



MINISTERUL EDUCAȚIEI
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București
Școala Doctorală de
Inginerie Industrială și Robotică



TEZĂ DE DOCTORAT

**Cercetări privind optimizarea structurală
a produselor industriale fabricate prin
tehnologii aditive**

Student doctorand,
Alexandru – Mihai C. Cișmilianu

Conducător științific,
Prof. Univ. Dr. Ing. Ec. Cristian – Vasile Doicin

- București -

- 2023 -



MINISTERUL EDUCAȚIEI
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București
Școala Doctorală de
Inginerie Industrială și Robotică



TEZĂ DE DOCTORAT

**Cercetări privind optimizarea structurală a
produselor industriale fabricate prin tehnologii
aditive**

REZUMAT

Student doctorand,
Alexandru – Mihai C. Cișmilianu

Conducător științific,
Prof. Univ. Dr. Ing. Ec. Cristian – Vasile Doicin

- București -
- 2023 -



MINISTERUL EDUCAȚIEI
Universitatea Națională de Știință și
Tehnologie POLITEHNICA București
Școala Doctorală de
Inginerie Industrială și Robotică



Decizie CSUD UPB nr. 976 din 08.12.2022

TEZĂ DE DOCTORAT

Cercetări privind optimizarea structurală a produselor industriale fabricate prin tehnologii aditive / Research on structural optimization of industrial products manufactured through additive manufacturing

Student doctorand,
Alexandru – Mihai C. Cișmilianu

COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	Prof. univ. dr. ing. IONESCU Nicolae	Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București
Conducător științific	Prof. univ. dr. ing. DOICIN Cristian - Vasile	Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București
Membru	Conf. univ. dr. ing. ULMEANU Mihaela	Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București
Membru	Prof. univ. dr. ing. BÂLC Nicolae	Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca
Membru	Prof. univ. dr. ing. OANCEA Gheorghe	Universitatea Transilvania din Brașov

- 2023 -

CUPRINSUL LUCRĂRII

INTRODUCERE	5
LISTA DE NOTAȚII ȘI ABREVIERI (extras).....	6
LISTA DE DEFINIȚII (extras).....	7
STRUCTURA ȘI CONȚINUTUL TEZEI DE DOCTORAT	8
JUSTIFICAREA ALEGERII TEMEI	8
PARTEA I STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND FABRICAȚIA ADITIVĂ ȘI OPTIMIZAREA STRUCTURALĂ A PRODUSELOR INDUSTRIALE	9
Capitolul 1. Stadiul actual al cercetărilor privind tehnologia de fabricație aditivă	9
Capitolul 2. Stadiul actual al cercetărilor privind optimizarea structurală.....	12
PARTEA A II-A CONTRIBUȚII PRIVIND ELABORAREA UNEI METODOLOGII DE OPTIMIZARE STRUCTURALĂ.....	18
Capitolul 3. Direcțiile, obiectivul principal și metodologia de cercetare-dezvoltare	18
Capitolul 4. Dezvoltarea și validarea unei metodologii de optimizare topologică....	19
Capitolul 5. Aplicarea metodologiei în cazul asamblărilor nedemontabile	19
Capitolul 6. Aplicarea metodologiei în cazul pieselor prelucrate prin așchiere	23
Capitolul 7. Studiu de caz 1 – Ansamblu de repere prelucrate pe o mașină cu comandă numerică	26
Capitolul 8. Studiu de caz 2 –Variante de personalizare a optimizării structurale aplicate pieselor fabricate aditiv	28
Capitolul 9. Validarea metodologiei de optimizare topologică.....	34
Capitolul 10. Proiectare pentru fabricare – reguli pentru evacuarea pulberii din structuri metalice complexe fabricate aditiv	36
Capitolul 11. Fabricarea aditivă a unei piese cu cavități interne și procedura de calificare pentru utilizare în spațiu.....	41
Capitolul 12. Optimizarea topologică a unui tren de aterizare pentru un vehicul cu decolare și aterizare verticală (VTVL).....	42
12.1. Optimizarea pentru un vehicul VTVL cu motor turbojet.....	42
Introducere.....	42
12.2. Optimizarea pentru un vehicul VTVL cu motor rachetă ADAMP	47
Capitolul 13. Concluzii, contribuții proprii și direcții viitoare de cercetare.....	50
13.1. Concluzii generale.....	50
13.2. Contribuții proprii	51
13.3. Direcții viitoare de cercetare	51
BIBLIOGRAFIE (extras)	52

INTRODUCERE

Tehnologiile de fabricație aditivă sunt folosite și îmbunătățite de peste 30 de ani, însă deși acestea lărgesc dramatic orizontul pieselor care pot fi produse, încă sunt limitări și reguli stricte. Limitările diferă în funcție de tehnologia de fabricație aditivă aleasă pentru producție și în funcție de domeniul pentru care se realizează piesa, adesea este necesară introducerea unor etape suplimentare și verificări adiționale pentru piese cu cavități complexe, atât în proiectare, cât și în producție.

Optimizarea structurală este o unealtă utilizată în reducerea timpului de dezvoltare a unei piese prin adăugarea de valoare, prin îmbunătățirea experienței și consolidarea intuiției proiectantului, folosind un proces automat (Abaqus Docs, 2020).

Optimizarea structurală este folosită în industrie de zeci de ani indicând, de-a lungul timpului necesitatea apariției unor aplicații software comerciale și îmbunătățirea constantă a acestora pentru a fi performante și a se diferenția de competitorii lor.

Prin implementarea tehnicilor de optimizare structurală, fie că este vorba de realizarea unor piese noi sau de optimizarea unui produs existent, se reduce numărul de iterații dintre echipa de proiectare și echipa de analiză structurală. Se poate ajunge astfel la un cost mult mai mic de timp și de personal, de la nivel de date de intrare, la un concept, respectiv rezultat final detaliat.

Optimizarea structurală devine o parte a procesului de dezvoltare a produselor din ce în ce mai utilizată, mai ales în domenii unde minimizarea masei aduce scăderi de costuri semnificative, cum sunt cele aeronautice și spațiale.

Luând în considerare toate elementele prezentate mai sus, **obiectivul general al tezei de doctorat** este de a dezvolta o metodologie robustă de optimizare structurală pornind de la experiența practică a optimizării unor produse complexe, de a demonstra posibilitatea personalizării acestora pentru diferite tehnologii, incluzând tehnologii de fabricație aditivă cu pulberi metalice, de a defini reguli de proiectare necesare pentru introducerea cavităților, a metodelor de evacuare a pulberii, a etapelor de producție suplimentare necesare pentru fabricația unei piese complexe cu cavități.

LISTA DE NOTAȚII ȘI ABREVIERI (extras)

Nr. Crt	Abrev.	Semnificație/ Significance
1.	AESO	Optimizare structurală evolutivă aditivă / Additive ESO
2.	ALM	Fabricație aditivă prin adăugare de straturi / Additive Layer Manufacturing
3.	AM	Fabricație aditivă / Additive Manufacturing
4.	ASTM	Societatea Americană pentru testare și materiale / American Society for Testing and Materials
5.	BESO	Optimizare structurală evolutivă bidirecțională / Bidirectional ESO
6.	CAD	Proiectare asistată de calculator / Computer Aided Design
7.	CAM	Fabricație asistată de calculator / Computer Aided Manufacturing
8.	CNC	Control numeric computerizat / Computer Numerical Control
9.	CT	Tomografie Computerizată / Computed tomography
10.	DDP	Programare dual-discretă / Dual Discrete Programming
11.	DED	Depunere directă de energie / Directed Energy Deposition
12.	DLP	Procesarea digitală a luminii / Digital Light Processing
13.	DMD	Depunere direcționată de metal / Direct Metal Deposition
14.	DMLS	Sinterizare directă prin laser a pulberilor metalice / Direct Metal Laser Sintering
15.	DOF	Degree Of Freedom / Grade de libertate
16.	DSC	Optimizare structurală hibridă deformabilă / Deformable Simplicial Complex Structural Optimization
17.	ESA	Agenția Spațială Europeană / European Space Agency
18.	ESO	Optimizare structurală evolutivă / Evolutionary Structural Optimization
19.	FDM	Depunere de material topit / Fused Deposition Modelling
20.	FFF	Fabricație cu filament topit / Fused Filament Fabrication
21.	HEX	Hexadecimal
22.	HIP	Presare izostatică la cald / Hot Isostatic Pressing
23.	HM	HyperMesh
24.	MAM	Fabricație aditivă cu materiale metalice / Metal Additive Manufacturing
25.	MEF	Modelare cu Element Finit / Finite element Modeling
26.	MIG	Gaz inert metalic / Metal Inert Gas
27.	MIT	Institutul de Tehnologie Massachusetts / Massachusetts Institute of Technology
28.	MUCN	Mașină Unealtă cu Comandă Numerică / Numerically Controlled Machine
29.	NASA	Administrația națională de aeronautică și spațiu / National Aeronautics and Space Administration
30.	NC	Control numeric / Numerical Control
31.	NOM	Microstructuri non-optimale / Non-Optimal Microstructures
32.	NP ND	Spațiu de non-proiectare / Non-Design Space
33.	OMP	Microstructură optimă cu penalizare / Optimal Microstructure with Penalization
34.	OT	Optimizare Topologică / Topology optimization
35.	P DS	Spațiu de proiectare / Design Space
36.	PBF	Fuziune pe pat de pulbere / Powder Bed Fusion
37.	RAMP	Aproximarea rațională a proprietăților de material / Rational Approximations of Material Properties
38.	RP	Prototipare rapidă / Rapid Prototyping
39.	SIMP	Microstructuri izotropice solide cu penalizare / Solid Isotropic Microstructure with Penalization
40.	SLM	Topire selectivă cu laser / Selective Laser Melting
41.	SLS	Sinterizare selectivă cu laser / Selective Laser Sintering
42.	SPC	Single Point Constraint / Constrângerea gradelor de libertate a unui singur punct
43.	xFEM	Modelare cu element finit extinsă / Extended Finite Element Method

LISTA DE DEFINIȚII (extras)

Definițiile prezentate tabelar reprezintă un extras din terminologia generală folosită în optimizarea structurală, așa cum sunt ele înțelese în teză.

Tab. 1 Definiții

Nr. Crt.	Denumire	Definiție
1.	Concept	Termen folosit în teză ca model 3D inițial / preliminar.
2.	Constrângere de fabricație	Sintagmă utilizată în aplicațiile software de optimizare structurală. Impune generarea rezultatelor optimizării similar unor metode de fabricație (turnare, extrudare, etc.).
3.	Factor de siguranță	Factor impus de reglementări sau proceduri de calcul specifice fiecărui domeniu sau proiect.
4.	Funcția obiectiv	o funcție a unei variabile de proiectare care, trebuie minimizată sau maximizată aceasta fiind funcția cheie din orice calcul de optimizare structurală (Abaqus, 2017).
5.	Optimizare Topologică	<p>Este o metodă de identificare a distribuției materialului în spațiul de proiectare definit, prin respectarea constrângerilor impuse. Distribuția materialului este realizată conform funcției obiectiv impuse. (Brackett D. A., 2011)</p> <p>Contribuție teoretică: Optimizarea topologică identifică cea mai bună distribuție de material într-un spațiu de proiectare definit astfel încât funcția obiectiv (rigiditate globală, frecvență proprie), respectând o serie de constrângeri impuse (condiții la limită, direcția deplasărilor, simetrii), să tindă către un extrem (maxim sau minim) prin reducerea volumului sau a masei.</p>
6.	Optimizarea Structurală	Optimizarea structurală este o metodă de determinare a variabilelor de proiectare, care controlează forma, proprietățile materialului sau dimensiunile unei structuri, astfel încât să respecte anumite restricții și să îmbunătățească anumite proprietăți pentru a obține structuri optime din punct de vedere al proprietăților mecanice. (Vlădulescu, 2022)
7.	Restricții de proiectare	condiții impuse structurii ce urmează a fi optimizate. (CRM, 2017).
8.	Sensibilitate	Analiza de sensibilitate este un instrument modern pentru aprofundarea cunoașterii comportării unui sistem de orice natură ar fi acesta: tehnic, economic, biologic, social ș.a.m.d. În esență, dacă desfășurarea unui proces (comportarea unui sistem) descrisă de traiectoriile stării și ale ieșirii în coordonate temporale și/sau spațiale, suferă modificări semnificative la abateri, relativ mici, ale unui parametru, de pildă, de la valoarea sa nominală, vom spune că procesul (sistemul) este "sensibil" în raport cu parametrul respectiv (Ștefan Ungureanu, 2021).
9.	Spațiu de non-proiectare	Contribuție teoretică: Spațiul de non-proiectare reprezintă spațiul/multitudinea de spații definit/e geometric, în care optimizatorul nu poate acționa.
10.	Spațiu de proiectare	Spațiul de proiectare este un solid sau un ansamblu de solide sau de elemente finite care impune limitele geometrice exterioare ale formei rezultate din optimizare. (Altair, 2021)
11.	Variabile de proiectare	cantități numerice reale ce caracterizează structura din punct de vedere geometric și funcțional (CRM, 2017). În cazul optimizării structurale, reprezintă parametrii care se modifică în timpul procesului de optimizare (Abaqus, 2017).

STRUCTURA ȘI CONȚINUTUL TEZEI DE DOCTORAT

Teza de doctorat este compusă din 13 capitole și 6 anexe, conținând 238 de figuri și 111 de tabele, prezentate în 361 de pagini.

În primul capitolul, se prezintă stadiul actual al cercetărilor privind tehnologiile de fabricație aditivă, iar în capitolul al doilea, se prezintă stadiul actual al cercetărilor privind optimizarea structurală. Informațiile din aceste capitole reprezintă fundamentul necesar personalizării procesului de optimizare a unui concept pentru tehnologia de fabricație aditivă. În capitolul al treilea, se prezintă obiectivul principal al activității de cercetare-dezvoltare, direcțiile de cercetare-dezvoltare și metodologia propusă pentru atingerea obiectivului principal. În capitolul al patrulea, se prezintă contribuțiile privind dezvoltarea unei metodologii de optimizare inițiale, urmând ca aceasta să fie validată în studiile de caz din lucrare. În capitolul al cincilea, se prezintă un exemplu de aplicare și validare a metodologiei dezvoltate și totodată de personalizare procesului de optimizare structurală pentru cazul asamblărilor nedemontabile. În capitolul al șaselea, se validează metodologia de optimizare pentru studiul de caz privind personalizarea optimizării structurale pentru fabricarea rezultatului reproiectat prin prelucrare prin frezare pe un centru CNC. În capitolul al șaptelea, se validează iar metodologia de optimizare, în acest caz, pentru personalizarea optimizării structurale spre prelucrarea prin frezare pe un centru CNC al unui ansamblu de piese. În capitolul al optulea, se prezintă personalizarea optimizării structurale pentru piese fabricate aditiv în contextul unui proiect cu ESA (Agenția Spațială Europeană), metodologia de optimizare fiind validată. În capitolul al nouălea, pornind de la capitolele 5-8, se realizează o analiză comparativă sintetizată cu privire la aplicarea metodologiei inițiale și se generează metodologia generală de optimizare structurală. În capitolul al zecelea, se prezintă contribuțiile privind regulile de proiectare pentru evacuarea pulberii din structuri complexe cu cavități fabricate aditiv din pulberi metalice. În capitolul al unsprezecelea, se prezintă contribuțiile privind etapele de producție și verificare necesare pentru o piesă cu cavități fabricată aditiv cu pulberi metalice în cadrul proiectelor cu ESA. În capitolul al doisprezecelea, se evidențiază utilizarea cu succes a metodologiei de optimizare prin aplicarea acesteia în două noi cazuri de calcul și trei aplicații software distincte, aplicații pentru care se realizează un studiu comparativ între acestea. În ultimul capitol, se prezintă concluziile generale ale tezei, se evidențiază contribuțiile proprii ale autorului și se expun direcțiile viitoare de cercetare. Se observă că se atinge obiectivul general și se ating obiectivele specifice enunțate de autor în cadrul prezentei teze.

JUSTIFICAREA ALEGERII TEMEI

În cadrul tezei de doctorat, *Cercetări privind optimizarea structurală a produselor industriale fabricate prin tehnologii aditive*, sunt prezentate cercetări și contribuții care au avut ca obiectiv principal dezvoltarea unei metodologii robuste de optimizare structurală pornind de la experiența practică a optimizării unor produse complexe, de a demonstra posibilitatea personalizării acesteia pentru diferite tehnologii, incluzând tehnologii de fabricație aditivă cu pulberi metalice, de a defini reguli de proiectare necesare pentru introducerea cavităților, a metodelor de evacuare a pulberii, a etapelor de producție suplimentare necesare pentru fabricația unei piese complexe cu cavități.

Teza a abordat un subiect nedocumentat în amănunt, acela al unei metodologii robuste de optimizare structurală și variații ale acesteia în care optimizarea structurală poate fi personalizată pentru tehnologia de fabricație pre-selectată. Această metodologie a fost aplicată în cazuri reale, fie pornind de la zero, fie pornind de la modele deja existente.

PARTEA I

STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND FABRICAȚIA ADITIVĂ ȘI OPTIMIZAREA STRUCTURALĂ A PRODUSELOR INDUSTRIALE

Capitolul 1. Stadiul actual al cercetărilor privind tehnologia de fabricație aditivă

Noțiuni generale

Capitolul curent conține informații privind stadiul actual al cercetărilor privind tehnologia de fabricație aditivă începând cu noțiuni generale, urmată de o comparație între tehnologia de fabricație aditivă și fabricație convențională prin frezare, clasificarea tehnologiilor de fabricație aditivă, etapele de producție în fabricația aditivă și concluzii.

Fabricație aditivă vs. fabricația convențională

Încă de la apariția sa, tehnologia descrisă inițial ca Rapid Prototyping (RP) a revoluționat industria, deoarece se puteau obține prototipuri la costuri reduse, chiar dacă timpii de realizare a unui singur prototip era semnificativ. Dar tehnologiile au evoluat, a scăzut timpul de realizare a unei singure piese, la fel și costurile, volumul documentației necesare și numărul etapelor necesare. Maturizarea acestei tehnologii a dus la eliminarea problemelor și, totodată, a multor constrângeri uzuale de fabricație. Pe măsură ce tehnologia a evoluat, de la denumirea de Rapid Prototyping sau prototipare rapidă, au apărut variante ca Additive Layer Manufacturing (ALM), Additive Manufacturing (AM), 3D Printing ș.a.m.d. standard. (Walmart, 2017), (H. Paris, 2016)

Diferența principală între fabricația aditivă și fabricația convențională este reprezentată de structura procesului de fabricare a pieselor. La fabricația convențională (de exemplu, prelucrare prin așchiere pe un utilaj tehnologic CNC) procesul tehnologic presupune îndepărtare de material, iar la fabricația aditivă, procesul tehnologic presupune adăugare de material. (Walmart, 2017), (H. Paris, 2016), (S.T. Newman, 2015)

Clasificarea tehnologiilor de fabricație aditivă

Până în prezent a apărut o multitudine de tehnologii de fabricație aditivă, multe dintre acestea trecând de nivelul obținerii doar a unui prototip sau model demonstrativ. În dezvoltarea tehnologiei, s-a urmărit dezvoltarea de noi metode pentru a putea depune din ce în ce mai multe materiale, indiferent de starea lor de agregare.

Conform Wohlers, în anul 2011, aproximativ 300 milioane de dolari erau cheltuiți pe materialul de baza necesar tehnologiei de fabricație aditivă (Wohlers, 2021). Deși există o varietate mare de tipuri de materiale, grupul Wohlers a împărțit în mod similar cu standardul ASTM F2792, toate materialele disponibile procesul de fabricație aditivă în următoarele categorii:

Tab. 2 Compatibilitate material – proces fabricație aditivă (Wohlers T. , 2012)

	Binder Jetting	Direct Energy Deposition	Material Extrusion	Material Jetting	Bed Fusion	Sheet Lamination	Vat Photopolymerization
Polimerice și variații ale acestora	✓		✓	✓	✓	✓	✓

Compozite	✓			✓	✓		✓
Metalice		✓		✓	✓	✓	
Metalice hibride		✓				✓	
Ceramice	✓				✓		✓
Hârtie						✓	

În continuare sunt prezentate tehnologiile de fabricație aditive utilizate pentru materiale metalice.

Fabricația aditivă cu materiale metalice sau Metal-Additive Manufacturing (MAM) are un potențial imens de a oferi libertate fără precedent din punct de vedere al conceptului posibil, acest lucru este posibil doar în cazul în care conceptul este realizat în mod corespunzător tehnologiei de fabricație alese (Huang S. H., 2013), (Ulu, 2018). Acest tip de fabricație aduce valoare adăugată deoarece face posibilă producerea de piese mai ușoare cu performanțe similare prin fructificarea libertății crescute în conceptul pieselor, producând avantaje din punct de vedere al mediului, dar și din punct de vedere economic, în industrii unde aceste elemente sunt critice, cum ar fi domeniul aerospațial, spațial, medical și cel al producerii de energie electrică (Huang S. H., 2013), (Huang R. R., 2016), (Khajavi, 2014), (Ulu, 2018). Costurile relativ mari (aparente sau reale) de producție pentru MAM încetinesc adoptarea tehnologiei în cele mai multe cazuri (Huang S. H., 2013), (Thomas, 2014), (Ulu, 2018). Studiile demonstrează că optimizarea structurală aplicată în cazul pieselor ce se doresc fabricate MAM pot reduce consumul de materiale, în acest caz, consumul de pulberi metalice, reducând astfel și costul de material păstrând totodată și aceleași performanțe pentru care piesa a fost calculată (Tomlin, 2011), (Cheng, 2017), (Wang X. X., 2016), (Ulu, 2018). Optimizarea topologică clasică minimizează încărcarea structurală până la constrângerea impusă prin varierea fracției volumice din volumul de lucru total pus la dispoziție (Bendsoe M. P., 2013), (Eschenauer H. A., 2001), (Rozvany, 2001), (Suzuki, 1991), (Ulu, 2018), rezultatul acestei analize influențând direct costul în ceea ce privește consumul de material (Rosen, 2014), (Dobrovski, 2011), (Zegard, 2016), (Gaynor, 2014), (Dede, 2015), (Ulu, 2018). Costul asociat cu consumul de material este doar unul dintre factorii ce antrenează costul total al piesei în funcție de conceptul piesei se pot adăuga și costuri asociate, cum ar fi costuri legate de energie, deșeurile tehnice, inclusiv poziționarea piesei în volumul de lucru al mașinii reprezintă un factor important de creștere a prețului total de fabricație (Thomas, 2014), (Ulu, 2018).

