

UNIVERSITATEA DIN PITEȘTI
FACULTATEA DE MECANICĂ ȘI TEHNOLOGIE
ȘCOALA DOCTORALĂ INGINERIA AUTOVEHICULELOR

Ing. Claudiu Diaconescu Cărbunescu

TEZĂ DE DOCTORAT

rezumat

Coordonator științific
Prof. univ. dr. ing. ION TABACU

PITEȘTI
2018

UNIVERSITATEA DIN PITEȘTI
FACULTATEA DE MECANICĂ ȘI TEHNOLOGIE

ȘCOALA DOCTORALĂ INGINERIA AUTOVEHICULELOR

Ing. Claudiu DIACONESCU CĂRBUNESCU

TEZĂ DE DOCTORAT

rezumat

Coordonator științific

Prof. univ. dr. ing. ION TABACU

Mentori

Prof. univ. dr. ing. Dinel POPA

Prof. univ. dr. ing. Viorel NICOLAE

Prof. univ. dr. ing. Ștefan TABACU

PITEȘTI

2018



UNIVERSITATEA PITEȘTI
FACULTATEA DE MECANICĂ ȘI TEHNOLOGIE
Școala Doctorală INGINERIA AUTOVEHICULELOR

ing. **Claudiu DIACONESCU CĂRBUNESCU**

TEZĂ DE DOCTORAT rezumat

APLICAREA SOLUȚIILOR TEHNICE ALE INGINERIEI INVERSE ÎN INDUSTRIA DE AUTOMOBILE

Comisia de evaluare a tezei:

Președinte:	prof. univ. dr. ing. Dumitru CRISTEA , Universitatea din Pitești
Conducător de doctorat:	prof. univ. dr. ing. Ion TABACU , Universitatea din Pitești
Referenți științifici:	prof. univ. dr. ing. Anghel CHIRU , Universitatea Transilvania din Brașov prof. univ. dr. ing. Nicolae BURNETE , Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca prof. univ. dr. ing. Viorel NICOLAE , Universitatea din Pitești

Data susținerii: 28.09.2018

Cuprins

Capitolul 1 - Noțiuni introductive	
1.1. Introducere	5
1.2. Stadiul actual al cercetarilor privind metodele si mijloacele aplicate in ingineria inversa	7
1.3. Planul de cercetare	16
1.3.1.Tema proiectului	16
1.3.2. Obiectivele proiectului	17
1.3.3. Tehnici și metodele de cercetare	17
1.4. Concluzii	19
Capitolul 2 – Scanare și prelucrare model geometric și realizare model 3D	
2.1. Introducere.....	21
2.2. Metode și mijloace tehnice pentru efectuarea cercetărilor	24
2.2.1. Pregătirea piesei pentru scanare 3D	24
2.2.2. Scanarea 3D a piesei și prelucrarea informației	26
2.3. Analiză cu privire la impactul pe care îl au modificările aplicate mesh-ului asupra verificărilor geometriei 3D	26
2.4. Pregătirea pentru tipărire 3D și tipărirea 3D	33
2.5. Concluzii	37
Capitolul 3 - Caracterizarea mecanică a materialelor utilizate în procesul de fabricație prin prototipaj rapid	
3.1. Materialele plastice. Introducere.....	38
3.1.1. Materialul plastic de tip ABS	40
3.1.2. Materialul plastic de tip Poliamidă	40
3.1.3. Materialul plastic de tip Polifenisulfonă	41
3.1.4. Materialul plastic de tip Polietilerimidă	41
3.2. Identificarea parametrilor de fabricare a pieselor prin tehnologia Fused Deposition Modelling – FDM	41
3.3. Definirea modelului geometric și analize experimentale.....	44
3.4. Caracterizarea mecanică a materialelor plastice	46
3.5. Studiul SEM	50
3.6. Concluzii	51
Capitolul 4 – Optimizarea structurilor	
4.1. Introducere	53
4.2. Prezentarea soluției tehnice pentru optimizare	54
4.3. Rezultate și discuții	59
4.4. Cercetări experimentale	61
4.5. Optimizarea structurilor existente	65
4.6. Concluzii	66
Capitolul 5 – Analiză dinamica	
5.1. Introducere	67
5.2. Studiul numeric	70
5.3. Cercetare experimentală	72
5.4. Concluzii	75
Capitolul 6 – Concluzii finale, contribuții personale și perspective de cercetare	
6.1. Concluzii	76
6.2. Contribuții personale	79
6.3. Direcții viitoare de cercetare	80
Bibliografie	82
Curriculum Vitae	88

1

Noțiuni introductive

1.1. Introducere

Ingineria asistată de calculator este o consecință firească a revoluției industriale de la începutul anilor 90. Implicațiile folosirii capacității sporite de prelucrare a datelor și informațiilor specifice calculatoarelor sunt direct cuantificabile prin dezvoltarea unor produse cu caracteristici superioare, (Buonamici et al. 2018; Al-Badour, Sunar, și Cheded 2011; Ćurković și Vučina 2014; Li et al. 2018; Jin, Li, și Gao 2013; Beccari et al. 2010; Tabacu, Diaconescu, și Oltean 2016; Oltean, Diaconescu, și Tabacu 2017) timpul redus de răspuns la cerințele pieței, reducerea costurilor de dezvoltare produs și de producție.

În timp, principalele jaloane ale dezvoltării ingineriei asistate de calculator constau în următoarele:

- apariția la începutul anilor 60 a primelor aplicații de tip CAD/CAM dar care, dat fiind prețul prohibitiv al echipamentului hardware, accesul era limitat la marile corporații. Odată cu apariția calculatorului personal dezvoltarea soluțiilor CAD/CAM iau avânt.
- sfârșitul anilor 70, când odată cu achiziția de către *Avions Marcel Dassault* a unei licențe cod/sursă a aplicației CADAM de la *Lockheed* punând bazele *Computer Aided Three Dimensional Interactive Application* (CATIA) și a BUILD, încep să fie dezvoltate aplicații de tip 3D CAD, aplicații care permitea la acea vreme modelarea elementelor de tip Solid.
- sfârșitul anilor 70 și începutul anilor 80, când odată cu primele calculatoare de tip stații de lucru, așa cum le cunoaștem astăzi. au apărut calculatoarele personale dezvoltate de IBM și HP;. acest moment a fost foarte important deoarece a permis accesul la tehnologie al unui număr însemnat de mare de

persoane, fapt ceea ce a condus la accelerarea dezvoltării computerului și aplicațiilor CAD.



Figura 1.1. Calculatorul personal la începutul anilor 80

- sfârșitul anilor 80 aduce în prim plan lupta companiilor dezvoltatoare de aplicații de proiectare asistată de calculator și a celor dezvoltatoare de hardware pentru o piață foarte importantă. Companii precum *Dassault Systems*, *McDonnell-Douglas*, *Computervision* or *Intergraph* cu un trecut important în dezvoltarea de aplicații asistate de calculator încercau să țină piept nou venitei *Parametric Technology Corp.* cea care a lansat *Pro/Engineer* o aplicație de proiectare asistată care avea o interfață de lucru prietenoasă și o viteză sporită de modelare a obiectelor solide. Din punct de vedere hardware lupta se purta între giganți precum *Sun Microsystems*, *SGI*, *HP*, *DEC*, *IBM* and *Apollo Computer* care dezvoltau stații de lucru care foloseau ca sistem de operare UNIX.
- în anii 90 soluțiile de proiectare asistată de calculator se stabilizează și maturizează împreună cu soluțiile hardware. Pe de o parte dezvoltatorii de soluții software încercau să confere aplicațiilor o interfață de lucru cu utilizatorul cât mai prietenoasă și o putere de modelare sporită atât a modulelor de suprafețe cât și de solizi în timp ce dezvoltatorii hardware încercau să crească puterea de calcul a echipamentelor. Această cursă a fost deosebit de benefică pentru dezvoltarea ingineriei asistate de calculator. Se lansează sistemul de operare Windows NT și se fac primele implementări de aplicații CAD pe acest sistem de operare.
- anii 90 sunt marcați de apariția primelor soluții de scanare 3D industriale suficient de precise, rapide cu costuri rezonabile; sunt dezvoltate tehnologiile pentru scanare 3D: punct laser, fascicul laser și fascicul de lumină.
- CNC-urile s-au dezvoltat rapid începând cu anii 70 odată cu dezvoltarea computerului și a aplicațiilor CAD/CAM. Deși inițial prețul lor era prohibitiv acesta a scăzut progresiv pe parcursul anilor 90 când au apărut microprocesoarele.

- Stereolitografia a pus bazele prototipării rapide prin tipărire 3D încă din anii 80. Primele piese tipărite 3D strat cu strat au apărut la începutul anilor 90.



Figura 1.3. Primele imprimante 3D

Așa cum se poate observa din această scurtă trecere în revistă a momentelor cheie din dezvoltarea ingineriei prezența calculatorului a determinat apariția tehnologiilor avansate de fabricație care presupun informatizarea și automatizarea tuturor etapelor din procesul de dezvoltare a unui produs.

În contextul de mai sus, prezenta lucrare își propune să facă o trecere în revistă a cercetărilor în domeniul ingineriei asistată de calculator tocmai din perspectiva câtorva tehnologii de fabricație cum ar fi ingineria inversă (RE), prototipare rapidă (RP), prelucrare CNC și enumerarea poate continua.

Aceste tehnologii permit experimentarea rapidă cu modele fizice și virtuale complexe în vederea optimizării procesului de producție și a obținerii de produse inovatoare orientate spre piață. Infrastructura de cercetare dezvoltată permit implementarea în procesul de dezvoltare de produs a o serie de concepte menite să crească nivelul de inovare și competitivitate pe piață (CAD/CAM, inginerie simultană, prototipare rapidă, inginerie inversă, fabricație rapidă, inginerie virtuală etc.).

1.2. Stadiul actual al cercetărilor privind metodele și mijloacele aplicate în ingineria inversă

Intr-un domeniu cu o dezvoltare exponențială în timp, precum cel al ingineriei asistate de calculator, prezentarea stadiului actual al cercetărilor este un demers temerar, motiv pentru care prezentarea următoare se rezumă la evidențierea celor mai reprezentative realizări legate de specificul studiului abordat în prezenta lucrare.

Lucrarea (Ćurković și Vučina 2014) prezintă o metodologie de achiziție, procesare și reprezentare a suprafețelor bazată pe triangulație și stereofotogrametrie. În fapt norii de puncte 3D rezultați în urma scanării obiectelor fizice sunt succesiv

parametrizați în suprafețe matematice cu ajutorul suprafețelor B-spline. Datorită unei proceduri nonliniare dezvoltate care țin seama de coordonatele punctelor de control erorile dintre norul de puncte 3D și suprafețele parametrizate sunt minimizate. Algoritmul astfel creat ajută la generarea suprafețelor de complexitate ridicată sau a celor din zone cu muchii ascuțite.

În concluzie această procedură de procesare automată a norilor de puncte 3D care pornește de la un set extins de variabile și de redistribuiri ale norilor de puncte cu scopul obținerii unor suprafețe B spline cât mai precise, conduce la realizarea de suprafețe 3D cu abateri minime față de norul de puncte. Prin urmare se poate concepe un sistem expert pe baza acestei proceduri care să poată opera cu un nor compact de puncte de control în locul norilor de puncte de mari dimensiuni.

(Tóth și Živčák 2014) prezintă o comparație între norii de puncte produși cu două tipuri de scanere (unul folosind tehnologia laser celălalt optică) precum și compararea acestora cu geometria 3D a piesei scanate. Autorii fac o trecere în revistă a tipurilor de scanere existente pe piață din punct de vedere constructiv (mobile și fixe), al metodei de scanare (cu contact și fără contact) și a tehnologiei de scanare (optice, laser, ultrasunete, raze X, distructiv și mecanic). Testul a fost realizat în condiții controlate de temperatură, lumină și umiditate care au rămas nemodificate pe durata testului pentru a nu influența în mod direct rezultatele. Metodologia de scanare a fost următoarea:

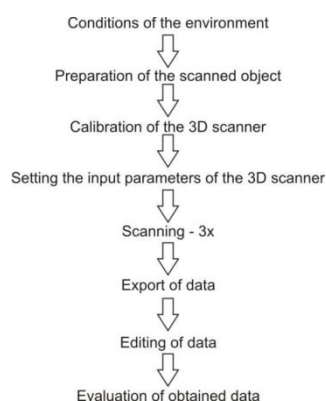


Figura1.6. Metodologia de scanare (Toth și Zivcak 2014)

Concluziile studiului prezintă punctele forte ale fiecărui scanner: astfel tehnologia laser are o acuratețe mai bună pe suprafețele cilindrice și plate precum și o variație a unghiurilor mai mică în timp ce tehnologia optică are o acuratețe mai bună în condiții de perpendicularitate. Ambele tehnologii de scanare sunt sensibile la schimbări ale formei, poziției și orientării suprafețelor scanate. În ceea ce privește compararea cu modelul 3D a capturilor realizate cu cele două tehnologii a fost relevată o acuratețe

mai bună pentru soluția de scanare pe bază de laser din punct de vedere al deviațiilor care sunt mai uniforme decât în cazul tehnologiei optice de scanare.

În lucrarea (Bénière et al. 2013) autorii se întorc către geometriile primitive în încercarea de a defini o metodă numită „retro-engineering” de reconstrucție 3D a unei reprezentări plecând de la o discretizare (Buonomici et al. 2018; Duro-Royo et al. 2014; Beccari et al. 2010; Galantucci, Percoco, și Dal Maso 2008). Luând în considerare câteva observații generale precum I) existența unor diferențe majore între norul de puncte creat prin metode de scanare față de numărul relativ mic de puncte relevante de discretizarea unei geometrii 3D, II) faptul că soluțiile de reconstrucție diferă de la o aplicație la alta, III) existența problemelor în reconstrucția suprafețelor în zone mai delicate precum muchiile ascuțite autorii definesc această nouă metodă care constă în următorii 3 pași respectiv:

- Extragerea primitivelor
- Construcția elementelor de tip wire (linii, curbe)
- Recrearea unui model 3D consistent.

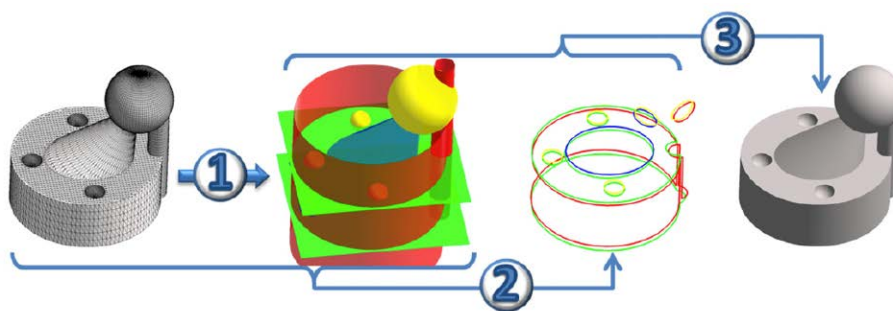


Figura 1.7. Reprezentarea grafică a celor trei pași.

Această metodă de construcție a modelelor 3D plecând de la un nor de puncte stă la baza unui algoritm de lucru pentru o serie de aplicații software scopul final fiind obținerea unor geometrii 3D care au abateri minime față de norul de puncte. Resursele hardware sunt foarte importante în stabilirea timpilor de realizare a geometriilor 3D, cu cât norul de puncte sau mesh-ul este mai complex cu atât mai mult va dura realizarea geometriei 3D. Concluziile studiului sunt acelea ca „retro-engineering-ul” este o soluție stabilă și robustă tocmai pentru că lucrează cu primitive și poate fi adaptată ușor pentru a lucra cu zonele de racordare, îndoire sau chiar cu suprafețe complexe (B-spline sau NURBS)

(Beccari et al. 2010) prezintă o soluție așa zis low-cost de realizare a ingineriei inverse care constă în definirea unui sistem de achiziții stereo care constă în două camere cu infraroșii și un dispozitiv cu contact mobil wireless de forma unui pix împreună cu o metodă de reconstrucție a suprafețelor. În vederea realizării mesh-ului

dispozitivul wireless urmărește profilul piesei 3D în diferite secțiuni urmând ca sistemul să producă automat mesh-ul care ulterior este prelucrat pe suprafețe mai mici. Soluția permite inclusiv scanarea suprafețelor complexe.

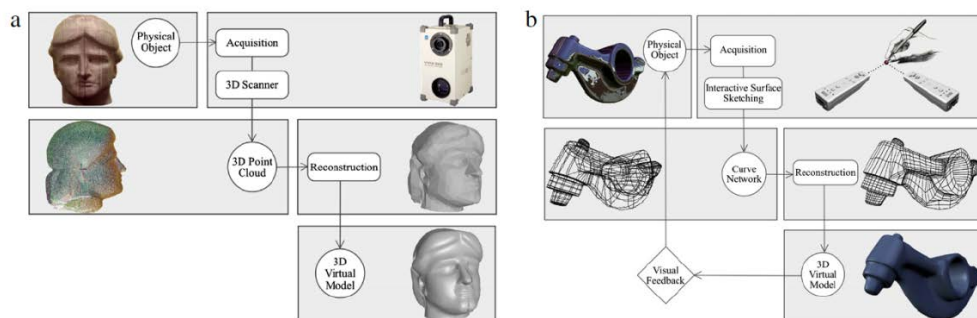


Figura 1.8. Comparație între procesul de reverse engineering prin metoda a) scanare optică și b) stereo (sau Fast interactive reverse engineering system FIRES) (Beccari et al. 2010)

FIRES nu pune accentul pe precizia reproducerii obiectului 3D real (din acest punct de vedere metodele convenționale de scanare optică sunt mai indicate) ci își propune să reproducă stilul pieselor de origine lăsând utilizatorului posibilitatea să improvizeze. Însă cel mai important aspect este legat de algoritmi de lucru ai aplicației care colectează datele și le prelucrează. Din această perspectivă informațiile capturate sunt prelucrate în 3 pași:

1. trecerea de la un mesh polilinie la unul tri-quad
2. rafinarea informațiilor prin transformarea mesh-ului tri-quad în mesh de bază
3. transformarea mesh-ului de bază în suprafețe componente ale unei suprafețe complexe.

Date fiind diversele limitări ale acestei soluții (incluzând aici și prezența operatorului uman) soluția nu poate avea o acuratețe care să coboare sub 1mm.

Din concluziile studiului înțelegem că deși soluția este una low cost, ea permite realizarea geometriilor 3D plecând de la geometriile reale prin folosirea metodei de contact, metodă care deși are o serie de minusuri penalizatoare precum acuratețe slabă la care se adaugă imposibilitatea replicării formelor care nu pot fi accesate de către elementul tactil, . Acuratețea poate fi îmbunătățită simțitor prin creșterea complexității hardware.

Lucrarea abordează problema programării procesului de prototipare rapidă și producție (RP/M) în sensul optimizării acestuia atât din perspectiva timp cât și a acurateții produsului final obținut. Autorii folosesc pentru acesta un mix de soluții care au la bază algoritmi capabili să genereze aceste contururi: I) metoda trasării pe fiecare nivel a curbelor de contur care păstrează acuratețea geometrică precum și II) metoda „zigzag” necesară aproximării suprafeței interioare a fiecărui nivel. În plus sunt folosiți algoritmi adaptivi în vederea adaptării vitezei cu care capul de tipărire lucrează pe

întreaga durată a procesului conducând direct la scăderea timpului de realizare a prototipului. Pentru aceasta autorii au abordat studii biomedicale de complexitate ridicată în vederea demonstrării performanțelor sporite.

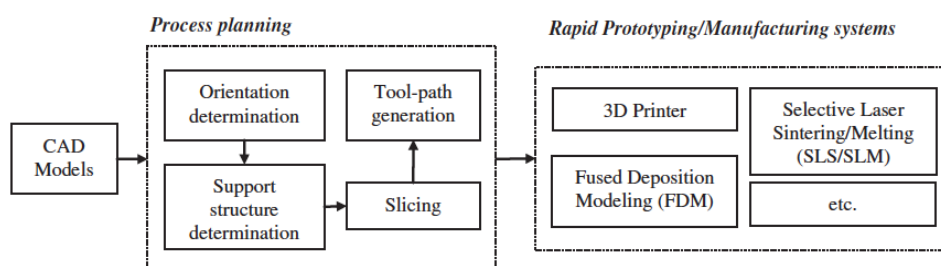


Figura 1.11. Schița sintetică a procesului de prototipare rapidă și producție (RP/M) (Jin, Li, și Gao 2013)

Metoda „zigzag” constă în realizarea unui model linie cu linie pe cele două direcții (X și Y) pe fiecare nivel. Punctele slabe ale acestei metode sunt I) pentru suprafețe complexe generează curse rapide du-te/vino ale capului de tipărire care conduc la o calitate slabă a suprafeței tipărite și II) modelul tipărit va avea probleme de contracție pe direcția în lungul căreia se va face tipărirea 3D. Inhibarea efectelor negative generate de metoda „zigzag” pe suprafețe complexe este realizată cu ajutorul metodei generării de contururi. Efectele combinării celor două metode se pot observa în Figura 12

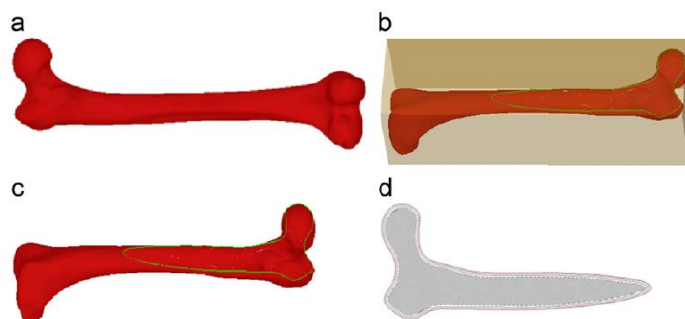


Figura 1.12. a) Model tibie, b) nivelul secțiunii, c) modelul secțiunii, d) conturul trasat pe nivelul secționat (Jin, Li, și Gao 2013)

În concluzie se pot observa din Figura 1.13 avantajele folosirii acestei metode din punct de vedere al timpului mai scurt de producție și al vitezei dar și al acurateții modelului final prototipat.

Problema scanării laser a obiectelor de mari dimensiuni cum sunt construcțiile industriale astfel încât rezultatul scanării să poată reda într-un timp cât mai scurt situația reală din șantier este un subiect investigat de cercetători (Bosché 2010). Autorul se concentrează încă de la început pe soluția laser de scanare a obiectelor de mari dimensiuni fiind singura soluție care minimizează factorii perturbatori care pot

exista pe santiere (lumină, caldură, praf etc) avand și o acuratețe ridicată. Metoda lor constă în introducerea noțiunii „Interactive Closest Point (ICP)” care nu este altceva decât o soluție mai robustă de suprapunere a punctelor apropiate ceea ce conduce la creșterea calitatii rezultatului final. Ipoteza astfel obținută din santier este comparată cu cea a modelului 3D (folosind metoda ICP) și astfel se poate afla stadiul în care se afla șantierul precum și respectarea toleranțelor dimensionale.

Metoda propusă de autor se bazează pe următorii 3 pași:

1. înregistrare grosieră a modelului
2. înregistrare fină a modelului
3. recunoașterea obiectului

Înregistrarea grosieră a modelului constă în alegerea manuală a minim 3 perechi de puncte corespunzătoare modelului scanat și cel 3D. Înregistrarea grosieră permite analiza calității controlului dimensional ea fiind completată cu pasul 2. Acest pas nu este altceva decât definirea unui algoritm de calcul care pe baza pasului 1 face căutări locale a celei mai bune soluții. Pasul 3 presupune suprapunerea suprafețelor între modelul 3D și modelul scanat folosind metoda recunoașterii metrice (un obiect este recunoscut atunci când suprafața acoperită de norul de puncte construit este mai mare decât o suprafață de referință calculată în mod automat de un algoritm)

În Figura 1.15 este prezentat succint întregul proces plecând de la modelul scanat (norul de puncte)(a) și modelul 3D CAD (b) urmate de recunoașterea obiectelor atât în norul de puncte (c) cât și în modelul CAD (d). Diferențele între modelul 3D CAD și modelul scanat sunt materializate în culori diferite.

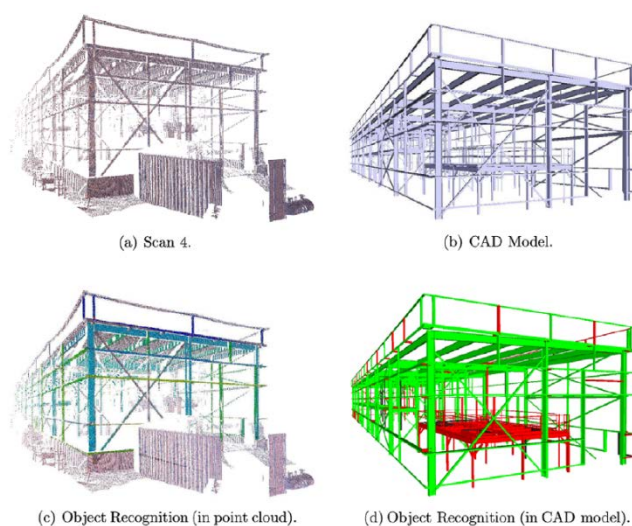


Figura 1.15. Procesul de scanare și recunoaștere a modelului 3D CAD (Bosché 2010)

Concluzia este că această abordare de monitorizare automată a stadiului unei construcții folosind scanarea 3D laser și modelul 3D CAD cu ajutorul unui algoritm

îmbunătățit de calcul (ICP) are următoarele avantaje I) automatizare, II) acuratețe, III) eficiență și IV) robustețe în ciuda condițiilor grele de pe șantiere.

„Biomanufacturing” (Mitsuishi et al. 2013) este o trecere în revistă a sistemelor biomedicale cu ajutorul cărora medicina a progresat foarte mult în ultimul timp. În egală măsură sunt prezentate și problemele apărute sau potențiale la implementarea acestor tehnologii precum și obiectivele de viitor. În Figura 1.16 este prezentată schema sintetică a procesului de bioproducție (biomanufacturing).

După cum se poate observa în fapt este vorba de cunoașterea în detaliu a tehnologiilor de tăiere, matrițerie a proceselor fizice și chimice etc.

Cum bioproducția acoperă atât procesul țesuturilor (oase) cât și a biomaterialelor constrângerile de design sunt acelea care țin de interacțiunea dintre cele două. Din acest motiv lucrul cu țesuturile vii se petrece în condiții stricte de mediu înconjurător (curățenie, sterilitate, etc.) iar materialele folosite în aceste condiții trebuie să aibă la rândul lor proprietăți deosebite.

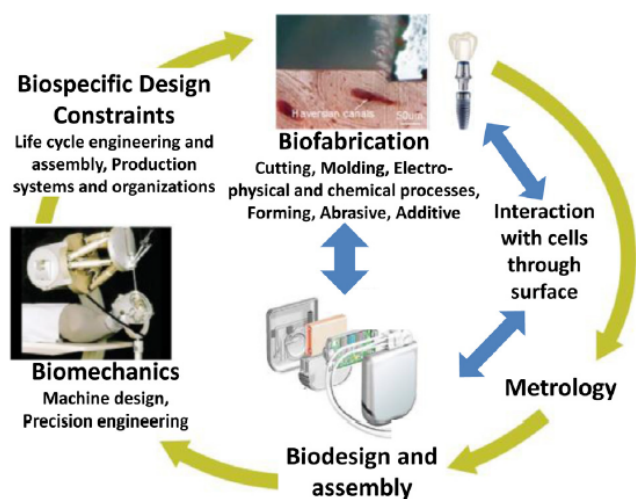


Figura 1.16. Sisteme biomedicale (Mitsuishi et al. 2013)

În cele ce urmează ne vom referi în mod deosebit la procesarea datelor medicale rezultate în urma operațiilor de tomografie (scanare cu raze X sau rezonanță magnetică). Provocarea constă în realizarea geometriei anatomice a diverselor organe și țesuturi folosind prototiparea rapidă și materiale biologice. În acest sens sunt dezvoltate așa numitele „materiale fantomă” care reproduc duritatea, rezistența și alte proprietăți ale țesuturilor reale în vederea stabilirii modului de interacțiune dintre dispozitivul medical dezvoltat și țesutul viu.

În concluzie tot mai multe procese și tehnologii industriale sunt implementate în medicina cu scopul creșterii calității actului medical. Bioproducția are ca și elemente

de bază biomecatronica, biofabricația, biodesignul și procesul de asamblare și reprezintă o platformă excelentă pentru inovare în ingineria de mare precizie, în nanotehnologie, biotehnologie și științele cognitive.

În (Mitsuishi et al. 2013) se prezintă oportunitatea oferită de rezonanța magnetică în privința efectuării de măsurători metrologice. Principalul avantaj al folosirii computerului tomograf începând cu anii 80 este identificarea problemelor din structura internă a pieselor (defecte ascunse) care nu pot fi identificate prin alte soluții. Începând cu anii 90 s-a pus problema măsurării acestor defecte însă până în 2005 precizia de măsurare nu a putut fi coborâtă sub 0.1mm. Începând cu 2005 pe piață încep să apară computere tomograf destinate maturării pieselor cu o acuratețe sporită culminând cu folosirea aplicației în scopuri metrologice.

Figura 1.20 prezintă principiul de funcționare al computerului tomograf: o sursă emite raze X asupra unui obiect prin care acestea trec fiind apoi captate de un receptor. Pe parcursul acestui proces este foarte important ca obiectul sau sursa de radiații să se rotească și/sau translateze una în raport cu alta pentru ca rezultatul obținut să poată fi convertit într-un element 3D. Calitatea rezultatului este influențată de peste 20 factori legați de caracteristicile constructive și funcționale ale echipamentului experimental și de metodologiile de lucru abordate precum tipul de material scanat, mărimea radiației X, energia cu care este emis fluxul de radiații, timpul de expunere, viteza de rotație/translate și precizia cu care sunt efectuate aceste mișcări, temperatura, calibrarea geometrică a detectorilor, rezoluția și sensibilitatea de captare, numărul de nivele în care se face analiza, algoritmi folosiți la interpretarea datelor captate cât și la reconstrucție. axele de rotație, capacitatea de atenuare a împrăștiilor razelor X, repetabilitatea detectării punctelor etc.

