structurilor, sub conducerea prof. dr. ing. Mircea Viorel Drăgoi;
- ✓ integrarea în echipe de cercetare interdisciplinare a doctoranzilor;
- ✓ încurajarea doctoratului în cotutelă, cu universități din străinătate;

Dezvoltarea activităților de formare continuă pentru mediul industrial are următoarele componente:

- ✓ Susținerea unor cursuri personalizate de formare continuă în domeniul disciplinelor predate pentru mediul industrial, în cadrul departamentului de Formare continuă din cadrul Universității. Astfel, sunt propuse cursurile de Proiectare 3D avansată utilizând SolidWorks și Proiectare în CATIA și se va propune un curs nou de Fabricație aditivă.
- ✓ Participarea la cursuri oferite de mediul industrial în vederea dezvoltării activității didactice.

B2.2. Planuri de dezvoltare ale activității de cercetare științifică

Activitatea de cercetare științifică se bazează pe experiența acumulată și se va concentra în primul rând pe domeniile de competență deja abordate prin aprofundarea și extinderea acestora. Activitățile de cercetare viitoare se vor concentra pe următoarele direcții principale:

- Fabricația aditivă și Printarea 3D cu accent pe analiza calității produselor și proceselor;
- Structuri din materiale compozite;
- Designul, analiza și fabricația asistată de calculator a produselor complexe.

Fabricația aditivă și Printarea 3D cu accent pe controlul calității produselor și proceselor reprezintă prima direcție majoră de cercetare științifică. În ultimii ani, tehnologiile de fabricație aditivă sunt utilizate în diverse domenii industriale cum ar fi cea a automobilelor, aerospațială și a bunurilor de larg consum. Standardele referitoare la fabricația aditivă sunt în continuă dezvoltare având în vedere multitudinea de tehnologii noi și materiale noi. Ținând cont în literatura de specialitate sunt relativ puține rezultate privind caracterizarea și proprietățile pieselor obținute cu aceste tehnologii aditive din materiale noi doresc abordarea următoarelor aspecte:

- ✓ Investigații experimentale privind calitatea pieselor (dimensională, textura suprafeței etc.) obținute din materiale compozite cu matrice plastică și metalică.
- ✓ Investigații experimentale și optimizarea parametrilor tehnologici ai sistemelor de fabricație aditivă și a imprimantelor 3D.
- ✓ Analize privind caracterizarea micro și macro structurală a pieselor fabricate aditiv.

Structurile din materiale compozite reprezintă cea de a doua direcție principală de cercetare. Un prim pas va consta în valorificarea rezultatelor, prin publicarea în reviste ISI categoria Q1, din granturile internaționale câștigate în ultimul an, și anume:

- ✓ proiectul Sfera focusat pe materiale compozite noi de înaltă rezistență și ușoare obținute prin sinterizare solară;
- ✓ proiectele ESTEEM concentrate pe caracterizarea materialelor compozite cu matrice termoplastică utilizate în industria de transport, preponderent în domeniul aerospațial.

Continuarea colaborării cu centrul de cercetare IMDEA Energy Institute, Madrid, Spania am realizat-o prin câștigarea în competiție internațională a unui nou proiect de cercetare care a fost aprobat spre finanțare pentru anul 2023. Acest proiect vizează analiza materialelor compozite fabricate aditiv și postprocesate în simulatoare solare. De asemenea caracterizarea acestor noi materiale va fi realizată în institutul JSI Ljubljana din Slovenia, continuând colaborarea în direcția cercetării științifice avută cu aceștia.

Designul, analiza și fabricația asistată de calculator a produselor complexe este cea de a treia direcție de cercetare, în cadrul căreia se va pune accentul pe minimizarea masei produselor și menținerea unor proprietăți mecanice bune. În acest domeniu îmi propun designul și analiza unor produse complexe fabricate din materiale polimerice și compozite din primele două direcții principale de cercetare.

Obiectivele propuse pentru susținerea direcțiilor de cercetare științifică și dezvoltarea continuă a carierei științifice sunt următoarele:

- modernizarea și dezvoltarea laboratorului de cercetare, destinat fabricării, prin tehnologii aditive, a produselor industriale (Laborator de Tehnologii integrate), precum și realizarea mentenanței echipamentelor;
- valorificarea echipamentelor de cercetare existente în cadrul Universității Transilvania și a Institutului de cercetare prin propunerea de colaborări interdisciplinare în cadrul departamentului de Ingineria fabricației și cu alte departamente
- elaborarea unor propuneri de proiecte în cadrul unor competiții interne, naționale și internaționale
- continuarea colaborării cu mediul economic prin rezolvarea unor teme specifice, în cadrul unor noi contracte de cercetare / dezvoltare cu mediul industrial
- participarea la conferințe internaționale, desfășurate în țară și în străinătate;
- efectuarea de stagii de cercetare în vederea perfecționării în domeniile de interes;
- diseminarea rezultatelor cercetărilor în jurnale indexate ISI, situate în zonele Q1 și Q2, prin publicarea a minim 2 articole anual;
- colaborarea cu alți cercetători din domeniu în vederea publicării unor monografii la edituri de prestigiu internaționale;
- organizarea de conferințe, seminarii și școli de vară naționale și internaționale
- implicarea studenților, masteranzilor și doctoranzilor în cadrul proiectelor de cercetare câștigate;
- susținerea și mediatizarea evenimentelor științifice și a conferințelor organizate de către departamentul Ingineria Fabricației.