Etapele procesului tehnologic de fabricare

Procesul de fabricație aditivă a unei piese conține, de regulă, mai multe etape (vezi (Ulmeanu & Doicin, 2018)):

- 1) Proiectarea modelului CAD 3D;
- 2) Salvarea acestuia ca fișier .STL;
- 3) Procesarea fișierului .STL în aplicația software a mașinii de depunere aditivă;
- 4) Pregătirea mașinii și fabricarea aditivă efectivă;
- 5) Post-procesarea piesei finale.

Deși etapele sunt relativ similare și pentru restul tehnologiilor, etapele descrise în continuare se vor referi la procesul de fabricație aditivă cu pulberi metalice. Prima etapa este

reprezentată de proiectarea modelului CAD 3D ținând seama de un set minim de reguli reperul fiind proiectat conform principiului “Design for AM”. În etapa doi, modelul CAD 3D rezultat din etapa anterioară este salvat în format .STL. Proiectantul reperului generează un desen tehnic de execuție 2D pe care îl exportă în format .PDF. A treia etapă a procesului tehnologic de fabricare aditivă cu pulberi metalice a unei piese este reprezentată de procesarea fișierului .STL. După primirea modelului, în funcție de cerințele clientului și de specificațiile din desenul 2D, un consultant în fabricație aditivă verifică modelul și transmite feedback cu modificările necesare pentru obținerea unei piese de o calitate superioară. A patra etapa din cadrul procesului tehnologic de fabricație este reprezentată de pregătirea mașinii de fabricație aditivă, aceasta presupunând verificarea nivelului de pulbere și umplerea cu pulbere adițională, dacă este necesar, a patului de fabricație aditivă ș.a.m.d.. În aceeași etapă are loc fabricația efectivă a reperului. Ultima etapă din procesul de fabricație este reprezentată de post-procesarea piesei obținute prin fabricație aditivă, aici fiind incluse toate etapele necesare aducerii unei piese de la starea și geometria intermediară, de la patul mașinii de fabricație aditivă, la starea și geometria finală. (M.K. Thompson, 2016), (H. Paris, 2016), (S.T. Newman, 2015) În succesiunea fazelor de post post-procesare clasice prezentate în lucrare pot exista și diverse opțiuni disponibile (vezi Fig. 1 marcat cu verde).

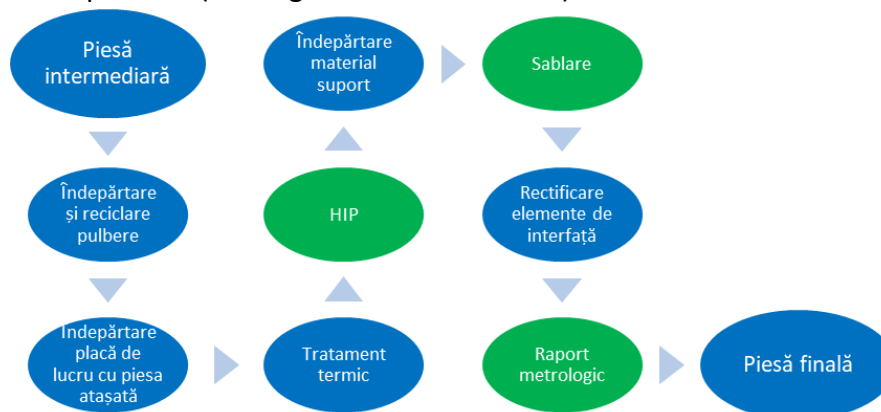


Fig. 1 Alternativă a etapelor clasice de post-procesare

Concluzii

Din analiza stadiului actual al cercetărilor privind tehnologia de fabricație aditivă au rezultat următoarele concluzii:

- Fabricația aditivă (cel puțin în privința tehnologiilor care lucrează cu materiale metalice) poate înlocui în cazuri particulare fabricația convențională care presupune prelucrarea prin așchiere pe mașini CNC, în special în cazul pieselor complexe. Piese rezultate nu pot fi folosite direct deoarece adesea trebuie finisate la zonele de interfață ale ansamblurilor în care vor fi integrate. Procesele hibride de fabricație aditivă, pot realiza piese finite dintr-o singură etapă de producție.
- Din punct de vedere al semifabricatului, tehnologiile de fabricație aditivă ies în avantaj față de tehnologia de prelucrare prin așchiere (frezare) pentru că aceasta nu are nevoie de semifabricat, ci doar de materialul de bază.
- În etapa de pre-procesare, în cazul tehnologiilor de fabricație aditivă procesul este mult mai direct și nu este impactat major de nivelul de complexitate al piesei.
- Din punct de vedere al lanțului de producție, tehnologia de fabricație aditivă prezintă un risc mult mai mic cu privire la apariția posibilelor întârzieri datorate terților.

Capitolul 2. Stadiul actual al cercetărilor privind optimizarea structurală

Introducere

În teză se identifică stadiul actual al cercetărilor privind optimizarea structurală începând cu clasificarea variantelor de optimizare structurală, prezentarea algoritmilor din optimizarea structurală și se aplică metodele de optimizare structurală în exemple concrete aplicate în industria aerospațială.

Optimizarea structurală este o metodă de determinare a variabilelor de proiectare, care controlează forma, proprietățile materialului sau dimensiunile unei structuri, astfel încât să respecte anumite restricții și să îmbunătățească anumite proprietăți pentru a obține structuri optime din punct de Vedere al proprietăților mecanice. (Vlădulescu, 2022)

În cadrul tezei, studiul optimizării se va concentra în special în domeniul structurilor de rezistență pentru aplicații spațiale. În industria spațială, un impact major asupra costului este dat de masa încărcăturii. Prin aplicarea metodologiilor de optimizare structurală și realizarea componentelor prin fabricație aditivă, se pot minimiza costurile misiunilor spațiale. Costurile pentru o încărcătură ce urmează a fi trimisă în orbită sunt foarte mari (**Error! Reference source not found.**), în special până în anul 2010.

Tab. 3 Prețuri de lansare în LEO (Low Earth Orbit)-extras (Jones H. W., 2018)

Vehicul/Lansator	Data Primei Lansări	\$k/kg	Referință
Ariane 44	1988	17.9	(Wertz, 1996)
Ariane 5G	1996	13.1	(Futron, 2002)
Atlas IIA	1991	19.8	(Wertz, 1996)
Delta 3910	1975	28.0	(Koelle, 1996)
Delta II	1989	15.3	(Futron, 2002)
Delta III	1998	11.7	(Koelle, 1996)
Falcon 9	2010	2.7	(SpaceX.com, 2020)
Falcon Heavy	2018	1.4	(SpaceX.com, 2020)
H-2	1994	26.4	(Wertz, 1996)
Rockot	1994	10.4	(Futron, 2002)
Saturn V	1968	5.2	Williams, 2016
Space shuttle	1981	61.7	(Pielke, 2011)
Soyuz	1966	7.6	(Futron, 2002)
Vega	2012	10.0	Wikipedia, Comparison, 2018

Conform lucrării (Konstantinos, Evangelos, Alikem, Jack, & Lukas, 2019), problemele de optimizare structurală sunt prezentate matematic sub expresia:

$$\text{Optimizare structurală} \left\{ \begin{array}{l} \text{minimizare/maximizare } f(x, y) \\ \text{supusă la } \left\{ \begin{array}{l} \text{constrângerile de calcul } y \\ \text{restricții de proiectare } x \\ \text{constrângeri de echilibru} \end{array} \right\} \end{array} \right\} \text{ (Konstantinos, Evangelos, Alikem, Jack, \& Lukas, 2019)}$$

Jack, & Lukas, 2019)

Unde, **f(x,y)** – **Funcție obiectiv** – Într-o problemă de optimizare structurală, aceasta urmărește maximizarea sau minimizarea valorii selectate (masă, volum, solicitare etc.), **x** – **Variabile de proiectare** – vectori sau funcții ce descriu proprietățile geometrice sau de material ale conceptului, **y** – Funcție sau vector ce descrie răspunsul structurii pentru valoarea x. (Vanderplaats, 1983)

Clasificarea variantelor de optimizare structurală

Optimizarea structurală poate fi împărțită în două mari categorii, în funcție de zona care se dorește a fi optimizată: optimizare locală, vizând anumite zone de interes dintr-un model și optimizare globală, vizând întregul model sau volum de studiu. Optimizarea locală poate fi realizată, în mod direct, folosind metodele de optimizare detaliată (vezi Fig. 2). Optimizarea globală poate fi realizată cu metodele de optimizare în vederea obținerii unui concept (vezi Fig. 2). În anumite cazuri specifice, metodele de optimizare în vederea obținerii unui concept, cu etape suplimentare introduse în procesul de pre-optimizare, pot fi folosite în optimizarea locală.

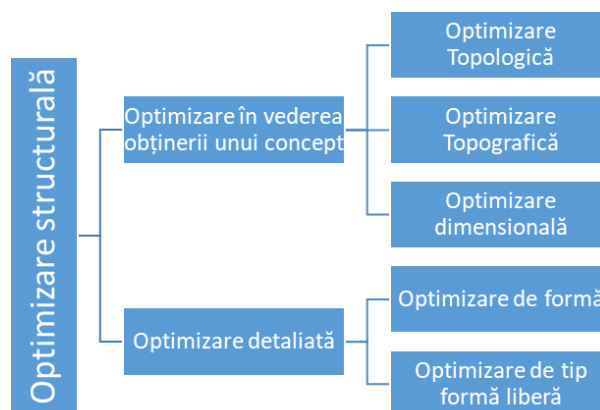


Fig. 2 Clasificare optimizare structurală

În cadrul prezentului rezumat se prezintă doar optimizarea topologică, restul variantelor de optimizare fiind detaliate în versiunea în extenso a tezei.

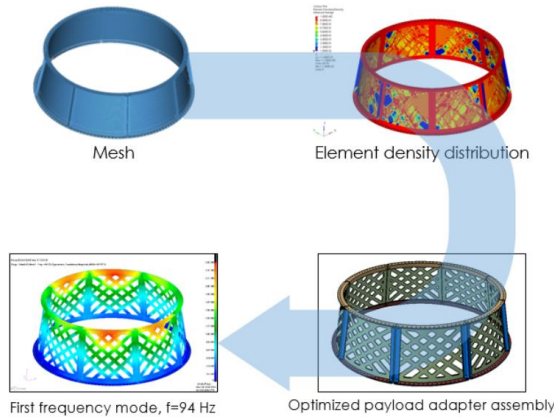
Optimizarea structurală care se realizează în vederea obținerii unui concept, conține variantele cele mai utilizate de optimizare structurală, printre care: optimizarea topologică, optimizarea topografică și optimizarea de tip dimensiune liberă.

Optimizarea topologică (pentru definiție vezi Tab. 1) este prima opțiune în cazul optimizării structurale, care se realizează în vederea obținerii unui concept de reper.

Prin utilizarea optimizării topologice se poate ajunge la stabilirea geometriei constructive optime, într-o anvelopă de lucru predeterminată, pe baza direcțiilor induse de solicitări în material, ținând seama totodată de constrângeri (interfețe, simetrie, producție ș.a.m.d.) și de funcția obiectiv predefinită. Optimizarea topologică nu este limitată la un anumit tip de elemente. Optimizarea topologică este utilizată într-o arie largă de domenii din industrie, de la cel aeronautic, spațial, mecanic la construcții civile. Majoritatea tehnologiilor de fabricație necesită adaptarea modelului pentru metoda aleasă. Post procesarea se face chiar și în cazul fabricației aditive având în minte conceptul „proiectării pentru fabricație aditivă” (“Design for AM”).

Câteva exemple de optimizare sunt prezentate în teza, în continuare e prezentat un exemplu de optimizare topologică:

Exemplul 1. Optimizare topologică pentru un adaptor de sarcină utilă



Exemplul evidențiază aplicabilitatea optimizării topologice pentru o piesă dintr-un ansamblu în vederea obținerii unui concept cu masă minimă care să distribuie solicitările în structură și să obțină marje de siguranță pozitive.

Fig. 3 Optimizare topologică pentru un “ adaptor de sarcină utilă” (Cismilianu, Petre, Liliceanu, & Bibire, 2017)

Algoritmii din optimizarea structurală

Secțiunea curentă prezintă algoritmii uzuali utilizați în optimizarea structurală și metoda de funcționare a acestora. Dintre algoritmii de optimizare ce se pot afla la baza acestor aplicații software comerciale de optimizare regăsim: SIMP (Solid Isotropic Microstructure with Penalization), RAMP (Rational Approximations of Material Properties), OMP (Optimal Microstructure with Penalization), NOM (Non-Optimal Microstructures), DDP (Dual Discrete Programming), “The Bubble-method” (Topological derivatives), Level set, Phase field, ESO (Evolutionary Structural Optimization), AESO (Additive ESO), BESO (Bidirectional ESO), xFEM (Extended Finite Element Method), DSC (Deformable Simplicial Complex).

Majoritatea algoritmilor de optimizare din aplicații software comerciale de optimizare topologică sunt similari din punctul de vedere în care aceștia „jonglează” cu valoarea densității pentru a calcula și reprezenta forma rezultată ca fiind optimă. Conform (Johnsen, 2013), pentru ca aceștia să poată fi utilizați, au nevoie de un domeniu de dimensiune fixă din punct de vedere geometric (Ω^{mat}) care uneori este parte dintr-un domeniu mai mare (Ω) inclus în \mathbb{R}^2 sau \mathbb{R}^3 . Domeniul mai mare (Ω) este cunoscut sub denumirea generică de “design space” sau spațiu de proiectare, domeniul în care optimizatorul poate acționa. Cei mai utilizați algoritmi de optimizare topologică au la baza identificarea minimizării complianței, ca de exemplu:

$$\text{rigiditatea} = \frac{1}{\text{complianța}}$$

De unde rezultă că minimizarea complianței [adimensională] induce maximizarea rigidității structurii [adimensională].

Algoritmul SIMP (Solid Isotropic Microstructure with Penalization / Microstructură Izotropă Solidă cu Penalizare)

Primul algoritm ca importanță în optimizarea structurală este SIMP. Acesta sau versiuni ale acestuia reprezintă unul din algoritmii principali în optimizarea topologică, fiind folosit la toate nivelurile, de la programe scrise de mână pentru probleme simple până la aplicații software comerciale în anumite situații (Johnsen, 2013).

SIMP este unul din algoritmii de optimizare care se bazează pe modificarea valorii densității, pentru a reprezenta forma rezultată ca fiind optimă.

$$E_{ijkl}(x) = \rho(x)^p E_{ijkl}^0, \quad p > 1 \quad (5)$$

$$\int_{\Omega} \rho(x) d\Omega \leq V; 0 \leq \rho(x) \leq 1, x \in \Omega \quad (\text{Johnsen, 2013})$$

Unde, ρ – densitatea elementului interpolată între 0 și 1 [adimensională], E_{ijkl} – densitatea elementului la valoarea numerică 1 [N/m], E_{ijkl}^0 – densitatea elementului interpolată între 0 și 1 [N/m], V – limita de material impusă în % [adimensional], Ω – “design space” sau spațiu de proiectare, domeniul în care optimizatorul poate acționa [adimensional], p – penalizare [adimensională]

SIMP interpolează între valorile extreme conform ecuațiilor (5) unde alegerea penalizării [adimensionale] “ p ” mai mici ca 1 impune o probabilitate redusă ca densitățile din zona “gri” să fie considerate, astfel se va micșora raportul rigiditate/volum. Conform lui Hans (Eschenauer H. A., 2001), valoarea numerică ce trebuie imputată penalizării pentru a furniza rezultate corecte pentru zona „gri” este de minimum 3.

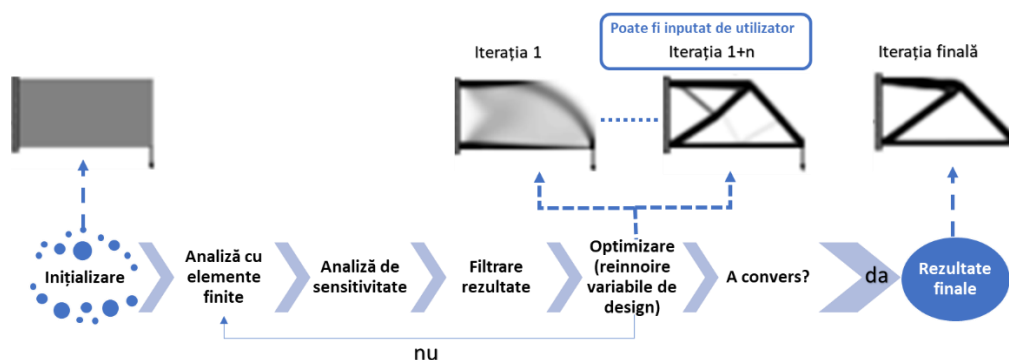


Fig. 4 Fluxul de lucru al algoritmului SIMP (Krylov, 2007)

Algoritmul RAMP (Rational Approximations of Material Properties / Aproximarea Rațională a Proprietăților de Material)

Aproximarea Rațională a Proprietăților de Material (Rational Approximations of Material Properties) RAMP, așa cum este prezentat în (Johnsen, 2013) și în (Gersborg-Hansen A, 2005), este un algoritm ce poate funcționa și cu intrări formate din presiuni, ca de exemplu cele din natură preluate de la vânt, apă, zăpadă etc.

Deși atât SIMP cât și RAMP sunt metode bazate pe variația densității pentru rularea și convergerea algoritmului, RAMP prezintă rezultate mai clare atunci când este nevoie de soluții în cazuri de calcul cu fracția volumică impusă mică (Johnsen, 2013).

Algoritmul ESO (Evolutionary Structural Optimization / Optimizare Structurală Evolutivă)

ESO, așa cum este prezentat de (Querin, Steven, & Xie, 2000), este un algoritm, de tip „hard-kill”, ce permite doar eliminarea de material având ca ideologie faptul că o componentă structurală eficientă are tensiunile pe cât de uniform distribuite posibil (Johnsen, 2013).

Variantele AESO/BESO ESO (Additive ESO/ Optimizare Structurală Evolutivă Aditivă respectiv Bidirectional ESO/ Optimizare Structurală Evolutivă Bidirecțională)

Având la bază algoritmul ESO, în optimizarea structurală au apărut variații ale acestuia, BESO și AESO. În timp ce ESO elimină elemente pe baza tensiunilor acestora, AESO adaugă elemente pentru a obține o structură optimă conform schematicii de mai jos (Johnsen, 2013).

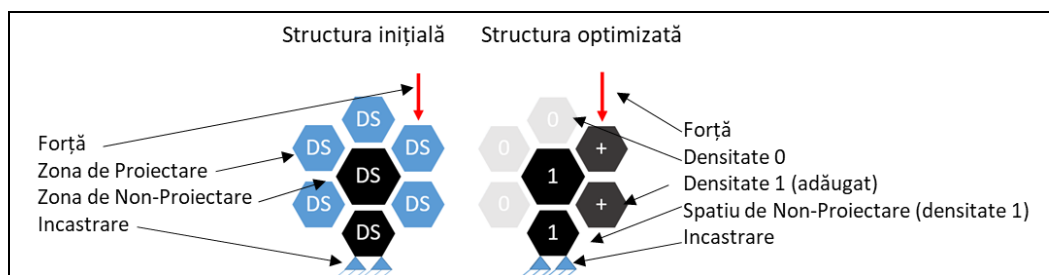


Fig. 5 Exemplificarea schematică a acționării algoritmului AESO – Date de intrare și rezultat (reprezentarea pictografică reprezintă contribuție proprie)

BESO, în schimb, este un algoritm de optimizare topologică, prezentat prima oară tot de (OM Querin, 1998), care funcționează prin înlăturarea (sau adăugarea) unei cantități finite de material (sau elemente) din domeniul de lucru (spațiul de proiectare) conform schematicii de mai jos.

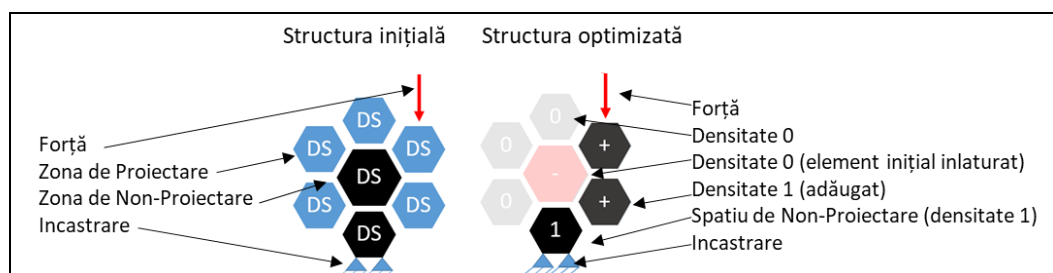
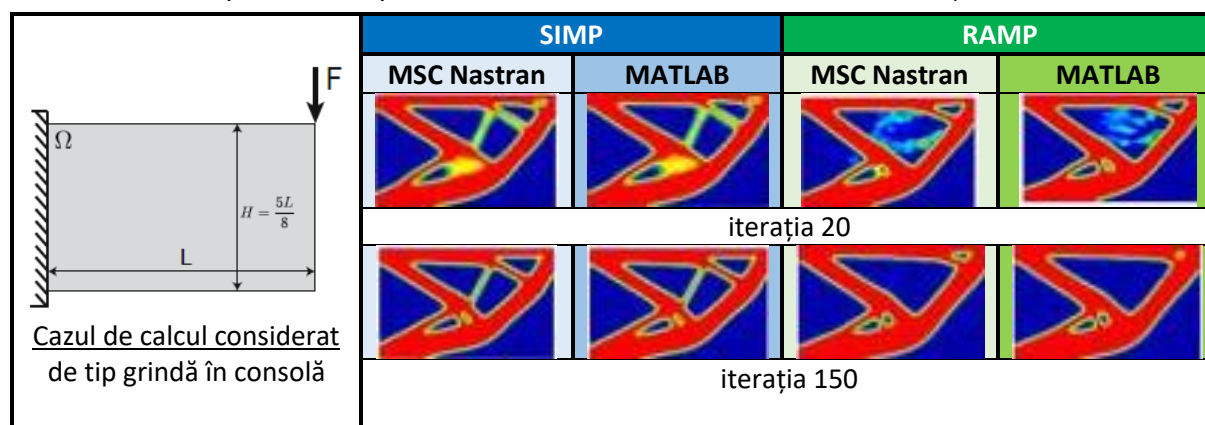


Fig. 6 Exemplificarea schematică a acționării algoritmului BESO – Date de intrare și rezultat (reprezentarea pictografică reprezintă contribuție proprie)

În ANEXA 5 a variantei in extenso a tezei a fost extras și tradus un tabel exhaustiv în care sunt comparați algoritmi de optimizare topologică.