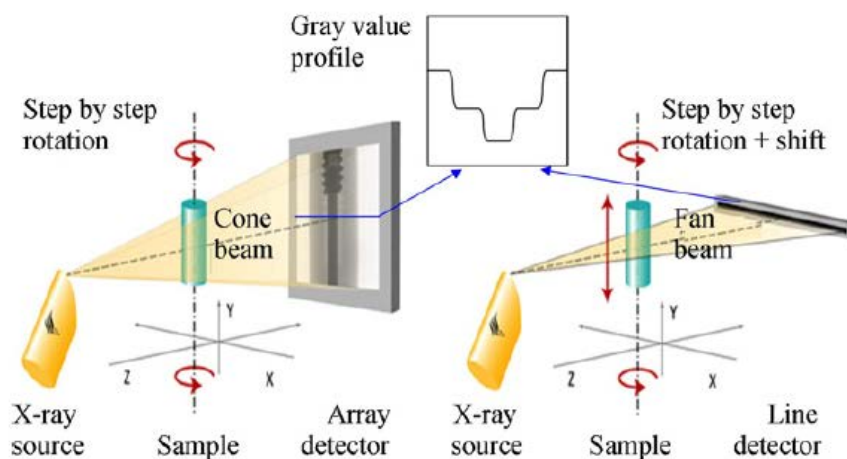


Figura 1.20. Principiul de funcționare al unui computer tomograf (Mitsuishi et al. 2013)

Pentru ca un computer tomograf să poată fi folosit ca un dispozitiv metrologic toți factorii prezentați anterior trebuie eliminați sau măcar efectele generate diminuate.

Din acest motiv, în acest proces de scanare sunt folosite proceduri clare, puse la punct pe baza unor elemente de bună practică.

În Figura 1.21 sunt prezentate aplicații de scanare cu raze X folosite, cu succes, în controlul nedestructiv pentru determinări care prin metodele tradiționale (distructive) ar necesita un timp de lucru îndelungat iar riscul ca defectul precum pereți subțiri, goluri în structura pereților, defecte ale nodurilor de sudură etc să treacă neobservat este mare. Mai mult, se pot realiza comparații între geometria 3D CAD și geometria rezultată în urma scanării cu ajutorul computerului tomograf prin suprapunerea imaginilor și prin secționarea lor identificându-se în timp real eventualele probleme din structura piesei fizice (Figura 1.22).

Din concluziile studiului rezultă că, deși această soluție de scanare a fost pusă la punct relativ recent, acuratețea ei mult îmbunătățită a ajuns să fie comparabilă cu rezultatele unei mașini de măsurat în coordonate, care reprezintă referința din punct de vedere al mijloacelor de control, scanarea CT având în plus marele avantaj ca piesele nu trebuie distruse pentru a se face analiza elementelor mai puțin vizibile sau a defectelor structurale. CT este astfel singurul proces de inspecție care permite combinarea controlului dimensional cu cel al calității materialului.

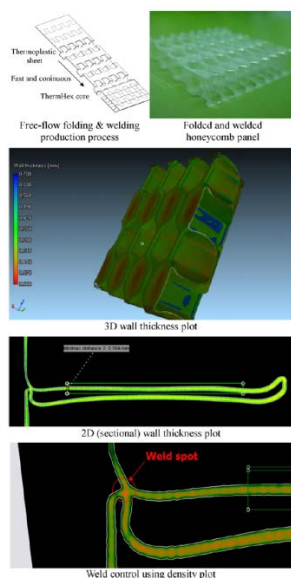


Figura 1.21. Aplicații – panou figure (Mitsuishi et al. 2013)

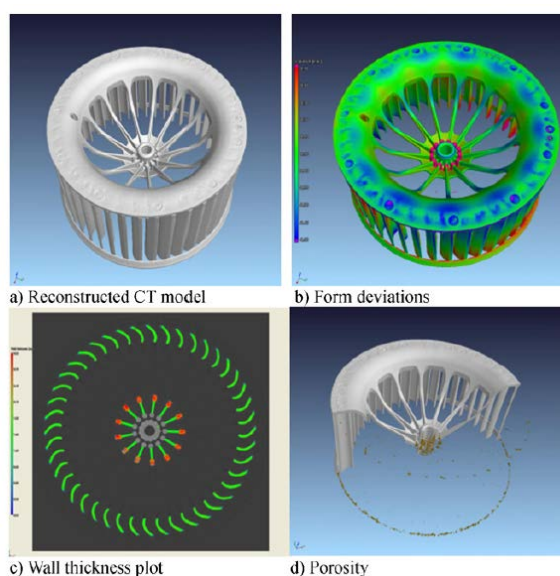


Figura 1.22. Analiză structurală elice (Mitsuishi et al. 2013)

(Paulic et al. 2014) prezintă procesul complet de prototipare rapidă pentru un obiect fizic. Pentru aceasta autorii folosesc un proces de inginerie inversă de scanare optică a obiectului fizic realizând astfel norul de puncte pe care cu ajutorul aplicațiilor CAE/CAD îl prelucrează obținând astfel geometria virtuală care este apoi tipărită 3D cu ajutorul unei imprimante. Mai mult decât atât, lucrarea prezintă o serie de elemente de cost care demonstrează implicațiile pe care le au asupra prețului final de producție

o serie de parametrii cum ar fi: tipul materialului, reciclarea acestuia, numărul de piese care se realizează la o tipărire, complexitatea geometriei.

(Park și Chang 2009) se concentrează pe identificarea zonelor care nu pot fi scanate dintr-o singură trecere a dispozitivelor de scanare optice acest lucru având ca rezultat direct I) lipsa zonelor respective din mesh, II) efectuarea de treceri suplimentare și re poziționări relative între scaner și piesă și III) creșterea timpului necesar obținerii unui mesh complet în urma operației de scanare. Se constată că dacă sistemele optice (SLS) au ca principal punct slab faptul că de pe suprafețele pe care nu ajung franje de lumină nu sunt captate puncte prin urmare apar goluri în norul de puncte și implicit în mesh, , problema este rezolvată prin scanări succesive și re poziționări ale piesei scanate și scanerului. Pentru a eficientiza acest proces autorii propun o soluție care are la bază următoarea schemă logică compusă din 3 pași:

1. scanare pe direcții prestabilite
2. identificarea zonelor care lipsesc (golurilor)
3. identificarea direcției/direcțiilor de scanare care vor permite rezolvarea problemelor de la pasul 2

Autorii se concentrează pe pasul 2, respectiv pe identificare golurilor, deoarece această fază presupune cele mai mari resurse de calcul dar și cel mai mare timp pentru găsirea soluțiilor optime fiind un pas repetitiv pentru cazul în care nu este găsită o soluție.

1.3. Planul de cercetare

1.3.1. Tema proiectului

Încă de la începutul anilor 90, productivitatea și competitivitatea reprezintă preocupările principale ale industriei prelucrătoare la nivel mondial. Pentru atingerea acestor obiective și pentru a răspunde provocărilor, companiile inovatoare au adoptat tehnologii avansate de fabricație ca: modelarea și fabricarea asistată de computer, sisteme de fabricație flexibile, proiectarea asistată de calculator a proceselor tehnologice etc.

Presiunea concurenței internaționale și a pieței globale din secolul 21 a condus la necesitatea reducerii costurilor de producție și a timpului de intrare pe piață a unui produs nou, dar fără a diminua calitatea și proprietățile funcționale ale acestuia. Răspunsul rapid și flexibilitatea în fața unei noi oportunități de afaceri sunt unii dintre cei mai importanți factori ce influențează competitivitatea. Pentru a răspunde acestor provocări, trebuie să adoptate tehnologii avansate de fabricație, tehnologii ce presupun informatizarea și automatizarea tuturor etapelor din procesul de dezvoltare

al unui produs. Ingineria Inversă, Prototiparea Rapidă și metodele avansate de prelucrare CNC sunt tehnologii avansate de fabricație, ce necesită implicarea directă a sistemelor controlate de computer.

Aceste tehnologii permit experimentarea rapidă cu modele fizice și virtuale complexe în vederea optimizării procesului de producție și a obținerii de produse inovatoare orientate spre piață. Infrastructura de cercetare dezvoltată permit implementarea în procesul de dezvoltare de produs o serie de concepte menite să crească nivelul de inovare și competitivitate pe piață (CAD/CAM, inginerie simultană, prototipare rapidă, inginerie inversă, fabricație rapidă, inginerie virtuală etc.).

1.3.2. Obiectivele proiectului:

Obiectivul principal al proiectului este de a identifica posibilități de utilizare a mijloacelor și metodelor ingineriei inverse pentru realizarea unor produse cu performanțe sporite.

Obiectivele specifice necesare atingerii obiectivului principal sunt următoarele:

- Cercetări privind utilizarea tehnologiilor avansate de fabricație, RP și RE, pentru dezvoltarea de produse inovatoare din materiale compozite destinate industriei auto
- Cercetări privind realizarea modelelor virtuale prin scanare 3D și obținerea modelelor fizice prin prototipare rapidă.
- Cercetări privind optimizarea proiectării reperelor din mase plastice.

1.3.3. Tehnicile și metodele de cercetare

Pentru o piesă sau o componentă care este modelată într-un mediu CAD specializat sunt posibile două rute diferite:

- a. prin metoda directă - piesa este modelată direct în sistemul CAD pornind de la un set de specificații;
- b. prin inginerie inversă – în care datele 3D necesare sunt obținute plecând de la o piesă fizică existentă, pentru care cu ajutorul echipamentelor specializate (**scaner 3D sau mașină de măsurat în coordonate în funcție de complexitatea geometriei și rezoluția dorită**), norul de puncte obținut este prelucrat pentru reconstrucția 3D a modelului.

Modelul solid astfel creat este apoi convertit într-un fișier în format STL (STereoLithography). În acest fișier, suprafața modelului este aproximată cu ajutorul poligoanelor.

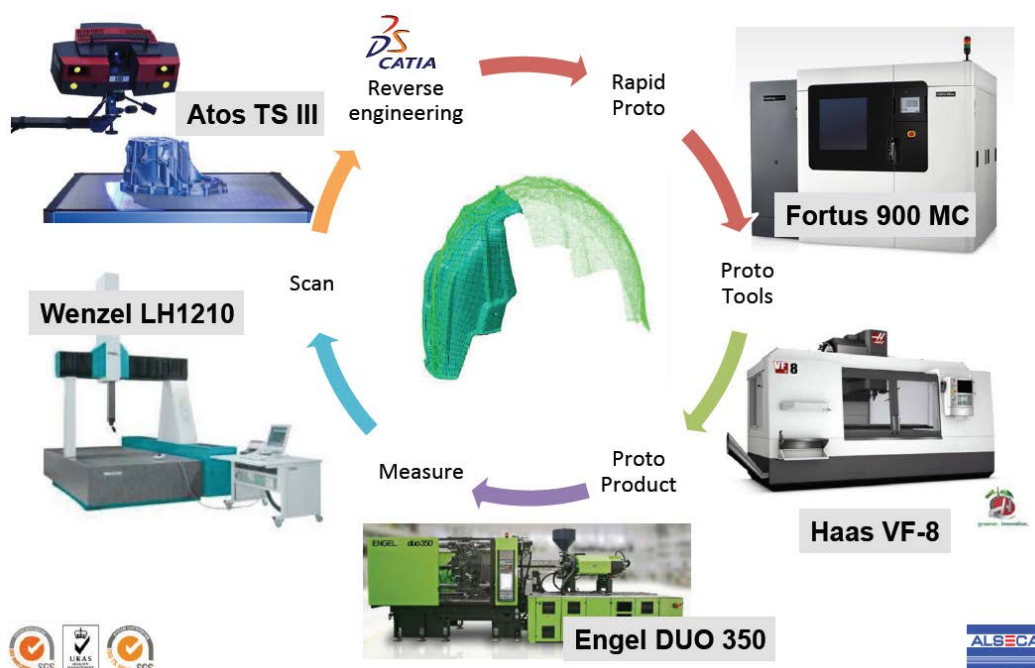


Figura 1.27. Reprezentare grafică a procesului integrat de prototipare rapidă prin diverse tehnologii specifice laboratorului Alseca Engineering SA

- A. Metoda directă presupune conceperea unei piese de la bun început în mediu virtual (CAD) ținând cont de constrângerile geometrice și de toleranța pe care aceasta trebuie să le respecte în vederea îndeplinirii rolului funcțional dorit. Modelul virtual ajunge să fie complet definit la momentul la care se realizează prototipurile care permit punerea la punct a detaliilor. Prototiparea se poate realiza prin metode clasice cu ajutorul unei matrițe prototip care permite realizarea unui număr redus de piese înainte de a se uza, sau prin metode de prototipare rapidă care permit realizarea pieselor cu ajutorul imprimantelor 3D. Imprimantele 3D pot fi categorisite după mai multe criterii.

Pentru realizarea modelelor fizice detaliate în această lucrare vom folosi o imprimanta 3D Fortus 900 care utilizează pentru realizarea pieselor prototip tehnologia FDM.

- B. Ingineria inversă presupune realizarea geometriei 3D virtuale plecând de la o geometrie existentă. Pentru a putea fi realizată geometria virtuală se folosește un scanner 3D care în funcție de modul în care realizează norul de puncte sunt clasificate astfel:
- Cu contact
 - Fără contact

În general culegerea datelor folosind tehnologia cu contact este asociată CMM-urilor care sunt dispozitive foarte exacte folosite în special în domeniul metrologiei motiv

pentru care acuratețea datelor culese este foarte bună. Această metodă are ca principal neajuns durata mare de colectare a datelor.

Tehnologia fără contact presupune scanarea obiectelor folosind dispozitive optice, laser sau raze X (CT). Precizia acestor dispozitive este foarte bună în măsura în care sunt îndeplinite anumite condiții ale mediului în care se desfășoară acest proces, acesta fiind principalul motiv pentru care în general se folosește o soluție în detrimentul alteia în anumite domenii. Pe de altă parte soluțiile de scanare CT permit culegerea de date în structura elementelor scanate motiv pentru care această metodă este folosită extensiv în domeniul medical. Vom folosi un dispozitiv de scanare optic Atos III de mare rezoluție folosit la scară largă în industria constructoare de mașini.

Aplicația CAD folosită pentru prelucrarea datelor este Catia V5 , mai exact modulele de „reverse engineering” și de modelare avansată 3D „hybrid design”.

Fișierul STL este analizat, iar modelul este “tăiat” în secțiuni transversale. Aceste secțiuni transversale sunt recreate succesiv în echipamentul de prototipare rapidă și apoi combinate pentru a forma modelul fizic 3D din materialele disponibile.

Cu ajutorul modulului software CAE este verificată îndeplinirea cerințelor de design. Dacă acestea sunt îndeplinite, se trece la realizarea prin CF-CNC sau RP a piesei/prototipului/matriței etc. Dacă aceste cerințe nu sunt îndeplinite este reluat pasul 1.

Control dimensional-geometric al piesei/prototipului/matriței. Dacă sunt respectate limitele de toleranță, **se validează prototipul/produsul/matrița**.

Dacă limitele de toleranță nu sunt respectate se reia pasul 1 pentru optimizarea modelului geometric.

1.4. Concluzii

În cadrul acestei lucrări au fost identificate și studiate referințe bibliografice cuprinse în fluxul principal al revistelor de specialitate. În acest fel s-a realizat o documentare a etapelor parcurse în domeniul ingineriei inverse, soluțiilor de optimizare a structurilor și tehnicilor de realizare a prototipurilor. Această cercetare a permis alegerea și stabilirea obiectivelor lucrării.

Programul de cercetare s-a desfășurat în cadrul Centrului de Cercetare ”Ingineria Automobilului” al Universității din Pitești și în Laboratorul de Cercetare al Societății Alseca Engineering S.A. care a fost implementat prin Programul Operational Creșterea Competitivității Economice, Axa Prioritară 2 – Competitivitate prin CDI, Operațiunea 2.3.2. Dezvoltarea infrastructurii de C-D a întreprinderilor, cu crearea de noi locuri de muncă pentru C-D, numele proiectului fiind „Dezvoltarea infrastructurii de CD a firmei

ALSECA ENGINEERING S.A. prin înființarea laboratorului de tehnologii avansate de fabricație / Inotech-CD”. În cadrul implementării acestui proiect am fost implicat direct în funcția de director de proiect.

2

Scanare și prelucrare model geometric și realizare model 3D

2.1. Introducere

Desfășurarea programului de cercetare s-a făcut în cadrul Centrului de Cercetare "Ingineria Automobilului" al Universității din Pitești și în Laboratorul de Cercetare al Societății ALSECA Engineering, acest din urmă laborator dispunând de o metodă modernă de prototipare rapidă¹ și anume de tehnologia **Fused Deposition Modelling – FDM** (Bakar, Alkahari, și Boejang 2010; Schniederjans 2017; Mitsuishi et al. 2013; Herrmann et al. 2014; Diaconescu, Tabacu, și Oltean 2017) (Depunere de material topit) a fost dezvoltată (1988) și patentată de către Scott Cramp în 1992 [US Patent 5121329 - : Apparatus and method for creating three-dimensional objects]. Fondată în 1989, Stratasys Inc. este compania ce a dezvoltat sistemele comerciale de prototipare rapidă prin tehnologia Fused Deposition Modeling.

Sistemele bazate pe tehnologia FDM au fost folosite cu succes în domenii ca: industria aerospațială, industria auto, aplicații medicale și militare, în scopuri educaționale în Universități și Institute de Cercetare etc.

Tehnologia **Fused Deposition Modelling – FDM**, care folosește pentru realizarea modelului 3D procesul de extrudare sunt echipamente *high-end* versatile, care permit realizarea atât de prototipuri pentru testare și experimentare, cât și de prototipuri

¹ O clasificare a sistemelor comerciale de prototipare rapidă se poate realiza după forma inițială a materialului din care este realizat prototipul, astfel [Chua C.K., Leong K.F., Lim C.S., Rapid prototyping: principles and applications, 2nd Edition]. 1. Sisteme pe bază de lichide. Exemple: Stereolithography Apparatus (SLA) - 3D Systems, Solid Ground Curing – Cubital, Solid Creation System (SCS) – Sony, Solid Object Ultraviolet-Laser Printer (SOUP) – CMET, E-Darts – Autostrade, Soliform - Teijin Seiki etc. 2. Sisteme pe bază de solide. Exemple: Laminated Object Manufacturing (LOM) - Cubic Technologies, Fused Deposition Modeling (FDM) – Stratasys, Paper Lamination Technology (PLT) - Kira Corporation, Multi-Jet Modeling System (MJM) - 3D Systems, ModelMaker și PatternMaster – Solidscape etc. 3. Sisteme bazate pe pulberi. Exemple: Selective Laser Sintering (SLS) - 3D Systems, Sistemele EOSINT – EOS, Three-Dimensional Printing (3DP) - Z Corporation, Laser Engineered Net Shaping (LENS) – Optomec, Multiphase Jet Solidification (MJS) – Fraunhofer, Direct Metal Deposition (DMD) - Precision Optical Manufacturing, Electron Beam Melting (EBM) - Acram.

funcționale. Unul din avantajele tehnologiei FDM este acela permite realizarea de prototipuri fizice dintr-o mare varietate de materiale:

- ABS (Acrilonitril-butadiena-stirenul) ABS-ul este un grup de copolimeri, în care monomerii de stiren și acrilonitril, sunt „grefați” cauciucului sintetic polibutadienă. Componenta acrilonitril conferă o bună rezistență copolimerului la agresiuni chimice, iar componenta polibutadienă îi conferă o rezistență ridicată mecanică la șoc.
- PC-ABS (polycarbonat- Acrilonitril-butadiena-stirenul) – proprietăți mecanice și termice superioare datorită polycarbonatului
- PC (polycarbonat) – proprietăți mecanice bune, folosit mai ales ca termoplast
- Polieterimida – rezistență la temperatură și atac chimic ridicată
- Polifenilsulfona – ideal pentru medii caustice și agresive chimic ș.a

În cadrul cercetărilor ce fac obiectul prezentului capitol se utilizează o mașină de tipărit 3D Fortus 900mc (Figura 2.1.), produsă de Stratasys (Ahn et al. 2009; Bakar, Alkahari, și Boejang 2010) și care are următoarele caracteristici:

- dimensiunea maximă a obiectelor care se pot tipări 3D: 914x610x914mm;
- tipărire în ciclu continuu cu ajutorul funcției de schimbare automată a cartușelor de material;
- grosimea celui mai fin strat de tipărire 0,18mm;
- material suport solubil pentru piesele din ABS și PA;
- capete de tipărire cu 3 tipuri de grosimi;
- acuratețe de tipărire cuprinsă între $\pm .0015$ și $\pm .089$ mm în funcție de capetele de tipărire, soluțiile de tipărire și material;
- cameră de tipărire cu control al temperaturii în vederea obținerii de piese corecte dimensional și stabile din punct de vedere al contracției;
- echipament de îndepărtare a materialului suport;
- aplicație de tipărire 3D dedicată.



Figura 2.1. Echipamentul de tipărit 3D Fortus 900 prin tehnologia FDM

În ceea ce privește colectarea datelor de suprafață sunt disponibile două categorii de metode și anume :

- metode cu contact
- metode fără contact.

În cadrul cercetărilor culegerea de informații s-a făcut folosind metoda fără contact (Tóth și Živčák 2014; Paulic et al. 2014), folosind pentru determinarea caracteristicilor geometrice ale suprafeței lumina sau fascicul laser, metodă de digitalizare **3D optică** care permite măsurarea rapidă a întregii suprafețe a pieselor investigate. Un sistem de scanare optică se bazează pe principiul triangulării și corelarea imaginilor. Unitatea sensorului proiectează franje luminoase pe suprafața reperului măsurat, care sunt apoi detectate de 2 senzori optici. Cu ajutorul computerului, sunt calculate automat coordonatele 3D pentru fiecare pixel al celor doi senzori de înaltă precizie. Echipamentul de scanare 3D pe care îl vom folosi se numește Atos III Triple Scan și are următoarele caracteristici tehnice:

- număr de pixeli/camera: $2 \times 8.000.000$;
- suprafață măsurată: $38\text{mm}^2 \div 2000\text{mm}^2$;
- distanța între puncte: $0,01 \div 0,61\text{mm}$;
- număr de puncte măsurate la o scanare: 8.000.000

În Figura 2.2 este prezentat dispozitivul de scanare 3D folosit în cadrul cercetărilor efectuate:



Figura 2.2. Echipamentul de scanat ATOS III

Aplicațiile software folosite în cadrul cercetărilor efectuate sunt:

- **Catia V5R19** – aplicație CAD;
- **MeshLab** și **Paraview** – aplicații de prelucrare a mesh-ului;
- **Matlab** – aplicație de programare;
- **Insight** – aplicație pentru tipărire 3D;

- **Control Centre** – aplicație pentru tipărire 3D;
- **ATOS Profesional** – aplicație de colectare a norilor de puncte rezultați în urma scanării 3D

2.2. Metode și mijloace tehnice pentru efectuarea cercetărilor

Ca obiect de studiu în cadrul cercetărilor efectuate s-a folosit ca referință o piesă de tip elice de la sistemul de răcire a unui autoturism, programul cercetărilor fiind urmatorul:

1. pregătirea piesei pentru scanare 3D;
2. scanarea 3D și evaluarea primelor informații;
3. analiză cu privire la impactul pe care îl au modificările aplicate mesh-ului și verificarea geometriei 3D;
4. pregătirea pentru tipărire și tipărire 3D;
5. analiza finală.

2.2.1. Pregătirea piesei pentru scanare 3D

În Figura 2.3 este prezentată piesa elice într-o fotografie de ansamblu, iar în Figura 2.4 numai referința ce va face obiectul studiului de cercetare.

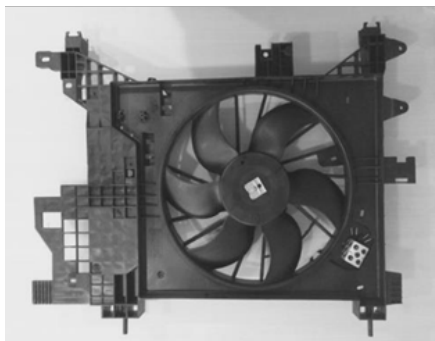


Figura 2.3. Ansamblul radiator



Figura 2.4. Elice radiator

Studiul de cercetare își propune să analizeze care este impactul privind calitatea și acuratețea cu care este tipărit 3D un produs atunci când este modificat/alterat norul de puncte/ mesh-ul unei piese care a fost scanată 3D anterior precum și eventualele alte aplicații în care poate fi folosită informația cunoscut fiind că mărimea fișierelor rezultate în urma scanării 3D a obiectelor (fișiere .STL²) au dimensiuni cu atât mai mari cu cât geometria piesei scanate este mai complexă ceea ce face ca lucrul cu acest

² Stereolithography (3D Systems)

tip de fișiere sa fie foarte complicat si să necesite resurse hardware importante (Galantucci, Percoco, și Dal Maso 2008; Bènière et al. 2013; Buonamici et al. 2018; Duro-Royo et al. 2014; Ćurković și Vučina 2014; Bosché 2010).

În vederea demarării procesului de scanare 3D trebuie îndeplinite următoarele condiții:

1. încăperea în care se efectuează scanarea trebuie să aibă o atmosferă curată, fără praf și să asigure condiții de iluminare foarte bune;
2. pregătirea piesei fizice astfel încât procesul de scanare să fie cât mai eficient atât din punct de vedere al numărului de puncte colectate de pe suprafață cât și al duratei procesului de scanare sau al operațiilor finale de pregătire a fișierului .STL.

Ținând cont de aceste condiții precum și de faptul că echipamentul de scanare este unul optic, suprafața care se va scana va trebui să nu absoarbă lumina. Din acest motiv, pentru realizarea cu succes a acestei operații, piesele care au suprafețe lucioase și/sau închise la culoare (negre) vor fi acoperite cu o soluție care să permită îndeplinirea condițiilor mai sus menționate soluție care la rândul ei trebuie să îndeplinească următoarele condiții cumulative:

- să adere suficient de bine pe suprafața acoperită;
- să nu reacționeze cu suprafețele acoperite deteriorându-le;
- să se poată îndepărta ușor prin spălare sau ștergere.

Data fiind culoarea piesei s-a optat pentru o soluție de tip spray cu care s-a acoperit întreaga suprafață a piesei.

O altă operație pregătitoare, legată de posibilitatea sistemului de scanare ca în funcție de dimensiunea și complexitatea geometriei să folosească diverse volume de măsurare, este cea de lipire a markerilor pe suprafața de scanat, scopul acestora fiind de a ajuta la poziționarea cadrelor capturate. Volumele de măsurare permit capturarea de puncte de pe o suprafață mai mare sau mai mica (cadre), piesa urmând să fie scanată prin repoziționarea ei sau a aparatului de scanat până când sunt capturate toate punctele dorite. Marcajele trebuie amplasate ținând cont de mărimea volumelor de măsurare și complexitatea suprafețelor de scanat. Ulterior toate cadrele sunt asamblate cu ajutorul marcajelor și cu ajutorul unei aplicații dedicate Atos Profesional.

Ultima operație de pregătire consta în fixarea piesei. Piesa este poziționată pe un dispozitiv universal de fixare care la rândul lui este amplasat fie pe o masă ce permite efectuarea de mișcări exacte de rotație fie pe o masă fixă urmând ca mișcarea să fie efectuată de aparatul de scanat. De asemenea piesa poate fi fixată în mai multe poziții, finalitatea fiind aceea de a captura punctele necesare realizării ulterioare a unui mesh complet.

2.2.2. Scanarea 3D a piesei și prelucrarea informației

Înainte de începerea operației de scanare trebuie avut în vedere ca mărimea volumului de măsură să fie cea potrivită piesei care se scanează. Volumele de măsură sunt obiectivele cu care aparatul de scanare captează franjele de lumină reflectate de obiectul scanat. Mărimea volumului de măsură este direct proporțională cu mărimea obiectului de scanat. Pe parcursul operațiilor de cercetare s-a optat pentru un volum de măsură din clasa medie și anume 400 MV 560x420, volum care permite scanarea detaliată a obiectelor având dimensiuni plane aproximative de 500 x 500mm

Finalizarea operației de scanare 3D presupune realizarea unui fișier .STL care conține un mesh fără goluri sau deformații, din care sunt eliminate acele informații de care nu este nevoie (spre exemplu sunt eliminate punctele capturate de pe suprafețele vecine piesei scanate cum ar fi elementele de fixare a piesei) și care poate fi folosite la o serie întreaga de operații de măsurare 3D, verificări geometrice complexe sau „reverse engineering”.

Din punct de vedere al proiectului de cercetare abordat, norul de puncte astfel obținut urmează să fie folosit în următorii pași ai studiului:

1. realizarea unor modificări de structura a mesh-ului care să fie evaluate ulterior;
2. verificări geometrice și dimensionale;
3. tipărirea 3D a piesei.

În cazul studiat, numărul de puncte care au fost capturate de pe suprafața piesei este de 1.145.912 ceea ce se traduce prin realizarea unui fișier având o mărime de 475MB, respectiv un fișier care necesită resurse hardware foarte mari și perioade foarte lungi de procesare. Cum o parte din informațiile culese sunt redundante, în cadrul studiului efectuat investigațiile s-au referit și la analiza consecințelor avute asupra acurateței măsurărilor în cazul micșorării fișierelor astfel încât acestea să poată fi folosite cu o eficiență crescută.

2.3. Analiza cu privire la impactul pe care îl au modificările aplicate mesh-ului asupra verificărilor geometriei 3D

Fișierele .STL au fost prelucrate în sensul diminuării mărimii pe care acestea le au inițial cu ajutorul unor aplicații dedicate (Bénière et al. 2013; Buonamici et al. 2018) și anume aplicația care va fi folosită pe parcursul proiectului de cercetare se numește denumită MeshLab versiunea 1.3.3. În această aplicație fișierul .STL a fost încărcat cu ajutorul funcției „Import Mesh”, în urma acestei operații realizându-se o primă analiză

asupra stl-ului importat și anume identificarea numărului de fațete ale mesh-ului care în cazul studiat este de 2.291.760, așa cum rezultă și din Figura 2.12.

Aplicația efectuată cu funcția de „Remesh Quadric Edges” a permis modificarea rapidă a mesh-ului astfel încât s-a obținut un fișier de dimensiuni mai mici, utilizabil în efectuarea studiilor propuse. Reducerea numărului de fațete sau puncte din mesh influențează direct acuratețea și chiar calitatea mesh-ului și pe cale de consecință rezultatele obținute în urma folosirii unui mesh simplificat. De aceea se recomandă găsirea unei soluții echilibrate între mărimea fișierelor rezultate în urma scanării 3D și fișierele folosite în realizarea diverselor studii. Parcurgând etapele amintite mai sus în cazul piesei studiate, în urma salvării fișierului în format .STL dimensiunea acestuia a ajuns la 21 MB iar în urma salvării fișierului în format .PLY acesta are aproximativ 4 MB .

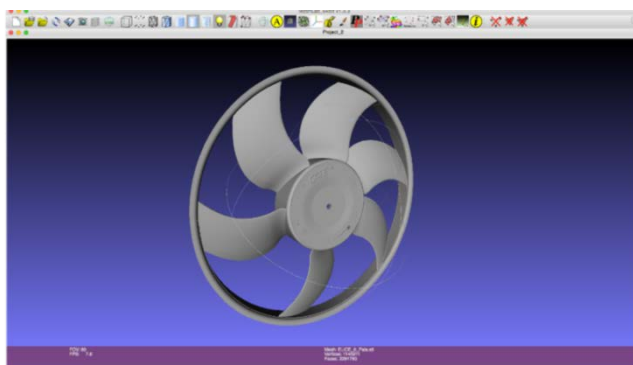


Figura 2.12. Norul de puncte încărcat în Meshlab

Ca o primă concluzie din cele prezentate mai sus este aceea că modificarea mesh-ului în sensul reducerii numărului de fațete sau a punctelor are efecte imediate asupra acurateții și chiar a calității acestuia prin trunchierea elementelor de detaliu de pe suprafață ajungând până la eliminarea acestora.