B2.3. Planuri de evoluție și dezvoltare ale carierei profesionale

Cariera profesională în mediul universitar necesită îmbinarea optimă a activității didactice și a activității de cercetare științifică. Nivelul de pregătire profesională și realizările obținute, după susținerea tezei de doctorat până în prezent, sunt evidențiate prin calitatea de membru editorial și recenzor al unor reviste de prestigiu (Q1 și Q2), organizator de manifestări științifice naționale și internaționale și membru în organizații profesionale. Experiența și competențele dobândite în această perioadă, în activitatea didactică și de cercetare științifică vor contribui la dezvoltarea domeniului Inginerie industrială, la creșterea prestigiului și

vizibilității Departamentului de Ingineria fabricației, a Facultății ITMI și a Universității Transilvania din Brașov. Obiective pentru planul de evoluție și dezvoltare a carierei profesionale:

- ✓ dezvoltarea profesională ca evaluator ARACIS.
- ✓ continuarea colaborărilor aflate în derulare pentru intensificarea activităților de cercetare științifică;
- ✓ dezvoltarea unor parteneriate cu mediul socio economic prin elaborarea de proiecte cu aceștia;
- ✓ intensificarea activităților editoriale și recenzoriale în jurnale cotate ISI Q1 și Q2;
- ✓ implicare și dezvoltarea școlii doctorale in domeniul Inginerie Industrială din cadrul Universității Transilvania din Brașov.

(B-iii) Bibliografie

1. Gibson, I.; Rosen, D.W.; Stucker, B. Additive Manufacturing Technologies; Springer-Verlag: New York, NY, USA, 2015.
2. Chu, W.S.; Kim, M.S.; Jang, K.H.; Song, J.H.; Rodrigue, H.; Chun, D.M.; Cho, Y.T.; Ko, S.H.; Cho, K.J.; Cha, S.W.; et al. From design for manufacturing (DFM) to manufacturing for design (MFD) via hybrid manufacturing and smart factory: A review and perspective of paradigm shift. *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Green Tech.* 2016, 3, 209–222, doi:10.1007/s40684-016-0028-0.
3. Kang, H.S.; Lee, J.Y.; Choi, S.; Kim, H.; Park, J.H.; Son, J.Y.; Kim, B.H.; Noh, S.D. Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Green Technol.* 2016, 3, 111–128. <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0015-5>.
4. **Udriou, R.**, Computer-aided Technologies. Applications in Engineering and Medicine, Editura IntechOpen Limited, London, U.K. ISBN:978-953-51-2788-8, 2016, 160 pag., <https://www.intechopen.com/books/5379> , DOI: 10.5772/62618
5. Morariu, C., Sistemul de Management al Calitatii, Editura Universitatii Transilvania din Brasov, Brasov, 2006
6. **Udriou, R.**; Braga, I.C.; Nedelcu, A. Evaluating the Quality Surface Performance of Additive Manufacturing Systems: Methodology and a Material Jetting Case Study. *Materials* 2019, 12, 995, FI 3.426 (Q2 zona roșie) , WOS: 000465025400057
7. International Organization for Standardization. In Standard Terminology for Additive Manufacturing—General Principles—Terminology; ISO/ASTM 52900-15; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2015.
8. Campbell, R.I.; Martorelli, M.; Lee, H.S. Surface roughness visualization for rapid prototyping models. *Comput. Aided Des. Appl.* 2002, 34, 717–725, doi:10.1016/S0010-4485(01)00201-9.
9. Perez, M.; Medina-Sánchez, G.; García-Collado, A.; Gupta, M.; Carou, D. Surface quality enhancement of fused deposition modeling (FDM) printed samples based on the selection of critical printing parameters. *Materials* 2018, 11, 1382–1395, doi:10.3390/ma11081382.