Compararea algoritmilor de bază compilați în Matlab cu cei existenți în aplicațiile comerciale

În continuare se prezintă un exemplu de optimizare topologică în care algoritmi de bază scriși în Matlab sunt comparați cu echivalentul comercial din solverul comercial MSC Nastran. Din lucrarea (B. Barroqueiro, 2019), sunt extrase rezultatele unei probleme clasice de tip grindă în consolă. Aceasta comparație între o aplicație software comercială și codul scris în Matlab (Andreassen, Clausen, Schevenels, Lazarov, & Sigmund, 2011), (Sigmund, 2001) este efectuată odată între Matlab și MSC Nastran, dar și între doi algoritmi de optimizare structurală. Optimizarea este prezentată în toate situațiile la aceleași incrementele de iterații 20, 90, 150, 300 pentru a se putea observa similaritatea între toate situațiile studiate.



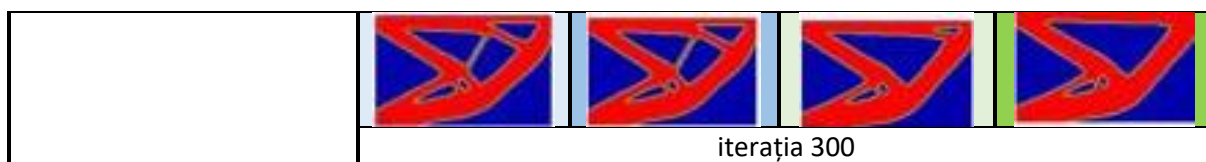


Fig. 7 Optimizare topologică a unei grinzi în consola folosind pentru comparație MSC Nastran și un cod scris în Matlab (B. Barroqueiro, 2019)

Rezultatele complete și explicația lor sunt prezentate în varianta în extenso a tezei.

Erori specifice în optimizarea structurală

Indiferent de aplicația software în care se face optimizarea structurală, există câteva erori specifice care pot să apară în anumite cazuri.

Tab. 4 Exemplificarea vizuala a erorilor din optimizarea topologică (Petersson & Sigmund, 1998)

<p>Diagram (a) shows a beam cross-section with a checkerboard pattern of black and white pixels, representing a 'chessboard' error.</p>	(a) Exemplificarea erorii de tip "tablă de șah"
<p>Diagram (b) shows a beam cross-section with a jagged, pixelated boundary, representing a discretization error with 600 elements.</p>	(b) Exemplificarea erorii dependentei de discretizare - Soluția în cazul unei discretizări de 600 de elemente.
<p>Diagram (c) shows a beam cross-section with a smooth, continuous boundary, representing a discretization error with 5400 elements.</p>	(c) Exemplificarea erorii dependentei de discretizare - Soluția în cazul unei discretizări de 5400 de elemente.

Concluzii

Din analiza stadiului actual al cercetărilor privind optimizarea structurală au rezultat următoarele concluzii:

- S-au identificat metodele principale de optimizare structurală și a fost realizată o clasificare a acestora.
- Introducerea optimizării topologice pe traseul dintre proiectare și analiză structurală reduce drastic numărul de iterații dintre aceste etape, dar nu le elimină total, deoarece optimizarea în sine poate reprezenta un proces iterativ de optimizare și reproiectare a rezultatelor în CAD, optimizând și rezultatul remodelat până când se îndeplinesc constrângerile și funcția obiectiv dorită.
- Conform lucrării (B. Barroqueiro, 2019), unde a fost făcută comparația între algoritmi SIMP și RAMP dintr-un cod MATLAB din literatură și un solver comercial MSC Nastran, cazurile de calcul 2D simpliste dau rezultate similare. În cazuri complexe cu multitudini de constrângeri, materiale diferite, 3D etc. devine irațională folosirea aplicațiilor software personale din punct de vedere al consumului de timp în pre- și post-procesarea cazurilor de calcul.
- Au fost identificați, prezentați și comparați algoritmi uzuali utilizați în optimizarea topologică. În optimizarea topologică, acești algoritmi prezintă un set de erori specifice de calcul, în acest capitol au fost identificate și prezentate aceste erori, dar și soluțiile posibile pentru remedierea sau prevenirea apariției acestora.

PARTEA A II-A

CONTRIBUȚII PRIVIND ELABORAREA UNEI METODOLOGII DE OPTIMIZARE STRUCTURALĂ

Capitolul 3. Direcțiile, obiectivul principal și metodologia de cercetare- dezvoltare

Obiectivul principal al tezei de doctorat este de a dezvolta o metodologie robustă de optimizare structurală pornind de la experiența practică a optimizării unor produse complexe, de a demonstra posibilitatea personalizării acesteia pentru diferite tehnologii, incluzând tehnologii de fabricație aditivă cu pulberi metalice, de a defini reguli de proiectare necesare pentru introducerea cavităților, a metodelor de evacuare a pulberii, a etapelor de producție suplimentare necesare pentru fabricația unei piese complexe cu cavități.

Analiza stadiului actual privind utilizarea tehnologiilor de fabricație aditivă la nivel industrial și optimizarea structurală a produselor fabricate aditiv a reliefat că dezvoltarea unei metodologii de optimizare robuste, găsirea unor soluții practice de utilizare a unor variante de optimizare structurală personalizate pentru un anumit produs fabricat aditiv și documentarea unor elemente cheie în proiecte cu aplicație spațială reprezintă, la momentul actual, subiecte de interes. Pornind de la aceste observații au fost generate următoarele direcții de cercetare-dezvoltare:

Dezvoltarea unei metodologii robuste, personalizabile și detalierea fiecărei etape a acesteia cu elaborarea de reguli pentru realizarea optimizării structurale și interpretarea rezultatelor acesteia, pornind de la experiența practică a optimizării unor produse complexe.

Demonstrarea posibilității personalizării metodologiei de optimizare structurală pentru diferite tehnologii, incluzând tehnologii de fabricație aditivă cu pulberi metalice.

Definirea regulilor de proiectare necesare pentru introducerea cavităților, a metodelor de evacuare a pulberii, a etapelor de producție suplimentare necesare pentru fabricația unei piese complexe cu cavități.

Elaborarea unei metodologii de evacuare a pulberilor din componentele rezultate, acolo unde este cazul.

Metodologia de cercetare-dezvoltare

Adesea, tehnologiile de fabricație aditivă și optimizare structurală nu sunt utilizate la potențialul lor maxim. Pentru fiecare proces de optimizare în parte pot exista inflexiuni ce pot maximiza efectul optimizării în industria spațială, dar și în alte domenii industriale.

Pentru îndeplinirea obiectivului principal, dar și a celor specifice, cercetările realizate se vor desfășura în patru etape principale:

- A. Dezvoltarea și validarea unei metodologii originale de optimizare topologică;
- B. Dezvoltarea unor metode de personalizare a optimizării structurale;
- C. Dezvoltarea de procese necesare proiectării, adaptării și validării unei piese cu cavități fabricată aditiv cu pulberi metalice pentru industria aerospațială, solicitată în proiecte cu Agenția Spațială Europeană;
- D. Analiza comportamentului pieselor realizate prin personalizarea optimizării pentru tehnologiile de fabricație selectate și a metodologiei de optimizare structurală.

Capitolul 4. Dezvoltarea și validarea unei metodologii de optimizare topologică

Introducerea unei etape de optimizare topologică între proiectare și analiză structurală reduce drastic numărul de iterații dintre aceste procese, dar nu le elimină total, deoarece optimizarea în sine reprezintă un proces care presupune iterații, optimizând și rezultatul remodelat până când se îndeplinesc constrângerile și funcția obiectiv dorită.

Un produs optimizat structural poate fi ulterior fabricat printr-o multitudine de tehnologii. Modul de abordare a optimizării poate fi personalizat pentru a se obține produse care să poată fi realizate printr-o tehnologie sau alta. Astfel, un anumit produs poate fi optimizat structural considerându-se că acesta va fi fabricat prin oricare dintre tehnologiile următoare: Tehnologii de semifabricare (Turnare, Extrudare); Tehnologii de fabricare (Prelucrare prin așchiere pe MUCN, asamblare etc.); Tehnologii de fabricație aditivă.

Metodologia de optimizare structurală reprezintă, în această formă, contribuția personală a autorului, în Fig. 8 fiind prezentată forma inițială a metodologiei, urmând ca după validări realizate prin aplicarea acesteia pe studiile de caz din teză să se verifice dacă este robustă și personalizabilă.

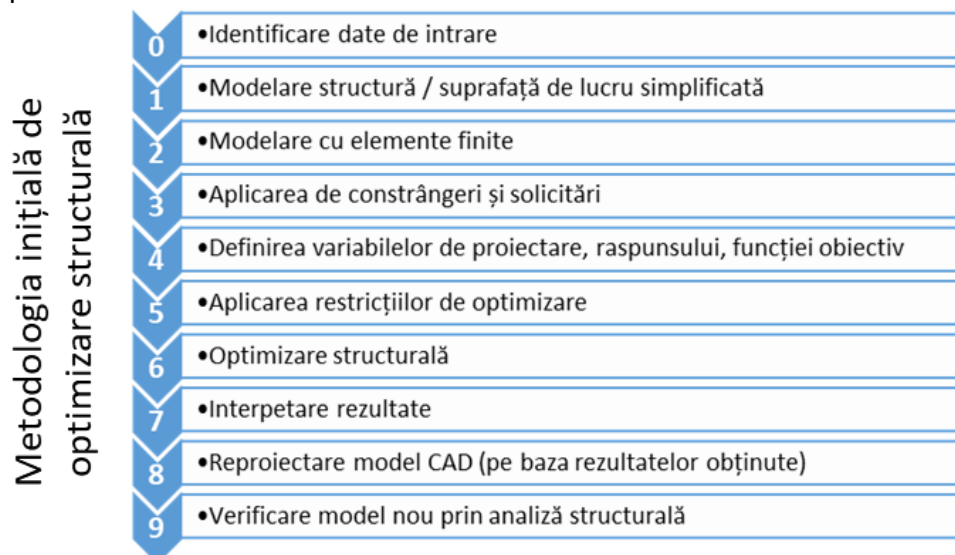


Fig. 8 Metodologia inițială de optimizare structurală

În teză se va studia aplicabilitatea metodologiei de optimizare structurală și metodele de definire rațională care personalizează rezultatul obținut pentru trei tehnologii de fabricație distincte. Se definesc și parcurg patru cazuri de calcul ce vizează obținerea a patru produse ce se pot fabrica prin tehnologii de fabricație distincte. Se vor reproiecta rezultatele obținute pentru tehnologia de fabricație definită ca restricție de proces.

Capitolul 5. Aplicarea metodologiei în cazul asamblărilor nedemontabile

Contextul

În ultimii ani se constată o avalanșă de misiuni spațiale complexe (Dart, Web, Parker, Euclid, etc.) care presupun realizarea de lansatoare și vehicule de reintrare în atmosferă reutilizabile, cu scopul de a reduce costurile de exploatare la minimum. Costul reconstrucției acestora și refolosirii lor este infim prin comparație cu cel necesar creării unui singur obiect pentru o utilizare. Unul dintre obiectivele critice de proiectare în vederea reducerii costurilor este cel de a reduce masa la minimum și de a eficientiza distribuția de material a pieselor.

Descrierea cazului de calcul

Pentru cazul curent a fost necesară conceptualizarea unei structuri metalice care să unească elemente de interfațare frezate, ale echipamentului auxiliar de interfață, folosite în conexiunea cu elicopterul, folosind optimizarea structurală. Structura rezultată se dorește a fi fabricată din profile rectangulare standard prin sudare, astfel preluând avantajul acestora dat de un moment de inerție mare cu o arie minimă, rezultând o masă minimă. Structura sudată va fi făcută tip sandwich pentru a îmbunătăți major comportamentul structurii rezultate la flambaj.

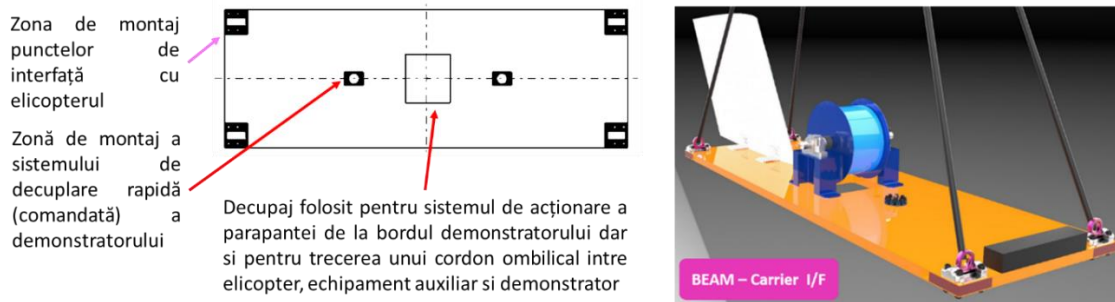


Fig. 9 Echipament auxiliar interfață dintre demonstratorul Space Rider Drop Test și elicopter (CONTRIBUTIE PERSONALĂ Sursa: PROIECT Space Rider Drop Test – INCAS ANEXA 3.1)

Plecând de la datele geometrice, o aplicație software de proiectare CAD a fost utilizată pentru delimitarea clară a spațiului în care se permite obținerea unui rezultat (spațiu de proiectare (P)) față de spațiul în care nu se poate altera mediul geometric prin optimizare (spațiu de non-proiectare (NP)).

Un model 2D a fost generat pentru software-ul specializat HM, format dintr-o suprafață plană și un set de linii ce va fi folosit pentru delimitarea zonelor de lucru.

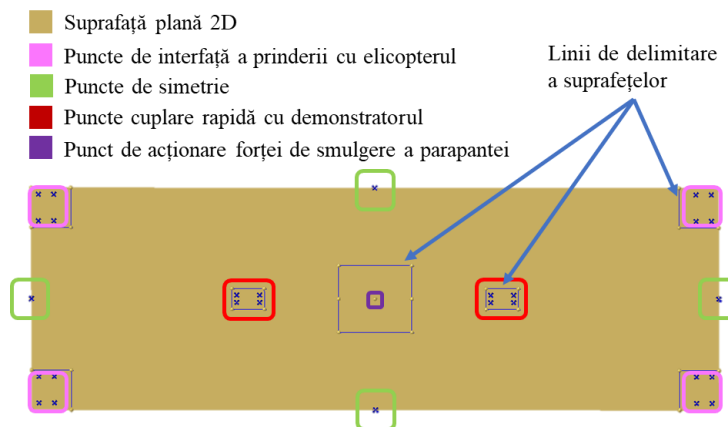


Fig. 10 Geometrie și linii de delimitare în HM

Zonele de P și de NP sunt discretizate cu elemente de 10 mm, impunând totodată nodurilor discretizării din proximitatea punctelor de interes să fie identice cu punctele de fixare sau de acționare a solicitărilor. Discretizarea a fost realizată impunând elemente continue (din punct de vedere dimensional), iar elementele folosite în MEF sunt majoritar quad-uri. Discretizarea este, de asemenea, împărțită în două zone, de P și NP, exact ca suprafețele inițiale, în două grupuri distincte, ambele fiind legate prin noduri comune.

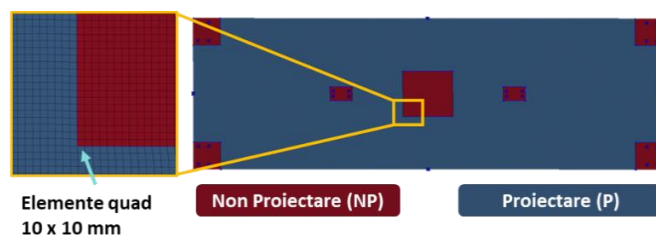


Fig. 11 Zone de lucru discretizate în HM

Pentru discretizările realizate se introduc proprietăți generalizate de material pentru aluminiu în cartela de material MAT1 împreună cu grosimea de 40 de mm pentru elemente. Complementar datelor de intrare de tip geometric se introduc datele de intrare numerice de tip solicitări, constrângeri ș.a.m.d. Aplicarea constrângerilor și forțelor a fost făcută folosind punctele inserate în geometrie conform schematicii de mai jos.

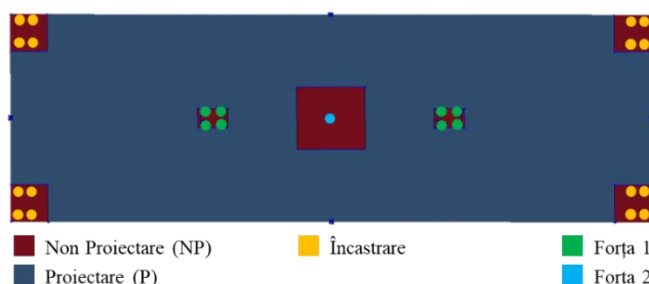


Fig. 12 Identificare zone de aplicare pentru constrângeri și solicitări (CONTRIBUȚIE PERSONALĂ Sursa INCAS - PROIECT Space Rider Drop Test. Mai multe informații în ANEXA 3.1)

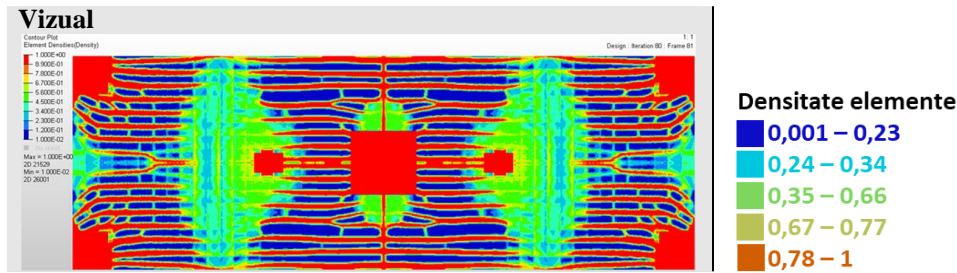
În urma aplicării forțelor și constrângerilor, în aplicația software specializată HM, a fost creat un caz de calcul liniar static. A fost definit tipul de optimizare folosită în mersul de calcul, pentru cazul de calcul curent a fost aleasă optimizarea topologică. Scopul acestei analize de optimizare este de a defini geometria structurii astfel încât să poată susține sarcinile impuse și să se încadreze în spațiul de proiectare impus. Atingerea scopului se face prin respectarea constrângerilor impuse. Funcția obiectiv a acestei analize este de minimizare a răspunsului, care în cazul nostru este masa. Definierea cazului de calcul pentru optimizarea topologică începe prin introducerea unor variabile de calcul asupra elementelor vizate. În cazul nostru, elementele vizate sunt cele 2D din spațiul de Proiectare (P).

Rezultatele și prelucrarea acestora

Rezultatele obținute sunt vizualizate cu aplicația software HyperView din suita Altair (vezi ANEXA 6). Acestea pot fi vizualizate iterativ cu iterativ, pentru a se vedea parcursul de calcul sau se poate vedea direct ultima iterativă ce reprezintă și rezultatul optimizării, momentul în care ea se oprește. Optimizatorul oprește calculul în una din două condiții: a ajuns la un rezultat de succes, ori a încercat până la un număr de iterații să ajungă la cel mai bun rezultat, dar nu a reușit să îl identifice.

Optimizatorul transformă discretizarea inițială, element cu element, în funcție de direcția solicitărilor principale, în elemente de valoare "1" și "0". "1" fiind reprezentat cu roșu în vizualizarea din Tab. 5 și evidențiind direcțiile principale ale solicitărilor, respectiv "0" fiind colorat cu albastru evidențiind zonele nesolicitate.

Tab. 5 Rezumatul parametrilor utilizați în obținerea rezultatelor optimizării studiului de caz curent și rezultatul optimizării (extras)



Folosind rezultatele sintetizate mai sus și ținând seama de faptul că se dorește utilizarea unui profil de secțiunea 50x50 mm, se determină zonele optime de plasare a profilelor adunând lățimea componentelor (șirurilor de elemente de densitate 1) pentru a determina numărul de profile necesar în structură pe lungime și pe lățime. Se reconstruiește un model 3D complet prin intermediul unei aplicații software de proiectare CAD. Pentru modelul 3D, ținând seama de magnitudinea solicitărilor, dar și de aria adunată în secțiuni a elementelor cu densitate 1, se aleg profile de aluminiu cu grosimea maximă disponibilă în comerț la acel moment la furnizorii locali pentru secțiunea de 50x50 mm, aceasta fiind de 5 mm. Rezultatul reproiectat în CAD este alcătuit din profile de aluminiu reprezentate Fig. 13 în culoarea oranj.

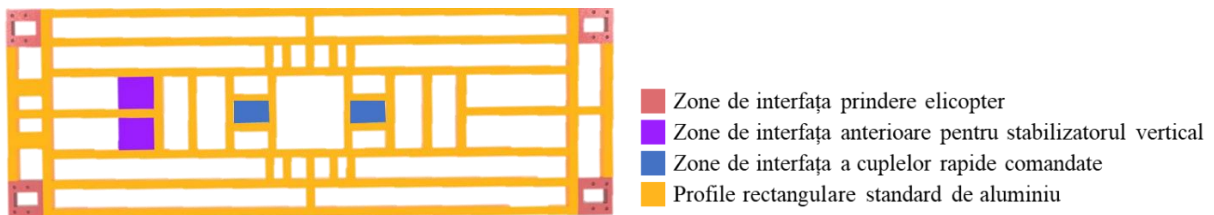


Fig. 13 Rezultatul reproiectat în CAD

Profilele rectangulare standard sunt alese de grosime identică maxim disponibilă (5mm) și vor fi sudate de zonele de interfață care vor fi prelucrate prin frezare din aluminiu (EN AW 7075). Sub și deasupra structurii prezentate se va monta, ulterior, câte o tablă de 3 mm de aluminiu EN AW 7075 prin asamblare demontabilă, pentru conferirea unei rigidități superioare. Odată ce toate celelalte elemente sunt integrate, dispozitivul este gata pentru executarea scopului pentru care a fost realizat.