În urma efectuării secțiunilor cu plane paralele s-a identificat spre exemplu că piesa scanată prezintă, așa cum rezultă din Figura 2.19, o problemă de planeitate prin faptul că una din secțiunile extreme nu este continua. Acest fapt demonstrează odată în plus că soluția propusă permite verificarea grafică a abaterilor de la planeitate, concentricitate etc ale pieselor fizice scanate 3D.

În scopul de a compara secțiunile rezultate în urma secționării mesh-ului cu o secțiune ideală și a identifica astfel abateri și deformări care apar în geometria piesei analizate norul de puncte salvat în format .PLY a fost încărcat în aplicația Matlab versiunea R2009.

Fișierul .PLY conține datele specifice începutului de fișier (header) urmate de datele ce conțin descrierea modelului geometric (suprafețe și puncte). În cadrul secțiunii în care sunt prezentate datele specifice sunt prezentate informații referitoare la numărul total de suprafețe, normalele acestora și culoarea utilizată pentru reprezentarea

grafică. Suprafețele sunt definite în listă, fiecare intrare conținând referințe către punctele care definesc suprafață curentă (Figura 2.20) (Tabacu 2015).

```
ply
format ascii 1.0
comment Unit: mm
element vertex 1933
property float x
property float y
property float z
property uchar red
property uchar green
property uchar blue
element face 3471
property list uchar int vertex_indices
end_header
-4.184693 18.403894 0.000000 255 12 0
-3.947790 18.401959 0.000000 255 42 0
...
4.778132 -8.205640 0.000000 255 70 0
5.022248 -8.210083 0.000000 255 55 0
3 27 1 0
3 28 2 1
...
3 1930 1889 1929
3 1931 1890 1930
3 1932 1891 1931
```

Figura 2.20. Exemplu de fișier .PLY (format ASCII)

Aplicația 2.1. conține secvența de cod Matlab elaborată pentru citirea fișierului .PLY (Bénière et al. 2013; Jin, Li, și Gao 2013).

Aplicația 2.1. Funcția pentru citirea fișierului .PLY.

```
1 function [hFig_, colors_]=PLY_file_read_(file_in_name,deltaX_, deltaY_, color_, alphap_, edge_show_, do_show_)
87 view([0 90]); set(gca,'DataAspectRatio',[1 1 1]);
```

Cu ajutorul datelor ce conțin coordonate punctelor se determină dimensiunea modelului geometric utilizat (Tabacu et al. 2010; Sohn, Cho, și Im 2012).

$$\begin{aligned} x_{max} &= \max(x_i); y_{max} = \max(y_i) z_{max} = \max(z_i); \\ x_{min} &= \min(x_i); y_{min} = \min(y_i) z_{min} = \min(z_i); \end{aligned} \quad (2.1)$$

De asemenea se definesc coordonatele centrului geometric al modelului cu ajutorul relațiilor:

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; x_c = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}; z_c = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} \quad (2.2)$$

Utilizând coordonatele centrului geometric al modelului s-a construit în sistemul de referință global un plan de referință paralel cu planul orizontal. Pentru definirea modelului numeric se stabilește dimensiunea elementului finit utilizat, parametru care definește în raport de dimensiunea calculată a modelului geometric numărul de plane paralele utilizate pentru identificare secțiunilor.

$$z_{dim} = \max(z_i) - \min(z_i) \quad (2.3)$$

$$N_{plane} = \frac{\max(z_i) - \min(z_i)}{dim\ element} \quad (2.4)$$

Planul curent utilizat pentru secționarea modelului geometric este definit cu ajutorul a trei puncte: primul punct, $\mathbf{p}_0 = (x_c, y_c, z)$, se află pe axa verticală ce trece prin centrul geometric iar cel de-al doilea punct, $\mathbf{p}_1 = (x_c + x_{dim}/2, y_c, z)$ și cel de-al treilea punct, $\mathbf{p}_2 = (x_c, y_c + y_{dim}/2, z)$ sunt astfel poziționate încât planul determinat să cuprindă întregul model geometric, reprezentat prin suprafețe elementare triunghiulare.

În funcție de coordonata verticală a planului de secționare a modelului geometric sunt identificate suprafețele elementare care intersectează acest plan și se calculează punctele de intersecție dintre laturile suprafețelor elementare și planul curent, iar punctele determinate vor fi utilizate pentru determinarea unui segment al conturului. Relația matematică de definire a unei linii ce trece prin două puncte date este:

$$\mathbf{v}_i + (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \cdot t = 0; t \in \mathbb{R} \quad (2.5)$$

Relația de definire a planului de secționare este:

$$\mathbf{p}_0 + (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_0) \cdot u + (\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_0) \cdot v = 0; u, v \in \mathbb{R} \quad (2.6)$$

Punctul în care latura unei suprafețe elementare intersectează planul de secționare se determină cu ajutorul relației

$$\mathbf{v}_i + (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \cdot t = \mathbf{p}_0 + (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_0) \cdot u + (\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_0) \cdot v \quad (2.7)$$

ce poate fi exprimată în formă matriceală (formă utilă pentru implementarea în structuri de cod)

$$\begin{bmatrix} x_i - x_c \\ y_i - y_c \\ z_i - z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i - x_j & x_c + x_{dim}/2 - x_c & x_c - x_c \\ y_i - y_j & y_c - y_c & y_c + y_{dim}/2 - y_c \\ z_i - z_j & z - z & z - z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Relația este rezolvată în raport cu parametrul t ce definește coordonatele punctului de intersecție:

$$\mathbf{i}_i = \mathbf{v}_i + (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \cdot t \quad (2.9)$$

Aplicația 2.2. prezintă codul Matlab elaborat pentru identificarea punctelor de intersecție.

Aplicația 2.2. Definirea punctelor de intersecție.

```

1      for ii=1:num_fcs
...      ...
75      end

```

În Figura 2.21 sunt prezentate planul de referință și planul curent utilizat pentru secționarea modelului geometric (Galantucci, Percoco, și Dal Maso 2008). Sunt reprezentate punctele identificate la intersecția dintre suprafețele elementare și planul curent de secționare.

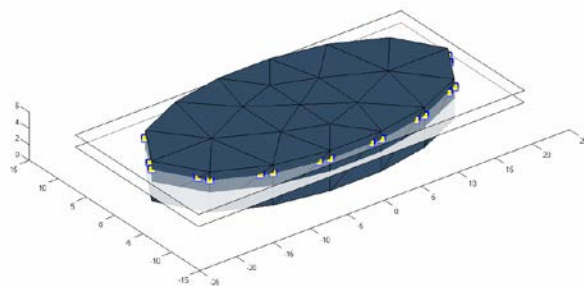


Figura 2.21. Definirea planului de secționare și a punctelor de intersecție

Procedura se repetă pentru numărul total de plane de secționare definite de utilizator (Figura 2.22). În final se obține o listă ce conține toate punctele de intersecție dintre suprafețele elementare și planele anterior definite (Figura 2.23). Lista nodurilor care definesc conturul este sortată în funcție de coordonata z . Se observă faptul că nu sunt definite linii de contur închise astfel că următorul pas constă în generarea conturului corect al secțiunii așa cum este indicat în Figura 2.24.

Fiecare dintre suprafețele elementare ale modelului geometric are o latură comună cu suprafețele elementare vecine. În acest caz, corespunzător procedurii de identificare a punctelor de intersecție, fiecare linie ce definește conturul unei suprafețe elementare va avea definite două puncte de intersecție. În plus pentru fiecare set de puncte de intersecție asociate unei suprafețe elementare este definit un segment de contur, iar prin identificarea punctelor de intersecție ce au coordonate coincidente se stabilește succesiunea segmentelor care definesc conturul.

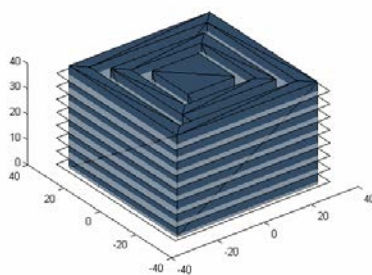


Figura 2.22. Planele de secționare

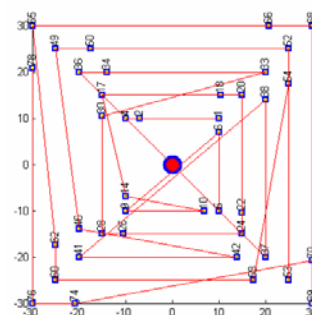


Figura 2.23. Punctele de intersecție

```
1    %% sortarea punctelor de intersecție
...    ...
92    end
```

Aplicația 2.3. Sortarea conturului.

În situația în care pentru o listă de puncte de intersecție analizată coordonatele punctului cu primul număr de ordine corespund cu cel care are numărul de ordine egal cu dimensiunea listei analizate (ultimul), conturul este definit ca închis.

Ținând cont de algoritmul de mai sus am realizat cu ajutorul aplicație Matlab secționarea mesh-ului cu plane paralele la 10mm pe axa Z rezultatele fiind prezentate succint în figurile următoare (Figura 2.25).

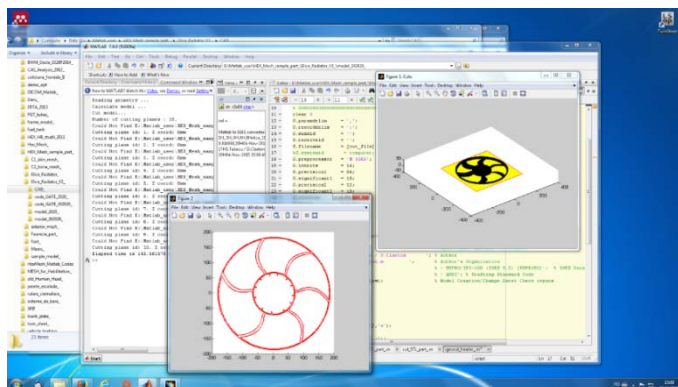


Figura 2.25. Secțiune cu un singur plan prin mesh

Prin realizarea secțiunilor pe variante de mesh, având acuratețe diferită, rezultată în urma trunchierii mesh-ului inițial și suprapunerea lor se determină matematic cu cât este afectată precizia de măsurare. Secțiunile rezultate în Matlab sunt exportate în mod automat în format IGES care este ușor de folosit de aplicațiile CAD. O atenție deosebită trebuie acordată aici parametrilor aleși pentru realizarea IGS-ului care trebuie să fie asemănători cu cei din aplicația CAD folosită ulterior, în caz contrar diferite anomalii putând să apară la importul informației în aplicația CAD. În Figura 2.27 este prezentat un „header” de export IGES (Aplicația 2.4).

Matlab to IGES converter.	S0000001
1H,,1H;;7HMatlab®,11HReceiver ID,11Helice_1.igs,5HPCWIN,	G0000001
14HMatlab -> IGES,16,6,15,13,15,1,3,2HMM,8,0.016000,	G0000002
20H04-Nov-2015 12:26:37,0.000100,100,	G0000003
27HS.Tabacu/C.Diaconescu/D.Claxton,21Hon igesout.m	G0000004
,11,3,	G0000005
20H04-Nov-2015 12:26:37;	
106 1 0 1 0 0 00000001D	1
106 1 0 9 12 0 0D	2
106 10 0 1 0 0 00000001D	3

Figura 2.27. Fișier .IGES

Aplicația 2.4. Header fișier .IGES.

[illegible]

În urma efectuării acestui studiu s-a constatat că unghiul de dispunere a palelor elicei studiate în planul XY nu este același așa cum rezultă din Figura 2.28 în care sunt

motiv pentru care realizarea unei aplicații care să permită generarea automată a suprafețelor poate aduce câștiguri importante de timp și chiar de calitate a acestora.

Calitatea suprafețelor obținute precum și precizia verificărilor geometriei 3D este strâns legată de acuratețea mesh-ului de la care se pleacă în analiză. Încă de la început trebuie să se cunoască foarte bine clasa de precizie cu care trebuie efectuate verificările astfel încât să se evite obținerea de deviații mai mari decât clasa de precizie solicitată.

Aplicația 2.6 prezintă soluția tehnică de realizare a modelelor numerice prin proiectarea unei suprafețe definite de utilizator pe suprafața exterioară a modelului geometric.

Aplicația 2.6. Aplicație Matlab pentru generarea modelelor numerice.

```
1 %generate cylindrical reference surface
...
222 set(gca, 'DataAspectRatio', [1 1 1]); view(90,0);
```

Modelul geometric este salvat în format specific programului Ls-Dyna pentru a fi utilizat în cadrul unor simulări numerice.

Aplicația 2.7. Aplicație Matlab pentru generarea modelelor numerice.

```
1 disp('Saving model...');
...
50 fclose(file_out);
```

2.4. Pregătirea pentru tipărire și tipărirea 3D

Pregătirile pentru tipărire 3D sunt corelate cu tipul echipamentului care este folosit pentru tipărire. În studiile efectuate s-a utilizat un echipament Fortus 900mc, produs de Stratasys, echipament care folosește tehnologia de tipărire FDM (Fused Deposition Modelling) care presupune depunerea strat cu strat a materialului plastic care poate fi ABS, PC, PA etc.

Pregătirea pentru tipărire 3D constă în:

1. Pregătirea modelului 3D pentru tipărire
2. Pregătirea echipamentului de tipărire 3D (imprimantă)

1. *Pregătirea modelului 3D pentru tipărire* constă în generarea fișierului care pleacă către imprimantă și care trebuie să conțină o serie de informații cum ar fi tipul materialului de bază și suport folosit, tipul capului de tipărire, mărimea foliei suport pe care se realizează tipărirea, poziționarea piesei pe masa imprimantei, numărul de piese care se tipăresc, tipul suportului folosit, modul de întrepătrundere a straturilor de material precum și densitatea acestora etc. Aplicația folosită pentru gestionarea acestor informații se numește Insight și în general fiecare producător de echipamente

de tipărit 3D dezvoltă propriile aplicații de acest fel dar pregătirea fișierului începe încă din aplicația CAD unde fișierul care urmează să fie tipărit este verificat să fie un solid care respectă anumite condiții cum ar fi: grosimi de pereți mai mari de 1mm, eliminarea eventualelor defecte de design care pot genera erori ale fișierului .STL.

În cazul studiului se vor realiza tipărirea 3D a piesei scanate și a mesh-ului ale cărui fațete sunt reduse până la 20% , atenția fiind reținută în special pe zona text GATE pentru a se putea observa care este impactul pe care îl are modificarea acurateței mesh-ului asupra piesei tipărite 3D.

În urma scanării 3D va rezulta un fișier STL care poate fi încărcat direct în aplicația Insight. Încă din faza de încărcare în această aplicație se realizează verificarea integrității fișierului astfel încât dacă anumite probleme sunt detectate în structura fișierului acesta nu va fi încărcat și prin urmare nu va putea fi realizată tipărirea 3D.

În Figura 2.32 sunt prezentate câteva probleme ale fișierului STL care nu vor fi identificate în timpul operației de import al fișierului în aplicația Insight prin urmare ele pot perpetua în situația în care fișierul este tipărit conducând la calitate slabă a piesei tipărite care fie va lăsa semne pe suprafață fie poate conduce la ruperea ușoară a piesei la eliminarea materialului suport. În situația în care aceste probleme apar se va proceda la repararea fișierului STL în aplicații dedicate și se va relua operația de import.

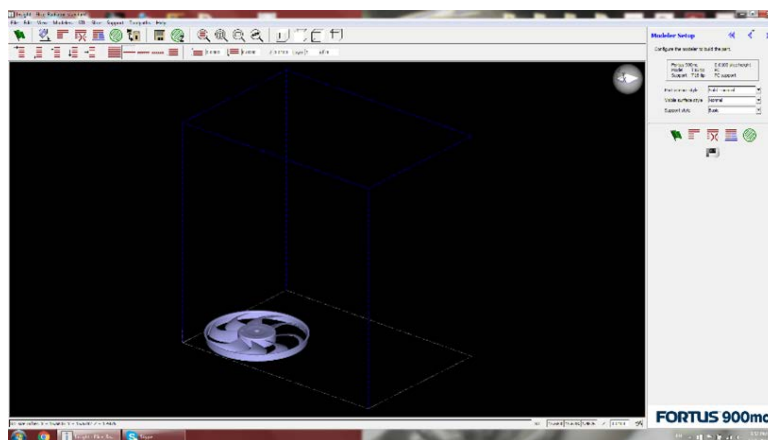


Figura 2.31. Fișierul scanat 3D deschis în aplicația Insight.

În aplicația Insight piesa poate fi poziționată astfel încât să poată fi optimizat consumul de material, viteza de tipărire, calitatea piesei tipărite. Este foarte importantă poziționarea piesei pe masa imprimantei în cazul acestei tehnologii de tipărire pentru a obține cel mai bun compromis între viteza de tipărire și caracteristicile tehnice ale piesei.

O serie întreagă de configurări ale mașinii participă la realizarea pieselor tipărite 3D :

- materialul de bază și cel suport folosit – Materialul suport este îndepărtat chimic prin spălare doar în cazul anumitor materiale de bază cum ar fi ABS și PA. Pentru celelalte materiale suportul este îndepărtat numai mecanic ceea ce poate conduce la operații secundare costisitoare și consumatoare de resurse;
- capetele de tipărire – la acest echipament există 3 mărimi T12, T16 și T20 care depun un filament având grosimi diferite. Cu cât se folosește un cap de dimensiuni mai mari cu atât viteza de tipărire crește;
- construcția materialului suport – care poate fi optimizată în funcție de aplicație pentru a permite o economie de material suport și îndepărtarea lui cât mai facilă;
- numărul de curse efectuate de capul de tipărire – cu cât numărul de curse este mai mare cu atât sunt depuse mai multe straturi de material iar rigiditatea crește.

Materialul suport are un rol foarte important în realizarea tipăririi 3D prin tehnologia FDM. Acesta are roluri multiple cum ar fi asigurarea aderenței piesei la folia de plastic amplasată pe masa echipamentului de tipărit, sprijină elementele suspendate ale piesei tipărite, umple golurile din piesa tipărită conducând la rigidizarea ei, asigură jocul între elemente în cazul în care sunt tipărite ansambluri de piese care prin dizolvarea suportului trebuie să devină funcționale etc. Din acest motiv este foarte importantă adaptarea materialului suport la cerințele fiecărei piese în parte. Aplicația Insight permite configurarea soluției de tipărire a materialului suport.

Alegerea unuia sau altuia din aceste două tipuri de suport mai depinde și de gabaritul piesei de tipărit, complexitatea geometriei și de experiența operatorului.

Următoare operație pregătitoare este aceea de „tăiere” a modelului geometric. Această operație este obligatorie și depinde de o serie de factori selectați anterior cum ar fi capul de tipărire folosit, tipul suportului ales și a materialului de bază etc., operația fiind executată în mod automat. Marcajele create pe geometrie nu sunt altceva decât nivelele pe care se va face depunerea de material strat cu strat. Din acest motiv acestea se calculează în mod automat în funcție de ceilalți parametri selectați.

Toolpath (traseul capului de tipărire) este o altă operație pregătitoare în care operatorul poate alege traseele pe care capul de tipărire le va face pe fiecare din nivelurile stabilite prin operația de „slice”.

Din punct de vedere a geometriei care constituie obiectul de studiu pe parcursul operațiilor pregătitoare, s-au ales:

- capul de tipărire: T16
- materialul suport: SMART
- slice-ul care permite realizarea unui aspect normal pentru interiorul și exteriorul piesei

- tool path-ul: ONE CONTUR/RASTERS

Aceste opțiuni au fost folosite pentru tipărirea ambelor piese: cu mesh rezultat în urma scanării 3D și cu mesh redus până la 20% a numărului de fațete.

2. Pregătirea echipamentului de tipărire 3D (imprimanta) constă în realizarea a o serie de operații specifice de mentenanță. Operațiile pregătitoare constau în:

- verificarea capetelor de tipărire și eventual schimbarea lor dacă sunt uzate;
- verificarea periilor de curățare a capetelor și schimbarea lor în caz de necesitate;
- Instalarea pe masa imprimantei a foliei suport în funcție de materialul folosit la tipărire;
- verificarea canistrelor de material bază și material suport;
- verificarea presiunii de aer la intrarea în imprimanta care trebuie să fie cuprinsă între 6 și 8 bari;

Imprimanta trebuie calibrată de fiecare dată când se schimbă materialul de bază și suport sau la schimbarea capetelor de tipărire, în caz contrar piesa tipărită va fi compromisă din punct de vedere a preciziei de execuție.

Înainte de începerea tipăririi cuptorul imprimantei este preîncălzit timp de 8 ore pentru a ajunge la temperatura de lucru optimă în funcție de tipul de material folosit la imprimare. Folia așezată pe masa mașinii este vacuumată pentru a rămâne nemișcată în timpul tipăririi.

La finalizarea operațiunii de tipărire 3D temperatura cuptorului este coborâtă gradual în mod automat astfel încât coeficientul de contracție al materialului să fie cât mai bine controlat precum și deformările materialului. După ce cuptorul ajunge la temperatura optimă piesele se pot extrage (Figura 2.43 și Figura 2.44) și curăța de materialul suport (Figura 2.45) fie prin spălare chimică fie prin prelucrări mecanice (Figura 2.46). Întotdeauna materialul suport este recomandat să fie îndepărtat imediat după scoaterea pieselor din cuptor în caz contrar putând apărea aderențe permanente între materialul de bază și cel suport. Precizia de execuție a pieselor tipărite 3D este de 0,1mm.



Figura 2.43. Mașina de tipărit și piesa 3D la sfârșitul procesului de tipărire.



Figura 2.45. Piesa tipărită 3D cu material suport înainte de curățare.

2.5. Concluzii

În cadrul acestui capitol au fost evidențiate aspecte referitoare la procesul de scanare tridimensională a pieselor și prelucrarea informațiilor obținute pentru definirea datelor de intrare necesare realizării unor modele prototip. Astfel au fost prezentate etapele de pregătire a pieselor (în funcție de modelul geometric specific, materiale utilizate și infrastructura disponibilă), desfășurarea procesului de scanare și prezentarea informației digitale obținută. Având în vedere informația obținută în urma procesului de scanare sunt prezentate o serie de aplicații software definite ca instrumente pentru manipularea conținutului digital. Aceste operații pot fi de tipul corectării conținutului, modificării sau prelucrării pentru operații viitoare de tipul procesului de optimizare. În ultima parte a capitolului a fost prezentat procesul de realizare a unui prototip prin tehnica tipăririi 3D. Etapele parcurse sunt în concordanță cu tehnologia FDM (Fused Deposition Modeling) inclusă în categoria tehnicilor de tipărire 3D. Au fost realizate piese prototip care să prezinte rezultate ale manipulării conținutului digital obținut în urma scanării și impactul asupra aspectului pieselor obținute.

3

Caracterizarea mecanică a materialelor utilizate în procesul de fabricație prin prototip rapid

3.1. Materialele plastice. Introducere.

Materialele plastice sunt compuse din structuri moleculare repetitive, cu structura amorfă sau semicristalină, având densitate, rezistență și duritate mai mici decât materialele metalice. În funcție de structura moleculară materialele plastice se împart în trei mari grupe:

1. **termoplastice** – au o structură liniară putând lua forma dorită prin deformare, inclusiv modificarea formei în urma încălzirii controlate în mod repetat, fără ca structura chimică să fie afectată. Din acest motiv aceste materiale sunt folosite cu precădere la aplicații care permit deformarea repetată (exemplu: obținerea foliilor prin extrudare care ulterior sunt deformate prin termoformare (Tabacu, Diaconescu, și Oltean 2016, 2017) în vederea obținerii produsului final) (Gu et al. 2013; Beyene et al. 2014).
2. **termoset** – au o structură moleculară încrucișată obținută prin tratament termic controlat. Aceste materiale odată aduse la forma dorită prin deformare nu se mai pot remodela. Reîncălzirea acestor materiale în vederea re-deformării conduce în majoritatea cazurilor la distrugerea proprietăților acestor materiale. Acest tip de materiale prezintă proprietăți bune de rezistență la temperatura înaltă (Priem et al. 2014; Stocchi et al. 2014; Davoodi et al. 2011; Thompson et al. 2016).
3. **elastomeri** – care au o structură moleculară încrucișată, se manifestă prin proprietăți elastice asemănătoare cauciucului natural (Parenteau et al. 2014; Zhang, Andrieux, și Sun 2011; Gu et al. 2013; Lyu și Choi 2015)

Tabelul 3.1. Prezentare succintă a proprietăților principale ale materialelor plastice (Kridli 2006)

Material	Structura	Densitatea [g/cm ³]	Duritatea a Rockwell	Tensiunea la rupere [MPa]	Modulul [GPa]			Impact Notched Izod J/cm	Temperatura		
					Alungire la rupere	Tensiune	Îndoire		Îndoire la 460 kPa	Sticla	Topire
ABS	A	1.05	110 R	42.0	27%	2.40	2.40	2.50	68-140	107-115	
Acrylics	A	1.18	91 M	68.7	6%	3.10	3.30	0.16	80-103	100-105	130
Nylon	S	1.12	110 R	73.1	83%	2.10	2.40	1.50	85-245		250
Polycarbonat	A	1.21	120 R	69.4	96%	2.60	2.40	6.80	128-174	145-148	
Poliester											
PBT	A,S	1.42	120 R	57.1	36%	2.70	2.90	2.10	95-225		220
PET	A,S	1.32	110 R	55.0	130%	2.70		1.40	68-72	73-78	250
Polietilena											
LDPE	S55	0.92	60 R	11.0	190%	0.21	0.27	3.90	40-67		110
HDPE	S90	0.96	63 R	20.3	380%	0.91	1.10	1.90	60-104		130
Polipropilena	S	0.94	96 R	38.8	120%	1.90	1.40	0.98	13-238		160
Polivinilclorhidra											
Rigid	A	1.40		40.0	60%		3.00	2.75	62	75-105	200
Flexible	A			13.0	320%				62	75-105	

Nota: A=Amorf; S=Semicristalin; C=Cristalin

Din categoriile de mai sus cele mai folosite pentru tipărire 3D sunt materialele termoplastice. În funcție de temperatură, care determină tipul structurii moleculare, materialele termoplastice se împart în două mari categorii și anume cu structură cristalină și cu structură amorfă. Se definesc în funcție de temperatura de tranziție a sticlei (T_g) și de temperatura de topire (T_m), 3 zone mari de temperatura:

- sub temperatura T_g materialul termoplastic are structura cristalină fiind rigid și casant,
- cu cât temperatura crește și este atins pragul T_g vâscozitatea scade ajungându-se în structura materialului la un amestec între structura cristalină și cea amorfă, materialul având un comportament elastic (asemănător cauciucului).
- la creșterea în continuare a temperaturii atingându-se temperatura de topire (T_g), vâscozitatea scade, gradul de lichiditate crește și odată cu acesta și coeficientul de curgere.

Soluțiile tehnice de realizare a pieselor prototip prin tehnologia FDM permit modificarea și adaptarea unui număr de parametrii (Brooks et al. 2016; Bates et al. 2016) astfel încât să se obțină piese cu performanțe îmbunătățite (modificarea temperaturii de extrudare a filamentului extrudat)

3.1.1. Materialul plastic de tip ABS

Cel mai răspândit material plastic în prototiparea rapidă este ABS-ul (Acrylonitrile Butadiene Styrene) (Dawoud, Taha, și Ebeid 2016; Mohamed, Masood, și Bhowmik 2017; Torrado et al. 2015a; Singh, Singh, și Singh 2016; Torrado et al. 2015b; S. Ahn et al. 2002; Domingo-Espin et al. 2015; Croccolo et al. 2013; Riddick et al. 2017). Este compus din 3 monomeri: acrilonitril (C_3H_3N), butadiena (C_4H_6), și stiren (C_8H_8). Combinarea acestor monomeri concură la obținerea de copolimeri în două faze: în prima fază se obține un copolimer stiren-butadiena având duritate sporită iar în faza a doua prin adăugarea acrilonitrilului copolimerul capătă proprietăți elastice (Krindli, 2006). ABS-ul este una din cele mai bune opțiuni de material care pot fi folosite în tipărirea 3D datorită proprietăților specifice (rezistența mărită la impact, rezistența la întindere și compresiune, etc.). În ultima perioadă de timp știința materialelor a evoluat foarte mult ceea ce a condus la dezvoltarea anumitor sorturi de material ABS cu proprietăți îmbunătățite în funcție de aplicații. Spre exemplu Stratasys are nu mai puțin de 6 materiale ABS cu care se pot realiza model 3D fiecare având proprietăți mecanice specifice. Imprimanta Fortus 900 mc folosită în cadrul laboratorului Alseca Engineering folosește ABS-M30 pentru fabricarea pieselor. Acest material are proprietățile specifice indicate în Tabelul 3.3.

Tabelul 3.3. Proprietățile generale ale ABS – M30

Proprietăți Mecanice		
	AXA XZ*	AXA ZX*
Rezistența la rupere	31 MPa	26 MPa
Alungirea la rupere	7%	2%
Rezistența la încovoiere	60 MPa	48 Mpa
Modulul de încovoiere	2060 MPa	1760 MPa
Proprietăți termice		
Temperatura de deformare	82°C	
Temperatura de tranziție a sticlei	108°C	
Coeficient de expansiune termică	8.82x10 ⁻⁰⁵ mm/mm/°C	
Punctul de topire	Nespecificat din cauza naturii amorfe a materialului	
Proprietăți fizice		
Densitate	1.04 g/cm ³	
Duritate	109.5	

3.1.2. Materialul plastic de tip Poliamida

Poliamida (Kaveh et al. 2015; Ravi, Shiakolas, și Welch 2017; L. Wang, Gramlich, și Gardner 2017; Chacón et al. 2017; Gomez-Gras et al. 2017) este un polimer semicristalin care face parte din grupa de mase plastice tehnice cu rigiditate și rezistență ridicată. Prezintă o combinație optimă de calități: rezistență mecanică, rigiditate, rezistență la lovituri și proprietăți bune antifricțiune.

3.1.3. Materialul plastic de tip Polifenilsulfona (PPSF)

Este cunoscut și sub denumirea de PPSU. Este un material plastic de înaltă performanță și este primul de acest fel dezvoltat pentru tipărire 3D de Stratasys. Aplicațiile care îl solicita sunt acelea în care temperaturile sunt extrem de mari sau este necesară o rezistență foarte bună la atacuri chimice. Temperatura maximă la care poate rezista este de 189°C fiind rezistent la acțiunea chimică a unor substanțe precum benzina, diluanți sau acizi. Având proprietăți bune, aplicațiile în care poate fi folosit acest material sunt matricele prototip sau piesele funcționale supuse la astfel de solicitări. Imprimanta Fortus 900 mc folosită în cadrul laboratorului Alseca Engineering folosește PA-12.