10. Byun, H.S.; Kwan, H., L. Determination of the optimal build direction for different rapid prototyping processes using multi-criterion decision making. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2006, 22, 69–80, doi:10.1016/j.rcim.2005.03.001.
11. Strano, G.; Hao, L.; Everson, R.M.; Evans, K.E. Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting. *J. Mater. Process. Technol.* 2013, 213, 589–597, doi:10.1016/j.jmatprotec.2012.11.011.
12. DebRoy, T.; Wei, H.L.; Zuback, J.S.; Mukherjee, T.; Elmer, J.W.; Milewski, J.O.; Beese, A.M.; Wilson-Heid, A.; Ded, A.; Zhang, W. Additive manufacturing of metallic components—Process, structure and properties. *Prog. Mater. Sci.* 2018, 92, 112–224, doi:10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
13. Chen, Y.; Lu, J. RP Part Surface quality versus build orientation: When the layers are getting thinner. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2013, 67, 377–385, doi:10.1007/s00170-012-4491-7.
14. Cazon, A.; Morer, P.; Matey, L. PolyJet technology for product prototyping: Tensile strength and surface roughness properties. *Proc. IMechE Part B J. Eng. Manuf.* 2014, 228, 1664–1675, doi:10.1177/0954405413518515.
15. Kumar, K.; Kumar, G.S. An experimental and theoretical investigation of surface roughness of poly-jet printed parts. *Virtual Phys. Prototyp.* 2015, 10, 23–34, doi:10.1080/17452759.2014.999218.
16. Bandari, Y.K.; Williams, S.W.; Ding, J.; Martina, F. Additive manufacture of large structures: Robotic or CNC systems? In *Proceedings of the 26th International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas, USA, 12–14 August 2015*; pp. 17–25.
17. Moylan, S. Progress toward standardized additive manufacturing test artifacts. In *Proceedings of ASPE 2015 Spring Topical Meeting Achieving Precision Tolerances in Additive Manufacturing, North Carolina, USA, 26–29 April 2015*; pp. 100–105.
18. Leach, R. Metrology for additive manufacturing. *Meas. Control* 2016, 49, 132–135, doi:10.1177/0020294016644479.
19. Derby, B. The inkjet printing of functional and structural materials: Fluid property requirements, feature stability, and resolution. *Annu. Rev. Mater. Res.* 2010, 40, 395–414, doi:10.1146/annurev-matsci-070909-104502.
20. **Udriou, R.**, Braga, I.C, Polyjet technology applications for rapid tooling, *Matec Web Conf. Vol. 112*, 2017, WOS: 000579349600046
21. **Udriou, R.**, Nedelcu, A., Chapter 1: Optimization of Additive Manufacturing Processes Focused on 3D Printing , in *Rapid prototyping technology –principles and functional requirements* Edited by Muhammad Enamul Hoque, Editura InTech, Croatia, ISBN:978-953-307-970-7, 2011
22. **Udriou, R.**, Ivan NV. (2010). *Rapid Prototyping and Rapid Manufacturing Applications at Transilvania University of Braşov*, Bulletin of the Transilvania University of Brasov - Series I: Engineering Sciences, indexata PROQUEST, EBSCO
23. **Udriou, R.**, Serban, D.A., Belgiu G. (2010). Optimisation of rapid prototyping process for electrical vehicle manufacturing, *Proceedings of the 3rd International Conference on Additive Technologies ICAT 2010, Nova Gorica, Slovenia, September, 22th – 24th, 2010*, Publisher DAAAM International Vienna, ISBN 978-3-901509-75-9, ISSN 1992-5093, Indexata Scopus
24. **Udriou, R.** Rapid tooling by Three Dimensional Printing (3DP), 3rd WSEAS international conference on manufacturing engineering, quality and production systems MEQAPS '11, April 11-13, 2011, Brasov, Romania, Published by WSEAS Press

25. **Udroi, R.**, (2010). Applications of additive manufacturing technologies for aerodynamic tests, Academic journal of manufacturing engineering, vol.8 issue 3/2010, ISSN 15837904, Indexata Scopus
26. **Udroi, R.** New Methodology for Evaluating Surface Quality of Experimental Aerodynamic Models Manufactured by Polymer Jetting Additive Manufacturing, *Polymers* **2022**, 14, 371, FI 4.967 (Q1 zona roșie) , WOS: 000754916900001
27. **Udroi, R.**; Nedelcu, A., Deaky, B. Rapid manufacturing by polyjet technology of customized turbines for Renewable energy generation, *Environmental Engineering and Management Journal* 2011, 10 (9), 1387, FI 1,435 (Q3), WOS:000296758400023
28. **Udroi, R.**, Nedelcu A. Stroia I., Application of rapid product development to pelton turbine, 15th International Conference Modern Technologies, Quality and Innovation - New face of TMCR, ModTech 2011 vol.II 25-27 May 2011, Vadul lui Voda-Chisinau, Republic of Moldova, WOS:000392260500280
29. Quail F., Stickland M., Scanlon T., (2009), Rapid Manufacturing Technique used in the Development of a Regenerative Pump Impeller, *Proc. World Congress on Engineering, WCE '09*, vol. 2, London, U.K, 2009, 1730-1736.
30. Wu H., Li D., Guo N., (2009), Fabrication of integral ceramic mold for investment casting of hollow turbine blade based on stereolithography, *Rapid Prototyping Journal*, 15, 232-237.
31. Kamaruzzaman S., Juhari A.R., (2009), Pico hydro: clean power from small streams, *Proc. 3rd WSEAS Int. Conf. on Renewable energy sources, RES '09*, University of La Laguna, Tenerife, Canary Islands, Spain, July 1-3, 2009, Published by the WSEAS Press, Perlovsky L., Mastorakis N. E., Zaharim A., Kamaruzaman S. (Eds.), 414-419.
32. **Udroi R.**, Mihail L., Experimental determination of surface roughness of parts obtained by rapid prototyping, *Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on Circuits, Systems, Electronics, Control & Signal Processing (CSECS '09)*, Puerto de la Cruz Tenerife, Canary Islands, Spain, December 14-16, 2009, Published by WSEAS Press, ISSN: 1790-5117, 283, WOS:000276789200050
33. **Udroi, R.**, Deaky, B., (2011). Optimization of additive manufacturing by 3d printing for fit and functional testing, *Proceedings of the 5th international conference on manufacturing science and education (MSE 2011)*, Vol I, ISSN 1843-2522, 95, June 2-5, 2011, Sibiu, Romania, WOS:000393733400024
34. **Udroi, R.**, (2012). Applications of polymer jettting technology for functional testing of the innovative products, *Academic journal of manufacturing engineering*, vol.10 issue 3/2012, indexată EBSCO
35. **Udroi, R.**, (2013). Rapid product development of e-ticketing products for urban public transport, *Academic journal of manufacturing engineering*, vol.11 issue 3/2013, indexată EBSCO
36. Bere, P.; Neamtu, C.; **Udroi, R.** Novel Method for the Manufacture of Complex CFRP Parts Using FDM-based Molds. *Polymers* 2020, 12, 2220, FI 4.329 (Q1 zona roșie) , WOS: 000586198100001
37. Cheah, C. M., C. K. Chua, H. S. Ong, Rapid Moulding Using Epoxy Tooling Resin, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, no.20, 2002, pp. 368–374.
38. Chu, C., H., Song, M., C., Luo V., C., S., Computer aided parametric design for 3D tire mould production, *Computers in Industry*, no. 57, 2006, pp. 11–25.