Structura rezultată prezintă, conform variabilelor de calcul impuse, o simetrie în două plane (longitudinal și transversal) ce asigură distribuția uniformă a solicitărilor, dar și simplificarea procesului de fabricație.

Concluzii

Rezultatul a fost verificat de echipa de analiză structurală din cadrul INCAS [sursă INCAS – PROIECT Space Rider Drop Test ANEXA 3.1] în configurație completă și a fost validat din punct de vedere structural.

Metodologia inițială de optimizare structurală a fost folosită și validată în acest caz personalizat pentru ansambluri sudate, se observă că metodologia dezvoltată este robustă fiind respectată în totalitate.

Un set de reguli este extras în urma studiului de caz prezentat pentru cazuri de optimizare simplificate la suprafețe respectiv elemente 2D, acestea sunt prezentate în varianta in extenso a tezei.

Capitolul 6. Aplicarea metodologiei în cazul pieselor prelucrate prin aşchiere

Contextul

În ultimii ani se constată o tendință crescătoare de a realiza demonstratoare cu decolare și aterizare verticală (VTVL) autonome. Scopul utilizării unor asemenea vehicule este acela de a reduce costurile de exploatare la minimum prin recondiționarea acestora, dacă este cazul, și re folosirea lor într-o misiune nouă, costul fiind infim comparativ cu cel necesar creării unui obiect pentru o singură utilizare. Se aduc contribuții privind personalizarea optimizării structurale pentru fabricația prin prelucrare prin frezare pe un centru CNC a unei componente structurale vitale pentru un vehicul de tip VTVL cu motor turbojet ca parte din proiectul Demonstrator Technology Vehicle (DTV) (vezi ANEXA 3.2) într-un proiect cu Agenția Spațială Europeană (ESA) condus de Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare Aero spațială "Elie Carafoli". Acest proiect face parte din Programul ESA de Pregătire a Lansatoarelor Viitoare sau ESA's Future Launchers Preparatory Programme.



Fig. 14 Vehiculul DTV în zbor captiv (ESA, Demonstrating flight sequences for reusability, 2020)

Vehiculul este singurul de mărimea aceasta în Europa și INCAS este singura entitate care a dezvoltat în contract cu Agenția Spațială Europeană un prototip de un asemenea gabarit.

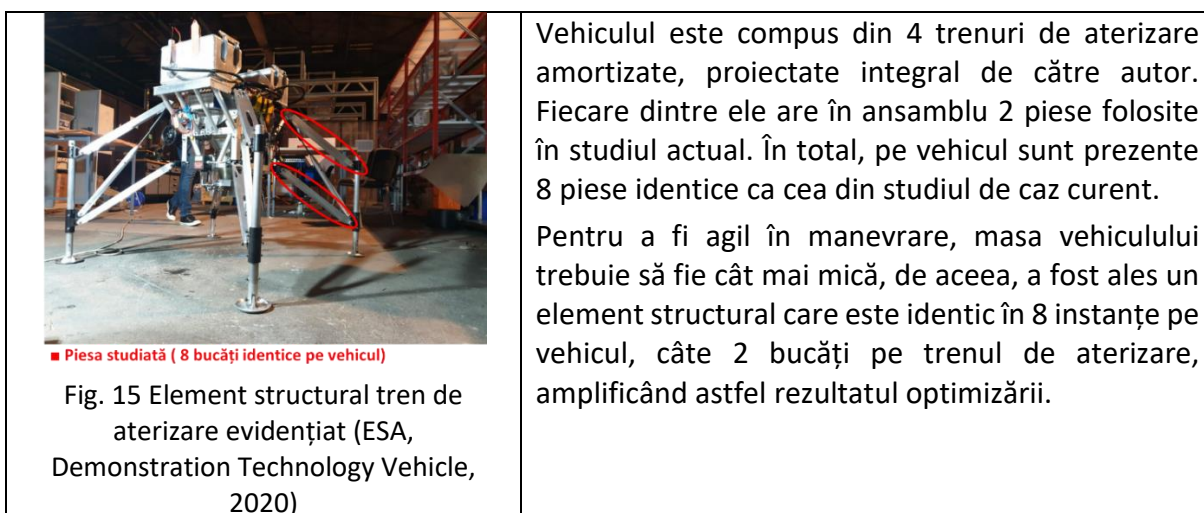


Fig. 15 Element structural tren de aterizare evidențiat (ESA, Demonstration Technology Vehicle, 2020)

Descrierea cazului de calcul

Cazul de calcul curent a avut ca scop demonstrarea utilizării personalizării optimizării structurale pentru piese ce se doresc a fi prelucrate pe mașini de frezat CNC cu 3 axe.

Obiectul de studiu pentru această optimizare a fost un element structural dintr-un ansamblu al unui tren de aterizare pentru un vehicul cu decolare și aterizare verticală (vezi Fig. 15).

Există mai multe aplicații software specializate în optimizare structurală pe piață, în cazul curent s-a dorit obținerea unui rezultat rapid, cu efort minim de pre- și post- procesare. Pentru acest caz, aplicația software INSPIRE este cea mai potrivită pentru acest tip de calcul deoarece optimizarea se face pe un solid 3D. Când se dorește optimizarea unei geometrii deja existente, având drept funcție obiectiv cea de minimizare a masei, este necesară extinderea spațiului de lucru în aplicații de proiectare CAD sau direct în aplicația de optimizare, altfel spus a zonei de P.

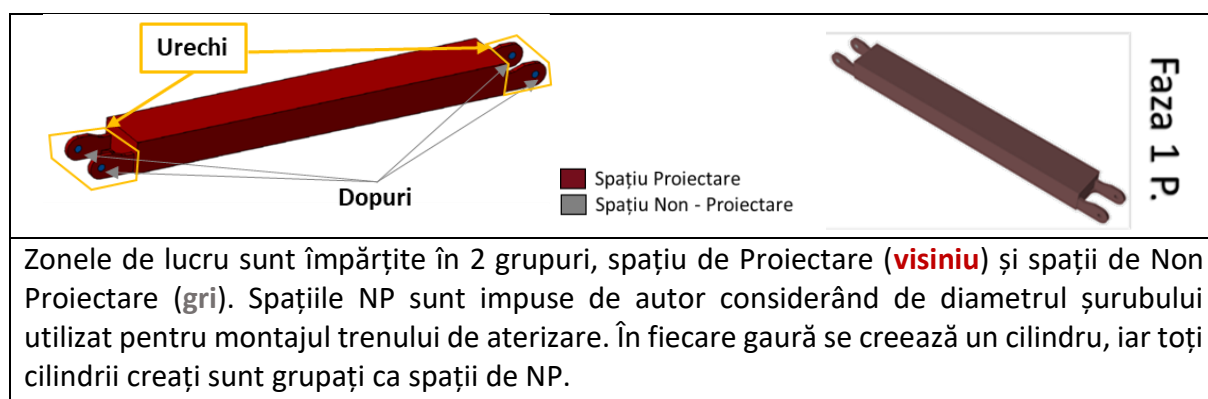


Fig. 16 Modelul CAD delimitat în spații P și NP

Rezultatul generat a fost introdus în INSPIRE, împărțit în spații distincte pentru P și NP conform Fig. 16, se discretizează automat de către programul software de optimizare cu o dimensiune medie a elementului rețelei mesh de 10 mm (valoare numerică impusă de autor), se introduc proprietățile de material pentru aluminiu EN AW 7075 și se aplică constrângerile respectiv forțele folosind puncte inserate în geometrie conform Fig. 17.

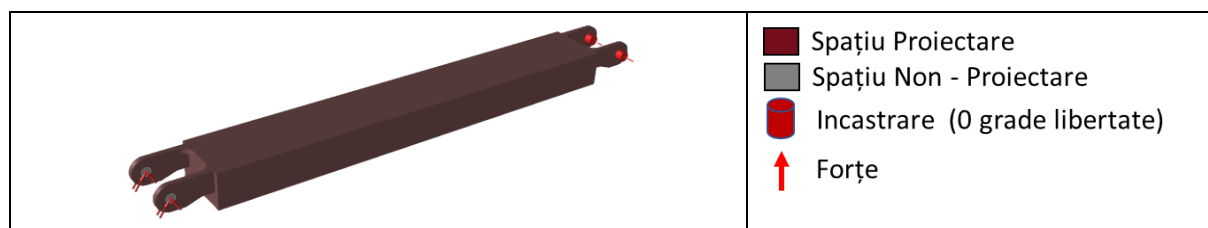


Fig. 17 Solicitări și constrângeri aplicate în INSPIRE

A fost definit tipul de optimizare folosită în mersul de calcul, pentru cazul de calcul curent a fost aleasă optimizarea topologică. Scopul acestei analize de optimizare este de a defini geometria structurii astfel încât să poată susține sarcinile impuse și să se încadreze în spațiul de proiectare impus. Atingerea scopului se face prin respectarea constrângerilor impuse. Odată definite cazurile de calcul, am stabilit etapele unui set de scenarii de optimizare în care am variat parametrii, etapizat, după cum este prezentat în continuare:

- Etapa 1 Proiectarea (Etapa 1 P.) – modelul extins introdus inițial în aplicația software de optimizare;
- Etapa 1 Optimizarea – primul set alcătuit din 8 faze de optimizări și rezultate obținute;

- Etapa 2 Reproiectarea (Etapa 2 Rep.) – Identificarea elementelor structurale cheie sau comune între rezultatele obținute din Etapa 1 și reproiectarea 3D CAD a acestora;
- Etapa 2 Optimizarea – al doilea set alcătuit din 4 faze de optimizări și rezultate obținute;
- Reproiectarea detaliată – Identificarea elementelor structurale cheie sau comune între rezultatele obținute din Etapa 2 și reproiectarea 3D CAD a acestora.

Etapele metodologiei de optimizare încep prin etapa de proiectare a modelului descrisă în subcapitolele anterioare și continuă cu etapa de optimizare. Pentru fiecare fază din etapele de optimizare cazurile de calcul au fost variate în funcție de seturile de parametri prezentați în varianta in extenso a tezei. În interpretarea rezultatelor, autorul generează și utilizează regulile de interpretare și reproiectare a rezultatelor optimizării structurale adaptate pentru fabricarea prin prelucrare pe mașini de frezat CNC în 3 axe. Etapele de proiectare-optimizare sunt reiterate pentru a ajunge la un rezultat final.

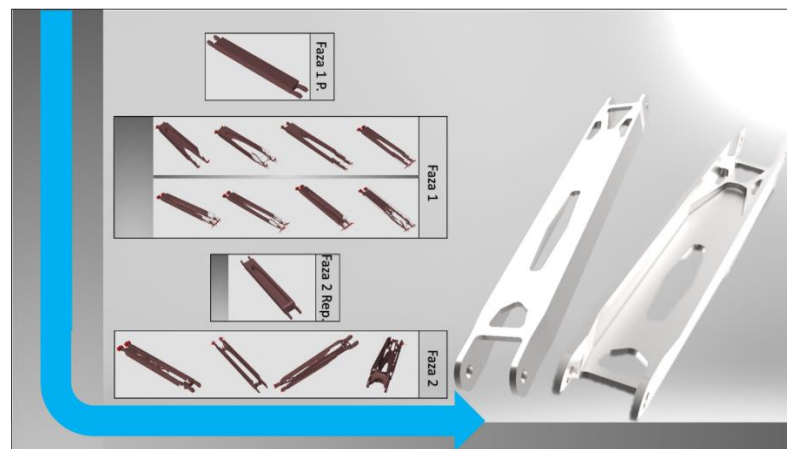


Fig. 18 Parcurs complet al cazului de calcul (Contribuție proprie. Sursa INCAS - PROIECT DTV. Mai multe informații în ANEXA 3.2)

Piesa obținută a fost fabricată fără probleme în multiple bucăți și face parte dintr-o variantă mult mai nouă a unui tren de aterizare prezentat la începutul cazului de calcul.

Influența parametrilor de optimizare structurală în INSPIRE, extrasă din calculele realizate pentru studiul de caz curent

În baza Etapei 1 și a fazelor de calcul al acesteia, necesare în obținerea unui rezultat pentru reproiectare, un sumar al variației parametrilor a fost realizat pentru a scoate în evidență impactul acestora asupra rezultatului optimizării. Același sumar al variației parametrilor a fost realizat și pentru Etapa 2 de optimizare și a fazelor de calcul al acesteia. Variația parametrilor tabelară împreună cu concluziile autorului privind rezultatele obținute sunt prezentate în varianta in extenso a tezei.

Concluzii

Rezultatul a fost verificat de echipa de analiză structurală din cadrul INCAS [sursă INCAS – PROIECT DTV ANEXA 4.2] în configurație completă și a fost validat din punct de vedere structural.

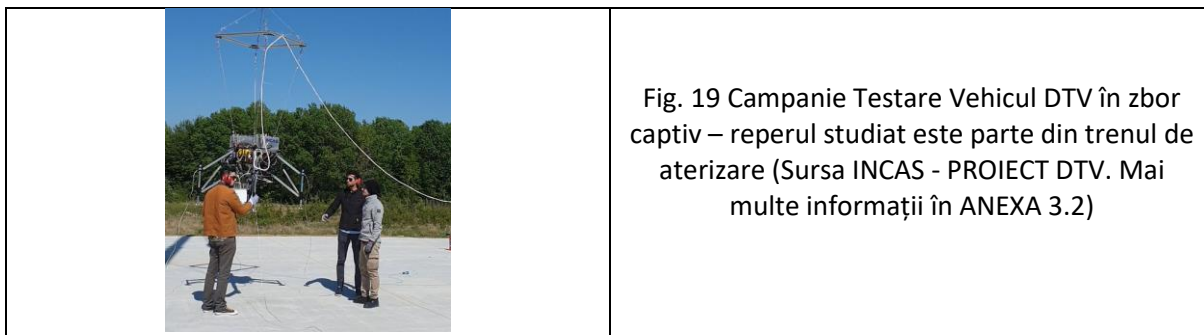
Metodologia inițială de optimizare structurală a fost utilizată și validată în cazul de calcul din acest capitol. Prin parcurgerea acestui caz de calcul se demonstrează că metodologia menționată este robustă și personalizabilă nefiind necesar ca etapele acesteia să fie modificate, ci fiind nevoie doar de multiplicarea unor etape specifice, în sistem iterativ, pentru a obține rezultatele dorite.

Optimizarea structurală poate fi personalizată pentru a obține rezultate fezabile pentru o multitudine de tehnologii de fabricație.

În cazul de față a fost nevoie de perfecționarea rezultatelor prin rularea unei noi faze de optimizare structurală.

Reproiectarea geometrică în acest caz se face prin identificarea de zone cheie comune în toate cazurile de calcul (zone cu lipsă de material sau zone cu elemente structurale).

Un set de reguli este extras în urma studiului de caz prezentat pentru obținerea unui reper prin optimizarea structurală cu elemente 3D adaptată pentru fabricarea prin prelucrare pe mașini de frezat CNC în 3 axe.



Capitolul 7. Studiu de caz 1 – Ansamblu de repere prelucrate pe o mașină cu comandă numerică

În ultimii ani, se constată o tendință crescătoare de noi lansatoare și noi vehicule de reintrare în atmosferă cu scopul reducerii costurilor de exploatare la minimum. Costul reconstrucției acestora și refolosirii lor este infim prin comparație cu cel necesar creării unui singur obiect pentru o utilizare.

Unul dintre obiectivele critice de proiectare este cel de a reduce masa la minimum și de a eficientiza distribuția de material a pieselor pentru a îmbunătăți totodată și forma structurală din punct de vedere al comportamentului mecanic.

Studiul de caz prin care se aduc contribuții privind personalizarea optimizării structurale a unui ansamblu de piese pentru prelucrarea prin frezare pe o mașină de frezat de tip centru CNC a fost folosit ca parte din proiectul Space Rider Drop Test într-un proiect cu Agenția Spațială Europeană (ESA), Centrul Italian de Cercetare Aerospațială (CIRA), Thales Alenia Space Italia filiala din Torino (TAS-I), (vezi ANEXA 3.1).

Descrierea cazului de calcul

În cazul de studiu curent s-a urmărit demonstrarea personalizării optimizării structurale a unui ansamblu de piese concepute pentru a fi fabricate prin frezare pe un centru CNC în 3 axe. Se urmărește ca rezultatul optimizării să fie separat în piese distincte ce pot fi asamblate între ele cu un sistem șurub-piuliță sau șurub-insertie elicoidală. Se urmărește specific fabricația prin prelucrare pe MUCN în 3 axe pentru a reduce costul de producție.

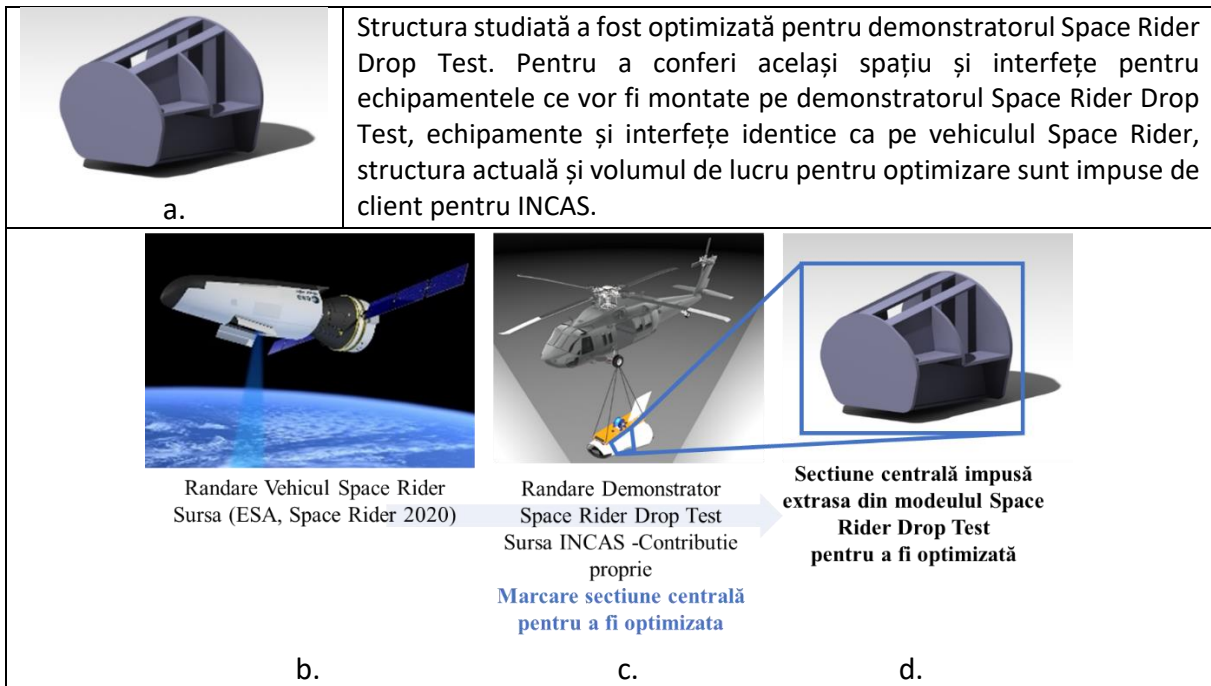


Fig. 20 a-d Structura inițială (a (Cismilianu, et al., 2022))

Respectând structura inițială, aceasta a fost redusă la suprafețe într-o aplicație software de proiectare CAD. Ansamblul de suprafețe a fost introdus în software-ul specializat HM și împărțit în două grupuri ce vor deveni spații de proiectare și non-proiectare. Spațiile de P și de NP sunt discretizate cu elemente de 10 mm impunând totodată nodurilor discretizării din proximitatea punctelor de interes să fie identice cu punctele de fixare sau de acționare a solicitărilor. Proprietățile materialului considerat se adaugă în proprietățile elementelor discretizate în "MAT1" împreună cu grosimea (T) elementelor pe care o considerăm inițial de 40mm. În continuare se aplică constrângerile și forțele folosind punctele inserate în geometrie conform Fig. 21. Solicitățile aplicate sunt considerate a fi similare cu cele induse de aterizarea unui vehicul de reintrare, iar punctele solicitate sunt considerate punctele de interfață ale trenului de aterizare, montat prin asamblare demontabilă.

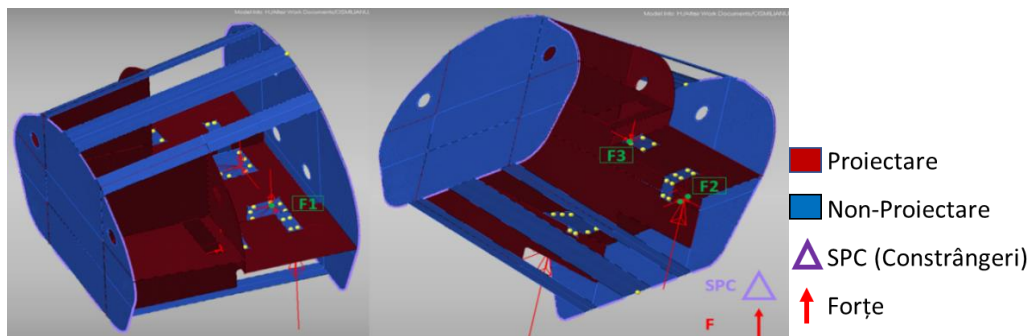


Fig. 21 Aplicare constrângeri și solicitări (Cismilianu, et al., 2022)

În urma aplicării forțelor și constrângerilor, a fost creat un caz de calcul liniar static și a fost definit tipul de optimizare, pentru cazul de calcul curent a fost aleasă optimizarea topologică. Scopul acestei analize de optimizare este de a defini geometria structurii astfel încât să poată susține sarcinile impuse și să se încadreze în spațiul de proiectare impus.