3.1.4. Materialul plastic de tip Polietilerimida (PEI)

Mai este cunoscut și sub denumirea de Ultem fiind un material plastic amorf deosebit de rezistent la temperaturi înalte la care își păstrează proprietățile mecanice deosebite. Dezvoltat și de Stratasys pentru tipărire 3D în două variante (Ultem 1010 și 9085) acestea se deosebesc în special printr-o superioritate a caracteristicilor mecanice pe care Ultem 1010 o are față de Ultem 9085.

Proprietățile mecanice specifice ale materialelor prezentate sunt indicate în raport cu modalitatea de aliniere a piesei în mașina de prototip rapid.

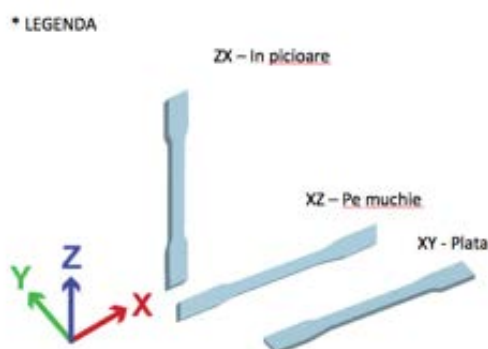


Figura 3.2. Sistemul de referință pentru stabilirea proprietăților mecanice ale materialelor.

3.2. Identificarea parametrilor de fabricare a pieselor prin tehnologia Fused Deposition Modelling – FDM

Sunt investigate următoarele aspecte:

- analiza și definirea cerințelor în proiectarea pieselor prototip din materiale plastice utilizate în industria auto

- optimizarea proiectării reperelor din mase plastice, pentru îmbunătățirea proprietăților mecanice, prin utilizarea „designului inteligent”;
- îmbunătățirea proiectării unor caracteristici geometrice pentru realizarea structurilor multistrat/hibride cu aderență ridicată;
- proiectarea asistată de calculator a reperelor din mase plastice pentru producerea prin injecție cu matrițe experimentale.

Pentru a înțelege efectele pe care le au anumite solicitări asupra pieselor tipărite 3D prin tehnologia FDM din punct de vedere al calității suprafețelor tipărite, acurateței și contracției materialului, de-a lungul timpului au fost realizate foarte multe studii experimentale. În acest sens (Bakar, Alkahari, și Boejang 2010) au realizat un studiu cu privire la efectele produse asupra pieselor cilindrice tipărite prin tehnologia FDM la modificarea anumitor parametri cum ar fi grosimea straturilor de material, profilul conturului și rasterul (alinierea) intern. Stabilitatea dimensională a fost măsurată cu ajutorul unui CMM (mașina de măsurat în coordonate) cu care s-au efectuat maturatori de suprafață, iar duritatea suprafeței a fost măsurată folosindu-se un aparat portabil de măsurare a suprafeței. Rezultatele au relevat ca suprafața cilindrică pierde din calitate și acuratețe cu cât dimensiunea pieselor tipărite 3D este mai mică. S-a concluzionat astfel ca principalul factor care determină acest fenomen este tensiunea reziduală care la rândul ei este determinat de gradientul de temperatură, viteza de depunere a straturilor de material plastic și geometria piesei.

În mod asemănător (Anitha, Arunachalam, și Radhakrishnan 2001) au realizat studii asemănătoare cu privire la impactul asupra durității suprafeței pieselor tipărite 3D generate de modificarea parametrilor de proces. Variabilele al căror impact a fost monitorizat pe trei nivele au fost de asemenea grosimea stratului de material depus, traseul depunerii și numărul de treceri precum și viteza de depunere a materialului. Studiul a demonstrat ca grosimea stratului de material influențează calitatea suprafeței în proporție de 50% în peste 95% din cazuri în timp ce ceilalți doi parametri influențează în proporție de doar 15% în 99% din cazuri. De asemenea studiul a relevat faptul ca există o inversă proporționalitate între grosimea stratului depus și duritatea suprafeței. Concluzia studiului a fost de asemenea ca traseul depunerii, numărul de treceri și viteza de depunere au un efect minim asupra calității suprafeței tipărite 3D.

Pe de altă parte (D. Ahn et al. 2009; Clausen et al. 2016; Casavola et al. 2017; Galeta et al. 2016; Porter et al. 2017) au realizat cercetări privind impactul pe care îl au variabilele de producție asupra caracterului anisotropic al materialului folosit la piesele tipărite 3D prin tehnologia FDM. Ca o observație generală trebuie spus ca prin tehnologia FDM se obțin piese având caracteristici unice. Au fost selectate cinci variabile pentru acest studiu de cercetare dintre care una calitativă (culoarea materialului), iar celelalte cantitative: orientarea structurii, mărimea golurilor de aer, lățimea stratului de material depus și temperatura de tipărire. Materialul folosit pe

parcursul cercetărilor a fost ABS și impactul produs de fiecare din parametrii prezentați anterior a fost evaluat independent calculându-se și rezistența la tracțiune. În vederea stabilirii unei valori de referință au fost create prin injecție de material plastic epruvete având în vedere ca acest proces tehnologic are o stabilitate mai mare din punct de vedere isotropic decât tehnologia FDM. În urma cercetărilor s-a stabilit ca parametri precum mărimea golurilor de aer și orientarea structurii au un impact major asupra rezistenței piesei prin comparație cu restul parametrii studiați

Aceleași cercetări au demonstrat ca rezistența la compresiune este mai mare decât cea la întindere și nu este la fel de mult afectată de orientarea structurii ca de direcția de construcție a piesei în camera de tipărire 3D așa cum se vede din Figura 3.4. (Ahn ș.a., 2002).

Conform acestor cercetări o serie întreagă de parametri contribuie la realizarea unei piese care răspunde cerințelor cunoscute (Du Jun et al 2016; Faes et al. 2016; Ning Fuda et al. 2015; Sood et al. 2012).

Tehnologia FDM presupune construcția pieselor pe nivele sau straturi (slice) fiecărui nivel corespunzându-i un perimetru care este caracterizat printr-un punct de plecare și unul de sosire. După definirea perimetrului, spațiul din interiorul acestuia este de asemenea umplut cu material după diverse traiectorii. Traectoria aleasă va avea ca impact o suprafață mai rugoasă (scenariul a) sau mai puțin rugoasă (scenariul b și c). În funcție de dimensiunea acestor straturi de material putem fie să avem o piesă mai grea (atunci când straturile se suprapun) fie mai ușoară atunci când două straturi consecutive sunt în tangență sau chiar la o oarecare depărtare unul de celălalt (Figura 3.6). Putem trage astfel concluzia că densitatea este cu atât mai mare cu cât straturile de material de umplere se suprapun mai mult (Gu, 2002).

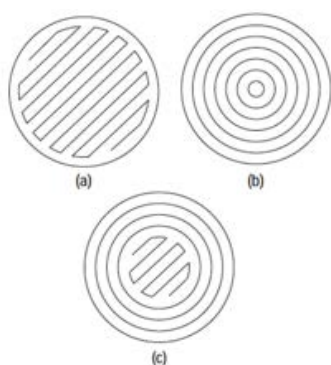


Figura 3.5. Trasee de umplere cu material în interiorul unui perimetru (Agarwala et al. 1996)

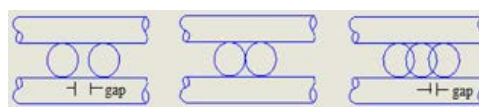
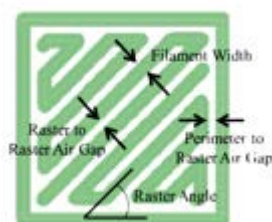


Figura 3.6. Golurile de aer (distanța între două straturi consecutive)

Procesul de formare a legăturii între straturi depinde de trei factori: suprafața de contact, mărimea trecerii și difuzia moleculară. O suprafață de contact lungă va fi întotdeauna benefică pentru realizarea legăturii dintre straturi. Cu toate acestea mărimea trecerii trebuie să fie corect aleasă altfel pe o suprafață lungă de contact pot fi zone cu aderențe diferite ceea ce ar afecta negativ calitatea proprietăților fizice ale

piesei finale. În același fel mișcările executate de capul de tipărire pot afecta proprietățile structurale ale pieselor (Agarwala et al. 1996).

Alți parametri importanți care influențează proprietățile structurale ale pieselor sunt (Feng et al. 2015; Garg et al. 2017):

- modul de umplere al interiorului unei piese. Tehnologia FDM permite folosirea a doua moduri de umplere și anume solid (plina) și sparse (după o forma geometrică predefinită care permite realizarea unei structuri nervurate în interior);
- unghiul de depunere a straturilor de material în raport cu axa X a mesei de tipărit 3D;
- golurile de aer între straturile de material depuse pe axa Z a mesei de tipărit;
- orientarea piesei care se tipărește în camera de tipărire. Orientarea piesei se va lua în considerare în raport cu axele X, Y și Z unde X și Y se considera în planul mesei de tipărit, iar Z este perpendiculară pe masa de tipărit.

Cunoașterea influenței pe care toți acești parametri o au asupra produsului va face la final diferența între a avea un produs conform sau nu.

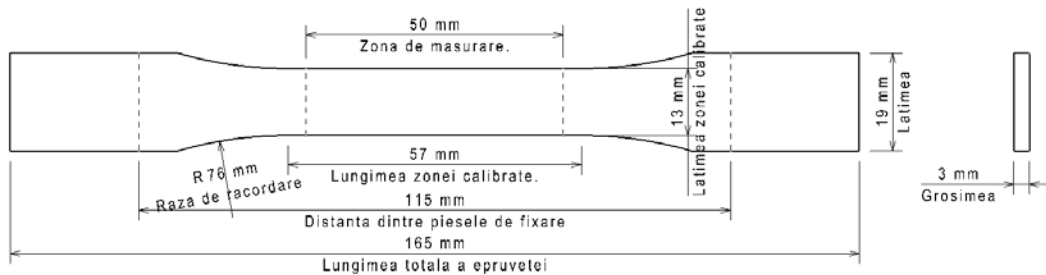
3.3. Definirea modelului geometric și analize experimentale

Așa după cum s-a prezentat mai sus proprietățile structurale ale pieselor tipărite 3D sunt afectate de foarte mulți factori. Din acest motiv cunoscând aplicația, mediul și condițiile în care va funcționa, precum și alte cerințe particulare, importanță deosebită trebuie acordată alegerilor corecte ale parametrilor care influențează respectivele condiții, demers care crează premise pentru obținerea unui produs optimizat (Mohamed, Masood și Bhowmik 2017; Kardel et al. 2017; Rao și Rai 2015; Domingo-Espin et al. 2015; Liu Xingchen 2016, Dizon et al. 2018; Hu Zhong et al. 2017; Kantaros et al. 2013; Kousiatza et al. 2016). Având în vedere numărul mare de variabile care influențează produsul tipărit 3D, propun folosirea unei tehnici statistice (DOE) (J. Wang et al. 2016; Kucewicz et al. 2018; Griffiths et al. 2016; Rezaie et al. 2013) care să analizeze efectele impactului fiecărui parametru plecând de la rezultatele experimentale obținute anterior.

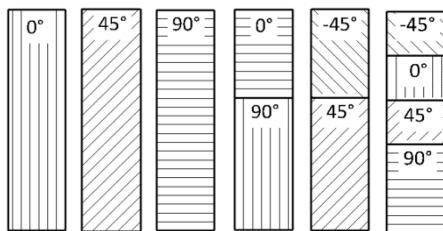
În cele ce urmează se prezintă procesul de pregătire, generare și analiza a rezultatelor experimentale realizate cu ajutorul personalului și echipamentelor aflate în dotarea Centrului de Cercetare "Ingineria Automobilului" din cadrul Facultății de Mecanica și Tehnologie Pitești precum și în cadrul laboratorului de cercetare al Alseca Engineering SA.

Cercetările efectuate s-au referit la identificarea modului în care este influențată structura și comportamentul unor epruvete de formă cilindrică, cu dimensiunile forma tip IV, cu dimensiunile din Figura 3.8, în condițiile în care variază următorii parametri:

- unghiul sub care este depus materialul, folosind tehnologia FDM (Tabacu și Ducu 2018);
- poziționarea piesei pe masa de tipărit;
- grosimea peretilor suprafeței cilindrice.



a)



b)



c)

Figura 3.8. Epruveta tip I (ASTM D638)

a) dimensiunile epruvetei;

b) orientarea straturilor; c) specimene(s): sus 90°, jos 0°.

Modelul CAD a fost realizat în Catia V5R19 după care s-a realizat exportul pieselor în format .stl către aplicația de tipărit 3D Insight 10.2 dezvoltată de Stratasys pentru gama de mașini de tipărit 3D care folosesc tehnologia FDM.

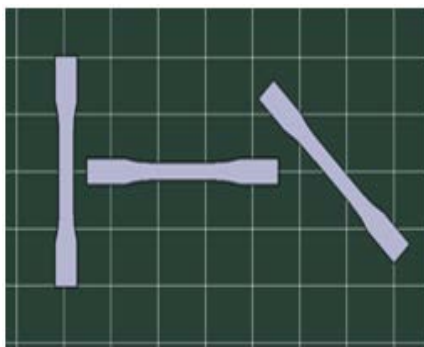


Figura 3.9. Poziționarea epruvetei de tip V pe masa de tipărire

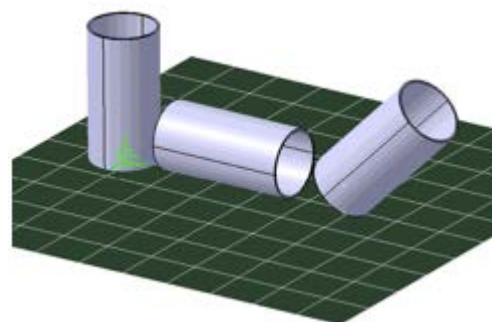


Figura 3.10. Poziționarea epruvetei cilindrice pe masa de tipărire

Parametrii imprimantei 3D folosiți pentru tipărirea pieselor (figura 13&14) au fost aceiași pentru toate piesele epruvete și sunt prezentați succint în Tabelul 3.10.

Tabelul 3.10. Parametrii de tipărire 3D a epruvetelor

Cap de tipărire	T16
Temperatura camerei de tipărire	80°C
Înălțimea straturilor pe axa Z	0,30 mm
Umplere pereți piesa	SOLID
Tip suport	SPARSE
Material de baza	ABS-M30
Material suport	SR 30

3.4. Caracterizarea mecanica a materialelor plastice

În vederea stabilirii proprietăților fizice ale materialului ABS-M30 epruvetele tipărite 3D au fost testate pe standul de încercări la solicitările mecanice de întindere și compresie. Reprezentarea grafică a caracteristicilor mecanice ale materialelor s-a făcut prin curbele de tensiune – alungire relativă $\sigma - \varepsilon$, obținute cu ajutorul datelor primare obținute în urma efectuării probelor la tracțiune. S-au obținut astfel, utilizând datele experimentate în modele matematice, caracteristicile forței de tracțiune în funcție de alungirea epruvetei.

Aceste modele matematice sunt necesare pentru a se asigura un comportament al modelului numeric similar încercărilor și testelor fizice (Tabacu et al. 2008; Beyene et al. 2014; Mortazavian și Fatemi 2015; Mohamed, Masood, și Bhowmik 2017; Teixeira et al. 2015; Matsumoto, Driemeier, și Alves 2012; Taherkhani et al. 2015). Curba de material definită la modul general pentru materialele termoplastice este prezentată în Figura 3.15.

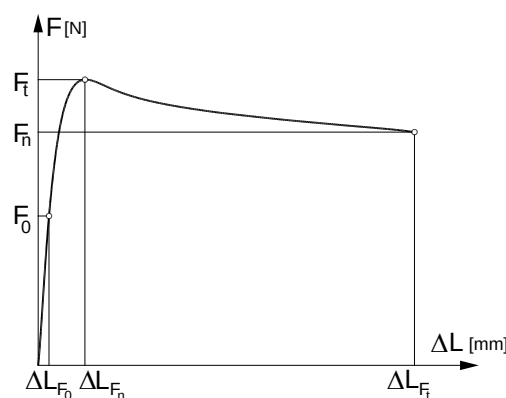


Figura 3.15. Curba tensiune-alungire relativa

În Figurile 3.17 și 3.18. se ilustrează modalitățile de fixare a epruvetelor, utilizând dispozitivele de fixare ale mașinii de încercări în vederea efectuării testelor de tracțiune și compresie



Figura 3.17. Prinderea pe mașina de încercări a epruvetei pentru încercarea la tracțiune.



Figura 3.18. Prinderea pe mașina de încercări a epruvetei cilindrice pentru încercarea la compresiune.

La solicitarea de întindere (tracțiune), forța axială se aplică asupra epruvetei prin deplasarea unuiu platou al mașinii în care este fixata epruveta în sens opus piesei. Efectuarea probei a constat în deplasarea bacului mobil al mașinii cu viteză constantă de 5mm/min, culegerea datelor/informațiilor făcându-se în mod continuu, pe toata durata acestui proces pana la ruperea epruvetei.

În Figura 3.20 sunt prezentate rezultatele de tip forță – deplasare obtinute la solicitarea de întindere pentru epruvetele fabricate cu o grosime a stratului de 0.3 mm.

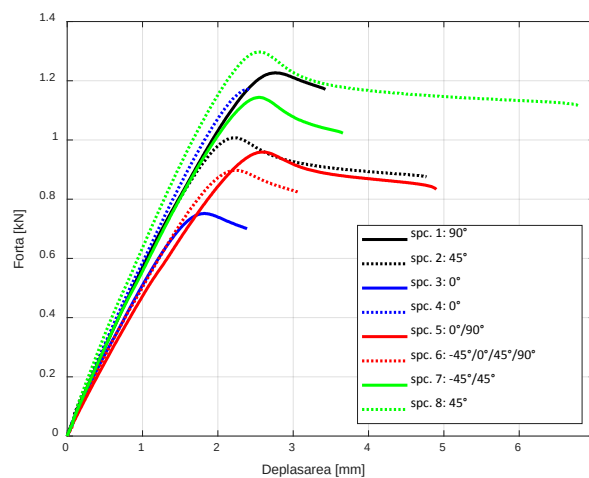


Figura 3.20. Rezultatele de tip forță – deplasare

Cu ajutorul relațiilor (3.1) și (3.2) se determină caracteristica nominală tensiune – alungire relativă.

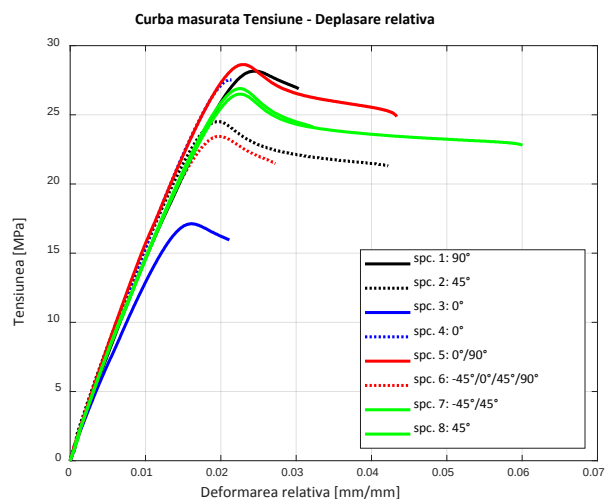


Figura 3.21. Curbele nominale tensiune – alungire relativă.

Prin schimbarea de coordonate cu ajutorul relațiilor (3.5) și (3.6).

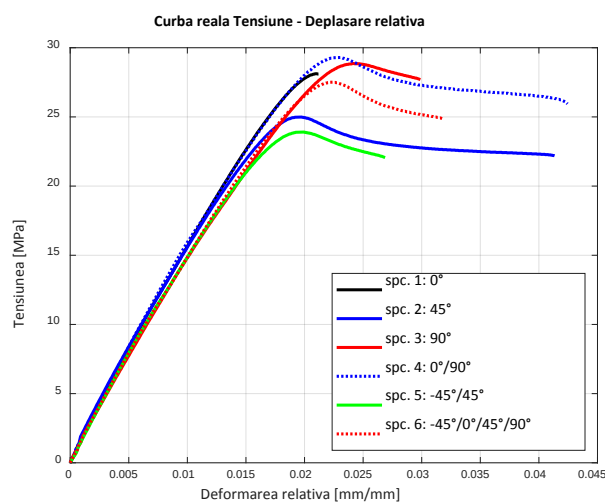


Figura 3.22. Curbele reale tensiune – alungire relativă.

Din analiza rezultatelor obținute se constată faptul că diferențele înregistrate între valorile măsurate, considerate semnificative, se încadrează în limitele definite de abaterea standard μ , calculată cu relația:

$$\mu = \frac{1}{N} \sqrt{\sum (\sigma_{m,i} - \sigma_{m,a})^2} \quad (3.7)$$

unde $\sigma_{m,a}$ este media aritmetică a valorilor maxime determinate:

$$\sigma_{m,a} = \frac{1}{N} \sum \sigma_{m,i} \quad (3.8)$$

Figura 3.23. prezintă rezultatele analizei statistice.

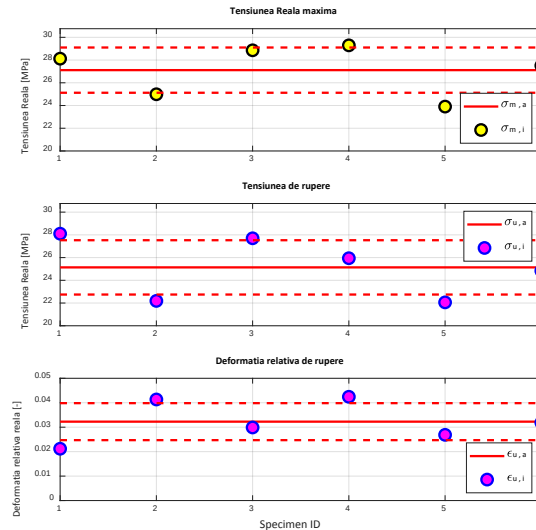


Figura 3.23 Curbele reale tensiune – alungire relativă. Evaluarea performanțelor.

La solicitarea de compresiune se aplica de asemenea o forță axială asupra epruvetei dar de aceasta data orientată către piesa. Platourile mașinii se apropie relativ unul de celălalt cu viteză constantă deformând epruveta, timp în care senzorii colectează informații pe parcursul întregului proces. Figura 3.24. prezintă procesul de deformare a unei structuri cilindrice.

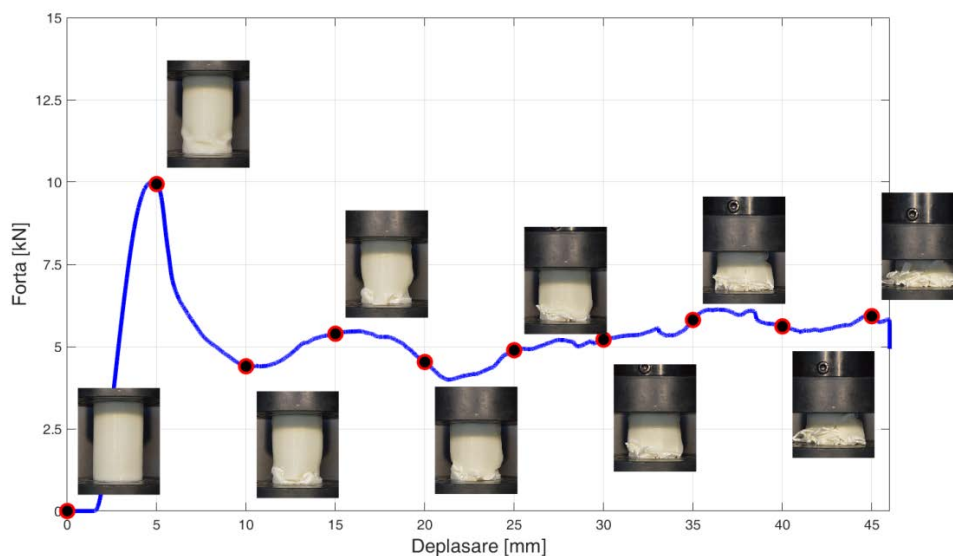


Figura 3.24. Curba forță deplasare și corelarea cu imaginile înregistrate

Studiul procesului de comprimare și a comportamentului mecanic al materialelor și pieselor fabricate prin tehnologia de tipărire 3D vor face obiectul unor studii și cercetări viitoare.

3.5. Studiul SEM

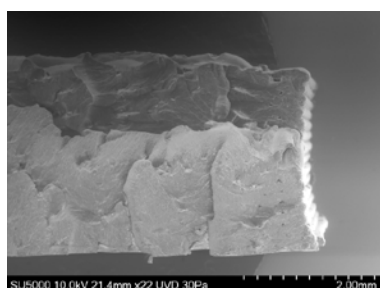
Epruvetele au fost investigate prin tehnici de microscopie electronică disponibile în cadrul Centrului Regional de Cercetare Dezvoltare - Auto al Universității din Pitești.

Imaginile prezintă zona în care s-a produs ruperea epruvetei în scopul evidențierii structurii, a modului de depunere a materialului și a mecanismului de rupere (Budinski 2014; Roberson et al. 2015).

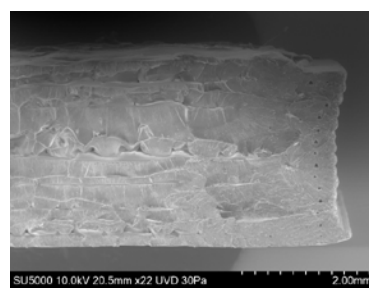
În Figura 3.25 sunt prezentate o serie de imagini fotografice în care sunt prezentate elemente specifice ale secțiunilor epruvetelor pentru diferite modalități de așezare pe platou și de depunere a materialului. Grosimea indicată de depunere a materialului este de 0.2 mm.

Figura 3.25 *a)* prezintă secțiunea transversală a unei epruvete fabricată $45^\circ/-45^\circ$. Se identifică mici goluri în apropierea marginilor epruvetei (linia de contur a epruvetei) care se datorează soluției tehnice de tipărire care nu a inclus nicio metodă suplimentară de compensare a golurilor (acest parametru este studiat în literatura de specialitate).

Și în cazul piesei fabricate $0^\circ/90^\circ$, prezentată în Figura 3.25 *b)* sunt identificate aspect similar celor menționate mai înainte.



a) 0.2 mm - $45^\circ/-45^\circ$

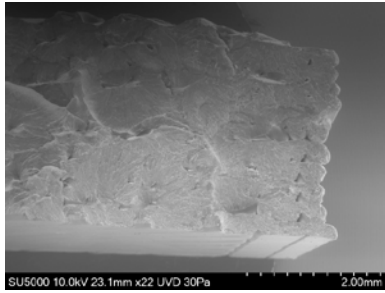


b) 0.2 mm - $0^\circ/90^\circ$

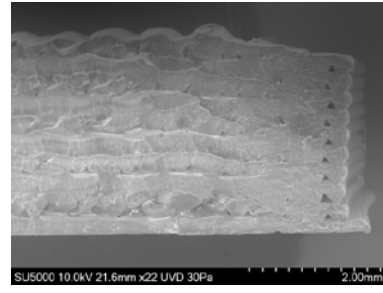
Figura 3.25. Imagini ale epruvetelor fabricate cu o grosime a stratului de 0.2 mm

În Figura 3.26 sunt prezentate o serie de imagini fotografice în care sunt prezente elemente specifice ale secțiunilor epruvetelor. Grosimea indicată de depunere a materialului este de 0.3 mm. Modelul de rupere a epruvetei fabricată la $45^\circ/-45^\circ$ este similar celui pentru o piesă fabricată cu grosimea stratului de 0.2 mm. Se identifică o direcție dominantă de rupere a materialului.

Epruvetă fabricată după modelul $0^\circ/90^\circ$ pentru o grosime a stratului de 0.3 mm are un comportament similar celei care a fost realizată cu o grosime a stratului de 0.2 mm.



a) 0.3 mm - 45°/45°



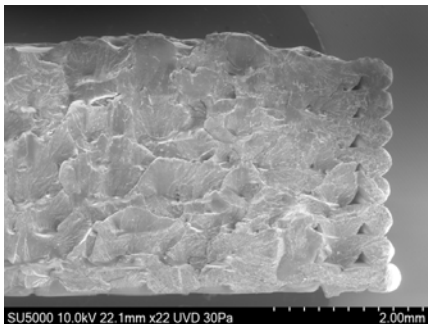
b) 0.3 mm - 0°/90°

Figura 3.26. Imagini ale epruvetelor fabricate cu o grosime a stratului de 0.3 mm

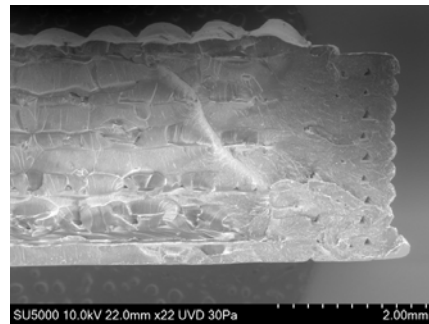
În Figura 3.27 sunt prezentate o serie de imagini fotografice în care sunt prezentate elemente specifice ale secțiunilor epruvetelor o grosimea indicată de depunere a materialului este de 0.4 mm.

Nu sunt identificate modificări semnificative ale structurii (se ține cont de grosimea diferită a stratului de tipărire). Este de menționat faptul că în cazul piesei fabricată după modelul 0°/90° se pot identifica goluri și în zona de mijloc a materialului.

Existența unui număr de goluri nu este însă un criteriu determinant pentru stabilirea rigidității piesei și deci a performanțelor structurale având în vedere faptul că grosimea materialului depus este mai mare și în consecință scade riscul apariției unor discontinuități.



a) 0.4 mm - 45°/45°



b) 0.4 mm - 0°/90°

Figura 3.27. Imagini ale epruvetelor fabricate cu o grosime a stratului de 0.4 mm

3.6. Concluzii

În cadrul acestui capitol au fost investigate performanțele mecanice ale pieselor de referință (epruvete) obținute prin FDM. Deși tehnologia FDM folosește proprietățile de adeziune ale materialelor termoplastice pentru depunerea straturilor de material în vederea obținerii piesei finale, piesele realizate prin aceasta tehnologie pot oferi o soluție tehnică viabilă. Parametrii de tipărire afectează și ei în buna măsură

comportamentul pieselor și proprietățile lor fizice, acest lucru fiind evident din testele de tracțiune și compresiune prezentate. Din această perspectivă este foarte importantă cunoașterea cerințelor la care trebuie să răspundă o piesă realizată prin prototipare rapidă, parametrii de tipărire putând fi ajustați, iar materialele de așa natură alese pentru ca piesa să răspundă acestor cerințe.