39. Chua C.K., Hong K.H., Ho S.L., Rapid Tooling Technology. Part 1 A Comparative Study. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, No.15, ISSN 0268-3768, 1999, p. 604-608.
40. Parada, L.R.; Mayuet, P.F.; Gámez, A.J. Industrial product design: Study of FDM technology for the manufacture of thermoformed prototypes. *Procedia Manuf.* 2019, 41, 587–593, doi:10.1016/j.promfg.2019.09.046
41. Hay, J.A.; Smayra, T.; Moussa, R. Customized Polymethylmethacrylate Cranioplasty Implants Using 3-Dimensional Printed Polylactic Acid Molds: Technical Note with 2 Illustrative Cases. *World Neurosurg.* 2017, 105, 971–979, doi:10.1016/j.wneu.2017.05.007
42. Siemiński, P.; Szulc, B. Analysis of FDM/FFF additive manufacturing production mold inserts of injection molds. *Mechanik* 2018, 1, 53–55, doi:10.17814/mechanik.2018.1.11
43. F. Rayegani, G. C. Onwubolu, A.Nagy and H. Singh, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 810 (2014)
44. R. Singh, *Int. J. of Autom. and Mech. Eng.*, 6, 777 (2012)
45. Stratasys Ltd, <http://www.stratasys.com/>, (acesat in 2017)
46. **Udroi R.**, Ivan N.V., Rapid-X Using 3D Printers, Supplement of Academic Journal of Manufacturing Engineering, No.2, Timisoara, ISSN 1583-7904, 2008, pp.199-205
47. **Udroi, R.**, Materiale compozite. Tehnologii și aplicații în aviație, Editura: Universității Transilvania Brașov, ISBN:973-635-646-9, 2006
48. Kim, G.D.; Oh, Y.T. A benchmark study on rapid prototyping processes and machines: Quantitative comparisons of mechanical properties, accuracy, roughness, speed, and material cost. *Proc. Imeche Part B J. Eng. Manuf.* 2008, 222, 201–215, doi:10.1243/09544054JEM724.
49. Ahn, D.; Kim, H.; Lee, S. Surface roughness prediction using measured data and interpolation in layered manufacturing. *J. Mater. Process. Technol.* 2009, 209, 664–671, doi:10.1016/j.jmatprotec.2008.02.050.
50. Kechagias, J.; Stavropoulos, P. An investigation of sloped surface roughness of direct poly-jet 3D printing. In *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering—INDE 2015*, Zakynthos Island, Greece, 16–20 July 2015; pp. 150–153.
51. Canellidis, V.; Giannatsis, J.; Dedoussis, V. Genetic-algorithm based multi-objective optimization of the build orientation in stereolithography. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2009, 45, 714–730, doi:10.1007/s00170-009-2006-y.
52. Kumbhar, N.N.; Mulay, A.V. Post processing methods used to improve surface finish of products which are manufactured by additive manufacturing technologies: A Review. *J. Inst. Eng. India Ser. C* 2018, 99, 481–487, doi:10.1007/s40032-016-0340-z.
53. Kretschmar, N.; Chekurov, S.; Salmi, M.; Tuomi, J. Evaluating the readiness level of additivelymanufactured digital spare parts: an industrial perspective. *Appl. Sci.* 2018, 8, 1837–1952, doi:10.3390/app8101837.
54. Reeves, P.E.; Cobb, R.C. Reducing the surface deviation of stereolithography using in-process techniques. *Rapid Prototyp. J.* 1997, 3, 20–31, doi:10.1108/13552549710169255.
55. Townsend, A.; Senin, N.; Blunt, L.; Leach, R.K.; Taylor, J.S. Surface texture metrology for metal additive manufacturing: A review. *Precis. Eng.* 2016, 46, 34–47, doi:10.1016/j.precisioneng.2016.06.001.
56. Grimm, T.; Wior, G.; Witt, G. Characterization of typical surface effects in additive manufacturing with confocal microscopy. *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.* 2015, 3, 1–12, doi:10.1088/2051-672X/3/1/014001.