Influența parametrilor în optimizarea structurală

Se analizează influența câtorva parametri în rezultatele optimizării structurale. Astfel, s-a variat grosimea (T) elementelor, dimensiunea minimă (mD) și dimensiunea maximă (MD)

a elementelor componente generate prin optimizare. Totodată, a fost impusă o simetrie în planul XOZ. Distanța minimă dintre componente va fi considerată autogenerată de optimizator în baza valorilor numerice introduce pentru mD și MD, iar limita de curgere și forțele aplicate nu vor fi modificate față de valorile din datele de intrare.

Funcția obiectiv este minimizarea răspunsului care în acest caz este masa

S-au prezentat variațiile parametrilor și influența acestora asupra rezultatelor, începând cu cazul inițial. Au fost prezentate doar cazurile relevante și nu totalitatea cazurilor studiate.

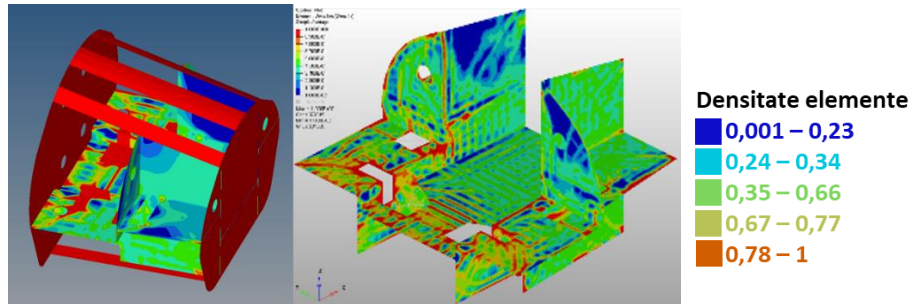


Fig. 22 Comparație între rezultatele optimizării cazurilor 1 (a.) și 5 (b.) (Contribuție proprie) (Cismilianu, et al., 2022)

După cum se poate observa și în Fig. 22, varierea corectă a parametrilor T, mD și MD pot transforma un rezultat greu de interpretat în ceva coerent.

Concluzii

Rezultatul a fost reproiectat și verificat de echipa de proiectare, respectiv de analiză structurală din cadrul INCAS (vezi ANEXA 3.1) în configurație completă și a fost validat din punct de vedere structural.

În cazul de calcul curent, metodologia inițială de optimizare structurală este respectată și validată în totalitate demonstrând că aceasta este robustă și în cazul în care optimizarea a fost personalizată pentru un ansamblu de repere prelucrate prin așchiere pe centre de frezare CNC.

Se observă influența parametrilor asupra rezultatelor optimizării și se determină păstrarea unui raport între parametrii mD și MD pentru găsirea mai rapidă a unor rezultate concludente ce pot fi utilizate în reproiectare CAD. Se prezintă că, odată menținut acest raport, prin modificarea grosimii de la un caz la altul, rezultatul poate fi rafinat.

Se dezvoltă și prezintă un set de reguli extrase în urma studiului de caz prezentat pentru un ansamblu de repere prelucrate pe o mașină cu comandă numerică simplificate la suprafețe respectiv elemente 2D.

Optimizarea unui ansamblu ale cărui componente au fost obținute prin frezare pe un centru CNC este fezabilă și reprezintă un proces relativ rapid, unde rezultatele obținute au dus la o reducere a masei cu ~37% și o creștere a rezultatelor analizelor structurale cu ~26,5%.

Capitolul 8. Studiu de caz 2 – Variante de personalizare a optimizării structurale aplicate pieselor fabricate aditiv

Contextul

Optimizarea structurală a unui produs/reper care urmează a fi fabricat prin tehnologii de fabricație aditivă poate fi aplicată într-o gamă largă de industrii (aerospațială, militară, fabricației de motoare pentru vehicule, medical/dentară, (Ciobota, Gheorghe, & Despa,

2019)). În domeniul aerospațial se întâlnesc numeroase tipuri de piese/produse cu potențial mare de reducere a masei în contextul în care acestea ar fi fabricate prin tehnologii aditive, (Uriondo, Esperon-Miguez, & Perinpanayagam, 2015), (Najmon, Raeisi, & Tovar, 2019). Optimizarea structurală se poate aplica în industria aerospațială asupra lansatoarelor curente, lansatoarelor în dezvoltare, vehiculelor cu decolare și aterizare verticală, dar și misiunilor satelitare de anvergură.

Toți sateliții de anvergură au anumite motoare cu gaz rece poziționate strategic astfel încât să se poată regla atitudinea păstrând orientarea sau modificând-o pentru a îndeplini misiunea. Aceste propulsoare se găsesc într-o gamă variată de dimensiuni în ceea ce privește forța de acționare, dar și cu principii de funcționare diferite (Krejci & Lozano, 2018), (Wang & Xie, 2009).

Studiul de caz prin care se aduc contribuții privind personalizarea optimizării structurale pentru piese fabricate aditiv a fost folosit ca parte din proiectul EUCLID, (vezi Fig. 23). Proiectul a fost realizat cu Agenția Spațială Europeană (ESA), și ANEXA 3.3 fiind implicate 100 de instituții din UE, dar și NASA din USA. INCAS a avut rol în proiectarea, analizarea, testarea, asamblarea și integrarea în clean-room a tuturor elementelor structurale de zbor ce au rolul de a menține motoarele satelitului EUCLID în poziție prestabilită.

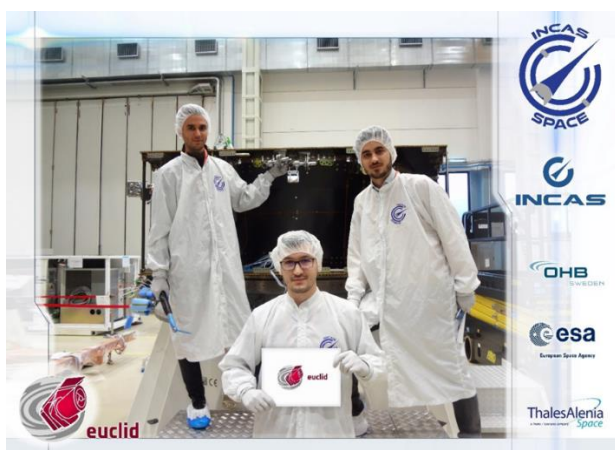


Fig. 23 Echipa de integrare INCAS lângă structura satelitului EUCLID în clean-room TAS-I Torino. Echipă condusă de **Alexandru Cișmilianu** [Sugestia de așezare și imaginea principală reprezintă contribuție personală din sursa INCAS- PROIECT EUCLID. Mai multe informații în ANEXA 3.3]

În spatele echipei de integrare se află structura de rezistență a satelitului EUCLID. Ca ordin de mărime, structura din spatele nostru este cea marcată în Fig. 24 cu roșu.

Satelitul EUCLID, deși a fost planificat pentru lansarea cu Ariane 6 și ulterior cu Soyuz, a fost lansat pe 01 iulie 2023 cu lansatorul SpaceX Falcon 9 (vezi Fig. 25) din Cape Canaveral Florida. EUCLID este un satelit de dimensiuni medii realizat pentru domeniul astronomiei și astrofizicii, cu rolul principal în investigarea energiei și materiei negre. Acesta va investiga istoria expansiunii universului din ultimele 10 miliarde de ani, prin verificarea expansiunii actuale alimentate de o componentă momentan misterioasă, energia neagră.



Fig. 24 Randarea satelitului EUCLID având structura evidențiată cu culoarea roșie (ESA, ESA's fleet across the spectrum poster, 2017 edition, 2017)



Fig. 25 Lansare satelit Euclid cu SpaceX Falcon 9 și extras din redarea camerelor a imaginii decuplării satelitului Euclid în spațiu cosmic (SkyNews, 2023)

În continuare, două dintre aceste elemente structurale au fost inițial alese pentru a fi realizate prin tehnologia de fabricație aditivă, iar contribuțiile cu privire la unul din acestea sunt prezentate în subcapitolele următoare.

Identificarea datelor de intrare

Datele de intrare, punctele de interfață, volumul de lucru ș.a.m.d. sunt impuse de OHB Suedia. Solicitățile cele mai mari apar la lansare. Cerințele prezentate sunt cele mai importante în cazul structurilor spațiale, cea mai importantă fiind îndeplinirea frecvenței modale minime. Prin îndeplinirea acestei cerințe dure, în general se îndeplinesc automat celelalte sau mai este nevoie doar de mici modificări locale.

Anvelopa de lucru, prinderile și poziția propulsoarelor sunt impuse de OHB Suedia și prezentate în Fig. 26.

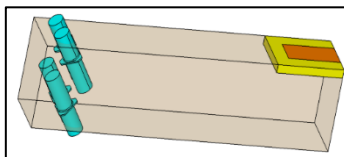


Fig. 26 Prezentare date de intrare geometrice (Cismilianu, et al., 2017)

Poziție propulsoare
Anvelopa disponibilă
Joncțiune de fixare

Tab. 6 Legendă date de intrare geometrice impuse de OHB Suedia

Pregătirea geometriei pentru optimizare

În cazul optimizării trebuie delimitată clar zona în care se dorește a se obține structura optimă în spațiu de proiectare și de non proiectare. În cazul curent, considerăm spațiul de proiectare zona gri din Tab. 7, iar spațiul de non-proiectare, zona turcoaz.

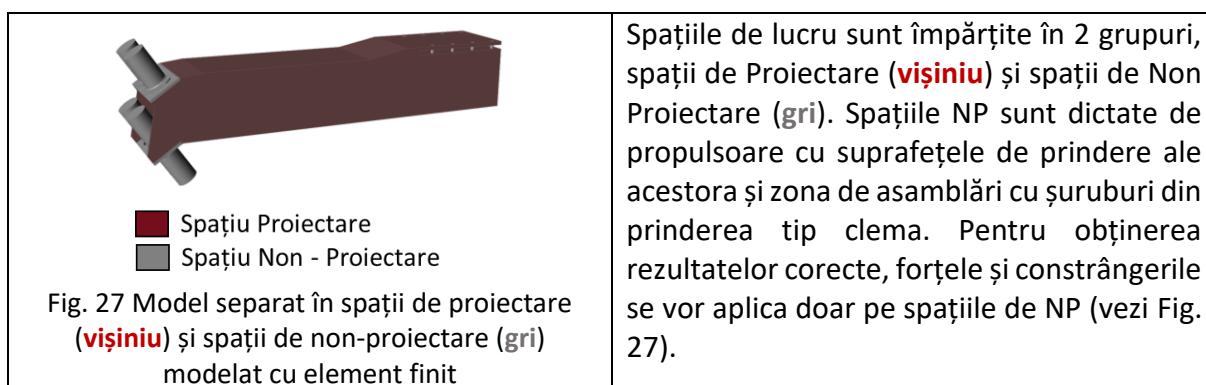
Tab. 7 Geometrie modificată pentru optimizare

	<p>Plecând de la anvelopa impusă (vezi Fig. 26 și Tab. 6), în zona de prindere considerăm o prindere cu un element geometric de tip “clemă” (vezi Tab. 7). Aceasta este considerată potrivită deoarece solicitările la care trebuie să reziste structura rezultată sunt foarte mari, iar prin prinderea sugerată se îmbunătățește radical zona de prindere din punct de vedere al rigidității structurale. În Tab. 7, în partea inferioară a fost eliminat material în afara zonei directe de prindere a propulsoarelor. În Tab. 7 în partea superioară a fost implementată o trecere până de la nivelul prinderii la nivelul motoarelor.</p>
--	---

În cazul calculelor în care se dorește maximizarea frecvenței modale, experiența dovedește că la piesele lungi se urmărește realizarea unei prinderi cât mai ferme, iar pe măsură ce ne îndepărtăm de prinderi, trebuie să se aloce o masă din ce în ce mai mică. Practic, se dorește o trecere lină de la o prindere fermă la capătul piesei unde se dorește o masă minimă.

Modelarea cu Elemente Finite (MEF)

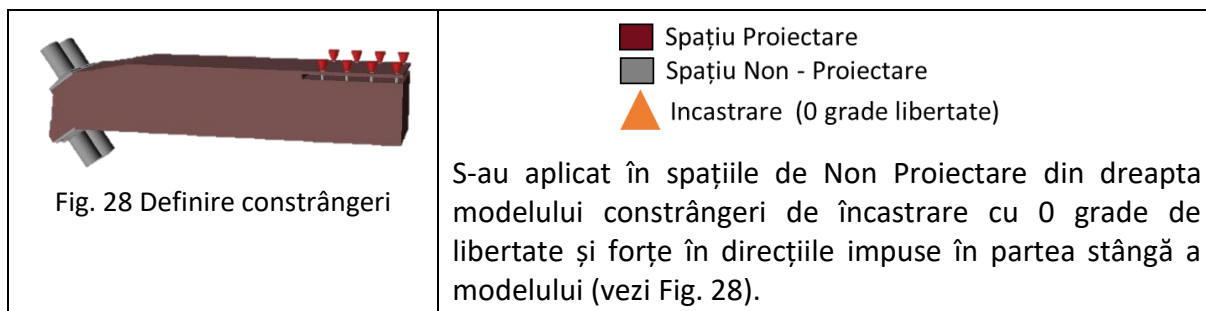
Pentru optimizarea curentă a fost utilizată o aplicație software din suita Altair Hypermesh numit INSPIRE Solidthinking. Aici se pot realiza o multitudine de optimizări diferite și analize pentru verificarea rezultatelor. A fost considerată o discretizare cu elemente 3D HEX cu un ordin de mărime general de 20 de mm. În INSPIRE, modelarea MEF se face automat, utilizatorul având impact minim asupra tehnicii de modelare.



Stabilirea solicitărilor și parametrilor de optimizare

Având în vedere că optimizarea pornește de la un volum de lucru, practic de la "0", se va aplica una din optimizările de concept întrucât se dorește realizarea unei optimizări conceptuale dintr-un volum 3D, singurul tip de optimizare prin care se poate aplica în acest caz este optimizarea topologică. Scopul acestei analize de optimizare este de a defini geometria structurii de menținere în poziție a propulsoarelor astfel încât să poată să reziste la sarcinile impuse și să se încadreze în spațiul de proiectare reprezentat în Fig. 26. Atingerea scopului se face prin respectarea constrângerilor. Astfel, valoarea frecvenței primului mod propriu al structurii trebuie să fie minimum 90 Hz. De asemenea, structura rezultată trebuie să reziste la o sarcină combinată de 30g pe fiecare direcție principală. Funcția obiectiv a acestei analize este de maximizare a răspunsului, care în acest caz este rigiditatea, respectând totodată și constrângerile și sarcinile menționate anterior. Prin maximizarea rigidității se crește valoarea primei frecvențe modale a structurii.

În cazul curent, după modelarea cu elemente finite, se introduc constrângerile în zona de prindere demontabilă a piesei ce se dorește a fi optimizată topologic (vezi Fig. 28).



Considerând că piesa va fi fabricată prin tehnologii de fabricație aditivă cu pulberi metalice, s-au identificat a materialele uzuale în industria aerospațială, dar și auto, pe care se poate fabrica o piesă cu de această lungime.



Fig. 29 Mașina de fabricație aditivă Concept Laser X-Line 1000R (LaserSystemsEurope, 2014)

Singura compatibilitate între dimensiunile piesei de fabricat, fabricant și mașină de fabricație aditivă a fost identificată ca fiind o mașină de fabricație aditivă de la firma Concept Laser, X line 1000R al unui subcontractor INCAS (Fig. 29). Materialul special dezvoltat pentru aceasta este AISi10Mg.

A fost ales ca obiectiv pentru optimizarea topologică maximizarea rigidității optând pentru paramentul de proiectare variabil ca fiind masa. Practic, a fost dorită îndeplinirea obiectivului de maximizare a frecvenței prin minimizarea masei. Funcția obiectiv este de maximizare a rigidității cu scopul atingerii frecvenței de 90 Hz prin minimizarea masei volumului (spațiului) de proiectare cu 95%. Având în vedere că structura este perfect simetrică într-un plan, a fost impusă o constrângere în model ca rezultatul optimizării să fie simetric.

Particularizarea cazului de calcul și rezultatele obținute

Odată definite solicitările și constrângerile cazului de calcul, am stabilit etapele unui set de optimizări, astfel:

- Etapa 1 Proiectare (Etapa 1P) – modelul extins introdus inițial în aplicația software de optimizare Fig. 28;
- Etapa 1 Optimizare – primul set de optimizări și rezultate obținute;
- Etapa 2 Reproiectare (Etapa 2 Rep.) – Identificarea elementelor structurale cheie sau comune între rezultatele obținute din Etapa 1 și reproiectarea 3D CAD a acestora;
- Etapa 2 Optimizare – al doilea set de optimizări și rezultate obținute;
- Reproiectarea detaliată – Identificarea elementelor structurale cheie sau comune între rezultatele obținute din Etapa 2 și reproiectarea 3D CAD a acestora.

Etapa 1 Proiectare

Etapa 1 de proiectare a fost prezentată în subcapitolele anterioare.

Etapa 1 - Optimizare

Parametrii utilizați în optimizare sunt prezentați sub forma unor tabele ce conțin seturi de parametri cu privire la constrângerile geometrice și funcția obiectiv.

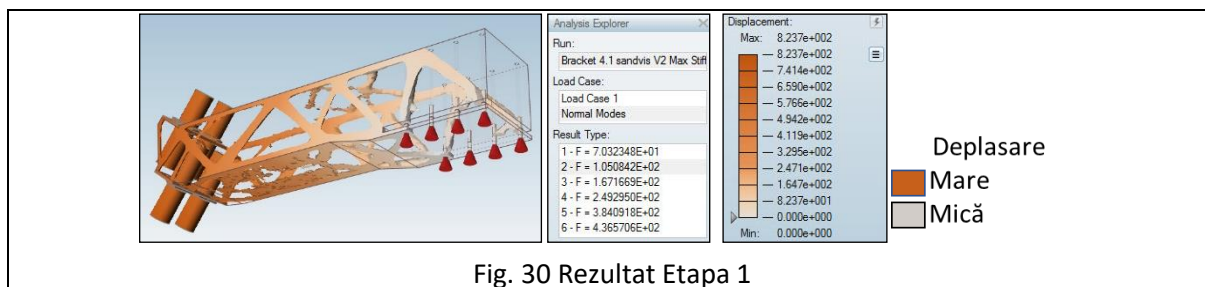


Fig. 30 Rezultat Etapa 1

În rezultatul de mai sus observăm că prima frecvență obținută este sub cerințele inițiale, și anume 70,2 Hz față de 90 Hz, cât este impus din datele de intrare considerate inițial. Această deplasare a rezultatului este pusă pe seama considerării minimizării masei până la un procent de 5% din spațiul de proiectare inițial folosind o discretizare foarte mare. Considerând

frecvența ca rezultată din prima iterație este cu 13% sub frecvența țintă se apreciază că rezultatul obținut are potențial, astfel, a fost considerată reproiectarea rezultatului obținut urmat de o nouă rulare a algoritmului de optimizare.

Etapa 2 - Reproiectarea

Rezultatele obținute în Etapa 1 Optimizare prezintă potențialul obținerii unui rezultat valid, din aceste considerente se alege continuarea procesului de optimizare prin etapa 2 de reproiectare. În momentul reconstrucției, sunt avute în vedere înclinările minime ce se pot realiza fără a necesita material suport în procesul de fabricație aditivă. În zonele în care nu am obținut elemente structurale relevante sau am obținut ceea ce în optimizare este cunoscut ca efectul “checkerboard”, se reproiectează o placă cu o grosime considerabil mai mare pentru a lăsa loc de acționare aplicației software în etapa a doua de optimizare și se remodelează zona de prindere (vezi Fig. 31).

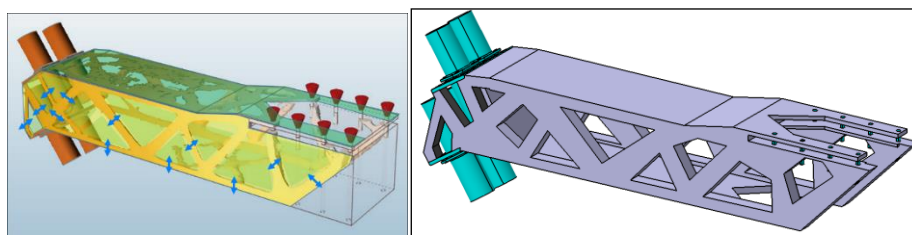


Fig. 31 Remodelarea primei etape de optimizare topologică (Cismilianu, et al., 2017)

Etapa 2 - Optimizarea

Datele de intrare ale optimizării topologice din etapa a doua de optimizare au fost considerate aceleași, mai puțin discretizarea, care a fost micșorată de la elemente de 20 mm, la elemente de 5 mm. În urma rulării modelului pregătit anterior în prima etapă de reproiectare CAD, a fost obținut rezultatul din Fig. 32.

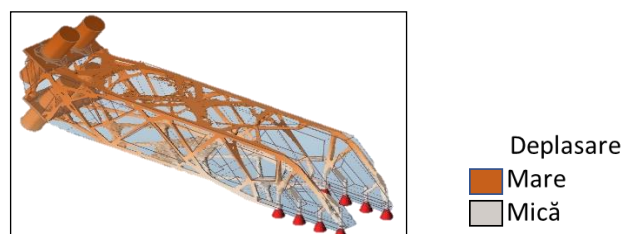


Fig. 32 Rezultat Etapa 2

În Fig. 32 avem rezultatul optimizării supus unei analize modale. Prima frecvență obținută din prima etapă de optimizare este de 90,07 Hz, iar în vizualizare se vede o trecere de la alb-portocaliu la portocaliu-închis. Zona alb-portocalie indică deplasare minimă și astfel rigiditate maximă, iar zona portocaliu-închis indică deplasare mare și rigiditate minimă. În zona de sus și în cea de jos, unde inițial nu aveam elemente conectate și existau erori ale optimizării, acum apar elemente structurale definite în urma procesului de optimizare topologică. Elementele structurale obținute inițial au fost definite mai bine la cea de-a doua rulare.