Rezultatele încercărilor mecanice prin probe specifice de tracțiune și compresiune sunt corelate cu informații obținute în urma investigării secțiunilor rupte ale epruvetelor prin tehnici de microscopie electronică.

Studiul prezintă rezultatele analizelor experimentale în vederea transpunerii în activitatea de producție din cadrul Alseca Engineering:

- optimizarea proiectării reperelor din mase plastice, pentru îmbunătățirea proprietăților mecanice, prin utilizarea „designului inteligent”;
- îmbunătățirea proiectării unor caracteristici geometrice pentru realizarea structurilor multistrat/hibride cu aderență ridicată;
- proiectarea asistată de calculator a reperelor din mase plastice pentru producerea prin injecție cu matrițe experimentale.
- Alegerea materialelor care răspund cel mai bine cerințelor aplicației

4

Optimizarea structurilor

4.1. Introducere

Optimizarea are ca scop final determinarea unei soluții tehnice care, în limitele unui cadru de referință definit prin condițiile admise sau impuse inițial, conduce la folosirea cea mai avantajoasă a resurselor de care se dispune pentru materializarea ei (Thakur, Banerjee, și Gupta 2009; Zhang și Zhang 2013; Karamooz Ravari et al. 2014; Jin et al. 2011; Duro-Royo et al. 2014; Bendsøe și Kikuchi 1988; Thompson et al. 2016; Galantucci, Percoco, și Dal Maso 2008; Zhu et al. 2014; Gardan și Schneider 2015; Stanković et al. 2017). Ca etape ale procesului de optimizare se disting optimizarea topologică și optimizarea structurală.

Procesul de optimizare topologică a structurilor mecanice cuprinde trei categorii majore de procese (Thakur, Banerjee, și Gupta 2009):

- optimizarea parametrică a modelului. Modelul geometric care se parametrizează (prin intermediul soluției de proiectare) prin intermediul unui număr de variabile (ex. grosime, diametre, dimensiuni) nu permite identificarea unor modele geometrice alternative ci are ca finalitate identificarea unui set de variabile cu valoare optimă.
- optimizarea formei geometrice, plecând de la o formă geometrică inițială, constă în modificarea limitelor domeniului de definire a piesei printr-o soluție tehnică care permite definirea modelului fără a-i afecta topologia formei de bază.
- optimizarea topologică permite obținerea celei mai bune forme a unei piese prin stabilirea unui domeniu inițial și a unui set de reguli de optimizare.

Optimizarea structurală se realizează prin minimizarea sau maximizarea unuia sau mai multor obiective de proiectare, precum:

- volumul/masa întregii structuri;

- tensiunea maximă sau distribuția tensiunilor în structură;
- deformații maxime;
- eficacitatea procesului de fabricare;
- cost.

Tehnologia realizării pieselor prin prototip rapid permite dezvoltarea unor soluții tehnice care să cuprindă etape de proiectare a pieselor prin tehnici de optimizare structurală (Langelaar 2016; Singh et al. 2016).

În cadrul acestui capitol se prezintă o soluție tehnică de proiectare a unei structuri mecanice prin optimizare topologică (Gardan și Schneider 2015; Liu et al. 2014; Alzahrani, Choi, și Rosen 2015; Stanković, Mueller, și Shea 2017; Langelaar 2016; Clausen, Aage, și Sigmund 2016; Mirzendeheel și Suresh 2016; Rezaie et al. 2013; Li et al. 2018).

4.2. Prezentarea soluției tehnice pentru optimizare.

Soluția de optimizare abordată în studiul efectuat se bazează pe identificarea și analiza stării de tensiune definită în structura de optimizat urmare a aplicării unui set de încărcări exterioare. În acest sens a fost elaborat un set de aplicații software menite care să permită interpretarea rezultatelor obținute prin simularea numerică. Algoritmii pentru optimizare pot avea, în funcție de strategia de calcul aleasă, un nivel de complexitate ridicat (Robbins et al. 2016), (Li et al. 2018).

Cercetări intense au fost întreprinse la sfârșitul anilor 90' (Bendsøe și Kikuchi 1988), perioadă în care soluțiile tehnice de optimizare elaborate sunt bazate pe distribuția materialului, distribuție determinată de valorile densității relative ale fiecărui element care variază între $\rho = 0$ pentru element nul și $\rho = 1$ pentru un element selectat. Această soluție tehnică permite crearea de goluri în domeniul de calcul acolo unde sunt necesare și care determină modificări topologice fără a fi necesară operația de realizare a unui nou model de calcul (definire a unei noi rețele de elemente finite). Se simplifică în acest fel și soluția de optimizare (Sigmund 2009).

Având în vedere flexibilitatea metodelor Additive Manufacturing de a realiza piese finite procesul de optimizare poate fi extins și se pot implementa metode și tehnici sofisticate (Li et al. 2018; Mirzendeheel și Suresh 2016).

Aplicația propusă pentru optimizare funcționează prin corelarea unui modul de analiză este dezvoltat în Matlab cu soluția de rezolvare a modelului numeric implementată de Ls-Dyna (Diaconescu, Tabacu, și Oltean 2017).

Etapile de calcul pentru identificarea soluției optimizată urmează structura prezentată în Figura 4.1.

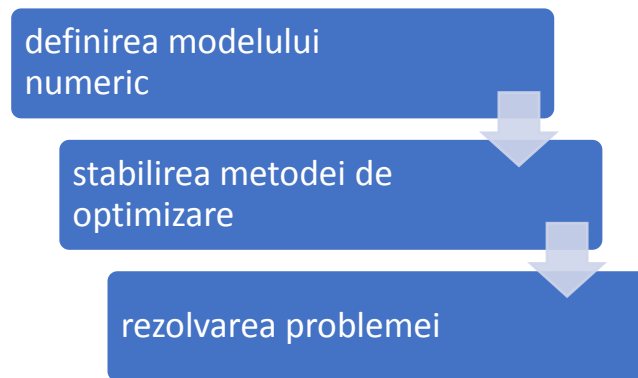
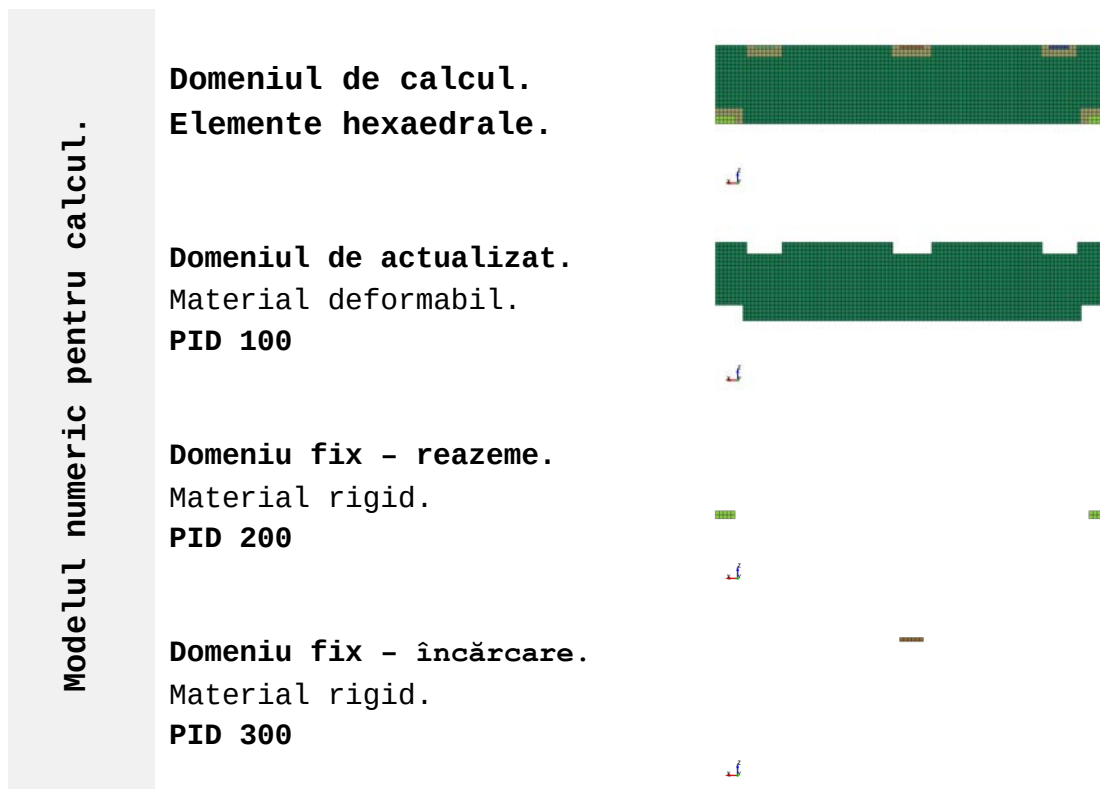


Figura 4.1. Schema generală a procesului de calcul.

Modelul numeric este definit general având în vedere faptul că pentru identificarea soluției tehnice se alege metoda de calcul prin asocierea unei densități de material.

Programul de calcul elaborat permite operarea cu un set de date definit de utilizator. Funcțiile seturilor de date sunt specificate prin proprietățile asociate și prin condițiile de margine stabilite.

În Figura 4.2 sunt prezentate elementele care compun modelul numeric. Se constată faptul domeniul inițial este simplu definit astfel că nu sunt necesare tehnici sau abilități speciale pentru definirea modelului numeric de bază.



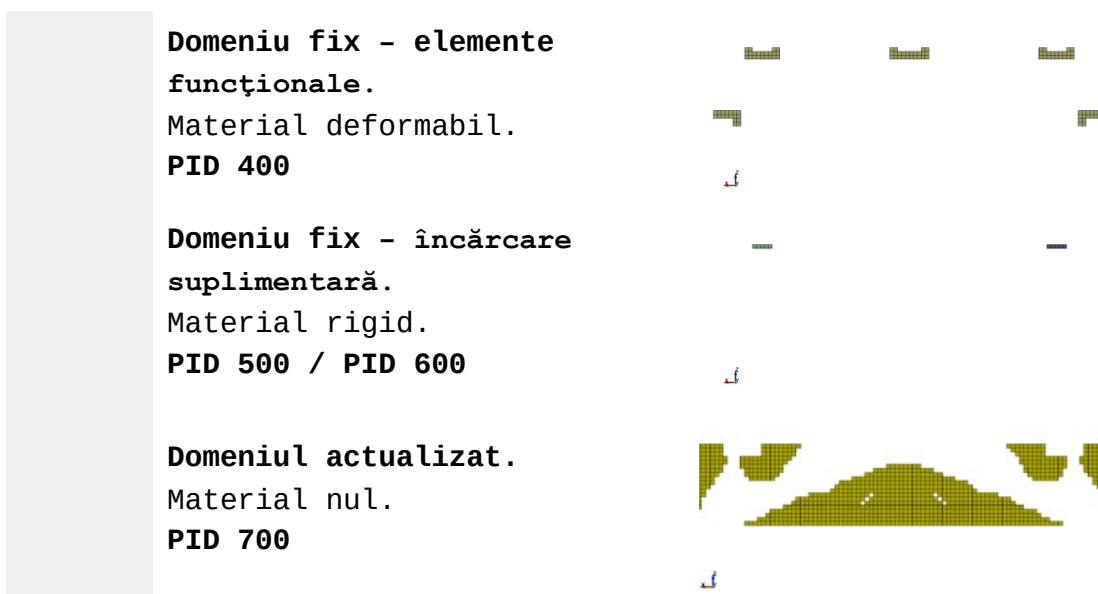


Figura 4.2. Compunerea modelului numeric.

Utilizatorul selectează elemente finite componente ale domeniului inițial și le asociază proprietăților definite și indicate în Figura 3.3.

Metoda de optimizare funcționează prin transformarea elementelor cuprinse în Domeniul de actualizat (PID 100) și elemente care vor defini Domeniul actualizat (PID 700). Transformarea se realizează într-un singur pas, în care elementele material sunt transformate în element nul după care utilizatorul definește proprietățile fizice și mecanice de tip material. Pentru definire se pot utiliza fie materiale de tip elastic sau materiale de tip elastic – plastic.

Aplicația astfel definită permite stabilirea ca parametri de optimizat:

- deplasarea maximă a set de elemente asociat unui domeniu de tip rigid (ex. PID 200);
- tensiunea maximă înregistrată în elemente ale domeniului de calcul (PID 100);
- deformare relativă în domeniul plastic;
- orice combinație a parametrilor definiți anterior.

Încărcările aplicate determină o stare de tensiune în elementele domeniului de calcul ce este utilizată ca mărime care definește gradul de utilizare a materialului. În acest sens elementele care înregistrează o stare de tensiune cu o valoare mai mică decât cea de referință a pasului curent sunt transformate în elemente care aparțin domeniului actualizat.

Tensiunea de referință este calculată cu ajutorul relației (4.2).

$$\sigma_i = \left(\frac{i}{n}\right)^k \cdot \sigma_a \quad (4.2)$$

unde:

- i este numărul de ordine al iterației;
- n este numărul de pași ai procesului de optimizare definit de utilizator;
- k este un exponent;
- σ_a este tensiunea admisibilă definită de utilizator.

Exponentul k definește viteza procesului de transformare a elementelor din domeniul de calcul în domeniul actualizat. Figura 4.5 prezintă variația fracției $\left(\frac{i}{n}\right)^k$ pentru valori ale exponentului k .

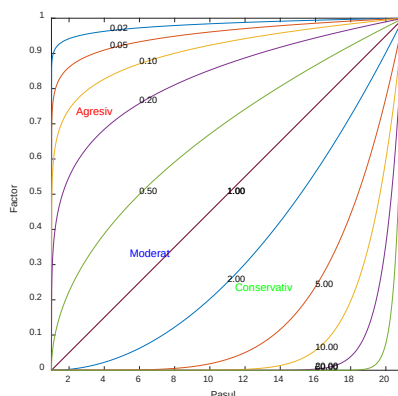


Figura 4.5. Calitatea procesului de formare

Starea de tensiune înregistrată în elementele conținute în domeniul de calcul este salvată într-un fișier ASCII cu ajutorul cartelelor specializate Ls-Dyna. Prin setul de comenzi *DATABASE_AVSFILT și *DATABASE_EXTENT_AVS sunt salvate informațiile menționate anterior. Structura datelor conținute în fișierul AVSFILT este prezentată în Figura 4.6.

```
ls-dyna smp.105896 s          date 02/24/2016
ls-dyna avs filter file
23870 20475 0 0 1
x-stress
1.00000E+02 1.25000E+01 0.00000E+00 1
...
9.80000E+01 1.05800E+01 2.00000E+01 23870 23870
23764 23758 23763 23769 23848 23842 23847 23853 2 1
...
755 766 754 743 2169 2180 2168 2157 7 20475
state # 1 time= 0.00000E+00
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
...
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
0.000E+00 0.000E+00
state # 2 time= 0.50000E-01
-0.443E-02 -0.451E-02 -0.422E-02 -0.418E-02 -0.428E-02 -0.427E-02
...
0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00
0.000E+00 0.000E+00
2
%% DATA Structure
%model structure- AVSFILT
%-----8-----16-----24
% 10829 8069 0 0 1
%nodes - AVSFILT
%-----12-----24-----36-----49
%-6.00000E+00 7.40000E+01 1.00000E-01 191
%element connectivity - AVSFILT
%-----8-----16-----24-----32-----40-----48-----56-----64-----72-----80
% 234 235 192 191 3181 3182 3139 3138 3 187
%data (stress) ELOUT
%-----9-----17-----30-----42-----54-----66-----78-----80-----92-----
% 1 elastic 3.0158E+01 1.5309E+02 3.4221E+01 -1.2422E+01 2.9747E+01 7.5510E+00 1.3386E+02 0.0000E+00
```

Figura 4.6. Structura fișierului AVSFILT.

Rezolvarea problemei se realizează cu ajutorul Ls-Dyna care este apelat din cadrul programului general de calcul elaborat în Matlab prin intermediul !run_.bat care definește un fișier de comenzi.

Figura 4.7 prezintă ecranul cu aplicația de optimizare și procesul de rulare Ls-Dyna.

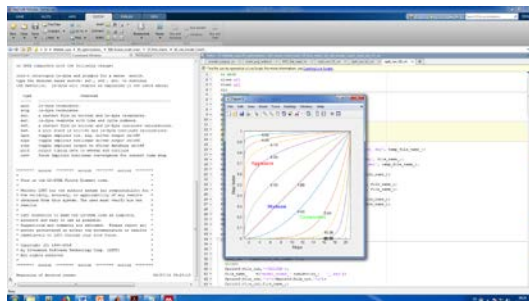


Figura 4.7. Fereastra principală a aplicației.

Aplicația 4.1. prezintă modul general de organizare a programului de optimizare. Secțiunile colorate sunt în corespondență cu informațiile prezentate în Aplicația 4.2 care prezintă codul detaliat.

Aplicația 4.1. Modul principal optimizare - organizare.	
Linia	Conținut
1-4	Initializare
5-14	Date de intrare ale procesului de optimizare
15-31	Organizare fișiere
32	%
33	start_=1; end_=steps_;
34	for uu_=start_:end_
35-59	organizare seturile de fișiere cu modelul geometric (pentru Ls-Dyna)
60-78	organizeaza fișierul BAT cu comenzi pentru Ls-Dyna
79	%% EXECUTES Ls-Dyna
80	!run_.bat
81	%% read the results
82-86	Citeste rezultate ale simularii numerice
87-94	Salveaza modelul numeric (elemente)
95-159	Sortare elemente in funcție de tensiunea maxima calculata
160-179	Salveaza model actualizat
180-219	Salveaza fisier comenzi pentru LsPrePost
220-227	Verifica sfarsitul procesului de optimizare
228-236	Salveaza ate date
237	end

Aplicația generală de calcul este prezentată.

Aplicația 4.2. Modul principal optimizare.	
1	%% MAIN
...	...
237	end

Informațiile referitoare la deplasare sunt extrase din fișierul specific RBDOUT generat de Ls-Dyna prin intermediul carteii *DATABASE_RBDOUT.

Modulul utilizat pentru extragerea informațiilor conținute în fișierul AVSFLT este prezentat în cele ce urmează. În cadrul aplicație Matlab (Aplicația 4.1./Aplicația 4.2.) pentru fiecare pas de optimizare sunt salvate imagini ale modelului numeric precum și diagrame ale rezultatelor (deformații și stare de tensiunea). Aceste imagini sunt salvate prin intermediul aplicației LsPrePost utilizată în mod consolă (lspp_.exe c=lspp_cmd_.txt –nographics). Modulul Matlab citește informațiile conținute în

fișierul AVSFLT și în cazul în care pentru un element identificat cu proprietatea 100 tensiunea calculată este mai mică decât tensiunea de referință pentru pasul curent σ_i definită de relația (4.2), elementul este transferat în setul cu proprietatea 700. La sfârșitul fiecărei iterații se salvează noua structură a modelului numerică care este utilizată pentru rezolvare în pasul următor (vezi Cartele 4.3).

Aplicația 4.3. Funcția pentru citirea fișierului AVSFLT.

```
1      %% open the AVSFLT file - for model information
...
126    %      1 elastic  3.0158E+01  1.5309E+02  3.4221E+01 -1.2422E+01  2.9747E+01  7.5510E+00  1.3386E+02  0.0000E+00
```

Fișierele care conțin seturile de cartele Ls-Dyna sunt prezentate în cele ce urmează.

Cartele 4.1. Fișierul principal Ls-Dyna.

```
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
1      *KEYWORD 7000000000
...
51     *END
```

Cartele 4.2. Fișierul cu informații despre seturi și materiale.

```
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
1      *PART
...
68     *END
```

Cartele 4.3. Modelul curent.

```
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
1      *INCLUDE
2      model_nodes_2_.key
3      *INCLUDE
4      model_elements_2_.key
5      *INCLUDE
6      model_PARTS_.key
7      *END
```

Comenzile utilizate pentru salvarea imaginilor grafice sunt:

Comenzi 4.1. Lista comenzi LsPrePost.

```
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
1      open d3plot "d3plot"
2      quat -0.181199 0.410444 0.849909 -0.276327;
3      right
4      ac
5      state -1
6      fringe 9
7      pfringe
8      range avgfrng none
9      print png "1_opt_state_stress_10.png" LANDSCAPE nocompress gamma 1.000 opaque enlisted "OGL1x1"
10     fringe 20
11     pfringe
12     print png "1_opt_state_disp_10.png" LANDSCAPE nocompress gamma 1.000 opaque enlisted "OGL1x1"
13     shad
14     print png "1_opt_state_10.png" LANDSCAPE nocompress gamma 1.000 opaque enlisted "OGL1x1"
15     quat 0.031264 0.901389 0.341236 -0.264723
16     print png "2_optstate_10.png" LANDSCAPE nocompress gamma 1.000 opaque enlisted "OGL1x1"
```

4.3. Rezultate și discuții.

În cadrul acestei secțiuni sunt prezentate rezultate obținute cu ajutorul aplicației pentru optimizare prezentată.

Domeniul inițial de calcul este definit printr-un paralelipiped format din elemente finite hexaedrale cu dimensiunea de 2 mm astfel că volumul total al domeniului de calcul este $200 \times 30 \times 20$ mm.

Domeniul este rezemat în partea de jos prin intermediul unor reazeme fixe.

Structura este încărcată, prin intermediul unei structuri solidare cu domeniul de calcul, cu o forță care acționează pe direcție verticală, a cărei valoare este de 1500 N.

Domeniului de calcul îi este asociat un material elastic-plastic definit de:

- densitatea materialului $\rho = 1000[kg/m^3]$;
- modulul de elasticitate $E = 1500 [MPa]$;
- coeficientul lui Poisson $\nu = 0.33$;
- modulul de întărire $E_t = 0 [MPa]$ (material perfect plastic);
- alungirea la rupere $\varepsilon_r = 4\%$.

Tensiunea care definește limita de elasticitate este $\sigma_o = 28.5[MPa]$ iar tensiunea admisibilă utilizată în procesul de optimizare este $\sigma_a = 20[MPa]$. Se urmărește o deplasarea a domeniului care încarcă structura de maxim 3.5 mm sau o deformare relativă în domeniul plastic de 2%.

Procesul de optimizare se desfășoară în 20 de pași și pentru primul set de date valoarea exponentului k este 1.0 corespunzătoare unui proces Moderat (Figura 4.5).

Figura 4.8 prezintă imagini obținute în cadrul procesului de optimizare. Sunt prezentate domeniile care definesc modelul și distribuția tensiunii totale (von Mises).

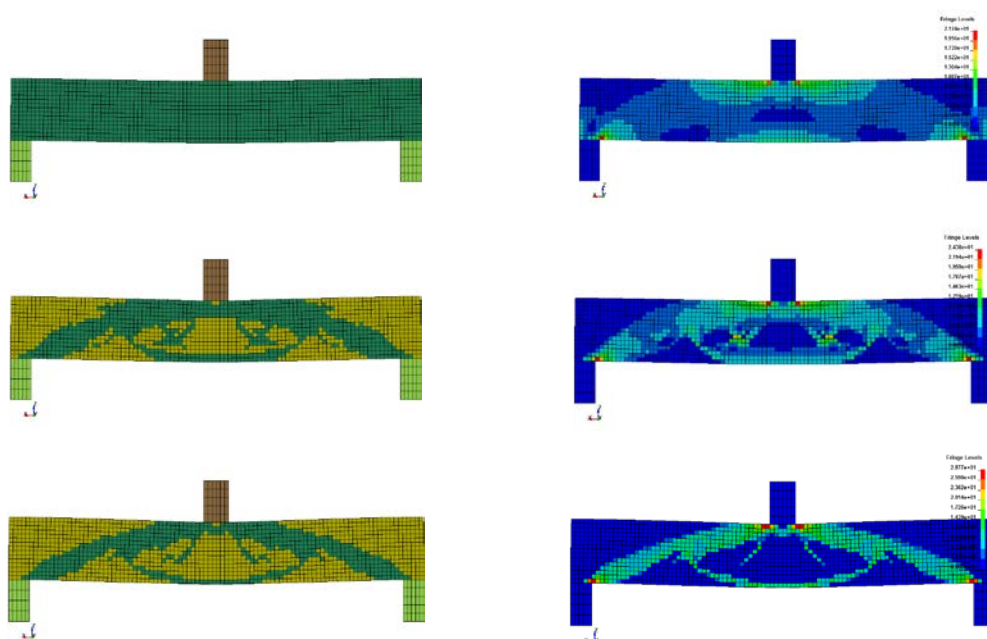


Figura 4.8. Procesul de optimizare pentru exponentul $k = 1.0$.

Procesul de optimizare se încheie după un număr de 8 pași prin determinarea unei deformări relative în domeniul plastic mai mare decât limita stabilită de 2%.

În Figura 4.10 sunt prezentate variația tensiunii maxime calculată în structură și deplasarea maximă a setului de elemente definit de setul prin care este încărcată structura.

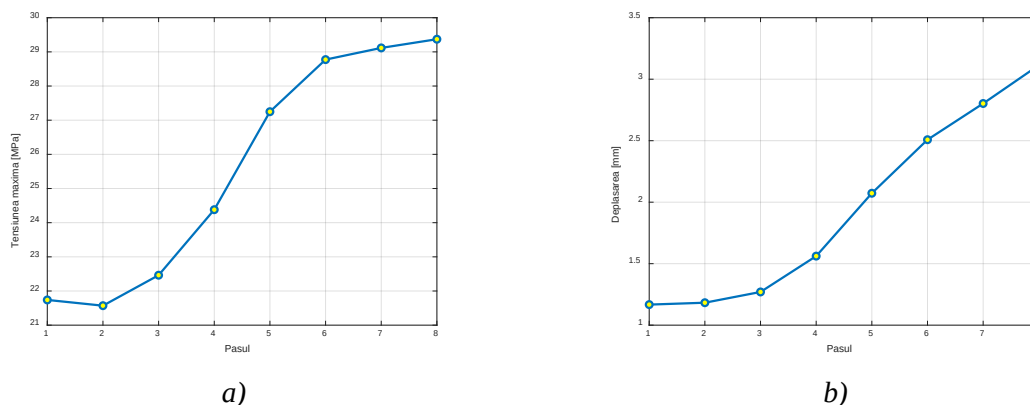


Figura 4.10. Rezultate ale procesului de optimizare
a) tensiunea maximă din structură; *b)* deplasarea setului de încărcare.

4.4. Cercetări experimentale.

În vederea efectuării cercetării experimentale, în prima etapă modelul geometric prelucrat al piesei prezentate în figura 4.19, structura optimizată a piesei a fost salvată sub formă de model geometric pentru a fi prelucrată în vederea realizării unui model prin metoda tipăririi 3D, după care s-a efectuat tipărirea 3D a piesei.

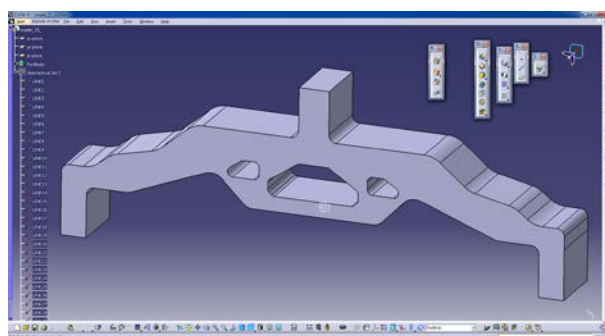


Figura 4.19. Modelul geometric prelucrat al piesei.

Piesa realizată prin metoda de prototipare rapidă a fost montată în dispozitivul de încercare cu fixarea piesei conforme încercărilor experimentale, când piesa este supusă acțiunii deformatoare a forțelor verticale cu valori de până la 2500 N.

Imagini fotografice au fost înregistrate în timpul efectuării probei pentru evaluarea completă a deformațiilor structurii. Pe suprafața vizibilă a piesei au fost lipite elemente de identificare (markere) pentru care stările de deformare au fost înregistrate, în etape

diferite ale probei, prin fotografiere. Suplimentar, pentru stabilirea unei referințe, au fost adăugate elemente de identificare pe cadrul instalației de încercare.

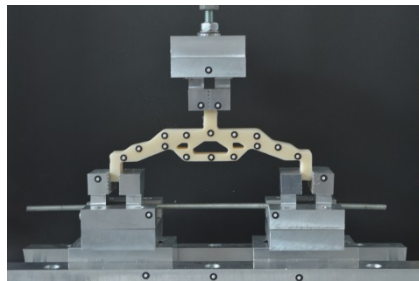
Calibrarea dimensională s-a realizat prin compararea unei elemente geometrice al imaginii fotografice cu o valoare măsurată.

Pentru analiza imaginilor fotografice a fost elaborat un modul în Matlab care extrage zona de interes din imaginea fotografică, analizează elementele geometrice din figură și identifică poziția markerelor.

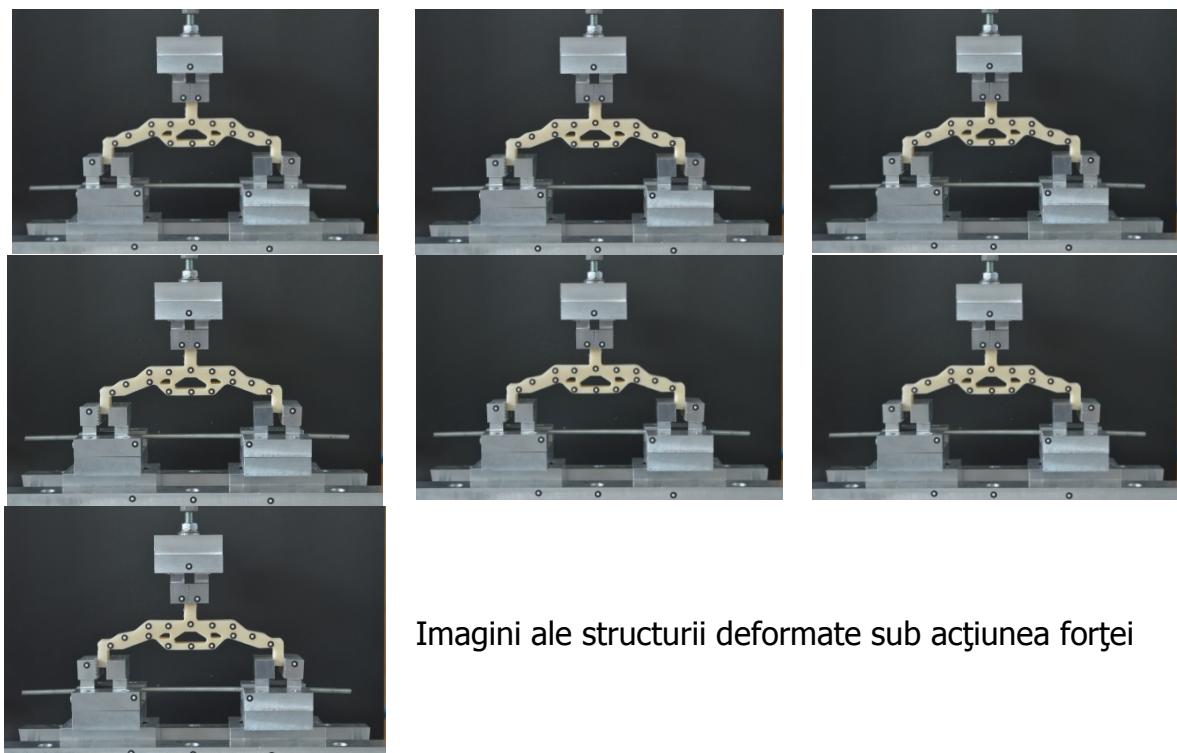
Aplicația 4.4. Prelucrarea imaginilor.

```
1      close all
...    ...
60     end
```

Imaginile fotografice de prelucrat sunt prezentate în Figura 4.21.