57. Bourell, D.; Kruth, J.P.; Leu, M.; Levy, G.; Rosen, D.; Beese, A.M.; Clare, A. Materials for additive manufacturing. *CIRP Ann.* 2017, 66, 659–681, doi:10.1016/j.cirp.2017.05.009.
58. Montgomery, D.C. *Design and Analysis of Experiments*; John Wiley & Sons: Hoboken, NY, USA, 2017; ISBN:9781119113478.
59. Salmi, M.; Ituarte, I.F.; Chekurov, S.; Huotilainen, E. Effect of build orientation in 3D printing production for material extrusion, material jetting, binder jetting, sheet object lamination, vat photopolymerisation, and powder bed fusion. *Int. J. Collab. Enterp.* 2016, 5, 218–231, doi:10.1504/ijcent.2016.10003187.
60. International Organization for Standardization. *Standard Terminology for Additive Manufacturing—Coordinate Systems and Test Methodologies*; ISO/ASTM 52921-13; ISO: Geneva, Switzerland, 2013.
61. Robinson, J.; Ashton, I.; Fox, P.; Jones, E.; Sutcliffe, C. Determination of the effect of scan strategy on residual stress in laser powder bed fusion additive manufacturing. *Addit. Manuf.* 2018, 23, 13–24, doi:10.1016/j.addma.2018.07.001.
62. **Udriou, R.** Powder bed additive manufacturing systems and its applications, *Academic journal of manufacturing engineering*, vol.10, issue 4, 2012, indexată EBSCO
63. Saboori, A.; Gallo, D.; Biamino, S.; Fino, P.; Lombardi, M. An overview of additive manufacturing of titanium components by directed energy deposition: microstructure and mechanical properties. *Appl. Sci.* 2017, 7, 883–905, doi:10.3390/app7090883.
64. NIST/SEMATECH. *e-Handbook of Statistical Methods*. Available online: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/index.htm> (accessed on 18 November 2018).
65. Objet Geometries. *Eden 500V/350V/350 3-D Printer System. User Guide*; Objet Geometries Ltd.: Rehovot, Israel, 2007.
66. International Organization for Standardization. *Geometrical Product Specifications (GPS)—Surface Texture: Profile Method—Rules and Procedures for the Assessment of Surface Texture*; ISO 4288:1996; ISO/ASME International: Geneva, Switzerland, 1996.
67. Automotive Industry Action Group. *Measurement Systems Analysis—Reference Manual*; 4rd ed.; MSA-4; Automotive Industry Action Group (AIAG): Southfield, MI, USA, 2010
68. Minitab. *Getting Started with Minitab 17*. Available online: <https://www.minitab.com> (accessed on 10 September 2018).
69. Mueller, J.; Shea, K.; Daraio, C. Mechanical properties of parts fabricated with inkjet 3d printing through efficient experimental design. *Mater. Des.* 2015, 86, 902–912, doi:10.1016/j.matdes.2015.07.129.
70. Kadivar, M.; Tormeya, D.; McGranaghan, G. A review on turbulent flow over rough surfaces: Fundamentals and theories. *Int. J.* 2021, 10, 100077. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100077>.
71. Petrie, H.L.; Deutsch, S.; Brungart, T.A.; Fontaine, A.A. Polymer drag reduction with surface roughness in flat-plate turbulent boundary layer flow. *Exp. Fluids* 2003, 35, 8–23. <https://doi.org/10.1007/s00348-003-0589-x>.
72. Salazar, F.; Barrientos, A. Surface Roughness Measurement on a Wing Aircraft by Speckle Correlation. *Sensors* 2013, 13, 11772–11781. <https://doi.org/10.3390/s130911772>.
73. Havaladar, S.; Pawar, S.; Lele, A.; Pradhan, R.; Rishi, A. Experimental investigation of lift for NACA 2412 airfoil without internal passage with NACA 2412 airfoil with internal passage in a subsonic wind tunnel. *J. Aerosp. Eng. Technol.* 2015, 5, 27–33.
74. Olasek, K.; Wiklak, P. Application of 3D printing technology in aerodynamic study. *J. Phys. Conf. Ser.* 2014, 530, 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/530/1/012009>.

75. Lipian, M.; Kulak, M.; Stepien, M. Fast Track Integration of Computational Methods with Experiments in Small Wind Turbine Development. *Energies* 2019, 12, 1625. <https://doi.org/10.3390/en12091625>.
76. Junka, S.; Schröder, W.; Schrock, S. Design of additively manufactured wind tunnel models for use with UAVs. *Procedia CIRP* 2017, 60, 241–246. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.02.027>.
77. Dupuy, D., Corre, B., Claeys-Bruno, M., Sergent, M.: Comparison of different screening methods. *Case Studies in Business, Industry and Government Statistics* 5, 115–125, 2014
78. Kepler, J. Investigation of Acrylic Based Systems for 3D Polyjet Printing. Master's Thesis, Degree-Granting University of Linz, Linz, Austria, 2018.
79. International Organization for Standardization. Additive Manufacturing—Test Artifacts—Geometric Capability Assessment of Additive Manufacturing Systems; ISO/ASTM 52902-19; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2019; doi:10.1520/F3345-19.
80. **Udriou, R.**; Braga, I.C. System Performance and Process Capability in Additive Manufacturing: Quality Control for Polymer Jetting, *Polymers* 2020, 12, 1292, FI 4.329 (Q1 zona roșie) , WOS: 000554639700001
81. Montgomery, D.C. Introduction to Statistical Quality Control, 6th ed.; John Wiley & Sons Inc.: New York, NY, USA, 2009.
82. Guoqing, W. Statistical Process Control Analysis Based on Software Q-Das. *Am. J. Theor. Appl. Stat.* 2014, 3, 90, doi:10.11648/j.ajtas.20140304.12.
83. Singh, J.; Singh, R.; Singh, H. Repeatability of linear and radial dimension of ABS replicas fabricated by fused deposition modelling and chemical vapor smoothing process: A case study. *Measurement* 2016, 94, 5–11, doi:10.1016/j.measurement.2016.07.064.
84. Automotive Industry Action Group. Statistical Process Control, Reference Manual, 2nd ed.; Detroit, MI, USA, 2005.
85. Akandeac, S.O.; Dalgarnoa, K.W.; Munguiaa, J.; Pallarib, J. Statistical Process Control Application to Polymer based SLS process, In Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, USA, 10–12 August 2015; pp.1634–1643.
86. International Organization for Standardization. Statistical Methods in Process Management—Capability and Performance—Part 2: Process Capability and Performance of Time-Dependent Process Models; ISO 22514-2; ISO: Geneva, Switzerland, 2017.
87. International Organization for Standardization. Geometrical Product Specifications (GPS)—Inspection by Measurement of Workpieces and Measuring Equipment—Part 1: Decision Rules for Verifying Conformity or Nonconformity with Specifications; ISO 14253-1; ISO: Geneva, Switzerland, 2017.
88. Baturynska, I. Statistical analysis of dimensional accuracy in additive manufacturing considering STL model properties. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018, 97, 2835–2849, doi:10.1007/s00170-018-2117-4.
89. George, E.; Liacouras, P.; Rybicki, F.J.; Mitsouras, D. Measuring and Establishing the Accuracy and Reproducibility of 3D Printed Medical Models. *RadioGraphics* 2017, 37, 1424–1450, doi:10.1148/rg.2017160165.
90. Preißler, M.; Rosenberger, M.; Notni, G. An Investigation for Process Capability in Additive Manufacturing. In Proceedings of the 59th Ilmenau Scientific Colloquium, Ilmenau, Germany, 11–15 September 2017.