Remodelare detaliată

La fel ca la prima reproiectare CAD, rezultatele obținute din etapa a doua de optimizare sunt transpuse într-un program de proiectare (Catia), iar în jurul elementelor rezultate din optimizare se realizează reconstrucția 3D. În această etapă se urmărește reconstrucția elementelor cât mai aproape de rezultatul obținut, dar ținând seama totodată și de constrângerile impuse de procesul de fabricație aditivă.



Fig. 33 Transpunerea remodelării CAD (**turcoaz**) peste rezultatele obținute din optimizare (**vișiniu**)

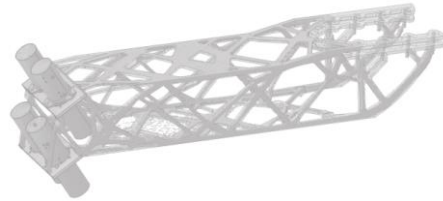


Fig. 34 Reproiectarea detaliată

Concluzii

Rezultatul a fost verificat de echipa de analiză structurală din cadrul INCAS [sursă INCAS – PROIECT EUCLID ANEXA 3.3] în configurație completă și a fost validat din punct de vedere structural.

Metodologia inițială de optimizare structurală prezentată este validată pentru cazul de calcul curent. Această metodologie este robustă și personalizabilă pentru cazuri de calcul în care optimizarea și reproiectarea sunt făcute iterativ nefiind existentă necesitatea modificării etapelor din aceasta ci doar multiplicarea lor.

În cazul de față a fost nevoie de perfecționarea rezultatelor prin rularea unei noi etape de optimizare structurală.

Un set de reguli, adiționale celor definite la finele subcapitolelor anterioare, este extras în urma studiului de caz prezentat pentru obținerea unui reper prin optimizarea structurală cu elemente 3D adaptată pentru fabricarea aditivă din pulberi metalice.

Capitolul 9. Validarea metodologiei de optimizare topologică

Pornind de la rezultatele și concluziile capitolelor 5, 6, 7 și 8 au fost sintetizate elementele definitorii particularizate ale metodologiei de optimizare inițiale în funcție de tipul procesului tehnologic utilizat pentru fabricarea reperului analizat.

A. Asamblări nedemontabile

Metodologia inițială de optimizare structurală prezentată a fost introdusă sub o formă personalizată în descrierea fiecărui caz. Pentru ansambluri nedemontabile, metodologia dezvoltată nu trebuie alterată, aceasta poate fi respectată în totalitate.

B. Piese prelucrate prin frezare

Metodologia inițială de optimizare structurală prezentată a fost utilizată pentru cazul de calcul din Capitolul 6. Metodologia menționată este robustă, nu este necesară modificarea etapelor acesteia pentru asemenea cazuri de calcul, ci doar multiplicarea unor etape specifice, în sistem iterativ, pentru a obține rezultatele dorite.

C. Ansamblu de repere prelucrate prin frezare pe centre CNC

Metodologia inițială de optimizare structurală prezentată este respectată în totalitate și în cazul de calcul în care optimizarea a fost personalizată pentru un ansamblu de repere prelucrate prin frezare pe centre CNC.

D. Piese fabricate aditiv

Metodologia inițială de optimizare structurală poate fi utilizată pentru cazul de calcul din Capitolul 8 deoarece optimizarea – reproiectarea a fost făcută în mai multe etape. Personalizarea se face identic cu studiul de caz B. nealterând metodologia, aceasta fiind destul de robustă din punct de vedere al lipsei necesității modificării etapelor acesteia pentru asemenea cazuri de calcul, astfel încât să necesite doar multiplicarea etapelor 6 (Optimizare

structurală), 7 (Interpretare rezultate) și 8 (Reproiectare model CAD (pe baza rezultatelor obținute)).

Concluzii

Metodologia identificată este robustă din punct de vedere al lipsei necesității modificării etapelor acesteia pentru asemenea cazuri de calcul și se poate aplica în cazurile de optimizare structurală pentru a avea o vedere de ansamblu a progresului și a direcției de lucru. Indiferent de tipul analizei, 2D/3D sau de direcția către care acestea sunt ghidate, metodologia identificată poate fi folosită. În unele situații este nevoie de multiple faze/etape de optimizare – reproiectare.

Metodologia inițială de optimizare structurală, devine, în urma validării acesteia prin studiile de caz din teză, o metodologie generală de optimizare structurală, robustă și personalizabilă.

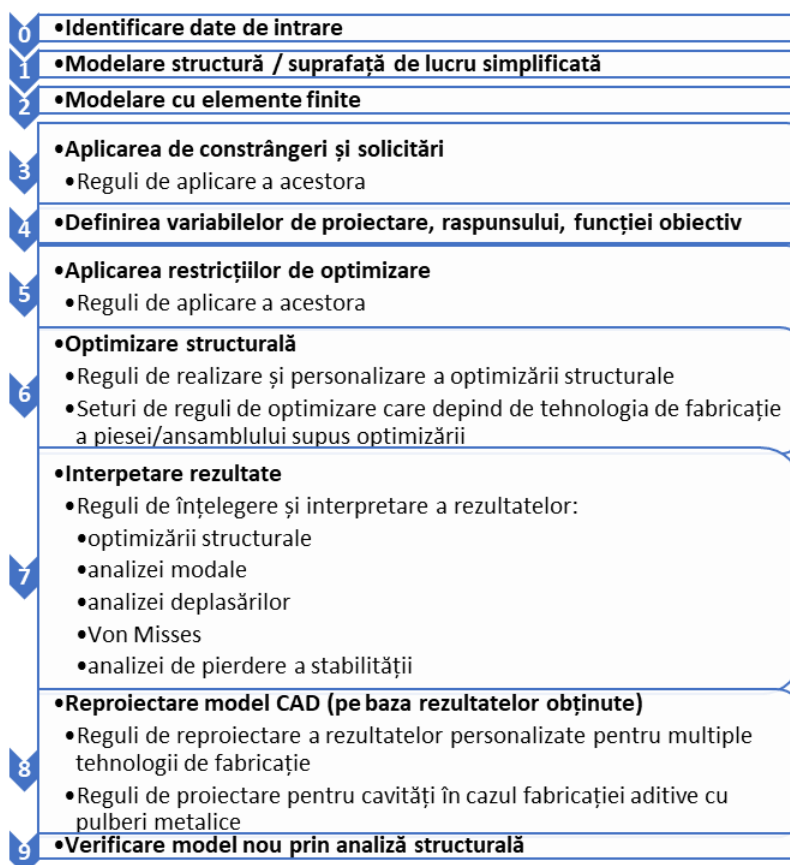


Fig. 35 Metodologia generală de optimizare structurală

Reguli de realizare a optimizării topologice

Corelând rezultatele obținute în cadrul capitolelor 5-8 au fost definite mai multe seturi de reguli de optimizare care depind de tehnologia de fabricație a piesei/ansamblului supus optimizării. Acestea sunt prezentate în varianta în extenso a tezei.

Metodă rapidă de interpretare și înțelegere a rezultatelor

În baza subiectelor abordate în teza, am elaborat cu o metodă rapidă de interpretare și înțelegere a rezultatelor obținute în diverse analize, aceasta fiind prezentă în varianta în extenso a tezei.

Reguli de proiectare pentru cavități în cazul fabricației aditive cu pulberi metalice

Au fost extrase din Capitolul 10 regulile de proiectare pentru cavități în cazul fabricației aditive cu pulberi metalice definite de autor, acestea fiind prezentate tabelar în varianta în extenso a tezei.

Capitolul 10. Proiectare pentru fabricare – reguli pentru evacuarea pulberii din structuri metalice complexe fabricate aditiv

Contextul

Pentru a avea aplicabilitate în domeniul aerospațial, toate componentele trebuie proiectate pentru a avea masă minimă și proprietăți structurale maxime. Tocmai din acest motiv, optimizarea topologică în acest domeniu poate fi ideală în atingerea acestor două obiective în cazul componentelor structurale.

Un subiect mai puțin abordat în domeniul spațial este crearea de structuri cu cavități prin fabricație aditivă, principalele motive fiind faptul că în acest fel crește complexitatea piesei și numărul de verificări necesare. Există un set de avantaje și dezavantaje cu privire la introducerea de cavități în piese utilizate în domeniul spațial.

Avantaje	Dezavantaje
+ Rigiditate ridicată	- Apariția găurilor de evacuare a pulberii și evaluarea acestora d.p.d.v. structural
+++ Masă mai mică	- Implementarea unei metode de evacuare a pulberii - Creșterea numărului de verificări

Abordarea

În cazul fabricării aditive a unei piese cu cavități printr-o tehnologie din cadrul procesului PBF (Powder Bed Fusion), existența cavităților presupune introducerea unor etape suplimentare, încă din stadiul de proiectare, în crearea variantei finale a piesei.

Pornind de la geometria inițială, ce ține seama de constrângerile interfețelor de prindere a piesei analizate, geometria este adaptată pentru adăugarea cavităților în definirea modelului piesei. Acestea trebuie adaptate ulterior, în funcție de orientarea piesei pe mașina de fabricație aditivă, pentru a se autosuține, eliminând astfel necesitatea apariției structurilor suport în interior. Geometria suport trebuie evitată, deoarece aduce masă non-structurală și, în același timp, poate bloca curgerea pulberii metalice în etapa de evacuare a acesteia, neputând fi eliminată ulterior. O metodă de evacuare a pulberii este definită pentru fiecare cavitate generată anterior, gândind cea mai bună abordare pentru a o realiza (evacuare prin jet de aer, optimizarea direcției fluxului de aer în piesă, orientare).

Reguli de proiectare pentru cavități în cazul fabricației aditive cu pulberi metalice

Studiul

Regulile de proiectare pentru cavități se împart în:

- reguli tehnologice;
- reguli de formă pentru evitarea formării structurii suport;
- reguli de adaptare a formelor cavităților pentru eficientizarea eliminării pulberii.

Regulile tehnologice sunt impuse, în primul rând, de grosimea minimă a peretelui piesei, respectiv a cavității, această grosime trebuind să fie peste 1 mm. Această grosime minimă nu este limitată de posibilitățile mașinii, aceasta reușind să creeze și grosimi mai mici, dar sub această grosime fabricantul terț al institutului susține că nu sunt destule „straturi”, cât să

asigure integritate structurală și lipsa deformațiilor piesei în cazul fabricării piesei din pulberi metalice.

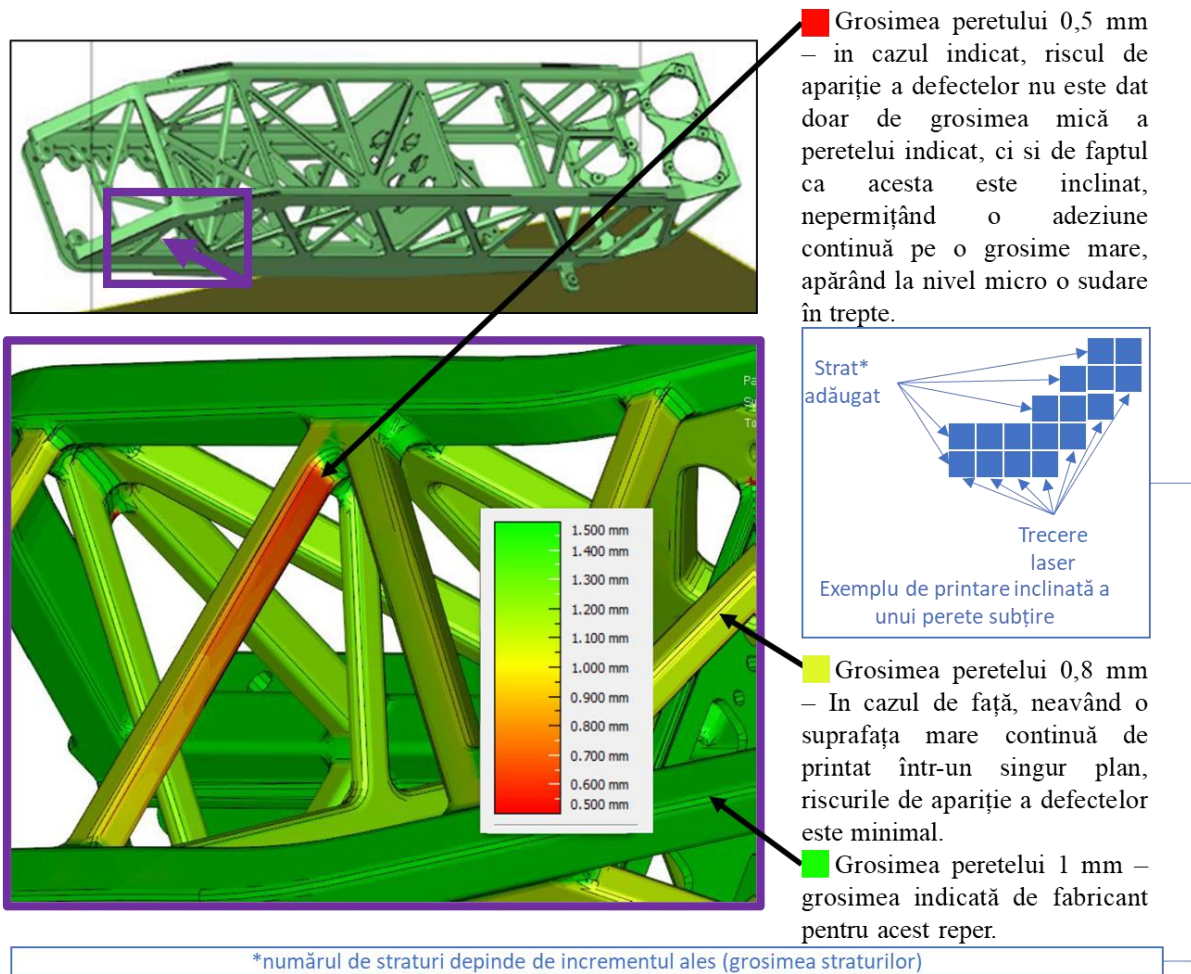


Fig. 36 Grosimea peretelui pentru piese cu cavități fabricate aditiv cu pulberi metalice (Imaginile din stânga provin din SURSA INCAS - PROIECT EUCLID. Mai multe informații în ANEXA 3.3)

Considerând regulile clasice din literatura (unghiuri auto-susținute recomandate între 30 și 45 de grade, raport înălțime: lățime maxim 20:1 40:1 8:1 ș.a.m.d. (Obeidi, 2022), (Bracken, et al., 2020), (Allison, Sharpe, & Seepersad, 2019), (Laser, 2022) și (Openadditive, 2019)) prin care se poate minimiza structura suport pe exteriorul piesei, acestea au fost extrapolate în reguli de formă și profil ale cavităților ce pot fi aplicate pieselor. Astfel se elimină necesitatea introducerii materialului suport în interiorul cavităților, material suport care nu ar mai putea fi înlăturat. Formele/profilele ideale, care nu conduc la crearea de structuri suport în cavități sunt prezentate în Fig. 37.



Fig. 37 Dependenta formelor ideale pentru cavități în funcție de orientarea piesei în platforma mașinii de fabricație aditivă (contribuție proprie)

Se observă că unele dintre variantele de profil sunt adecvate evitării structurilor suport, dar în condiții stricte de orientare pe platforma de construcție a mașinii de fabricație aditivă.

Mai mult decât atât, aceste reguli nu pot fi universal valabile, de aceea, în cazul unor zone particulare, se vor prezenta și descrie soluțiile găsite. De asemenea, este necesar ca orientarea piesei asupra căreia se face această etapă de proiectare să fie definită pe baza recomandărilor producătorului mașinii.

Piesa studiată este de tip grindă cu zăbrele, cu elemente de tip shell, goale pe dinăuntru, unde joncțiunile sunt sferice pentru a facilita unirea zăbrelelor, păstrând cavitățile unite. În anumite zone sferice a existat nevoia asamblării prin înșurubare în piesă a altor componente. Astfel, zonele sferice identificate au fost reproiectate local pentru a avea o suprafață plană de așezare, dar și un bosaj cu o gaură filetată. Scopul bosajului și al găurii filetate este de a monta o inserție metalică tip helicoil pentru a crește rezistența filetelui la smulgere (vezi Fig. 38).

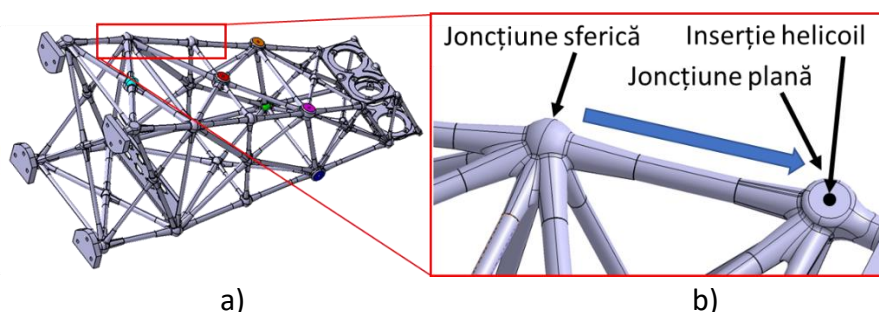


Fig. 38 Creare de interfețe de asamblare [Model 3D SURSA INCAS - PROIECT EUCLID. Mai multe informații în ANEXA 3.3]

În timp ce, din punct de vedere al regulilor aplicabile tehnologiei de fabricație aditivă, o structură sferică cu pereți subțiri este autosusținută și nu necesită material suport intern, sferile modificate, care conțin o suprafață plană, bosaje și găuri necesită, local, material suport în cavități. Acest material suport poate pune probleme în eliminarea totală a pulberii din cavități. Autorul a identificat soluții locale de reproiectare a structurii, astfel încât să se elimine apariția materialului suport, un exemplu din extras este prezentat mai jos.

Tab. 8 Reguli de concept locale pentru eliminarea necesității de utilizare a materialului suport și pentru îmbunătățirea curgerii pulberii în procesul de evacuare a acesteia

Nr	Secțiuni orientate conform așezării în mașina de fabricație aditivă (metode locale de eliminare a materialului suport din cavități)
1.	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 20%;"> <p>■ Perete piesă secționat</p> <p>■ Piesă</p> </div> <div style="width: 80%;"> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Înainte</p> <p>Adăugare perete ce va acționa ca suport controlat</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>După</p> <p>1,5 mm distanța minimă de la pereții cilindrului la restul structurii</p> <p>0-45 grade între perete structură și masa mașinii (unghi auto susținut)</p> </div> </div> <p>Vederi secționate din piesă pentru vizualizarea modificărilor locale</p> <p>[Model 3D SURSA INCAS - PROIECT EUCLID. Mai multe informații în ANEXA 3.3. Piesă fabricată la terți.]</p> </div> </div>

În zona identificată din este necesară găsirea unei soluții pentru eliminarea materialului suport care va apărea în interiorul cavității. Ulterior fabricației, gaura din va fi filetată și se va introduce o inserție helicoil pentru a deveni o suprafață de asamblare. Gaura are rol dublu, întrucât va fi folosită și pentru eliminarea pulberii interne după finalizarea procesului de fabricare.

Reguli de proiectare pentru crearea unei metode de evacuare a pulberilor metalice din cavități

În domeniu spațial, conform exemplelor din capitolele anterioare, se prezintă un element structural de susținere a motoarelor cu gaz rece poziționate strategic pentru a putea regla atitudinea păstrând orientarea sau modificând-o pentru a îndeplini misiunea.

Scopul acestui element structural este de a menține în poziție propulsoare cu gaz pentru a oferi propulsie la distanța și unghiul necesar față de structura satelitelui, astfel, țevile acestor motoare și cablajul trebuie montate pe lungimea elementului structural.

Pentru procesul de fabricație aditivă a pieselor cu cavități este nevoie de dialog permanent între proiectant sau echipa de proiectare și un specialist în fabricație aditivă. Această legătură strânsă este necesară pentru a putea rezolva câteva aspecte specifice ce țin de acest tip de piese. Unul dintre ele ar fi dimensiunea minimă necesară a canalelor (3-5mm diametru) și a găurilor de evacuare (3mm), iar un alt factor important este poziționarea lor. Cu cât poziția este mai corectă, (se pot poziționa acele găuri unde este nevoie fără să prezinte un risc structural), cu atât evacuarea se face mai ușor, mai rapid și mai corect.

Conform (Laser 2022), (Obeidi 2022), (Bracken, et al. 2020) și (Allison, Sharpe and Seepersad 2019) alegerea orientării optime a piesei în volumul de fabricație aditivă al mașinii are impact mare asupra rugozității pieselor, defectelor de suprafață și asupra materialului suport.

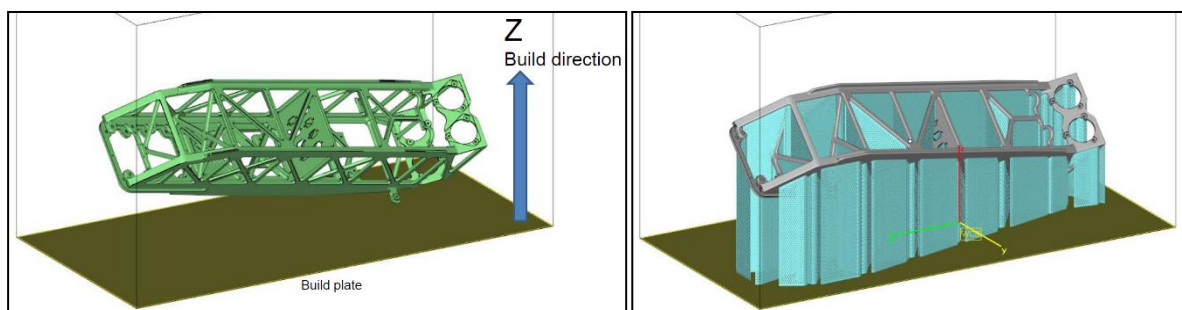


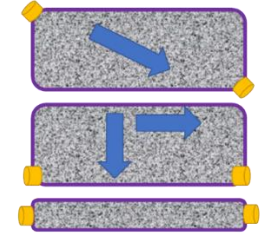
Fig. 39 Orientarea piesei în aplicația software a unei mașini de fabricație aditivă fără și cu material suport . Piesă fabricată la terți. (Cismilianu, și alții, 2017)

Se realizează modificări locale dacă în cavități apare material suport în urma simulării procesului de fabricație aditivă a piesei, cu ajutorul aplicației software dedicate a mașinii alese pentru fabricare. Considerând secțiunea fiecărei zăbrele, pentru a minimiza volumul materialului suport, a fost folosită o secțiune pătrată cu colțuri racordate în interiorul țevilor, care în cazul de față devine rombică, prin schimbarea orientării piesei așa cum a fost prezentat și în capitolul anterior. Această secțiune este una din cele mai eficiente în ceea ce privește minimizarea materialului suport din piese cu secțiuni goale.