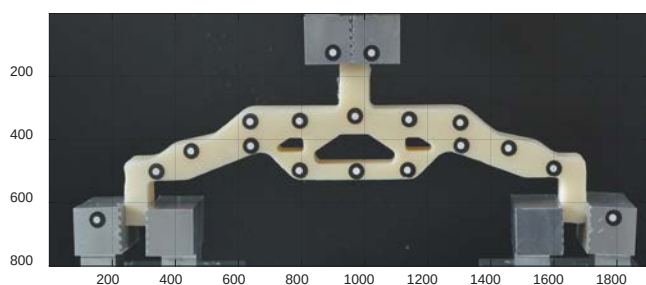
Imaginea de referință



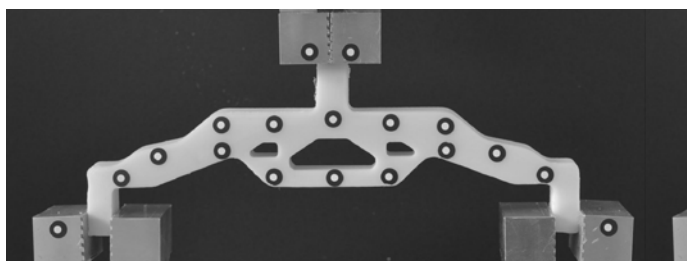
Imagini ale structurii deformate sub acțiunea forței

Figura 4.22. Setul de imagini fotografice utilizat.

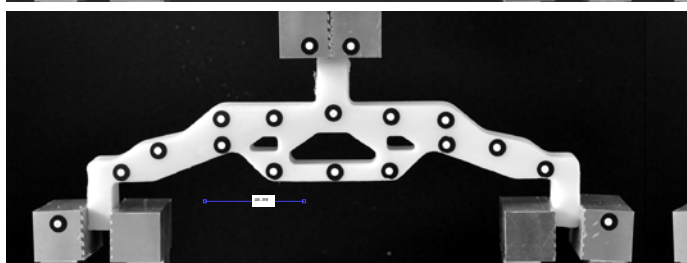
În Figura 4.22 sunt prezentate etapele parcurse pentru extragerea informațiilor pentru investigarea procesului de deformare a structurii.



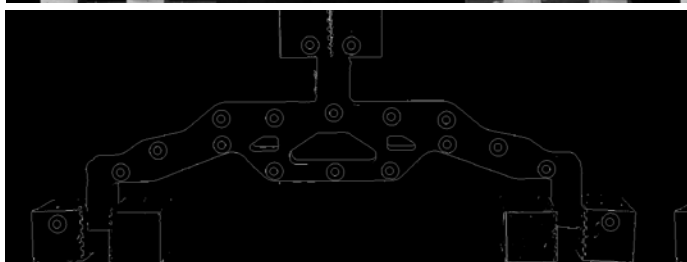
Se analizează imaginea curentă.



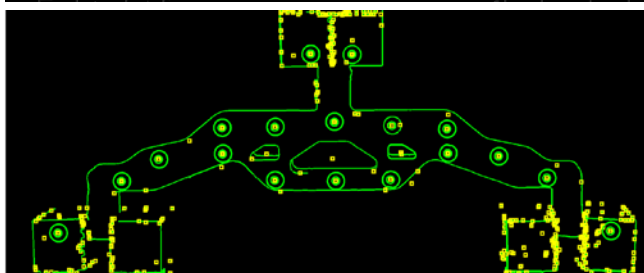
Imaginea este transformă în nuanțe de gri



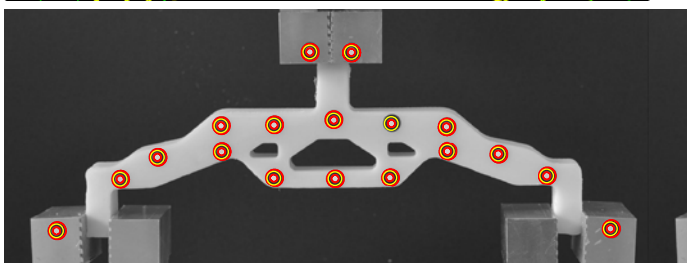
Se aplică filtre pentru îmbunătățirea calității imaginii



Sunt identificate elemente de contur conținute în imagine



Sunt analizate geometric elementele de contur identificate



Se extrag elementele care sunt asociate cercurilor ca poziții ale markerilor.

Figura 4.23. Procesul de analiză a imaginilor fotografice.

Aplicația 4.4. utilizează o funcție utilizator pentru procesare imaginilor fotografice așa cum este indicata în Figura 4.22.

Aplicația 4.5. Funcția utilizator.

```
1 function fimage_analysis(start_image_name_, plot_on_, sfi_)  
...  
116 save(case_name_, 'fCircle_', '-ascii', '-tabs');
```

Aplicația salvează pentru fiecare pas coordonatele centrelor cercurilor identificate în analiza de imagine pentru a fi utilizate în reprezentarea deformațiilor structurii.

În Figura 4.23 sunt prezentate rezultatele obținute în urma prelucrării imaginilor.

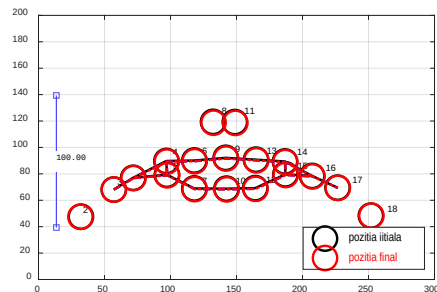


Figura 4.24. Rezultatele obținute în urma prelucrării imaginilor.

Modelul geometric a fost analizat cu ajutorul metodelor numerice pentru a se studia comportamentul mecanic.

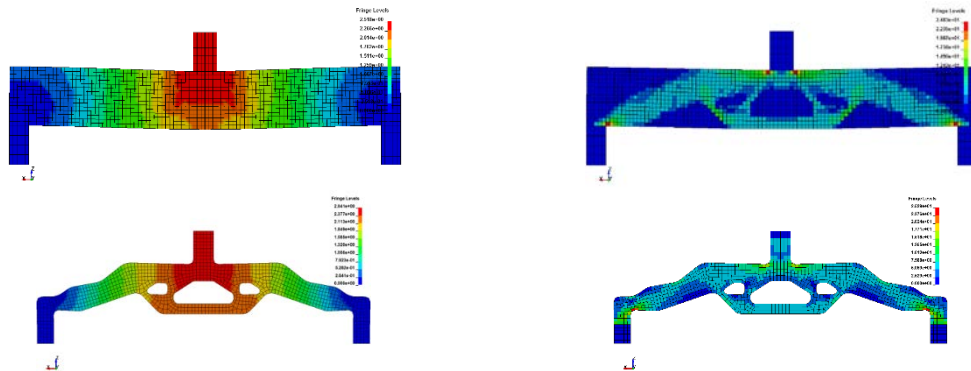


Figura 4.26. Rezultate obținute în timpul optimizării și rezultate obținute cu modelul prelucrat.

În Figura 4.26 sunt prezentate curbele forță – deplasare pentru rezultatele obținute prin simulare numerică și prin cercetare experimentală.

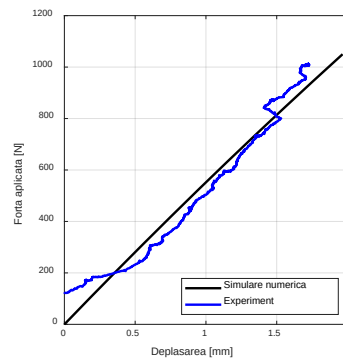


Figura 4.27. Rezultate forță – deplasare.

Se constată o bună corelare între cele două seturi de date astfel că procesul identificat poate fi utilizat pentru proiectarea optimă a structurilor.

4.5. Optimizarea structurilor existente.

Soluția tehnică propusă se aplică și în cazul structurilor existente. În acest sens s-a realizat corelarea modulelor pentru optimizare cu module pentru realizarea unor modele numerice tridimensionale prin procesarea fișierelor cu geometrie PLY.

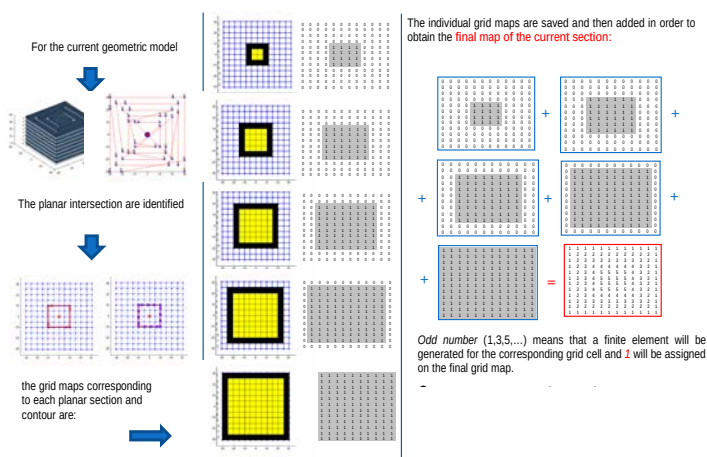


Figura 4.28. Schema completă de generare a modelului numeric

Un model geometric (Figura 4.28) este preluat (sub formă de fișier STL) și procesat obținându-se modelul numeric.

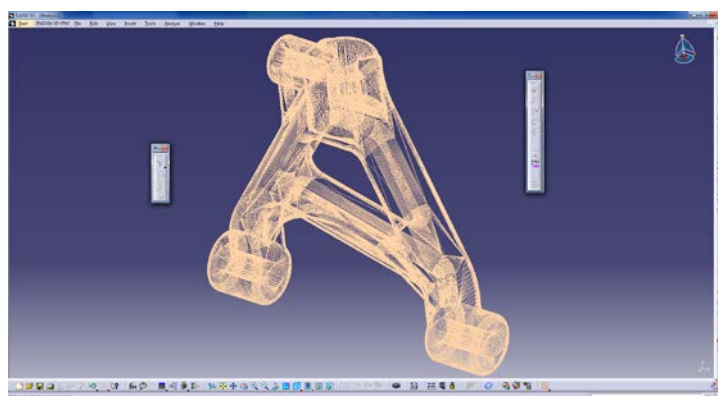


Figura 4.29. Model geometric.

Prin utilizare aplicației Matlab, descrisă în Figura 4.27, se obține o colecție de componente care definesc modelul numeric (noduri și elemente finite hexaedrale).

În Figura 4.28 este prezentată o imagine a modelului numeric astfel obținut.

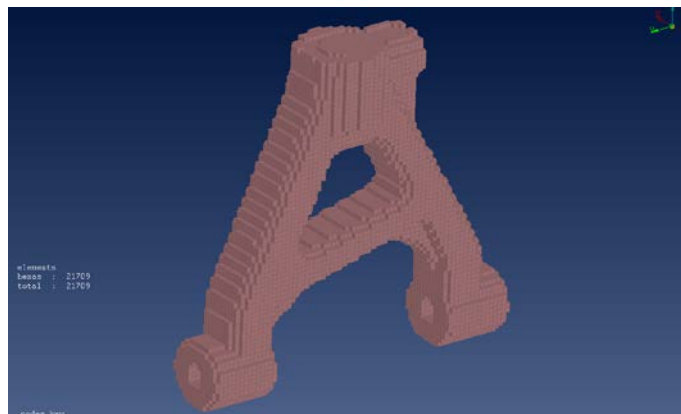


Figura 4.30. Model numeric.

Modelul numeric este pregătit pentru procesul de optimizare prin asocierea elementelor cu domeniile definite în cadrul programului de optimizare (Figura 4.2).

În acest sens se pot aplica două soluții tehnice:

- optimizarea formei geometrice plecând de la o formă geometrică inițială care constă în modificarea limitelor domeniului de definire a piesei (Figura 4.29) sau
- optimizarea topologică permite obținerea celei mai bune forme a unei piese prin stabilirea unui domeniu inițial prin completarea domeniului existent (Figura 4.30).

4.6. Concluzii.

În cadrul acestui capitol a fost prezentată o soluție tehnică de optimizare a structurilor plecând de la analiza proprietăților mecanice de material pentru o piesă tipărită 3D. Soluția tehnică prezentată sub forma unei aplicații software permite integrarea informației digitale obținută în timpul procesului de scanare. Pentru exemplificare a fost definită o problema pentru care au fost discutate rezultatele obținute în urma modificării parametrilor asociați algoritmului de optimizare propus. Ținând cont de modelul geometric adoptat și performanțele identificate ale procesului de tipărire 3D a fost realizat modelul prototip. Modelul prototip a fost testat în scopul corelării rezultatelor experimentale cu cele obținute prin simulare numerică. Având în vedere faptul că în cadrul lucrării a fost prezentată o soluție avansată de scanare optică, în acest capitol am dezvoltat și prezentat o soluție tehnică simplificată de investigare video a comportamentului în utilizare a structurilor. Soluția tehnică constă în realizarea unei aplicații ce prelucrează imagini obținute cu aparate de fotografiat digitale disponibile în mod curent.

În încheierea capitolului este prezentată o extensie a soluției tehnice de optimizare ce poate fi utilizată pentru structuri existente.

5

Analiza dinamică

5.1. Introducere

Metodele și mijloacele pentru prototipare rapidă au ajuns la maturitatea tehnologică și sunt capabile de realizarea unor piese și subansambluri ce pot fi utilizate în condiții de funcționare date. Tehnica ce a fost investigată în cadrul acestei lucrări este de tipărire 3D (Thompson et al. 2016). (Additive Manufacturing, 3D Printing), o metodă convenabilă din punct de vedere tehnologic și economic (Schniederjans 2017; Wu, Wang, și Wang 2016; Herrmann et al. 2014; Mohamed, Masood, și Bhowmik 2016).

Pentru îmbunătățirea calităților și performanțelor pieselor realizate cu ajutorul acestei metode sunt vizate tehnici de optimizare (Jin et al. 2011; Mirzendehtdel și Suresh 2016; Gardan și Schneider 2015; Carneiro, Silva, și Gomes 2015; Diaconescu, Tabacu, și Oltean 2017).

Menționăm faptul că sunt necesare cercetări legate de performanțele mecanice ale materialelor utilizându-se epruvete fabricate din materiale specifice procesului utilizând echipamente de tipărire 3D, avându-se în vedere faptul că pot fi identificate diferențe față de un produs realizat prin tehnici convenționale (ex. injecția de material plastic) (Dawoud, Taha, și Ebeid 2016). Completăm cu explicații referitoare la procesul de fabricație care constă în depunerea unui fir de material topit cu ajutorul unui extrudor cu orificiul calibrat capabil să topească doar local filamentele depuse anterior pentru realizarea legăturilor (Davis et al. 2017). O condiționare suplimentară (disponibilă la utilajul folosit FORTUS 900 mc) este realizată prin încălzirea incintei în care este fabricat modelul fizic (Costa, Duarte, și Covas 2017).

În cuprinsul acestui capitol se studiază comportamentul dinamic (Ding et al. 2016; Lim et al. 2018; Al-Badour, Sunar, și Cheded 2011; Yu et al. 2018; Casalino et al. 2008; Sinha 2013) al unei piese cu rol funcțional și a fost investigată din punct de vedere al procesului de reconstrucție și scanare 3D în cadrul Capitolul 2 al acestei lucrări.

Rezumând menționăm etapele parcurse:

- pregătire model fizic pentru scanare;
- scanare 3D;
- prelucrare model CAD;
- diverse interogări ale modelului CAD;
- pregătire pentru realizarea model fizic;
- realizare model fizic prin tipărire 3D.

Etapele indicate sunt ilustrate succint în Figura 5.1.

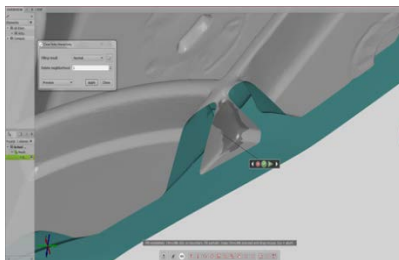


Am optat pentru o soluție de acoperire a suprafețelor de tip spray cu care s-a acoperit întreaga suprafață a piesei.

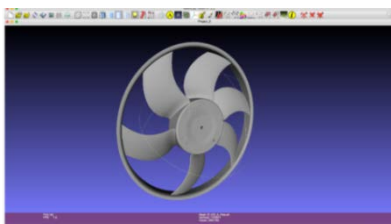
O altă operație pregătitoare este cea de lipire a markerilor pe suprafața de scanat. Scopul acestora este de a ajuta la poziționarea cadrelor capturate. Sistemul de scanare are posibilitatea ca în funcție de dimensiunea și complexitatea geometriei să folosească diverse volume de măsurare. Cadrele sunt asamblate cu ajutorul marcajelor și cu ajutorul unei aplicații dedicate Atos Profesional.



Aparatul de scanare este apoi calibrat și poziționat la aproximativ 1 – 1.5m de obiectul de scanat. Cu ajutorul unei aplicații dezvoltate de producătorul echipamentului de scanare și anume Atos Profesional începe să se realizeze captarea de informații (puncte) de pe geometria piesei.

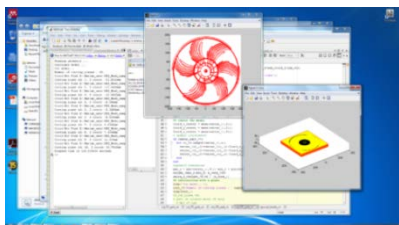


În urma realizării operației de scanare rezultă mai mulți nori de puncte (fiecare cadru generează un nor de puncte) care se suprapun cu ajutorul marcajelor de poziție și se elimină punctele care se suprapun obținându-se astfel un mesh final a cărui integritate este verificată astfel încât să se depisteze eventualele zone cu probleme (goluri, suprapuneri de puncte, noduri capturate de pe suprafețele vecine, etc.) procedându-se la curățarea și repararea mesh-ului

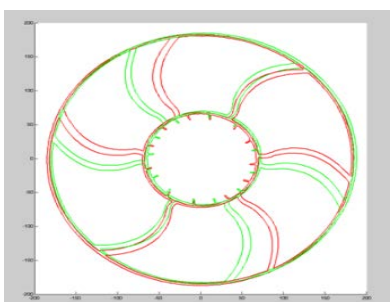


Fișierele .STL pot fi prelucrate în vederea diminuării mărimii pe care acestea le au inițial cu ajutorul unor aplicații dedicate. Aplicația care va fi folosită pe parcursul proiectului de cercetare se numește.

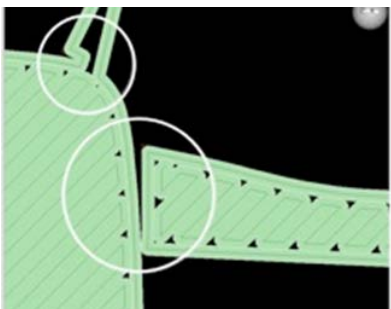
Aplicația permite realizarea a o serie întreagă de operații pe mesh-ul importat. În ceea ce ne privește vom folosi funcția de „Remesh Quadric Edges” care ne va permite modificarea rapidă a mesh-ului astfel încât să obținem un fișier de dimensiuni mai mici care să poată fi folosit la diverse studii.



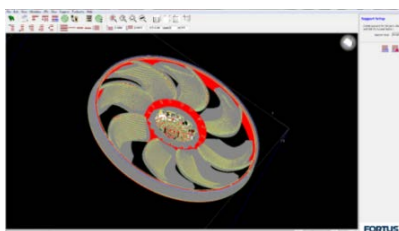
Am realizat cu ajutorul aplicației Matlab secționarea mesh-ului cu plane paralele la 10mm pe axa Z rezultatele fiind prezentate succint în figură



Prin realizarea secțiunilor pe variante de mesh având acuratețe diferită rezultată în urma trunchierii mesh-ului inițial și suprapunerea lor putem determina matematic cu cât este afectată precizia de măsurare. Secțiunile rezultate în Matlab sunt exportate în mod automat în format IGES care este ușor de folosit de aplicațiile CAD.



În figură sunt prezentate câteva probleme ale fișierului STL care nu vor fi identificate în timpul operației de import al fișierului în aplicația Insight prin urmare ele pot perpetua în situația în care fișierul este tipărit conducând la calitatea slabă a piesei tipărite care fie va lăsa semne pe suprafață fie poate conduce la ruperea ușoară a piesei la eliminarea materialului suport. În situația în care aceste probleme apar se va proceda la repararea fișierului STL în aplicații dedicate și se va relua operația de import.



În aplicația Insight piesa poate fi poziționată astfel încât să poată fi optimizat consumul de material, viteza de tipărire, calitatea piesei tipărite. Este foarte importantă poziționarea piesei pe masa imprimantei în cazul acestei tehnologii de tipărire pentru a obține cel mai bun compromis între viteza de tipărire și caracteristicile tehnice ale piesei.



Înainte de începerea tipăririi cuptorul imprimantei este preîncălzit timp de 8 ore pentru a ajunge la temperatura de lucru optimă în funcție de tipul de material folosit la imprimare. Folia așezată pe masa mașinii este vacuumată pentru a rămâne nemișcată în timpul tipăririi.

Figura 5.1. Etapele procesului de realizare a modelului fizic.

5.2. Studiul numeric

Pentru studiul dinamic al piesei de tip elice a fost realizat un model numeric obținut în urma prelucrării informațiilor obținute prin procesul de scanare 3D.

Avându-se în vedere complexitatea modelului scanat și faptul că suprafețele definesc un model 3D, nu este un proces fezabil utilizarea directă a acestei informații. Un model numeric derivat din acest model geometric disponibil va fi generat prin utilizarea unui număr mare de elemente finite de tip piramidă. Numărul mare de muchii și grosimea pereților (~ 2 mm.) nu oferă condițiile necesare de calitate pentru rețeaua de elemente finite.

În aceste condiții modelul geometric a fost utilizat ca suport pentru realizarea unui model numeric. Pașii următori pentru construirea acestui model sunt prezentați în Figura 5.3.

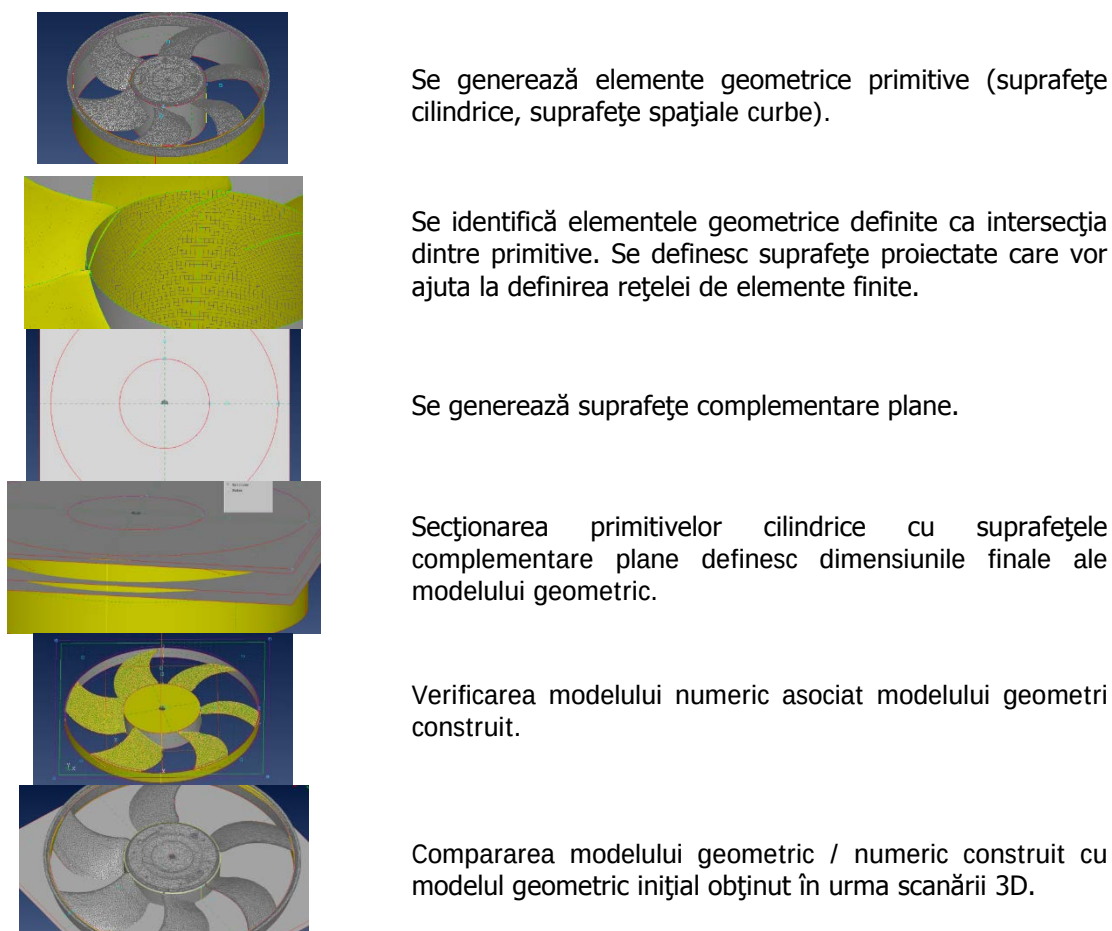


Figura 5.3. Etapele parcurse pentru realizarea modelului numeric (2.5D).

Modelul geometric a fost parametrizat astfel că poate fi utilizat în cadrul unui proces de optimizare. În acest caz procesul de optimizare se poate desfășura prin identificarea grosimii structurilor principale (zona centrală de fixare, pale, inel exterior) pentru

obținerea unor anumite frecvențe fundamentale. În Cartele 5.1 este prezentat modelul geometric introducerea parametrilor fiind făcută în cadrul cartelelor *SECTION_SHELL.

Cartele 5.1. Fișierul model Ls-Dyna.								
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	*NODE							
...	...							
36	*END							

Fișierul general care determină calcularea modurilor proprii este prezentat în Cartele 5.2. Sunt extrase primele 60 de frecvențe (valoarea parametrului neig – linia 23).

Cartele 5.2. Fișierul principal Ls-Dyna.

	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	*KEYWORD 800000000								
2	*INCLUDE								
3	parameters_.key								
4	*TITLE								
5	eigenvalues								
6	*CONTROL_IMPLICIT_GENERAL								
7	\$	imflag	dt0	iefs					
8		1	0.0005	0					
10	*CONTROL_IMPLICIT_SOLUTION								
11	\$	nlsvlvr	ilimit	maxref	dctol	ectol	rctol	lstol	
12		0	0	0	0.00	0.00	0	0	
13	\$	dnorm	divflag	inistif	nlprint				
14		0	0	0	0				
15	*CONTROL_IMPLICIT_SOLVER								
16	\$	lsolvr	prntflg	negeig					
17		0	0	0					
18	*CONTROL_IMPLICIT_AUTO								
19	\$	iauto	iteopt	itewin	dtmin	dtmax			
20		0	0	0	0.00	0			
21	*CONTROL_IMPLICIT_EIGENVALUE								
22	\$	neig							
23		60							
24	*CONTROL_PARALLEL								
25		4							
26	*CONTROL_TERMINATION								
27	\$	ENDTIM	ENDCYC	DTMIN	ENDENG	ENDMAS			
28		.02	0	.0	.0	.0			
29	*CONTROL_TIMESTEP								
30	\$	TDINT	TSSFAC	ISDO	TSLIMIT	DT2MS	LCTM	ERODE	MSIST
31			.9	0	.0	-1.E-6		0	0
32	\$	DT2MSF							
33									
34	*DATABASE_BINARY_D3PLOT								
35		1.E-4							
36	*INCLUDE								
37	model_.key								
38	*END								

Fișierul care conține valorile de calcul asociate parametrilor indicați este prezentat în Cartele 5.3. Acesta este apelat în cadrul fișierului principal prin *INCLUDE (liniile 2-3).

Cartele 5.3. Fișierul parametri Ls-Dyna.								
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	*PARAMETERS							
2		RthkB_	2.1000	RthkOR_	3.0000	RthkIC_	2.5000	
3	*END							

În Figura 5.4. sunt prezentate formele structurii în cazurile identificate ale primelor frecvențe proprii. În acest caz valorile parametrilor sunt RthkB_=2.1000 (pale); RthkOR_2.1000 (inel exterior); RthkIC_=2.1000 (zona centrală).

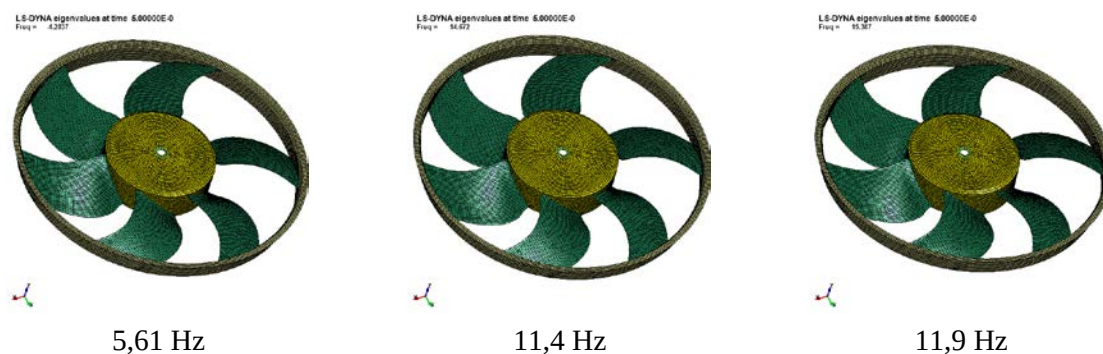


Figura 5.4. Frecvențe naturale.

Fișierul cu rezultate permite identificarea modului dominant de manifestare a frecvenței naturale. În Figura 5.5 sunt prezentate frecvențele și modul de manifestare pentru valori determinate până la 1000 Hz.