91. Singh, R. Process capability study of polyjet printing for plastic components. *J. Mech. Sci. Technol.* 2011, 25, 1011–1015, doi:10.1007/s12206-011-0203-8.
92. International Organization for Standardization. *Statistical Methods in Process Management—Capability and Performance—Part 3: Machine Performance Studies for Measured Data on Discrete Parts*; ISO 22514-3; ISO: Geneva, Switzerland, 2008.
93. Kitsakis, K.; Kechagias, J.; Vaxevanidis, N.; Giagkopoulos, D. *Tolerance Analysis of 3d-MJM Parts According to IT Grade*; IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering; Kozani, Greece, 2016; Volume 161, doi:10.1088/1757-899X/161/1/012024.
94. Yap, Y.L.; Wang, C.; Sing, S.; Dikshit, V.; Yeong, W.Y.; Wei, J. Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks. *Precis. Eng.* 2017, 50, 275–285, doi:10.1016/j.precisioneng.2017.05.015.
95. Minetola, P.; Calignano, F.; Galati, M. Comparing geometric tolerance capabilities of additive manufacturing systems for polymers. *Addit. Manuf.* 2020, 32, 101103, doi:10.1016/j.addma.2020.101103.
96. International Organization for Standardization. *Additive Manufacturing—General Principles—Requirements for Purchased AM Parts*; ISO/ASTM 52901-17; ISO/ASME International: Geneva, Switzerland, 2017.
97. International Organization for Standardization. *Geometrical Product Specifications (GPS)—ISO Code System for Tolerances on Linear Sizes—Part 1: Basis of Tolerances, Deviations and Fits*; ISO 286-1:2010; ISO: Geneva, Switzerland, 2010.
98. German Institute for Standardisation. *Plastics Moulded Parts—Tolerances and Acceptance Conditions*; DIN 16742-13; DIN: Germany, 2013
99. International Organization for Standardization. *General Tolerances—Part 1: Tolerances for Linear and Angular Dimensions without Individual Tolerance Indications*; ISO 2768-1:1989; ISO: Geneva, Switzerland, 2015.
100. International Organization for Standardization. *Statistical Methods in Process Management. Capability and Performance—Part 1: General Principles and Concepts*; ISO 22514-1; ISO: Geneva, Switzerland, 2014.
101. International Organization for Standardization. *Quality Management Systems. Particular Requirements for the Application of ISO 9001:2000 for Automotive Production and Relevant Service Part Organizations*; ISO/TS 16949; ISO: Geneva, Switzerland, 2009.
102. Arcidiacono, G.; Nuzzi, S. A Review of the Fundamentals on Process Capability, Process Performance, and Process Sigma, and an Introduction to Process Sigma Split. *Int. J. Appl. Eng. Res.* 2017, 12, 4556–4570.
103. Du Plessis, A.; Sperling, P.; Beerlink, A.; Tshabalala, L.; Hoosain, S.; Mathe, N.; Le Roux, S.G. Standard method for microCT-based additive manufacturing quality control 2: Density measurement. *MethodsX* 2018, 5, 1117–1123, doi:10.1016/j.mex.2018.09.006.
104. Sabău, E.; Udriou, R. (autor correspondent); Bere, P.; Buranský, I.; Miron-Borzan, C.- Ștefana A Novel Polymer Concrete Composite with GFRP Waste: Applications, Morphology, and Porosity Characterization. *Appl. Sci.* 2020, 10, 2060, doi:10.3390/app10062060.
105. Zanobini, A.; Sereni, B.; Catelani, M.; Ciani, L. Repeatability and Reproducibility techniques for the analysis of measurement systems. *Measurement* 2016, 86, 125–132, doi:10.1016/j.measurement.2016.02.041.
106. Pugna A. P., *Optimizări în Ingineria și Managementul calității*, format electronic, Universitatea Politehnica Timisoara, 2016