Pentru realizarea unui flux eficient de aer necesar evacuării pulberii, se proiectează cel puțin două orificii (3mm min.) de evacuare a pulberii, impuse în două colțuri racordate ale cavităților, în funcție de orientarea cavității față de masa de lucru a mașinii de fabricație aditivă (vezi Tab. 9). Fluxul de aer este important în momentul evacuării pulberii în etapele de post

procesare a procesului de fabricație aditivă pentru a asigura eliminarea completă a pulberii și a evita riscul de contaminare a echipamentelor.

Tab. 9 Regulă de plasare orificii de evacuare a pulberii

 <p> ■ Muchii cavitate (racordate la colturi) ■ Orificiu evacuare ■ Pulbere captivă ■ Orientare cavitate (piesă) relativă la masa de lucru a mașinii de fabricație prin depunere aditivă </p>	<p>Metodă de plasare a orificiilor de evacuare a pulberii în cazul unei cavități înclinate relativ la masa de lucru a mașinii.</p>
	<p>Metodă de plasare a orificiilor de evacuare a pulberii în cazul unei cavități paralele sau perpendiculare cu masa de lucru a mașinii.</p>
	<p>Metodă de plasare a orificiilor de evacuare a pulberii în cazul unei cavități de grosime apropiată de diametrul orificiului de evacuare implementat.</p>

Pentru a îmbunătăți fluxul de aer necesar evacuării pulberii și pentru minimizarea numărului de orificii de evacuare necesar, se unesc cât mai multe cavități, în mod continuu sau prin metode similare cu regulile de plasare a orificiilor de evacuare a pulberii prezentate mai sus prin crearea de cilindri cu diametrul interior de minimum 3 mm.

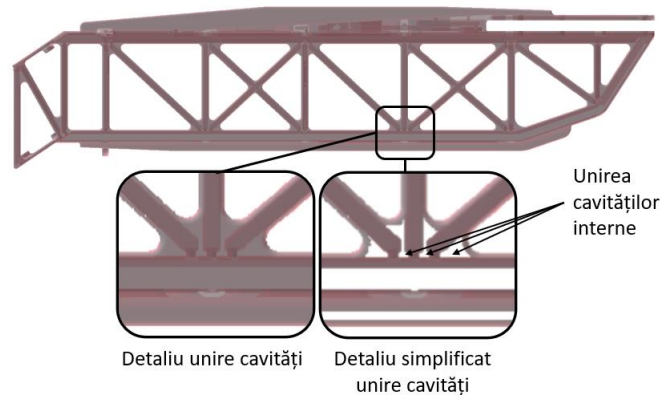


Fig. 40 Regulă de unire a cavităților prin cilindrii de 3mm diametru [Model 3D SURSA INCAS - PROIECT EUCLID. Mai multe informații în ANEXA 3.3. Piesă fabricată la terți.]

<p>Respectând metodele prezentate în Tab. 9, toate cavitățile interne sunt unite între ele.</p>	<p>În detaliul simplificat a fost șters materialul adiacent pentru a ușura vizualizarea conectării cavităților interne.</p>
---	---

După unirea cavităților din Fig. 40 se urmează o procedură de evacuare a pulberii prin adăugarea unor orificii de evacuare a pulberii de formă circulară (diametru minimum 3 mm) în zonele critice, ținând cont de orientarea actuală și de faptul că pulberea din interior trebuie îndepărtată înainte să se îndepărteze piesa de pe placă.

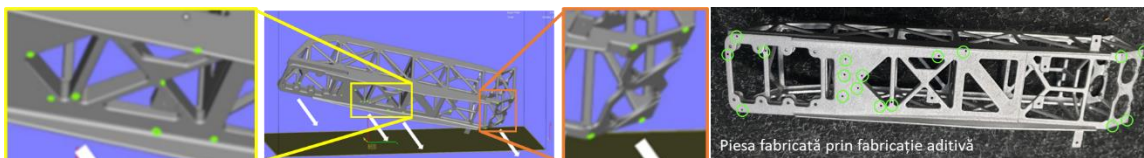


Fig. 41 Direcție de poziționare orificii de evacuare a pulberii (orificii marcate cu verde) . Piesă fabricată la terți. (Cismilianu, și alții, 2017)

Este important ca proiectarea să fie interconectată cu fabricația. Pentru ca piesa să fie proiectată ca și cum ar fi fabricată aditiv, prin modificarea locală a geometriei interne, se poate

realiza o piesă cu cavități, care nu are nevoie de structură suport. Apariția structurii suport în cavități duce la blocarea pulberii în interior și face conceptul ineficient.

Concluzii

- Încă din etapa de proiectare trebuie să existe o legătură strânsă între proiectant și un specialist în fabricație aditivă. Astfel, piesa poate fi gândită pentru fabricație aditivă încă din etapa de proiectare.
- Conform (Laser 2022), (Obeidi 2022), (Bracken, et al. 2020) și (Allison, Sharpe and Seepersad 2019) alegerea orientării optime a piesei în volumul de fabricație aditivă al mașinii are impact mare asupra rugozității pieselor, defectelor de suprafață și asupra materialului suport.
- Piesele cu cavități necesită o procedură de evacuare a pulberii personalizată.
- S-au generat un set de reguli de proiectare pentru crearea unei metode de evacuare a pulberilor metalice din cavități.

Capitolul 11. Fabricarea aditivă a unei piese cu cavități și procedura de calificare pentru utilizare în spațiu

Procesul tehnologic de fabricație a unei piese cu cavități interne utilizată în spațiu

Etapele de postprocesare pentru piesele fabricate aditiv din pulberi metalice (PBF) au fost definite și descrise în Capitolul 1, în continuare se vor considera etapele necesare care trebuie **adăugate** etapelor **clasice** de post-procesare pentru obținerea unei piese cu cavități.

În cazul pieselor cu cavități, în urma procesului de fabricare se constată că apar probleme privind îndepărtarea totală a pulberii, zone nesinterizate complet, potențiale incluziuni nedorite, prezența porozităților și a fisurilor. Pentru a rezolva aceste probleme, a fost introdusă o etapă suplimentară de verificare nedistructivă a piesei rezultate prin procesul de fabricație aditivă, dar au fost modificate unele dintre etapele uzuale de fabricație aditivă cu elemente dedicate pentru piese cu cavități.

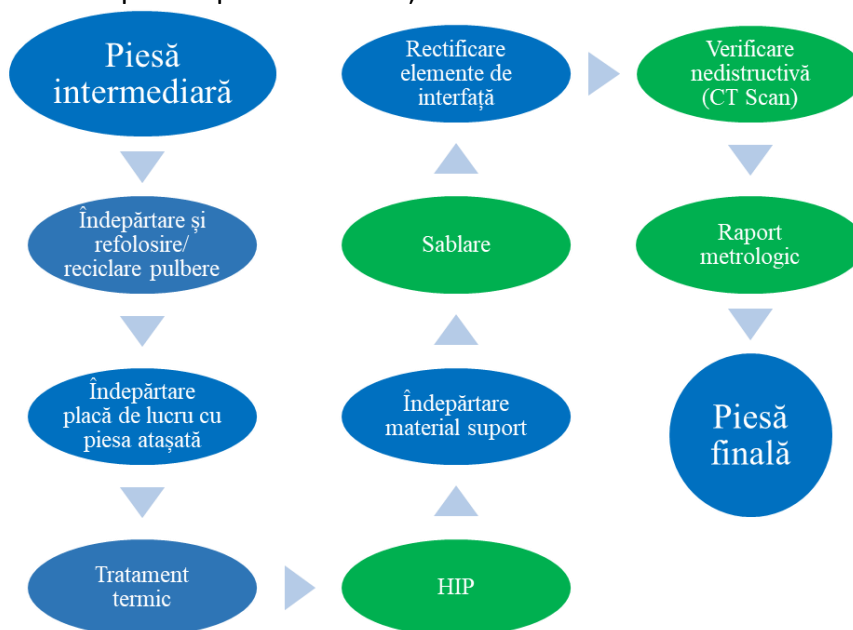


Fig. 42 Etape de post-procesare pentru piese cu cavități și opțiuni suplimentare

➤ Verificare nedistructivă (CT Scan)

În unele cazuri/industrii, evacuarea totală a pulberii este vitală, motiv pentru care la finalizarea întregului proces de producție se poate realiza o etapă suplimentară pentru

verificare. Verificarea este una nedistructivă și se face scanând piesa cu un computer tomograf (CT). Se poate verifica și integritatea structurală a piesei. Această verificare se realizează, în special, în industria spațială în cazul pieselor cu cavități. Acest caz este în general valabil în industria spațială unde pulberea remanentă reprezintă un risc de contaminare.

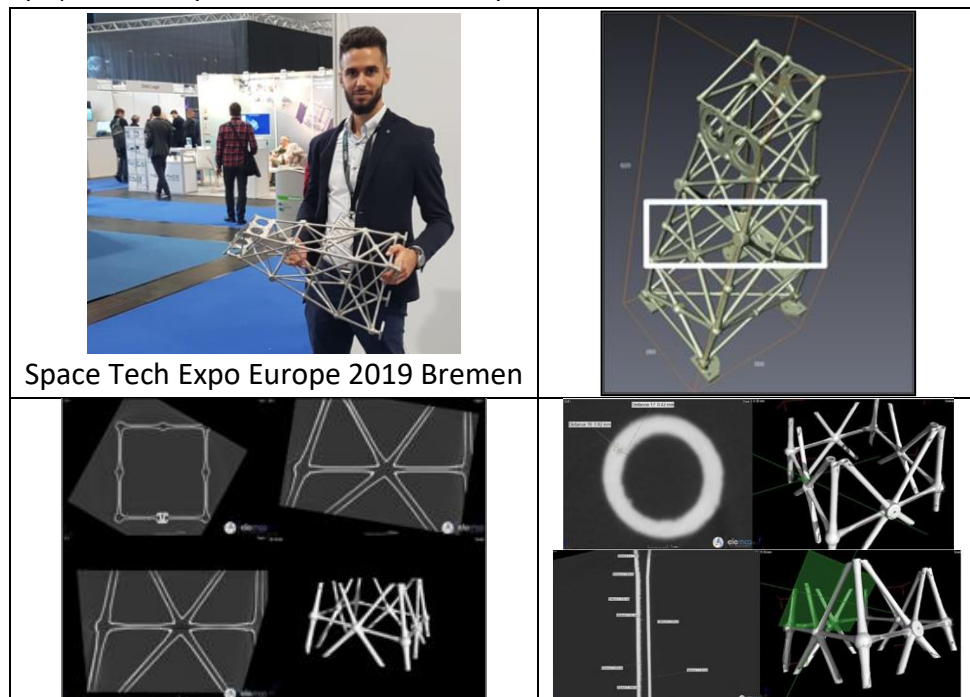


Fig. 43 Scanare CT . (Cismilianu, et al., 2017)

Capitolul 12. Optimizarea topologică a unui tren de aterizare pentru un vehicul cu decolare și aterizare verticală (VTVL)

12.1. Optimizarea pentru un vehicul VTVL cu motor turbojet

Introducere

În ultimii ani există o tendință crescătoare cu privire la vehiculele reutilizabile cu decolare și aterizare verticală, motiv pentru care s-a aplicat metodologia generală de optimizare structurală pentru un tren de aterizare pentru un vehicul cu decolare verticală și aterizare verticală (VTVL) cu motor turbojet.

Pentru identificarea rapidă a unui concept, s-a considerat un vehicul cu o formă generică care are în componență 4 trenuri de aterizare dispuse axial echidistant. Din acest motiv, în Fig. 44 este prezentată o formă generică, ca substituent a unui vehicul (marcat în culoarea turcoaz) și 4 volume în poziții standard pentru un tren de aterizare (marcate cu negru).

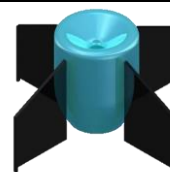


Fig. 44 Substituentul unui vehicul cu volume de proiectare în poziția trenurilor de aterizare (Munteanu & Cismilianu, 2016) [CONTRIBUTIE PROPRIE]

Am pornit de la premisa ca aterizarea se va face prin oprirea tracțiunii la 1 m de sol, iar vehiculul va avea aproximativ 60Kg. Distanța de 1 m de sol și masa de 60 Kg reprezintă masa estimativă a vehiculului DTV (vezi ANEXA 3.2), aceasta valoare este considerată de referință pentru acest studiu de caz. Considerăm că, în medie, vehiculul va ateriza în primă fază pe unul dintre trenuri, iar apoi pe celelalte, așadar impunem o sarcină/tren de 600 N.

Tema de optimizare a fost tratată în 3 aplicații software diferite, cu evidențierea particularităților fiecăreia după cum urmează:

- Inspire – Software din suita Altair, suita care prin intermediul solverului Optistruct, utilizat în programele software comerciale Inspire și Hypermesh, este studiat și îmbunătățit în ceea ce privește optimizarea structurală din 1994;
- Patran/Nastran – Solver și software dedicate analizei structurale care au un modul de optimizare structurală;
- Matlab – Mediu de programare.

Optimizarea realizată în INSPIRE

Dimensiunile din Fig. 45 sunt alese identic cu cele din (Munteanu & Cismilianu, 2016) pentru a compara rezultatele studiului început în (Munteanu & Cismilianu, 2016) unde sunt indicate dimensiunile geometrice ale spațiului de proiectare alocat spre optimizare pentru trenul de aterizare a unui vehicul cu decolare verticală și aterizare verticală (VTVL) cu motor turbojet.

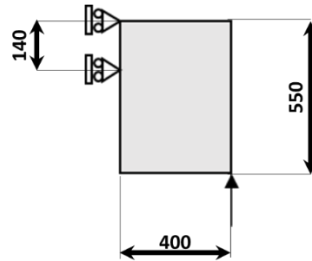


Fig. 45 Dimensiuni geometrice ale spațiului de proiectare considerat

Au fost impuse puncte de constrângere și de aplicare a forței în reprezentarea dimensiunilor. A fost aplicată o constrângere de extrudare asupra spațiului de P (vișiniu) pentru a transpune cazul de calcul 3D într-un caz de calcul 2D și a simplifica procesul de optimizare obținând rezultate ce pot fi traduse ulterior în structura hibridă alcătuită din profile și elemente care vor putea fi prelucrate prin frezare.

Întrucât se dorește realizarea unei optimizări dintr-un volum 3D, singurul tip de optimizare prin care se poate aplica în acest caz este optimizarea topologică. Parametrul optimizării, de tip răspuns, a fost ales a fost volumul, iar obiectivul minimizarea răspunsului. Același caz de calcul a fost considerat în cazul a două discretizări, de 10 mm și de 20 mm, pentru a vedea influența discretizării asupra rezultatelor obținute și pentru a le putea compara ulterior cu cele obținute prin aplicarea altei aplicații software.

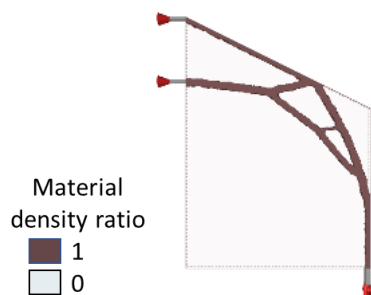


Fig. 46 Discretizare 20 mm masă rezultată 0,9 Kg (Munteanu & Cismilianu, 2016) [CONTRIBUTIE PROPRIE]

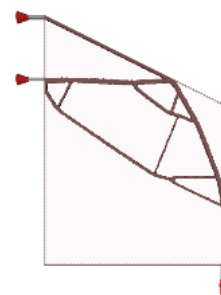


Fig. 47 Discretizare 10 mm masă rezultată 0,88 Kg (Munteanu & Cismilianu, 2016) [CONTRIBUTIE PROPRIE]

Variația densității discretizării a fost folosită în acest caz pentru a influența direcția de distribuție a materialului, oferind astfel utilizatorului opțiuni în alegerea conceptului ideal.

Optimizarea realizată în Patran/Nastran

Cazul prezentat mai sus reprezintă contribuție proprie, în paralel, în INCAS, a fost realizată în condiții identice, optimizarea structurală în modulul de optimizare al Patran/Nastran. Optimizarea realizată în Patran/Nastran nu reprezintă contribuție proprie, iar în subcapitolul curent sunt prezentate doar câteva figuri ce vor fi considerate sursa INCAS.

Plecând de la aceleași date de intrare, utilizând dimensiunile geometrice ale spațiului de proiectare considerat, o suprafață a fost generată și ulterior discretizată, cu elemente de dimensiune 20 mm.

Întrucât se dorește realizarea unei optimizări conceptuale, singurul tip de optimizare prin care se poate aplica în acest caz este optimizarea topologică. Răspunsul ales a fost volumul, iar obiectivul minimizarea răspunsului. Același caz de calcul a fost considerat în cazul a două discretizări, de 10 mm și de 20 mm pentru a vedea influența discretizării în rezultate și pentru a găsi o variantă ideală.

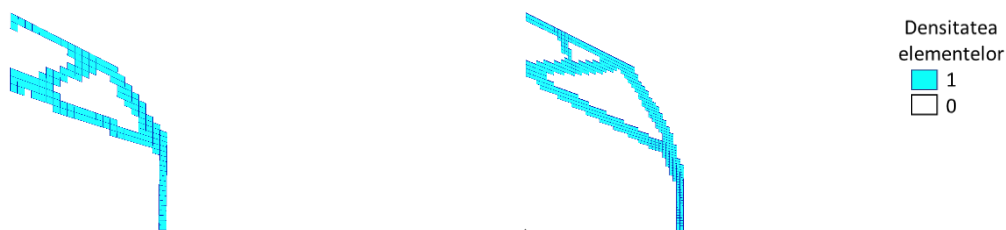


Fig. 48 Discretizare 20 mm (Munteanu & Cismilianu, 2016)

Fig. 49 Discretizare 10 mm (Munteanu & Cismilianu, 2016)

Variația densității discretizării a fost folosită și în acest caz pentru a influența direcția de distribuție a materialului, oferind astfel utilizatorului opțiuni în alegerea conceptului ideal.

Optimizarea realizată în Matlab

Pornind de la datele de intrare prezentate în introducere, a fost utilizată Fig. 45 pentru definirea dimensiunilor spațiului de proiectare alocat spre optimizare pentru trenul de aterizare a unui vehicul cu decolare verticală și aterizare verticală (VTVL) cu motor turbojet.

Calculul de optimizare a fost realizat folosind codul (Sigmund, 2001), cod care a fost modificat, conform comentariilor în codul din ANEXA 1, pentru nevoile specifice cazului de calcul curent. Codul este realizat conform unui caz standard de optimizare topologică. Parametrii cazului de calcul sunt introduși ca valori numerice în programul principal prin comanda de mai jos, scriind valori numerice în locul fiecărui parametru reprezentat:

```
top(nelx, nely, volfrac, penal, rmin)
```

unde, nelx – reprezintă numărul de elemente pe orizontală (în lungul axei x); nely – reprezintă numărul de elemente pe verticală (în lungul axei y); volfrac – reprezintă fracția de volum impusă în optimizare; penal – reprezintă factorul de penalizare impus în optimizare asupra rezultatului; rmin – reprezintă dimensiunea filtrului aplicată pentru eliminarea erorii de tip tablă de șah (checker board effect). La alegerea unei valori numerice mai mici de 1, filtrul este inactivat.

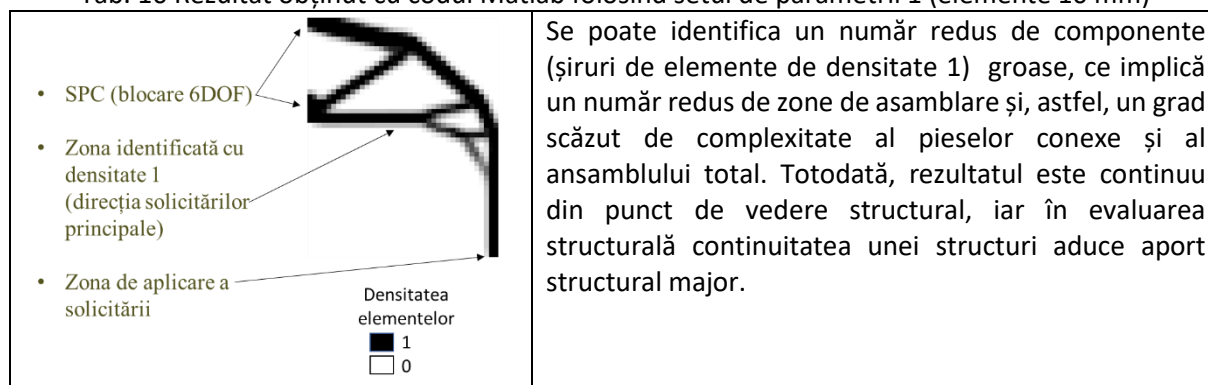
Pentru a putea realiza calculul de optimizare în Matlab, am adaptat codul descris mai sus pentru a defini domeniul de proiectare conform Fig. 45.

A fost realizată o analiză de sensibilitate prima dată asupra factorului de penalizare și a doua oară asupra factorului de filtrare, determinând valorile numerice ideale pentru parametrii menționați.

Nelx, numărul de elemente pe orizontală, este impus la 40, iar nely,, numărul de elemente pe verticală, 55, astfel mărimea fiecărui element este de 10mm, mărime identică cu cazul 2 de optimizare analizat, atât în Inspire, cât și în Nastran/Patran. Wolfrac este impus la 0,2, astfel, programul de optimizare are constrângerea de a utiliza doar 20% din volumul domeniului total de proiectare pentru a genera direcția solicitărilor principale.