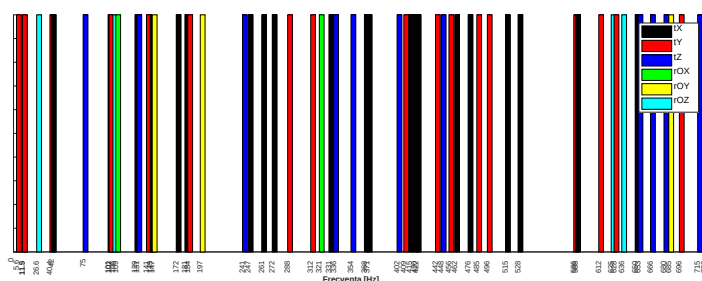


Figura 5.5. Frecvențele și modul de manifestare.

5.3. Cercetarea experimentală

Pentru evaluarea performanțelor în exploatare a fost conceput un stand pentru încercarea experimentală a piesei obținute și imprimare 3D și a modelului de referință obținut prin injecție de masă plastică.

Un motor electric fără perii este conectat la un controller care permite modificarea pas cu pas cu turației de funcționare. Motorul și controller-ul sunt componente ale unui kit profesional Minas fabricat de Panasonic.

Motorul electric este fixat pe un suport rigid fabricat din aluminiu montat prin intermediul unor suporturi elastice pe un banc de lucru.

Două accelerometre sunt utilizate pentru măsurarea vibrațiilor sistemului mecanic. Un accelerometru măsoară vibrațiile de direcție verticală și cel de-al doilea pe direcție axială. Semnale sunt procesate cu ajutorul unui modul NI-9234 montat pe un șasiu cDAQ-9188. Pentru înregistrare este folosit Matlab cu modulul Signal Analyzer instalat.

O camera video de mare viteză Photron Mini UX 1000 a fost utilizată pentru înregistrarea mișcării celor două piese testate.

Conexiunile și transmiterea datelor către sistemul de calcul s-a realizat prin intermediul unui ruter gigabit.

Sistemul de coordonate al laboratorului a fost aliniat sistemului de referință utilizat pentru realizarea modelului numeric astfel că direcția axială de măsurare corespunde axei OZ (Figura 5.4) iar direcția verticală corespunde axei OY (Figura 5.4).



Figura 5.12. Echipamentul utilizat pentru studiul dinamic.

Aplicația 5.1. prezintă setul de comenzi Matlab utilizat pentru programarea dispozitivului cDAQ-9188 în vederea înregistrării rezultatelor. Rata de eșantionarea prevăzută a fost de 2000 Hz, fiind corectată de sistem la valoarea de 2048 Hz pentru ambele canale utilizate pentru monitorizarea și/sau înregistrarea accelerațiilor.

Aplicația 5.1. Aplicația pentru înregistrarea experimentală.

```

1   close all
2   clear all
3   clc
4   global out_
5   mode_=1;
6   %%
7   daqS=daq.createSession('ni');
8   daqCh=addAnalogInputChannel(daqS_,'cDAQ9188XTMod1',0,'Accelerometer');
9   daqS_.Rate = 2000; daqS_.DurationInSeconds = 1;
10  %PCB 353B33 / SN 77495 / Bias 8.6V
11  daqS_.Channels(1).Coupling = 'AC';
12  daqS_.Channels(1).Sensitivity = 104.5/1000;
13  %
14  daqCh=addAnalogInputChannel(daqS_,'cDAQ9188XTMod1',1,'Accelerometer');
15  %PCB 333B42 / SN 18446 / Bias 11.3V
16  daqS_.Channels(2).Coupling = 'AC';
17  daqS_.Channels(2).Sensitivity = 514/1000;
18  %%
19  tic()
20  disp('Start data aquisition');
21  if mode_==0
22      daqS_.IsContinuous = true;
23      lh = addlistener(daqS_,'DataAvailable',@plotData);
24      startBackground(daqS_);
25  else
26      daqS_.DurationInSeconds = 10;
27      [data_, time_]=startForeground(daqS_);
28      hFig(1)=figure;
29      plot(time_, data_(:,1),...
30           time_, data_(:,2),...
31           'LineWidth',2);
32      xlabel('Time [ms]', 'FontSize',12);
33      ylabel('Measured signal', 'FontSize', 12);
34      legend_text={'Accelerometer 1', 'Accelerometer 2'};
35      legend(legend_text, 'Location', 'SouthEast');
36      set(hFig(1), 'Position', [50 50 600 450]);
37      data_out_(:,1)=time_; data_out_(:,2)=data_(:,1); data_out_(:,3)=data_(:,2);
38      save('data_out2_.dat', 'data_out_', '-ascii', '-tabs');
39  end

```

Sistemul mecanic a fost programat să se rotească cu o viteză constantă de 1500 *rpm* ceea ce definește o frecvență a mișcării de 25 *Hz* . Rezultatele înregistrate au fost prelucrate prin utilizarea Transformatei Fourier Rapide (FFT). Parametrii eșantionării au fost indicați la momentul precizării condițiilor de înregistrare a datelor. În Figura 5.14 sunt prezentate rezultatele obținute în cazul aplicării operației datelor înregistrate pe direcție verticală.

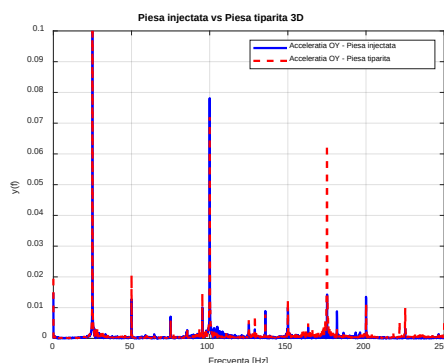


Figura 5.14. Transformarea FFT pentru valorile măsurate ale accelerației OY.

Se identifică un răspuns maxim corespunzător valorii de 25 *Hz* valoare egală cu turația de funcționare a elicei.

Încercarea celor două componente a fost înregistrată video cu ajutorul camerei de mare viteză programată la 2000 cadre pe secunda (fps). În Figura 5.18 sunt prezentate imagini capturate din înregistrările video cu cele două piese testate.

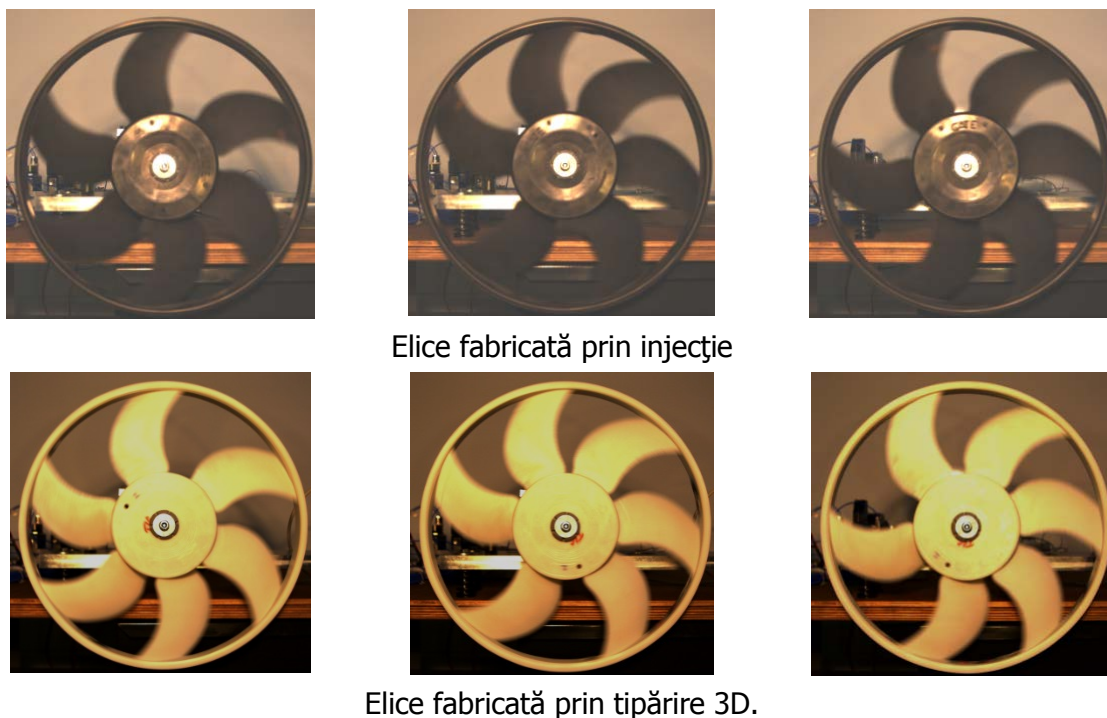


Figura 5.18. Imagini ale pieselor în timpul încercării.

Analizându-se imaginile video înregistrate nu au fost constatate anomalii în funcționarea piesei fabricată prin procesul de prototipare (tipărire 3D).

5.4. Concluzii

În cadrul acestui capitol au fost prezentate rezultatele obținute prin simularea numerică a comportamentului dinamic al piesei de tip elice obținută prin inginerie inversă. Având în vedere rezultatele obținute prin scanare, prelucrarea modelului geometric și realizarea unui prototip 3D a fost aleasă o piesă pentru determinarea performanțelor în condiții normale de utilizare. În acest scop a fost realizat un montaj experimental care să permită antrenarea elicei cu o turație bine definită și care să permită măsurarea unor parametri în timpul funcționării. Montajul experimental este realizat dintr-un motor comandat de un controler montat pe o placă rigidă suspendată elastic pe direcție verticală. Datele experimentale sunt de tipul unor accelerații și imagini video înregistrate cu ajutorul unei camere specializate de înregistrare cu viteză ridicată. Au fost astfel cercetate experimental două piese:

- piesa referință realizată prin turnare sub presiune, materialul folosit fiind ABS
- piesa tipărită 3D din ABS M30 prin tehnologia FDM fiind obținută prin scanare 3D a piesei referință și având aplicate optimizările și modificările prezentate în capitolele anterioare

În cadrul aceluiași capitol a fost prezentată și o tehnică de realizare a modelului numeric al piesei elice care permite analiza dinamică prin tehnica identificării frecvențelor proprii pentru adaptarea la condițiile de utilizare.

Rezultatele arată o bună compatibilitate între piesa realizată prin prototip rapid și piesa nominală astfel că există posibilitatea utilizării componentelor tipărite 3D.

6

Concluzii finale, contribuții personale și perspective de cercetare

6.1 Concluzii finale

Tehnologiile de prototipare rapidă și de inginerie inversă ajung după aproximativ 30 de ani de la apariția lor la maturitate, acest lucru însemnând de fapt ca produsele obținute prin folosirea acestor tehnologii prezintă proprietăți mecanice foarte asemănătoare cu cele ale pieselor realizate prin tehnologii convenționale.

Pentru atingerea obiectivelor propuse ale acestei lucrări a fost realizat un studiu complex al problematicii legate de subiectul abordat printr-o serie de cercetări teoretice, experimentale și prin simulare numerică structurate astfel:

A. Cercetări teoretice:

- Identificarea cerințelor actuale ale pieselor obținute prin inginerie inversă și tipărite 3D
- Identificarea și analiza tipurilor de materiale folosite în prototiparea rapidă
- Elaborarea unor seturi de programe de calcul pentru definirea modelelor numerice ale pieselor obținute prin inginerie inversă și tipărite 3D
- Elaborarea unor seturi de programe de calcul pentru optimizarea pieselor din perspectiva greutateii/surplusului de material.
- Cercetări legate de evoluția tehnologiei ingineriei inverse și nu numai.

B. Cercetări experimentale:

- Cercetarea experimentală a procesului ingineriei inverse și prototipării rapide
- Investigarea influenței modificării anumitor parametrii de tipărire 3D

- Investigarea comportamentului pieselor tipărite 3D la solicitări de întindere/compresiune
- Investigarea comportamentului dinamic al unei piese realizate prin inginerie inversă, optimizată din perspectiva mesh-ului și tipărită 3D.

C. Cercetari cu metode si mijloace numerice:

- Elaborarea unui model numeric pentru studiul comportamentului dinamic al unei piese obtinuta prin inginerie inversa si prototipata rapid
- Elaborarea unui model numeric pentru studiul caracteristicii mecanice a pieselor obtinute prin inginerie inversa si prototipate rapid
- Validarea modelului numeric in conditii experimentale
- Elaborarea unui model numeric necesar optimizarii structurii pieselor.

În cadrul acestei lucrări au fost identificate și studiate referințe bibliografice cuprinse în fluxul principal al revistelor de specialitate. În acest fel s-a realizat o documentare a etapelor parcurse în domeniul ingineriei inverse, soluțiilor de optimizare a structurilor și tehnicilor de realizare a prototipurilor. Această cercetare a permis alegerea și stabilirea obiectivelor lucrării.

Lucrarea evidențiază de asemenea aspecte referitoare la procesul de scanare tridimensională a pieselor și prelucrarea informațiilor obținute pentru definirea datelor de intrare necesare realizării unor modele prototip. Astfel au fost prezentate etapele de pregătire a pieselor (în funcție de modelul geometric specific, materiale utilizate și infrastructura disponibilă), desfășurarea procesului de scanare și prezentarea informației digitale obținută. Având în vedere informația obținută în urma procesului de scanare, sunt prezentate o serie de aplicații software definite ca instrumente pentru manipularea conținutului digital. Aceste operații pot fi de tipul corectării conținutului, modificării sau prelucrării pentru operații viitoare de tipul procesului de optimizare. În ultima parte a capitoului a fost prezentat procesul de realizare a unui prototip prin tehnica tipăririi 3D. Etapele parcurse sunt în concordanță cu tehnologia FDM (Fused Deposition Modeling) inclusă în categoria tehnicilor de tipărire 3D. Au fost realizate piese prototip care să prezinte rezultate ale manipulării conținutului digital obținut în urma scanării și impactul asupra aspectului pieselor obținute.

De asemenea au fost investigate performanțele mecanice ale pieselor de referință (epruvete) obținute prin FDM. Deși tehnologia FDM folosește proprietățile de adeziune ale materialelor termoplastice pentru depunerea straturilor de material în vederea obținerii piesei finale, piesele realizate prin această tehnologie pot oferi o soluție tehnică viabilă. Parametrii de tipărire afectează și ei în bună măsură comportamentul pieselor și proprietățile lor fizice, acest lucru fiind evident din testele de tracțiune și

compresiune prezentate. Din această perspectivă este foarte importantă cunoașterea cerințelor la care trebuie să răspundă o piesă realizată prin prototipare rapidă, parametrii de tipărire putând fi ajustați, iar materialele de așa natură alese pentru ca piesa să răspundă acestor cerințe.

Rezultatele încercărilor mecanice prin probe specifice de tracțiune și compresiune sunt corelate cu informații obținute în urma investigării secțiunilor rupte ale epruvetelor prin tehnici de microscopie electronică.

Studiul prezintă rezultatele analizelor experimentale în vederea transpunerii în activitatea de producție din cadrul Alseca Engineering:

- optimizarea proiectării reperelor din mase plastice, pentru îmbunătățirea proprietăților mecanice, prin utilizarea „designului inteligent”;
- îmbunătățirea proiectării unor caracteristici geometrice pentru realizarea structurilor multistrat/hibride cu aderență ridicată;
- proiectarea asistată de calculator a reperelor din mase plastice pentru producerea prin injecție cu matrițe experimentale.
- Alegerea materialelor care răspund cel mai bine cerințelor aplicației

În cadrul celui de al patrulea capitol a fost prezentată o soluție tehnică de optimizare a structurilor plecând de la analiza proprietăților mecanice de material pentru o piesă tipărită 3D. Soluția tehnică prezentată sub forma unei aplicații software permite integrarea informației digitale obținută în timpul procesului de scanare. Pentru exemplificare a fost definită o problemă pentru care au fost discutate rezultatele obținute în urma modificării parametrilor asociați algoritmului de optimizare propus. Ținând cont de modelul geometric adoptat și performanțele identificate ale procesului de tipărire 3D a fost realizat modelul prototip. Modelul prototip a fost testat în scopul corelării rezultatelor experimentale cu cele obținute prin simulare numerică. Având în vedere faptul că în cadrul lucrării a fost prezentată o soluție avansată de scanare optică, în acest capitol am dezvoltat și prezentat o soluție tehnică simplificată de investigare video a comportamentului în utilizare a structurilor. Soluția tehnică constă în realizarea unei aplicații ce prelucrează imagini obținute cu aparate de fotografiat digitale disponibile în mod curent.

În încheierea capitolului este prezentată o extensie a soluției tehnice de optimizare ce poate fi utilizată pentru structuri existente.

În cadrul capitolului cinci sunt prezentate rezultatele obținute prin simularea numerică a comportamentului dinamic al piesei de tip elice obținută prin inginerie inversă. Având în vedere rezultatele obținute prin scanare, prelucrarea modelului geometric și realizarea unui prototip 3D a fost aleasă o piesă pentru determinarea

performanțelor în condiții normale de utilizare. În acest scop a fost realizat un montaj experimental care să permită antrenarea elicei cu o turație bine definită și care să permită măsurarea unor parametri în timpul funcționării. Montajul experimental este realizat dintr-un motor comandat de un controler montat pe o placă rigidă suspendată elastic pe direcție verticală. Datele experimentale sunt de tipul unor accelerații și imagini video înregistrate cu ajutorul unei camere specializate de înregistrare cu viteză ridicată. Au fost astfel cercetate experimental două piese:

- piesa referință realizată prin turnare sub presiune, materialul folosit fiind ABS
- piesa tipărită 3D din ABS M30 prin tehnologia FDM fiind obținută prin scanare 3D a piesei referință și având aplicate optimizările și modificările prezentate în capitolele anterioare

În cadrul aceluiași capitol a fost prezentată și o tehnică de realizare a modelului numeric al piesei elice care permite analiza dinamică prin tehnica identificării frecvențelor proprii pentru adaptarea la condițiile de utilizare.

Rezultatele arată o bună compatibilitate între piesa realizată prin prototip rapid și piesa nominală astfel că există posibilitatea utilizării componentelor tipărite 3D.

Programul de cercetare s-a desfășurat în cadrul Centrului de Cercetare "Ingineria Automobilului" al Universității din Pitești și în Laboratorul de Cercetare al Societății Alseca Engineering S.A. care a fost implementat prin Programul Operațional Creșterea Competitivității Economice, Axa Prioritară 2 – Competitivitate prin CDI, Operațiunea 2.3.2. Dezvoltarea infrastructurii de C-D a întreprinderilor, cu crearea de noi locuri de muncă pentru C-D, numele proiectului fiind „Dezvoltarea infrastructurii de CD a firmei ALSECA ENGINEERING S.A. prin înființarea laboratorului de tehnologii avansate de fabricație / Inotech-CD”

6.2 Contributii personale

Prin activitatea de cercetare desfășurată pentru elaborarea lucrării autorul a contribuit la dezvoltarea soluțiilor tehnice ale ingineriei inverse aplicată în industria de automobile și nu numai cu următoarele:

1. Modul de abordare al lucrării de cercetare care își propune să analizeze impactul pe care îl au folosirea diverselor tehnologii de inginerie inversă și prototipare în realizarea de produse cu caracteristici cât mai apropiate de cele ale pieselor realizate prin tehnologiile convenționale.
2. Dezvoltarea de aplicații sau algoritmi de calcul pentru simplificarea numărului de puncte rezultat în urma operațiilor de scanare optică precum și a creșterii calității acestuia. În felul acesta se reduce spațiul necesar stocării

informațiilor dar și creșterea puterii de calcul cu impact direct în scăderea timpului de procesare.

3. Dezvoltarea unor algoritmi de calcul care permit realizarea optimizărilor structurale. Într-o perioadă în care se pune tot mai mult accent pe optimizare și reducere a costurilor prin eliminarea surplusurilor de material este foarte importantă dezvoltarea produselor în această direcție. Cu ajutorul aplicațiilor de optimizare dezvoltate cu această ocazie se pot reduce de asemenea timpii de obținere a unor soluții geometrice optimizate care ulterior prin tipărire 3D pot fi verificate funcțional.
4. Evaluarea modelului geometric obținut prin scanare 3D și adaptarea parametrilor procesului de tipărire 3D pentru obținerea pieselor care îndeplinesc specificații date (timp de realizare, forma geometrică sau rezistență mecanică etc)
5. Elaborarea unei metode pentru studiul deformațiilor sau a răspunsului mecanic al structurilor prin utilizarea unor echipamente mai deosebite precum microscopul electronic sau mai comune precum aparatul foto și dezvoltarea de aplicații Matlab.
6. Pe durata stagiului de doctorat am fost implicat în calitate de director de proiect în implementarea proiectului „Dezvoltarea infrastructurii de CD a firmei ALSECA ENGINEERING S.A. prin înființarea laboratorului de tehnologii avansate de fabricație / Inotech-CD” finanțat prin Programul Operațional Creșterea Competitivității Economice, Axa Prioritară 2 – Competitivitate prin CDI, Operațiunea 2.3.2. Dezvoltarea infrastructurii de C-D a întreprinderilor, cu crearea de noi locuri de muncă pentru C-D astfel că lista de echipamente a fost dezvoltată în conformitate cu cerințele industriei producătoare de automobile iar obiectivele tezei au fost elaborate în funcție de cerințele specifice industriei dar și prezentei lucrări.

6.3 Direcții viitoare de cercetare

Într-un domeniu cu o dezvoltare spectaculoasă în ultimii ani precum cel al industriei asistate de calculator în contextul ingineriei inverse, am identificat pe parcursul desfășurării activităților specifice acestei lucrări o serie întreagă de direcții viitoare de cercetare. În cele ce urmează iată câteva oportunități de studiu care pot reprezenta subiecte de cercetare pentru lucrări de cercetare ulterioare:

1. Investigarea procesului de tipărire 3D astfel încât piesa să aibă calități cât mai bune. Numărul parametrilor de lucru specifici tehnologiei FDM este foarte mare prin urmare numărul de combinații care se pot realiza în vederea obținerii de produse adaptate cerințelor este la fel de mare.

2. Dezvoltarea unor algoritmi pentru corectarea modelelor geometrice ținând cont de precizia echipamentului de tipărire sau scanare 3D. Rezultatul final poate fi influențat major de calitatea și precizia echipamentelor folosite în procesul de cercetare. Din această perspectivă dezvoltarea unor algoritmi care să permită optimizarea modelelor de calcul luând în considerare specificul cerințelor este foarte importantă.
3. Îmbunătățirea algoritmilor de optimizare.
4. Studiul procesului de comprimare și a comportamentului mecanic al materialelor și pieselor fabricate prin tehnologia de tipărire 3D.
5. Folosirea analizei spectrale pentru analiza regimurilor tranzitorii ale turațiilor (ex. funcționarea elicelor)
6. Adaptarea și implementarea soluțiilor dezvoltate în activități industriale curente.

BIBLIOGRAFIE

- Agarwala, Mukesh K., Vikram R. Jamalabad, Noshir A. Langrana, Ahmad Safari, Philip J. Whalen, și Stephen C. Danforth. 1996. „Structural quality of parts processed by fused deposition”. *Rapid Prototyping Journal* 2 (4): 4-19. doi:<https://doi.org/10.1108/13552549610732034>.
- Ahn, Sung-hoon, Michael Montero, Dan Odell, Shad Roundy, și Paul K Wright. 2002. „Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS”. *Rapid Prototyping Journal* 8 (4): 248-57. doi:10.1108/13552540210441166.
- Ahn, Daekeon, Jin Hwe Kweon, Soonman Kwon, Jungil Song, și Seokhee Lee. 2009. „Representation of surface roughness in fused deposition modeling”. *Journal of Materials Processing Technology* 209 (15-16): 5593-5600. doi:10.1016/j.jmatprotec.2009.05.016.
- Al-Badour, F., M. Sunar, și L. Cheded. 2011. „Vibration analysis of rotating machinery using time-frequency analysis and wavelet techniques”. *Mechanical Systems and Signal Processing* 25 (6). Elsevier: 2083-2101. doi:10.1016/j.ymssp.2011.01.017.
- Alzahrani, Mahmoud, Seung-Kyum Choi, și David W. Rosen. 2015. „Design of truss-like cellular structures using relative density mapping method”. *Materials & Design* 85 (March 2016). Elsevier Ltd: 349-60. doi:10.1016/j.matdes.2015.06.180.
- Anitha, R., S. Arunachalam, și P. Radhakrishnan. 2001. „Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling”. *Journal of Materials Processing Technology* 118 (1-3): 385-88. doi:10.1016/S0924-0136(01)00980-3.
- Bakar, Nur Saaidah Abu, Mohd Rizal Alkahari, și Hambali Boejang. 2010. „Analysis on fused deposition modelling performance”. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A* 11 (12): 972-77. doi:10.1631/jzus.A1001365.
- Barnett, Eric, și Clément Gosselin. 2015. „Weak support material techniques for alternative additive manufacturing materials”. *Additive Manufacturing* 8. Elsevier B.V.: 95-104. doi:10.1016/j.addma.2015.06.002.
- Bates, Simon R G, Ian R. Farrow, și Richard S. Trask. 2016. „3D printed polyurethane honeycombs for repeated tailored energy absorption”. *Materials and Design* 112. Elsevier B.V.: 172-83. doi:10.1016/j.matdes.2016.08.062.
- Beccari, C. V., E. Farella, A. Liverani, S. Morigi, și M. Rucci. 2010. „A fast interactive reverse-engineering system”. *CAD Computer Aided Design* 42 (10). Elsevier Ltd: 860-73. doi:10.1016/j.cad.2010.06.001.
- Bendsøe, Martin Philip, și Noboru Kikuchi. 1988. „Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method”. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 71: 197-224. https://ac.els-cdn.com/0045782588900862/1-s2.0-0045782588900862-main.pdf?_tid=d21fcc02-24b8-4eb1-ac4b-41d7d9b468d2&acdnat=1524461860_a7d9eb7ced245a291def2a7f73e29fcb.
- Bénière, Roseline, Gérard Subsol, Gilles Gesquière, François Le Breton, și William Puech. 2013. „A comprehensive process of reverse engineering from 3D meshes to CAD models”. *CAD Computer Aided Design* 45 (11). Elsevier Ltd: 1382-93. doi:10.1016/j.cad.2013.06.004.
- Beyene, a.T., E.G. Koricho, G. Belingardi, și B. Martorana. 2014. „Design and Manufacturing Issues in the Development of Lightweight Solution for a Vehicle Frontal Bumper”. *Procedia Engineering* 88. Elsevier B.V.: 77-84. doi:10.1016/j.proeng.2014.11.129.
- Bosché, Frédéric. 2010. „Automated recognition of 3D CAD model objects in laser scans and calculation of as-built dimensions for dimensional compliance control in construction”. *Advanced Engineering Informatics* 24 (1). Elsevier Ltd: 107-18. doi:10.1016/j.aei.2009.08.006.
- Brooks, Hadley, și Samuel Molony. 2016. „Design and evaluation of additively manufactured parts with three dimensional continuous fibre reinforcement”. *Materials and Design* 90. Elsevier Ltd: 276-83. doi:10.1016/j.matdes.2015.10.123.
- Budinski, Michael K. 2014. „Failure analysis of a bearing in a helicopter turbine engine due to electrical discharge damage”. *Case Studies in Engineering Failure Analysis* 2 (2). Elsevier Ltd.: 127-37. doi:10.1016/j.csefa.2014.05.003.
- Buonamici, Francesco, Monica Carfagni, Rocco Furferi, Lapo Governi, Alessandro Lapini, și Yary Volpe. 2018. „Reverse engineering of mechanical parts: A template-based approach”. *Journal of Computational Design and Engineering* 5 (2). Society for Computational Design and Engineering: 145-59. doi:10.1016/j.jcde.2017.11.009.
- Carneiro, O. S., A. F. Silva, și R. Gomes. 2015. „Fused deposition modeling with polypropylene”. *Materials and Design* 83. Elsevier Ltd: 768-76. doi:10.1016/j.matdes.2015.06.053.
- Casalino, D., F. D'iozzi, R. Sannino, și A. Paonessa. 2008. „Aircraft noise reduction technologies: A bibliographic review”. *Aerospace Science and Technology* 12 (1): 1-17. doi:10.1016/j.ast.2007.10.004.