107. Q-DAS Statistical Software (Q-DAS). Available online: <https://www.q-das.com/en/> (accessed on 10 February 2020).
108. Sambrani, V.N. Process Capability—A Managers Tool for 6 Sigma Quality Advantage. *Glob. J. Manag. Bus. Res.: G Interdiscip.* 2016, 16, 63–69.
109. Galve, J.E.; Elduque, D.; Pina, C.; Clavería, I.; Acero, R.; Fernández, Á.; Javierre, C. Dimensional Stability and Process Capability of an Industrial Component Injected with Recycled Polypropylene. *Polymers* 2019, 11, 1063, doi:10.3390/polym11061063.
110. Maurya, N.K.; Rastogi, V.; Singh, P. Comparative Study and Measurement of Form Errors for the Component Printed by FDM and PolyJet Process. *Instrum. Mes. Métrol.* 2019, 18, 353–359, doi:10.18280/i2m.180404
111. ASTM D4404-18, Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org. DOI: 10.1520/D4404-18
112. Kritikos, M.; Buranský, I.; Buranská, E.; Mojžiš, M.. Evaluation of accuracy of seamless steel tube scanning by industrial computed tomography, *MATEC Web of Conferences* 2019, 299, 04009. DOI: 10.1051/mateconf/201929904009
113. ASTM E1441-19, Standard Guide for Computed Tomography (CT), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org. DOI: 10.1520/E1441-19
114. Carmignato, S. Accuracy of industrial computed tomography measurements: Experimental results from an international comparison. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 2012, 61, pp. 491-494. DOI: 10.1016/j.cirp.2012.03.021
115. Kruth, J. P.; Bartscher, M.; Carmignato, S.; Schmitt, R.; De Chiffre, L.; Weckenmann, A. Computed tomography for dimensional metrology. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 2011, 60(2), pp. 821-842. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.05.006
116. De Chiffre L.; Carmignato, S.; Kruth, J.P.; Schmitt R.; Weckenmann A. Industrial applications of computed tomography. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 2014, 63, 655. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.011.
117. Villarraga-Gómez, H.; Lee, C.; Smith, S. Dimensional metrology with X-ray CT: a comparison with CMM measurements on internal features and compliant structures. *Precision Engineering*, 2018, 51, pp. 291-307. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2017.08.021
118. Garcea, S.C.; Wang, Y.; Withers. P.J. X-ray computed tomography of polymer composites. *Composites Science and Technology* 2018, 156, 305. DOI: 10.1016/j.compscitech.2017.10.023
119. Crupi, V.; Epasto, G.; Guglielmino, E. Computed Tomography analysis of damage in composites subjected to impact loading. *Frattura ed Integrità Strutturale* 2011, 17, pp. 32-41. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.17.04
120. Liaptsis, G.; Clarke, A. L.; Nithiarasu, P. High resolution X-ray volumetric inspection of large planar amples using SART based computed laminography, the 56th Annual Conference of The British Institute of Non-Destructive Testing, Telford, 2017.
121. Grębowski K.; Rucka, M.; Wilde K. Non-Destructive Testing of a Sport Tribune under Synchronized Crowd-Induced Excitation Using Vibration Analysis. *Materials* 2019, 12(13), 2148. DOI:10.3390/ma12132148
122. VGSTUDIO. Available online: <https://www.volumegraphics.com/de /produkte/vgstudio.html> (accessed on 2 May 2019).
123. Nikishkov, Y.; Airoidi, L.; Makeev, A. Measurement of voids in composites by X-ray Computed Tomography. *Compos Sci Technol* 2013, 89, pp. 89-97. DOI: 10.1016/j.compscitech.2013.09.019