- Casavola, Caterina, Alberto Cazzato, Vincenzo Moramarco, și Giovanni Pappalettera. 2017. „Residual stress measurement in Fused Deposition Modelling parts”. *Polymer Testing* 58. Elsevier Ltd: 249-55. doi:10.1016/j.polymertesting.2017.01.003.
- Casavola, Caterina, Alberto Cazzato, Vincenzo Moramarco, și Carmine Pappalettera. 2016. „Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory”. *Materials and Design* 90. Elsevier Ltd: 453-58. doi:10.1016/j.matdes.2015.11.009.
- Chacón, J. M., M. A. Caminero, E. García-Plaza, și P. J. Núñez. 2017. „Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection”. *Materials and Design* 124. Elsevier Ltd: 143-57. doi:10.1016/j.matdes.2017.03.065.
- Chen, Liming, Jian Zhang, Bing Du, Hao Zhou, Houchang Liu, Yongguang Guo, Weiguo Li, și Daining Fang. 2018. „Dynamic crushing behavior and energy absorption of graded lattice cylindrical structure under axial impact load”. *Thin-Walled Structures* 127 (August 2017). Elsevier Ltd: 333-43. doi:10.1016/j.tws.2017.10.048.
- Chen, Fei, Gary Mac, și Nikhil Gupta. 2017. „Security features embedded in computer aided design (CAD) solid models for additive manufacturing”. *Materials and Design* 128 (December 2016). Elsevier: 182-94. doi:10.1016/j.matdes.2017.04.078.
- Christiansen, Asger Nyman, Ryan Schmidt, și J. Andreas Bærentzen. 2015. „Automatic balancing of 3D models”. *Computer-Aided Design* 58. Elsevier Ltd: 236-41. doi:10.1016/j.cad.2014.07.009.
- Clausen, Anders, Niels Aage, și Ole Sigmund. 2016. „Exploiting Additive Manufacturing Infill in Topology Optimization for Improved Buckling Load”. *Engineering* 2 (2). THE AUTHORS: 250-57. doi:10.1016/J.ENG.2016.02.006.
- Costa, S. F., F. M. Duarte, și J. A. Covas. 2017. „Estimation of filament temperature and adhesion development in fused deposition techniques”. *Journal of Materials Processing Technology* 245. Elsevier B.V.: 167-79. doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.02.026.
- Croccolo, Dario, Massimiliano De Agostinis, și Giorgio Olmi. 2013. „Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of ABS-M30”. *Computational Materials Science* 79. Elsevier B.V.: 506-18. doi:10.1016/j.commatsci.2013.06.041.
- Ćurković, Milan, și Damir Vučina. 2014. „3D shape acquisition and integral compact representation using optical scanning and enhanced shape parameterization”. *Advanced Engineering Informatics* 28 (2): 111-26. doi:10.1016/j.aei.2014.01.002.
- Davis, Chelsea S., Kaitlyn E. Hillgartner, Seung Hoon Han, și Jonathan E. Seppala. 2017. „Mechanical strength of welding zones produced by polymer extrusion additive manufacturing”. *Additive Manufacturing* 16. Elsevier B.V.: 162-66. doi:10.1016/j.addma.2017.06.006.
- Davoodi, M. M., S. M. Sapuan, D. Ahmad, A. Aidy, A. Khalina, și Mehdi Jonoobi. 2011. „Concept selection of car bumper beam with developed hybrid bio-composite material”. *Materials and Design* 32 (10). Elsevier Ltd: 4857-65. doi:10.1016/j.matdes.2011.06.011.
- Dawoud, Michael, Iman Taha, și Samy J. Ebeid. 2016. „Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques”. *Journal of Manufacturing Processes* 21. The Society of Manufacturing Engineers: 39-45. doi:10.1016/j.jmapro.2015.11.002.
- Diaconescu, Claudiu**, Stefan Tabacu, și Alexandru Oltean. 2017. „Design and Analysis of a Fused Deposition Modelling Manufactured Part”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 252 (1). doi:10.1088/1757-899X/252/1/012040.
- Diaconescu, Claudiu**, Stefan Tabacu, Alexandru Oltean și Pârlac Sebastian. 2018. „Dynamic analysis of a rotating structure manufactured by fused deposition modeling”. *AMMA 2018* (lucrare acceptată spre publicare).
- Ding, Yin, Wangpeng He, Binqiang Chen, Yanyang Zi, și Ivan W. Selesnick. 2016. „Detection of faults in rotating machinery using periodic time-frequency sparsity”. *Journal of Sound and Vibration* 382. Elsevier: 357-78. doi:10.1016/j.jsv.2016.07.004.
- Dizon, John Ryan C., Alejandro H. Espora, Qiyi Chen, și Rigoberto C. Advincula. 2018. „Mechanical characterization of 3D-printed polymers”. *Additive Manufacturing* 20. Elsevier B.V.: 44-67. doi:10.1016/j.addma.2017.12.002.
- Domingo-Espin, Miquel, Josep M. Puigoriol-Forcada, Andres-Amador Garcia-Granada, Jordi Llumà, Salvador Borros, și Guillermo Reyes. 2015. „Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts”. *Materials & Design* 83. Elsevier Ltd: 670-77. doi:10.1016/j.matdes.2015.06.074.
- Du, Jun, Zhengying Wei, Xin Wang, Jijie Wang, și Zhen Chen. 2016. „An improved fused deposition modeling process for forming large-size thin-walled parts”. *Journal of Materials Processing Technology* 234. Elsevier B.V.: 332-41. doi:10.1016/j.jmatprotec.2016.04.005.
- Duro-Royo, Jorge, Katia Zolotovskiy, Laia Mogas-Soldevila, Swati Varshney, Neri Oxman, Mary C. Boyce, și Christine Ortiz. 2014. „MetaMesh: A hierarchical computational model for design and fabrication of biomimetic armored surfaces”. *CAD Computer Aided Design*. Elsevier Ltd, 1-14. doi:10.1016/j.cad.2014.05.005.

- Faes, M., E. Ferraris, și D. Moens. 2016. „Influence of Inter-layer Cooling time on the Quasi-static Properties of ABS Components Produced via Fused Deposition Modelling”. *Procedia CIRP* 42 (Isem Xviii). Elsevier B.V.: 748-53. doi:10.1016/j.procir.2016.02.313.
- Feng, Yuezhong, Thomas Siegmund, Ed Habtour, și Jaret Riddick. 2015. „Impact mechanics of topologically interlocked material assemblies”. *International Journal of Impact Engineering* 75. Elsevier Ltd: 140-49. doi:10.1016/j.ijimpeng.2014.08.003
- Galantucci, L. M., G. Percoco, și U. Dal Maso. 2008. „A volumetric approach for STL generation from 3D scanned products”. *Journal of Materials Processing Technology* 204 (1-3): 403-11. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.11.119.
- Galeta, Tomislav, Pero Raos, Josip Stojšić, și Ivana Pakši. 2016. „Influence of structure on mechanical properties of 3D printed objects”. *Procedia Engineering* 149 (June): 100-104. doi:10.1016/j.proeng.2016.06.644.
- Gardan, Nicolas, și Alexandre Schneider. 2015. „Topological optimization of internal patterns and support in additive manufacturing”. *Journal of Manufacturing Systems* 37. The Society of Manufacturing Engineers: 417-25. doi:10.1016/j.jmsy.2014.07.003.
- Garg, Ashu, și Anirban Bhattacharya. 2017. „An insight to the failure of FDM parts under tensile loading: finite element analysis and experimental study”. *International Journal of Mechanical Sciences* 120 (September 2016). Elsevier Ltd: 225-36. doi:10.1016/j.ijmecsci.2016.11.032.
- Gomez-Gras, Giovanni, Ramón Jerez-Mesa, J. Antonio Travieso-Rodriguez, și Jordi Lluena-Fuentes. 2017. „Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens”. *Materials & Design*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.matdes.2017.11.072.
- Griffiths, C. A., J. Howarth, G. De Almeida Rowbotham, și A. Rees. 2016. „Effect of Build Parameters on Processing Efficiency and Material Performance in Fused Deposition Modelling”. *Procedia CIRP* 49. The Author(s): 28-32. doi:10.1016/j.procir.2015.07.024.
- Gu, Gongyao, Yong Xia, Chin Hsu Lin, Shaoting Lin, Yan Meng, și Qing Zhou. 2013. „Experimental study on characterizing damage behavior of thermoplastics”. *Materials and Design* 44. Elsevier Ltd: 199-207. doi:10.1016/j.matdes.2012.07.062.
- Hallquist, JO. 2003. *LS-DYNA Keyword User's Manual*. Version 970. Livermore Software and Technology Corporation, Livermore CA.
- Herrmann, Karl Heinz, Clemens Gärtner, Daniel Güllmar, Martin Krämer, și Jürgen R. Reichenbach. 2014. „3D printing of MRI compatible components: Why every MRI research group should have a low-budget 3D printer”. *Medical Engineering and Physics* 36 (10). Institute of Physics and Engineering in Medicine: 1373-80. doi:10.1016/j.medengphy.2014.06.008.
- Hu, Zhong, Kaushik Thiyagarajan, Amrit Bhusal, Todd Letcher, Qi Hua Fan, Qiang Liu, și David Salem. 2017. „Design of ultra-lightweight and high-strength cellular structural composites inspired by biomimetics”. *Composites Part B: Engineering*. Elsevier Ltd, 1-14. doi:10.1016/j.compositesb.2017.03.033.
- Jin, G. Q., W. D. Li, C. F. Tsai, și L. Wang. 2011. „Adaptive tool-path generation of rapid prototyping for complex product models”. *Journal of Manufacturing Systems* 30 (3): 154-64. doi:10.1016/j.jmsy.2011.05.007.
- Jin, G. Q., W. D. Li, și L. Gao. 2013. „An adaptive process planning approach of rapid prototyping and manufacturing”. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 29 (1): 23-38. doi:10.1016/j.rcim.2012.07.001.
- Jin, Yifan, Yi Wan, Bing Zhang, și Zhanqiang Liu. 2017. „Modeling of the chemical finishing process for polylactic acid parts in fused deposition modeling and investigation of its tensile properties”. *Journal of Materials Processing Technology* 240. Elsevier B.V.: 233-39. doi:10.1016/j.jmatprotec.2016.10.003.
- Karamooz Ravari, M.R., M. Kadhodaei, M. Badrossamay, și R. Rezaei. 2014. „Numerical Investigation on mechanical properties of cellular lattice structures fabricated by fused deposition modeling”. *International Journal of Mechanical Sciences* 88. Elsevier: 154-61. doi:10.1016/j.ijmecsci.2014.08.009.
- Kantaros, Antreas, și Dimitris Karalekas. 2013. „Fiber Bragg grating based investigation of residual strains in ABS parts fabricated by fused deposition modeling process”. *Materials and Design* 50. Elsevier Ltd: 44-50. doi:10.1016/j.matdes.2013.02.067.
- Kardel, Kamran, Hamid Ghaednia, Andres L. Carrano, și Dan B. Marghitu. 2017. „Experimental and Theoretical Modeling of Behavior of 3D-Printed Polymers Under Collision with a Rigid Rod”. *Additive Manufacturing*. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.addma.2017.01.004.
- Kaveh, Mahdi, Mohsen Badrossamay, Ehsan Forozmehr, și Ardeshir Hemasian Etefagh. 2015. „Optimization of the printing parameters affecting dimensional accuracy and internal cavity for HIPS material used in fused deposition modeling processes”. *Journal of Materials Processing Technology* 226. Elsevier B.V.: 280-86. doi:10.1016/j.jmatprotec.2015.07.012.
- Kousiatza, Charoula, și Dimitris Karalekas. 2016. „In-situ monitoring of strain and temperature distributions during fused deposition modeling process”. *Materials & Design* 97. Elsevier Ltd: 400-406. doi:10.1016/j.matdes.2016.02.099.
- Kridli, Ghassan T. 2006. „Chapter 1 Material Properties and Characterization”.
- Kucewicz, Michał, Paweł Baranowski, Jerzy Małachowski, Arkadiusz Popławski, și Paweł Płatek. 2018. „Modelling, and characterization of 3D printed cellular structures”. *Materials and Design* 142: 177-89. doi:10.1016/j.matdes.2018.01.028.

- Langelaar, Matthijs. 2016. „Topology optimization of 3D self-supporting structures for additive manufacturing”. *Additive Manufacturing* 12. Elsevier B.V.: 60-70. doi:10.1016/j.addma.2016.06.010.
- Li, Hao, Zhen Luo, Liang Gao, și Qinghua Qin. 2018. „Topology optimization for concurrent design of structures with multi-patch microstructures by level sets”. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 331. Elsevier B.V.: 536-61. doi:10.1016/j.cma.2017.11.033.
- Lim, Jonghyuk, Woojeong Sim, Seen Yun, Dongkon Lee, și Jintai Chung. 2018. „Reduction of vibration forces transmitted from a radiator cooling fan to a vehicle body”. *Journal of Sound and Vibration* 419. Elsevier Ltd: 183-99. doi:10.1016/j.jsv.2018.01.016.
- Liu, Yilun, Tobias A. Schaedler, Alan J. Jacobsen, și Xi Chen. 2014. „Quasi-static energy absorption of hollow microlattice structures”. *Composites Part B: Engineering* 67. Elsevier Ltd: 39-49. doi:10.1016/j.compositesb.2014.06.024.
- Liu, Xingchen, și Vadim Shapiro. 2016. „Homogenization of material properties in additively manufactured structures”. *CAD Computer Aided Design* 78. Elsevier Ltd: 71-82. doi:10.1016/j.cad.2016.05.017.
- Lyu, Min Young, și Tae Gyun Choi. 2015. „Research trends in polymer materials for use in lightweight vehicles”. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 16 (1): 213-20. doi:10.1007/s12541-015-0029-x.
- Matsumoto, André Takashi, Larissa Driemeier, și Marcílio Alves. 2012. „Performance of polymeric reinforcements in vehicle structures submitted to frontal impact”. *International Journal of Crashworthiness* 17 (5): 479-96. doi:10.1080/13588265.2012.678693.
- Mirzendehtdel, Amir M., și Krishnan Suresh. 2016. „Support structure constrained topology optimization for additive manufacturing”. *CAD Computer Aided Design* 81. Elsevier Ltd: 1-13. doi:10.1016/j.cad.2016.08.006.
- Mitsubishi, Mamoru, Jian Cao, Paulo Bártolo, Dirk Friedrich, Albert J. Shih, Kamlakar Rajurkar, Naohiko Sugita, și Kanako Harada. 2013. „Biomufacturing”. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 62 (2): 585-606. doi:10.1016/j.cirp.2013.05.001.
- Mohamed, Omar Ahmed, Syed Hasan Masood, și Jahar Lal Bhowmik. 2016. „Mathematical modeling and FDM process parameters optimization using response surface methodology based on Q-optimal design”. *Applied Mathematical Modelling* 40 (23-24). Elsevier Inc.: 10052-73. doi:10.1016/j.apm.2016.06.055.
- Mohamed, Omar Ahmed, Syed Hasan Masood, și Jahar Lal Bhowmik. 2017. „Characterization and dynamic mechanical analysis of PC-ABS material processed by fused deposition modelling: An investigation through I-optimal response surface methodology”. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 107. Elsevier Ltd: 128-41. doi:10.1016/j.measurement.2017.05.019.
- Mortazavian, Seyyedvahid, și Ali Fatemi. 2015. „Fatigue behavior and modeling of short fiber reinforced polymer composites including anisotropy and temperature effects”. *International Journal of Fatigue* 77. Elsevier Ltd: 12-27. doi:10.1016/j.ijfatigue.2015.02.020.
- Ning, Fuda, Weilong Cong, Jingjing Qiu, Junhua Wei, și Shiren Wang. 2015. „Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling”. *Composites Part B: Engineering* 80. Elsevier Ltd: 369-78. doi:10.1016/j.compositesb.2015.06.013.
- Oltean, Alexandru, **Claudiu Diaconescu**, și Stefan Tabacu. 2017. „Wheel liner design for improved sound and structural performances”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 252 (1). doi:10.1088/1757-899X/252/1/012042.
- Parenteau, T., E. Bertevas, G. Ausias, R. Stoczek, Y. Grohens, și P. Pilvin. 2014. „Characterisation and micromechanical modelling of the elasto-viscoplastic behavior of thermoplastic elastomers”. *Mechanics of Materials* 71. Elsevier Ltd: 114-25. doi:10.1016/j.mechmat.2013.06.010.
- Park, Sang C., și Minho Chang. 2009. „Reverse engineering with a structured light system”. *Computers and Industrial Engineering* 57 (4). Elsevier Ltd: 1377-84. doi:10.1016/j.cie.2009.07.005.
- Paulic, Matej, Tomaz Irgolic, Joze Balic, Franc Cus, Andrej Cupar, Tomaz Brajlji, și Igor Drstvensek. 2014. „Reverse engineering of parts with optical scanning and additive manufacturing”. *Procedia Engineering* 69. Elsevier B.V.: 795-803. doi:10.1016/j.proeng.2014.03.056.
- Porter, Daniel A., Trung V T Hoang, și Thomas A. Berfield. 2017. „Effects of in-situ poling and process parameters on fused filament fabrication printed PVDF sheet mechanical and electrical properties”. *Additive Manufacturing* 13. Elsevier B.V.: 81-92. doi:10.1016/j.addma.2016.11.005.
- Priem, Cyril, Ramzi Othman, Patrick Rozycki, și Damien Guillon. 2014. „Experimental investigation of the crash energy absorption of 2.5D-braided thermoplastic composite tubes”. *Composite Structures* 116 (1). Elsevier Ltd: 814-26. doi:10.1016/j.compstruct.2014.05.037.
- Rao, R Venkata, și Dhiraj P Rai. 2015. „Optimization of fused deposition modeling process using teaching-learning-based optimization algorithm”. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 19 (1). Elsevier B.V. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2015.09.008.
- Ravi, Prashanth, Panos S. Shiakolas, și Tré R. Welch. 2017. „Poly-L-lactic acid: Pellets to fiber to fused filament fabricated scaffolds, and scaffold weight loss study”. *Additive Manufacturing* 16. Elsevier B.V.: 167-76. doi:10.1016/j.addma.2017.06.002.
- Rezaie, R., M. Badrossamay, A. Ghaie, și H. Moosavi. 2013. „Topology optimization for fused deposition modeling process”. *Procedia CIRP* 6. Elsevier B.V.: 521-26. doi:10.1016/j.procir.2013.03.098.

- Riddick, Jaret C., Mulugeta A. Haile, Ray Von Wahlde, Daniel P. Cole, Oluwakayode Bamiduro, și Terrence E. Johnson. 2016. „Fractographic analysis of tensile failure of acrylonitrile-butadiene-styrene fabricated by fused deposition modeling”. *Additive Manufacturing* 11. Elsevier B.V.: 49-59. doi:10.1016/j.addma.2016.03.007.
- Robbins, J., S.J. Owen, B.W. Clark, și T.E. Voth. 2016. „An efficient and scalable approach for generating topologically optimized cellular structures for additive manufacturing”. *Additive Manufacturing* 12. Elsevier B.V.: 296-304. doi:10.1016/j.addma.2016.06.013.
- Roberson, David A., Angel R. Torrado Perez, Corey M. Shemelya, Armando Rivera, Eric MacDonald, și Ryan B. Wicker. 2015. „Comparison of stress concentrator fabrication for 3D printed polymeric izod impact test specimens”. *Additive Manufacturing* 7. Elsevier B.V.: 1-11. doi:10.1016/j.addma.2015.05.002.
- Rosati, Giulio, Simone Minto, și Fabio Oscari. 2017. „Design and construction of a variable-aperture gripper for flexible automated assembly”. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 48 (May 2016). Elsevier Ltd: 157-66. doi:10.1016/j.rcim.2017.03.010
- Schniederjans, Dara G. 2017. „Adoption of 3D-printing technologies in manufacturing: A survey analysis”. *International Journal of Production Economics* 183 (November 2016). Elsevier: 287-98. doi:10.1016/j.ijpe.2016.11.008.
- Sigmund, Ole. 2009. „Exercises with «A 99 line topology optimization code written in Matlab» *”, nr. 1999: 120-27. <http://www2.mae.ufl.edu/haftka/stropt/sigmund-topology-exer2009.pdf>.
- Singh, Jaspreet, Rupinder Singh, și Harwinder Singh. 2016. „Repeatability of linear and radial dimension of ABS replicas fabricated by fused deposition modelling and chemical vapor smoothing process: A case study”. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 94. Elsevier Ltd: 5-11. doi:10.1016/j.measurement.2016.07.064.
- Singh, Rupinder, Sunpreet Singh, și Fernando Fraternali. 2016. „Development of in-house composite wire based feed stock filaments of fused deposition modelling for wear-resistant materials and structures”. *Composites Part B: Engineering* 98. Elsevier Ltd: 244-49. doi:10.1016/j.compositesb.2016.05.038.
- Singh, Rupinder, Sunpreet Singh, Iqwinder Preet Singh, Francesco Fabbrocino, și Fernando Fraternali. 2016. „Investigation for surface finish improvement of FDM parts by vapor smoothing process”. *Composites Part B: Engineering*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.compositesb.2016.11.062.
- Sinha, Sunil K. 2013. „Rotordynamic analysis of asymmetric turbofan rotor due to fan blade-loss event with contact-impact rub loads”. *Journal of Sound and Vibration* 332 (9). Elsevier: 2253-83. doi:10.1016/j.jsv.2012.11.033.
- Sohn, Dongwoo, Young Sam Cho, și Seyoung Im. 2012. „A novel scheme to generate meshes with hexahedral elements and poly-pyramid elements: The carving technique”. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 201-204. Elsevier B.V.: 208-27. doi:10.1016/j.cma.2011.09.002.
- Sood, Anoop K., Raj K. Ohdar, și Siba S. Mahapatra. 2012. „Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement”. *Journal of Advanced Research* 3 (1). Cairo University: 81-90. doi:10.1016/j.jare.2011.05.001.
- Stocchi, Ariel, Lucas Colabella, Adrián Cisilino, și Vera Álvarez. 2014. „Manufacturing and testing of a sandwich panel honeycomb core reinforced with natural-fiber fabrics”. *Materials and Design* 55. Elsevier Ltd: 394-403. doi:10.1016/j.matdes.2013.09.054.
- Stanković, Tino, Jochen Mueller, și Kristina Shea. 2017. „The effect of anisotropy on the optimization of additively manufactured lattice structures”. *Additive Manufacturing* 17: 67-76. doi:10.1016/j.addma.2017.07.004.
- Tabacu, Stefan, Anton Hadar, Danut Marinescu, Dumitru Marin, Gabriela Dinu, și Daniela Smaranda D.S. Ionescu. 2008. „Structural Performances of Thermoplastic Manufactured Parts”. *Materiale Plastice* 45 (1).
- Tabacu, Stefan, Anton Hadar, Nicolae Doru Stanescu, Sorin Ilie, și Daniela Ioana Tudor. 2010. „Hexahedral Finite Elements Mesh Generation Method with Applications to Plastics Parts”. *Materiale Plastice* 47 (1).
- Tabacu, Stefan. 2015. „Numerical model (switchable/dual model) of the human head for rigid body and finite elements applications”. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 18 (7): 769-81. doi:10.1080/10255842.2013.847092.
- Tabacu Stefan, Leuciuc Dan, Oltean Alexandru, **Diaconescu Claudiu**, "Design Reinforced Twin Sheet Structures", FISITA WORD AUTOMOTIVE CONGRESS, 2014
- Tabacu, Stefan, **Claudiu Diaconescu**, și Alexandru Oltean. 2016. „Concept Design of Twin-Sheet Thermoplastic Cellular Structures for Vehicle's Bumper System”. În *Proceedings of the European Automotive Congress EAEC-ESFA 2015*, 81-91. doi:10.1007/978-3-319-27276-4.
- Tabacu, Stefan, **Claudiu Diaconescu**, și Alexandru Oltean. 2017. „Numerical and Experimental Investigations of a Twin Sheet Thermoplastic Structure with Rectangular Frusta”. În *CONAT 2016 International Congress of Automotive and Transport Engineering*, 2:17-25. doi:10.1007/978-3-319-45447-4.
- Tabacu, Stefan, și Cătălin Ducu. 2018. „Experimental testing and numerical analysis of FDM multi-cell inserts and hybrid structures”. *Thin-Walled Structures* 129 (April): 197-212. doi:10.1016/j.tws.2018.04.009.
- Tanikella, Nagendra G., Ben Wittbrodt, și Joshua M. Pearce. 2017. „Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing”. *Additive Manufacturing* 15. Elsevier B.V.: 40-47. doi:10.1016/j.addma.2017.03.005.

- Taherkhani, Ali, Mojtaba Sadighi, Ali Sadough Vanini, și Mohsen Zarei Mahmoudabadi. 2015. „An experimental study of high-velocity impact on elastic-plastic crushable polyurethane foams”. *Aerospace Science and Technology* 1. Elsevier Masson SAS: 1-11. doi:10.1016/j.ast.2015.11.013.
- Teixeira, D., M. Giovanela, L. B. Gonella, și J. S. Crespo. 2015. „Influence of injection molding on the flexural strength and surface quality of long glass fiber-reinforced polyamide 6.6 composites”. *Materials and Design* 85: 695-706. doi:10.1016/j.matdes.2015.07.097.
- Thakur, Atul, Ashis Gopal Banerjee, și Satyandra K. Gupta. 2009. „A survey of CAD model simplification techniques for physics-based simulation applications”. *CAD Computer Aided Design* 41 (2). Elsevier Ltd: 65-80. doi:10.1016/j.cad.2008.11.009.
- Thompson, Mary Kathryn, Giovanni Moroni, Tom Vaneker, Georges Fadel, R. Ian Campbell, Ian Gibson, Alain Bernard, et al. 2016. „Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints”. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65 (2). CIRP: 737-60. doi:10.1016/j.cirp.2016.05.004.
- Torrado, Angel R., Corey M. Shemelya, Joel D. English, Yirong Lin, Ryan B. Wicker, și David A. Roberson. 2015a. „Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing”. *Additive Manufacturing*. doi:10.1016/j.addma.2015.02.001.
- Torrado, Angel R., Corey M. Shemelya, Joel D. English, Yirong Lin, Ryan B. Wicker, și David A. Roberson. 2015b. „Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing”. *Additive Manufacturing* 6. Elsevier B.V.: 16-29. doi:10.1016/j.addma.2015.02.001.
- Tóth, Teodor, și Jozef Živčák. 2014. „A comparison of the outputs of 3D scanners”. *Procedia Engineering* 69. Elsevier B.V.: 393-401. doi:10.1016/j.proeng.2014.03.004.
- Tsouknidas, A., M. Pantazopoulos, I. Katsoulis, D. Fasnakis, S. Maropoulos, și N. Michailidis. 2016. „Impact absorption capacity of 3D-printed components fabricated by fused deposition modelling”. *Materials and Design* 102. Elsevier Ltd: 41-44. doi:10.1016/j.matdes.2016.03.154.
- Türk, Daniel-Alexander, Franco Brenni, Markus Zogg, și Mirko Meboldt. 2017. „Mechanical characterization of 3D printed polymers for fiber reinforced polymers processing”. *Materials & Design* 118. Elsevier Ltd: 256-65. doi:10.1016/j.matdes.2017.01.050.
- Wang, Jianlei, Hongmei Xie, Zixiang Weng, T. Senthil, și Lixin Wu. 2016. „A novel approach to improve mechanical properties of parts fabricated by fused deposition modeling”. *Materials & Design* 105. Elsevier Ltd: 152-59. doi:10.1016/j.matdes.2016.05.078.
- Wang, Lu, William M. Gramlich, și Douglas J. Gardner. 2017. „Improving the impact strength of Poly(lactic acid) (PLA) in fused layer modeling (FLM)”. *Polymer (United Kingdom)* 114. Elsevier Ltd: 242-48. doi:10.1016/j.polymer.2017.03.011.
- Wu, Peng, Jun Wang, și Xiangyu Wang. 2016. „A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry”. *Automation in Construction* 68. Elsevier B.V.: 21-31. doi:10.1016/j.autcon.2016.04.005.
- Yu, Pingchao, Dayi Zhang, Yanhong Ma, și Jie Hong. 2018. „Dynamic modeling and vibration characteristics analysis of the aero-engine dual-rotor system with Fan blade out”. *Mechanical Systems and Signal Processing* 106. Elsevier Ltd: 158-75. doi:10.1016/j.ymssp.2017.12.012.
- Zhang, X. F., F. Andrieux, și D. Z. Sun. 2011. „Pseudo-elastic description of polymeric foams at finite deformation with stress softening and residual strain effects”. *Materials and Design* 32 (2). Elsevier Ltd: 877-84. doi:10.1016/j.matdes.2010.07.004.
- Zhang, Xiong, și Hui Zhang. 2013. „Optimal design of functionally graded foam material under impact loading”. *International Journal of Mechanical Sciences* 68. Elsevier: 199-211. doi:10.1016/j.ijmecsci.2013.01.016.
- Zhu, Feng, Liqiang Dong, Honglei Ma, Cliff C. Chou, și King H. Yang. 2014. „Parameterized optimal design of a novel cellular energy absorber”. *International Journal of Mechanical Sciences* 86. Elsevier: 60-68. doi:10.1016/j.ijmecsci.2013.09.021.

CURRICULUM VITAE

1. Nume: Diaconescu - Carbunescu
2. Prenume: Claudiu
3. Data și locul nașterii: Craiova, 08.10.1975
4. Cetățenie: Română
5. Stare civilă: Căsătorit
6. Studii:

Instituția	Perioada	Grade sau diplome obținute
Universitatea din Craiova	1994-1999	Inginer
Universitatea din Pitesti	2015 - prezent	Doctorand

7. Experiența profesională:

Instituția	Perioada	Funcția	Descriere
S.C. Alseca Engineering S.A.	2009-prezent	Administrator /Director General	Administrare afacere, responsabil cercetare si dezvoltare produse
S.C. Black River Companies S.R.L.	2006-2009	Director Tehnic	Responsabil cu administrarea departamentului tehnic.
S.C. GECI Engineering S.R.L.	2004-2006	Inginer Proiectant	1. Modelare/design structura aeronave 2. Formare personal tehnic
S.C. Magic System S.R.L.	2001-2004	Inginer Suport Tehnic	1. Suport tehnic pentru departamentul de vanzari 2. Formare personal in Catia V4/V5

8. Limbi străine cunoscute: Engleza, Franceza

9. Brevete de invenții, dacă există (maxim cinci):

BEARING PANEL FOR BAGGAGE COMPARTMENT of motor vehicle which is provided with space for storing spare wheel

Patent Number(s): RO130842-A0

Inventor(s): [DIACONESCU C C](#), [LEUCIUC D](#), [OLTEAN A](#), [TABACU S](#)

Patent Assignee Name(s) and Code(s): ALSECA AUTOMOTIVE SA (ALSE-Non-standard)

Derwent Primary Accession Number: 2016-12077F

Abstract: NOVELTY - The invention relates to a bearing panel meant for arrangement of the baggage compartment of a motor vehicle which is provided with a space for storing the spare wheel, the panel being meant to be used in the machine-building industry. According to the invention, the panel has a sandwich-type structure, consisting inside of a lower board (1) and an upper board (2) made of polypropylene, both being thermally vacuumed in an identical cellular structure, heat-welded in a mirror-like manner, butt-welded on the top surface area, a sound attenuating layer (3) made integral with the lower board (1) by thermal welding, and a finishing layer (4) made integral with the upper board (2) by thermal welding as well, while, in the second embodiment of the sandwich panel, the upper polypropylene board (2) is plane, and, in a third embodiment, the panel comprises a reinforcing insert (6) with a cellular structure, the sandwich panel folding areas being carried out by thermal pressing with circular arc-shaped profile.

Application Details:

10. Lucrări publicate, dacă există

- Design Reinforced Twin Sheet Structures, FISITA WORD AUTOMOTIVE CONGRESS, 2014
- Concept Design of Twin-Sheet Thermoplastic Cellular Structures for Vehicle's Bumper System, Proceedings of the European Automotive Congress EAEC-ESFA, 2015
- Numerical and experimental Investigations of a Twin Sheet Thermoplastic Structure with Rectangular Frusta, CONAT 2016 International Congress of Automotive and Transport Engineering, 2016
- Design and Analysis of a Fused Deposition Modelling Manufactured Part, CAR 2017 - The International Congress of Automotive and Transport Engineering, 2017
- Wheel Liner Design for Improved sound and Structural Performance, CAR 2017 - The International Congress of Automotive and Transport Engineering, 2017

11. Membru al asociațiilor profesionale:

SFIP – Societe Francaise des Ingenieurs des Plastiques

SIAR – Societatea Inginerilor de Automobile din Romania

12. Specializări și calificări:

- nu este cazul

13. Experiența acumulată (inclusiv managerială) în alte programe/proiecte naționale/internaționale:

Programul / Proiectul	Funcția	Perioada
<i>Formare personal modelare in Catia V4 la Uzina Dacia Pitesti</i>	Instructor	2002
<i>Modelare structura de rezistenta la avioanele Airbus</i>	Inginer proiectant	2005
<i>Modelare/dezvoltare tehnologica piese plastic pentru proiecte B90 si H79 Dacia</i>	Coordonator echipa	2006/2007
<i>Dezvoltare matrite si dispozitive de control pentru piese din material plastic</i>	Coordonator echipa	2007/2008
<i>Dezvoltarea de solutii alternative pentru realizarea pieselor din material plastic si nu numai</i>	Director	2010-2011
<i>Implementarea proiectului "Dezvoltarea infrastructurii de CD a firmei ALSECA ENGINEERING S.A. prin înființarea laboratorului de tehnologii avansate de fabricație "</i>	Director de proiect	2013-2015