124. Liu X. ; Chen, F. Defects Characterization in CFRP Using X-ray Computed Tomography, *Polymers & Polymer Composites* 2016, 24, 149.
125. Sabău, E. Recycling of Polymeric Composite Materials. In *Product Lifecycle Management – Terminology and Applications*, Udrioiu, R.; Bere, P. IntechOpen: London, United Kingdom, 2018; pp. 103-121. DOI: 10.5772/intechopen.81281
126. Chung, S.Y.; Lehmann, C.; Abd Elrahman, M.; Stephan, D. Pore characteristics and their effects on the material properties of foamed concrete evaluated using micro-CT images and numerical approaches. *Appl. Sci.* 2017, 7, 550. DOI: 10.3390/app7060550
127. Vecchio, I.; Schladitz, K.; Godehardt, M.; Heneka, M. J. Geometric characterization of particles in 3D with an application to technical cleanliness. *Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik: Kaiserslautern, Germany*, 2011, 1–33, ISSN 1434-9973.
128. **Udrioiu, R.**, Bere, P. Introductory Chapter: Integration of Computer-Aided Technologies in Product Lifecycle Management (PLM) and Human Lifecycle Management (HUM) in *Product Lifecycle Management. Terminology and Applications*, Editura Intech Open Limited, London, U.K. ISBN:978-1-78984-543-3, 2018, 14 pag., <https://www.intechopen.com/chapters/64122> , DOI: 10.5772/intechopen.81686
129. Deaconu A.M., **Udrioiu R.**, Nanau C.S., capitol "Algorithms for Delivery of Data by Drones in an Isolated Area Divided into Squares" în cartea "Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Enabled Wireless Communications and Networking", Editura MDPI, ISBN: 978-3-0365-4663-6, 2022, 19 pag. <https://www.mdpi.com/books/pdfview/book/5760>
130. **Udrioiu, R.**, capitol "New Methodology for Evaluating Surface Quality of Experimental Aerodynamic Models Manufactured by Polymer Jetting Additive Manufacturing" în cartea "Process–Structure– Properties in Polymer Additive Manufacturing II" Editura:MDPI ISBN 978-3-0365-4483-0, 2022, 19 pag., <https://www.mdpi.com/books/pdfdownload/book/5681>
131. Bere, P.; Neamtu, C.; **Udrioiu, R.** , capitol "Novel Method for the Manufacture of Complex CFRP Parts Using FDM-based Molds" în cartea "Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing; Editura:MDPI, ISBN 978-3-0365-1371-3, 2021, 20 pag. <https://www.mdpi.com/books/book/4179>
132. **Udrioiu, R.**; Braga, I.C., capitol "System Performance and Process Capability in Additive Manufacturing: Quality Control for Polymer Jetting" în cartea "Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing" Editura:MDPI, ISBN 978-3-0365-1371-3, 2021, 21 pag. <https://www.mdpi.com/books/book/4179>
133. Ivan, N.V., Păunescu, T., **Udrioiu, R.**, Ivan MC, Găvruş, C., Pescaru, R. Tehnologia construcțiilor de masini, vol.I, Teorie și abordări inovative, Editura Universitatii Transilvania ISBN:978-973-598-759-6, 2010, 455 pag.
134. Ivan, N. V., Berce, P., Drăgoi, M.,V., Oancea, Ivan, M.C., Gh., Bâlc, N., Lancea, C., **Udrioiu, R.**, Vasiloni, M., Mihali, M., Ivan, C., *Sisteme CAD/CAM/CAPP. Teorie și practică*, Editura Tehnică, București, ISBN:973-31-1530-4, 2004, 404 pag.
135. Postelnicu A., Deliu Gh., **Udrioiu R.**, Teoria, performanțele și construcția elicopterelor, Editura: Albastră, Grupul MicroINFORMATICA, ISBN:973-650-008-X, 2001, 401 pag
136. **Udrioiu, R.**, Bere, P., *Product Lifecycle Management. Terminology and Applications* Editura IntechOpen Limited, London, U.K. ISBN:978-1-78984-543-3, 2018, 121 pag., <https://www.intechopen.com/books/7489> , DOI: 10.5772/intechopen.75972

137. **Udriou, R.**, Computer-aided Technologies. Applications in Engineering and Medicine, Editura IntechOpen Limited, London, U.K. ISBN:978-953-51-2788-8, 2016, 160 pag., <https://www.intechopen.com/books/5379> , DOI: 10.5772/62618
138. **Udriou, R.**, Sisteme CAD/CAM. Aplicatii in SolidWorks, Editura: Universităţii Transilvania din Braşov, ISBN: 978-606-19-1505-7, 2022, 200 pag.
139. **Udriou, R.**, Sisteme CAD/CAPP/CAM. Aplicatii in CATIA V5, Editura: Universităţii Transilvania din Braşov, ISBN: 978-606-19-1506-4, 2022, 170 pag.
140. Ivan, N., V., Drăgoi, M., V., Păunescu T., Oancea, Gh., Lancea, C., Ivan, M., C., Lupulescu, N., Nedelcu, A., **Udriou, R.**, Sisteme CAPP. Sisteme CAD/CAM și optimizări tehnologice. Aplicații în construcția de mașini, Editura: Universităţii Transilvania din Braşov, ISBN:973-9474-38-1, 2002, 277 pag.
141. Nedelcu A, **Udriou R.**, Automatizarea sistemelor de producție, Editura:LUX LIBRIS ISBN:978-973-131-240-8, 2013, 337 pag.
142. Drăgoi, M., V, **Udriou, R.**, Vasiloni, A., M., Modelare 3D în AutoCAD 2002. Aplicatii practice, Editura:Albastră, Grupul Microinformatica, Cluj-Napoca, ISBN:973-650-111-6, 2003, 150 pag.
143. Postelnicu, A., **Udriou, R.**, Elicoptere – indrumar de laborator, Editura: Universităţii Transilvania din Braşov, 2000, 150 pag.
144. **Udriou R.**, Blaj M.. Conceptual design of a VTOL remotely piloted aircraft for emergency missions, JurnalBDI:Scientific Research & Education in the Air Force - AFASES 2016, ISSN 2247-3173, indexată EBSCO, DOI: 10.19062/2247-3173.2016.18.1.27
145. Angi N, **Udriou R.**, (2015). Design of a LSA aircraft using advanced software, JurnalBDI:Scientific Research & Education in the Air Force - AFASES 2015, ISSN 2247-3173, indexată EBSCO
146. Muntean S., **Udriou R.**, Brevet de inventie, Motor cu levitatie magnetica pentru aeronave si mod de realizare a levitatiei și a cuplului motor, Cerere de Brevet de inventie publicata Nr. RO134248 A0, 2019
147. Dima, G, Balcu Gh, **Udriou R.**, Brevet de inventie, Suport motor turbopropulsor, Nr. RO129076 B1, 2019
148. Dima, G, Balcu Gh, **Udriou R.**, Dispozitiv pliant pentru mentenanta aeronavelor, Cerere de Brevet de inventie publicata Nr. 129148 A0, 2014