Introducând toate variabilele de mai sus în codul modificat, prin rularea acestuia s-a obținut rezultatul din Tab. 10.

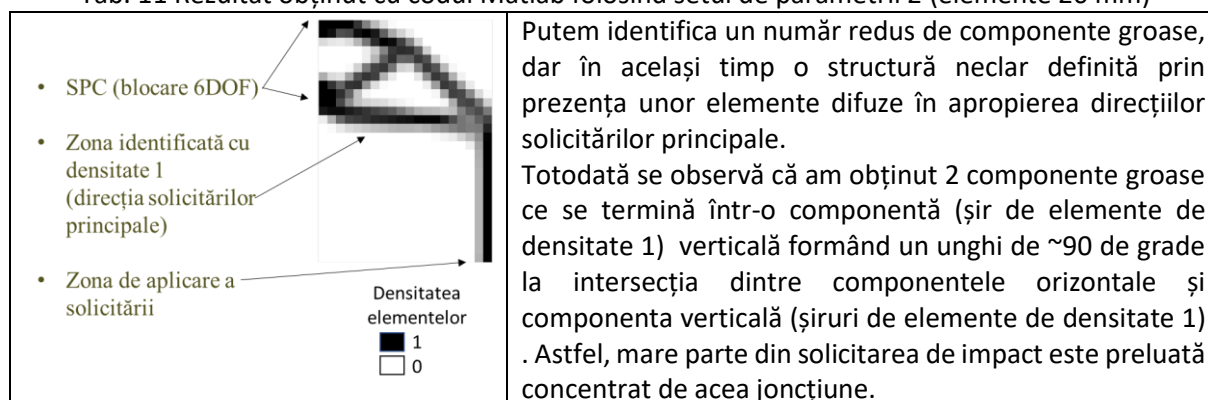
Tab. 10 Rezultat obținut cu codul Matlab folosind setul de parametri 1 (elemente 10 mm)



Inițial	top	(nelx,	nely,	wolfrac,	penal,	rmin)
Set 1	top	(40,	55,	0.2,	4.0,	1.5)
parametrii						
*toți parametrii de mai sus sunt adimensionali						

Din motive de similitudine cu cazurile de optimizare realizate în Inspire și Nastran/Patran, o nouă rulare este necesară pentru a avea o variantă optimizată și cu elemente de 20 mm. Astfel, valorile elementelor de pe orizontală, nelx și valorile elementelor de pe verticală, nely, utilizate în setul 1 de parametri se împart la 2, rezultând o dimensiune a elementelor de 20 mm.

Tab. 11 Rezultat obținut cu codul Matlab folosind setul de parametri 2 (elemente 20 mm)



Inițial	top	(nelx,	nely,	wolfrac,	penal,	rmin)
Set 2	top	(20,	28,	0.2,	4.0,	1.5)
parametrii						
*toți parametrii de mai sus sunt adimensionali						

Comparația rezultatelor

Toate calculele de optimizare au fost realizate în condiții la limită identice conform Fig. 45. Rezultatele (vezi Fig. 50) aferente fiecărei aplicații software care se împart în funcție de dimensiunea elementelor discretizate în două categorii:

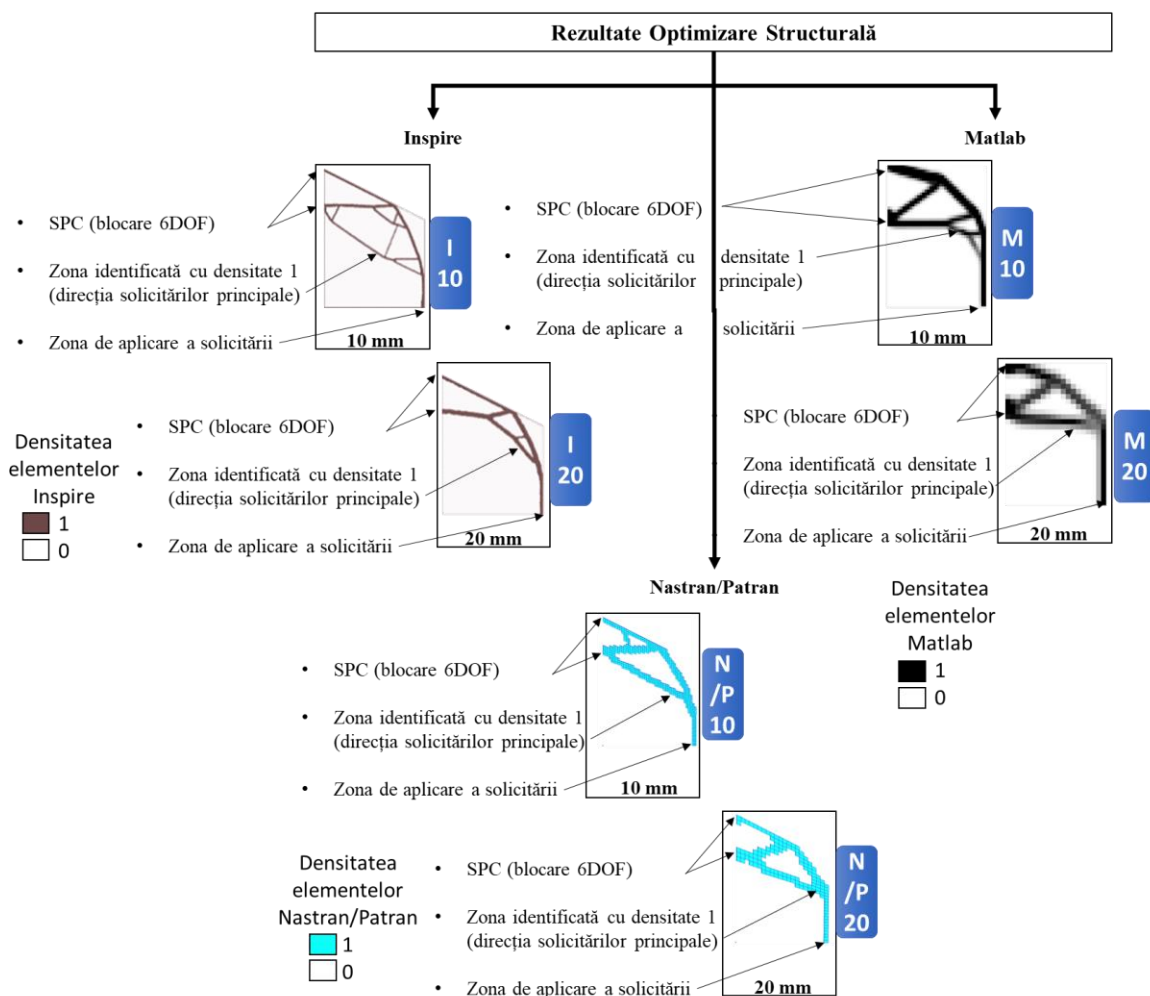


Fig. 50 Rezultate optimizare structurală Inspire, Nastran/Patran, Matlab

A fost realizată o ierarhizare din punct de vedere a distribuției solicitărilor principale (vizualizate în rezultate prin densitate 1 a elementelor) în structura rezultată: 1. I20 și M10; 2. N/P 10; 3. N/P 20 și M20; 4. I10. A fost realizată o comparație (vezi Fig. 51) între rezultatele obținute prin cele 3 metode și două dimensiuni de discretizare a elementelor prin utilizarea unei aplicații software online gratuite (onlinejgtools, 2022) prin care s-au extras culorile medii din rezultatele optimizărilor realizate în Inspire, Nastran/Patran și Matlab.

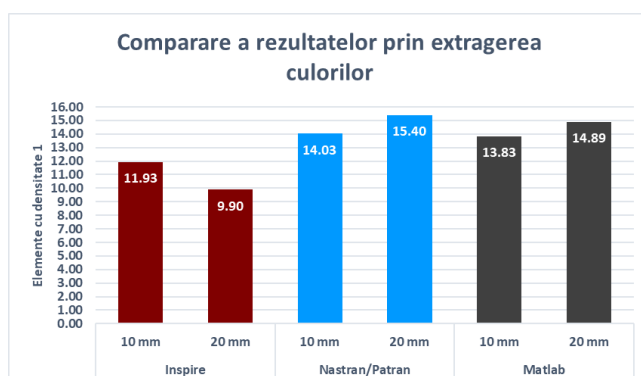


Fig. 51 Comparația rezultatelor Inspire, Nastran/Patran, Matlab

În Fig. 51 se observă că, pentru discretizarea realizată cu elemente de 10 mm respectiv 20 mm, în cazul aplicațiilor software Nastran/Patran și Matlab, din punct de vedere al suprafeței elementelor cu densitate 1 extrase, cele 4 rezultate sunt similare. O diferență de ~1% este identificată în cazul aplicațiilor software Nastran/Patran și Matlab pentru rezultatele

în care s-a folosit discretizarea elementelor de 10 mm și o diferență de ~3% în cazul discretizării elementelor cu 20 mm. În cazul Inspire, se poate observa că, pentru discretizarea realizată cu elemente de 10 mm și pentru discretizarea realizată cu elemente de 20 mm rezultatele sunt mai bune cu ~15% respectiv mai bune cu ~36% decât metodele concurente de optimizare.

Suita Altair are în componență două aplicații software ce pot fi folosite pentru optimizarea structurală, Inspire și Hypermesh. Ambele folosesc la bază același solver, Optistruct. Astfel, din privința solverului comun, ambele aplicații software sunt avantajate de acest studiu.

12.2. Optimizarea pentru un vehicul VTVL cu motor rachetă ADAMP

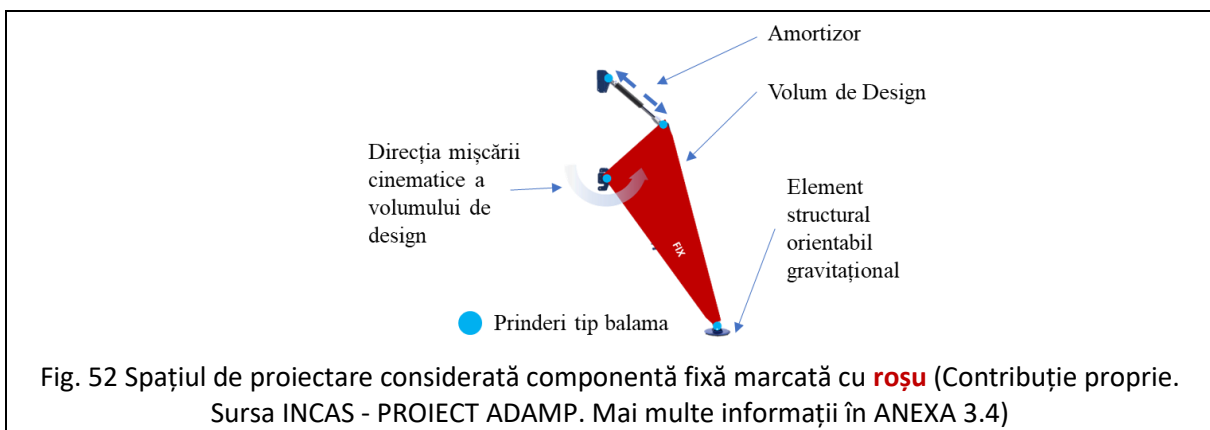
Contextul

S-a realizat un studiu pentru un tren de aterizare amortizat pentru un vehicul cu structură octogonală reutilizabil cu decolare și aterizare verticală și motor rachetă. Studiul a fost realizat prin utilizarea metodelor de optimizare structurală cu scopul dezvoltării unui concept de tren de aterizare. Acest studiu a fost folosit în etapele premergătoare proiectare ale Proiectului ADAMP (vezi ANEXA 3.4) condus de INCAS sub tutela Agenției Spațiale Europene.

Studiul

Vehiculul asupra căruia s-a efectuat studiul este alcătuit din 4 trenuri de aterizare dispuse axial echidistant și are o masă de aproximativ 800 Kg. Se pornește de la aceeași premisă, ca de la 1 m distanță se taie tracțiunea motorului, iar vehiculul cade întâi pe unul din picioare.

S-a pornit de la un concept inițial creat în INCAS și a fost generat un volum de proiectare P doar în zona care se consideră fixă (vezi Fig. 52). În zona neinclusă în anvelopa de P se consideră introducerea unor amortizoare, astfel încât zona rezultată din optimizare să oscileze în balamale pentru a permite amortizarea (vezi Fig. 52).



Întrucât se dorește realizarea unei optimizări conceptuale dintr-un volum 3D, singurul tip de optimizare prin care se poate aplica în acest caz este optimizarea topologică. Pentru optimizarea curentă a fost utilizată aplicația software INSPIRE Solidthinking. Aceasta poate realiza o multitudine de optimizări diferite și analize pentru verificarea rezultatelor.

În continuare se va considera în optimizare doar zona marcată în figura anterioară. Au fost impuse și puncte de constrângere și de aplicare a forței la prezentarea dimensiunilor geometrice. Punctele au fost transformate în volume de non-proiectare (NP) în exteriorul

spațiului de proiectare pentru a putea aplica forțele și constrângerile pe spațiile de NP (gri). A fost introdusă și o constrângere de simetrie în zona mediană a trenului de aterizare.

Valorile forței impuse în cazul de studiu curent sunt confidentiale motiv pentru care nu sunt menționate.

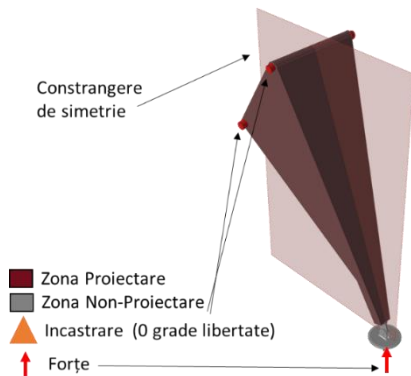


Fig. 53 Spații de P și NP + Simetria aplicată în zona mediană (Contribuție proprie. Sursa INCAS - PROIECT ADAMP. Mai multe informații în ANEXA 3.4)



Fig. 54 Rezultate optimizare (Contribuție proprie. Sursa INCAS - PROIECT ADAMP. Mai multe informații în ANEXA 3.4)

Răspunsul ales a fost volumul, iar obiectivul minimizarea răspunsului. Volumul P a fost discretizat cu elemente de 20 mm. Rezultatele ne indică zona de plasare a profilelor circulare, care ar trebui să fie extinse la maximum în spațiul volumului de proiectare. Direcția indicată a fost respectată în zona inferioară, iar în zona superioară a fost considerată aria alocată celor 2 elemente structurale generate prin optimizare și au fost înlocuite cu un singur profil dispuse central. Zonele de joncțiune au fost înlocuite cu elemente frezate pentru a conecta profilele circulare, iar în zona superioară au fost introduse elemente de amortizoare.

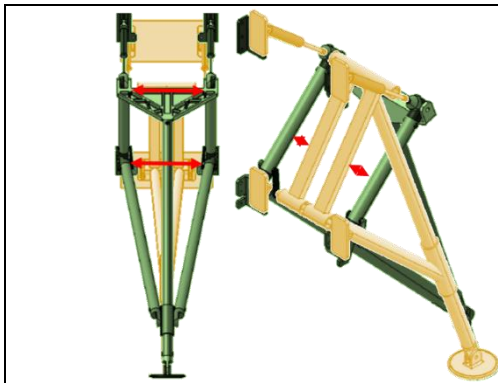


Fig. 55 Suprapunerea rezultatului optimizării și proiectării (Model Nou Model Vechi) (Contribuție proprie. Sursa INCAS - PROIECT ADAMP. Mai multe informații în ANEXA 3.4)

Rezultatele au fost reproiectate ca un ansamblu de țevi de aluminiu EN AW 6082 și piese frezate din EN AW 7075. Peste conceptul inițial (Fig. 55 galben) am suprapus modelul rezultat în urma optimizării (Fig. 55 verde) pentru a se observa diferențele dintre acestea. Conceptul nou, cel verde din Fig. 55, are elementele structurale extinse la lățimea maximă permisă de prinderi. Astfel, performanțele structurale ale trenului de aterizare optimizat sunt superioare modelului inițial.

Concluzii

Metodologia generală de optimizare structurală este validată încă o dată demonstrând că este robustă indiferent de cazul de calcul la care se aplică.

Mărimea discretizării are un impact direct asupra rezultatelor optimizării (vezi Fig. 50), în special în cazul în care se folosește optimizarea cu scopul de a obține un concept. Variația mărimii elementelor discretizate se poate face pentru a obține mai multe variante de concept cu scopul identificării celui fezabil pentru metoda de fabricație dorită.

În cazul optimizării conceptuale a unui tren de aterizare planar (un singur plan) ce se dorește a fi fabricat din profile standard și elemente frezate la joncțiuni, se va introduce constrângerea de extrudare pentru optimizarea realizată în Inspire. Aceasta se impune asupra spațiului de proiectare.

În cazul optimizării conceptuale a unui tren de aterizare ne-planar (două plane aflate în unghi) ce se dorește a fi fabricat din profile standard și elemente frezate la joncțiuni, se va introduce constrângerea de simetrie centrată în volumul spațiului de P.

În cazul realizării optimizării în Nastran/Patran, cu cât mărimea elementelor din discretizare este mai mică cu atât rezultatele sunt mai clar definite după cum se observă în Fig. 50.

În cazul realizării optimizării în Matlab, o atenție deosebită trebuie acordată valorii numerice a factorului de penalizare și a valorii numerice factorului de filtrare. Pentru fiecare parametru se recomandă realizarea unei analize de sensibilitate înainte de considerarea rezultatelor calculului de optimizare dorit.

A fost realizată o analiză comparativă între rezultatele obținute în Inspire, Nastran/Patran și Matlab având condiții la limită și mărimi de discretizare a elementelor identice. Analiza comparativă a fost realizată din punct de vedere al continuității structurale și al procentului elementelor cu densitate 1 din rezultate din care s-a observat că rezultatul pentru discretizarea realizată în Inspire cu elemente de 20 mm este mai bun cu ~36% decât metodele concurente de optimizare.

Capitolul 13. Concluzii, contribuții proprii și direcții viitoare de cercetare

13.1. Concluzii generale

Teza a abordat un subiect nedocumentat în amănunt, acela al unei metodologii robuste de optimizare structurală și variații ale acesteia în care optimizarea structurală poate fi personalizată pentru tehnologia de fabricație pre-selectată. Această metodologie a fost aplicată în cazuri reale, fie pornind de la zero, fie pornind de la modele deja existente. Lucrarea începe cu stadiul actual în domeniul fabricației aditive și a optimizării structurale și este divizată în 13 capitole.

Concluziile generale rezultate în urma cercetărilor sunt:

- Introducerea optimizării topologice pe traseul dintre proiectare și analiză structurală reduce drastic numărul de iterații dintre aceste etape, dar nu le elimină total, deoarece optimizarea în sine poate reprezenta un proces iterativ de optimizare și reproiectare a rezultatelor în CAD, optimizând și rezultatul remodelat până când se îndeplinesc constrângerile și funcția obiectiv dorită;
- Există aplicații software de proiectare comerciale foarte avansate, care elimină necesitatea dezvoltării unei aplicații software proprietare de acest fel în momentul de față;
- Optimizarea structurală poate fi făcută special pentru o anumită tehnologie (sudare, turnare, extrudare, prelucrare prin frezare pe un centru cu comandă numerică, fabricație aditivă ș.a.m.d.). Atunci când tehnologia este cunoscută de la început, posibilitatea scăderii timpului de obținere a unui rezultat pertinent și ulterior adaptat pentru acea tehnologie scade dramatic. Fiecare rezultat personalizat trebuie să fie adaptat din punct de vedere tehnologic în etapa de reproiectare a unui model CAD pe baza rezultatelor obținute din optimizarea structurală;
- Metodologia de optimizare a fost testată pe cazurile de calcul parcurse prin intermediul acestei lucrări. Având în vedere varietatea dintre cazuri și faptul că metodologia a rămas constantă, fiind necesară varierea acestora în cazuri particulare doar prin multiplicarea unor etape, reiese că metodologia de optimizare rezultată este robustă;
- În baza studiilor de caz din capitolele 5-8, s-au studiat etapele ce trebuie respectate și parametrii ce pot fi variați și a fost realizat trei seturi de reguli de realizare a optimizării topologice;
- Piesele cu cavități necesită o procedură de evacuare a pulberii dedicată;
- În cazul pieselor cu cavități, s-au prezentat etapele necesare ce trebuie adăugate sau modificate în producție pentru a obținerea unei astfel de piese
- În baza subiectelor abordate în teza, s-a realizat o metodă rapidă de interpretare și înțelegere a rezultatelor obținute în diverse analize;
- În cazul optimizării conceptuale a unui tren de aterizare ne-planar (două plane aflate în unghi) ce se dorește a fi fabricat din profile standard și elemente frezate la joncțiuni, se va introduce constrângerea de simetrie centrată în volumul spațiului de P. Rezultatele obținute în urma optimizării de concept pentru un tren de aterizare pot fi modificate ulterior pentru a include un amortizor și mecanismul cinematic necesar pentru punerea acestuia în funcționare în momentul aterizării.

13.2. Contribuții proprii

Rezultatele obținute în teza curentă sunt reprezentate de rezultate utilizate în prezent, în practică sau prezintă importanță practică în primul rând în domeniul pieselor realizate prin fabricație aditivă cu pulberi metalice ce au în componență cavități din punct de vedere a dezvoltării unor reguli de proiectare, etape suplimentare necesare în producție și metode de calificare/validare a pieselor realizate pentru spațiu. În al doilea rând, prezintă importanță practică în personalizarea optimizării structurale și în dezvoltarea unei metodologii de optimizare structurală. Principalele contribuții au fost:

- Elaborarea unei metodologii robuste de optimizare structurală care a fost aplicată și validată pe toate cazurile de calcul din lucrare;
- Demonstrarea utilizării unei metodologii robuste ușor adaptabile în cazuri specifice;
- Evaluarea metodologiei de optimizare topologică dezvoltate din punct de vedere al aplicabilității prin aplicarea acestora într-un număr crescut de studii de caz;
- Realizarea și prezentarea unui set de studii de caz cu scop de demonstra posibilitatea personalizării metodologiei pentru diferite tehnologii, incluzând tehnologii de fabricație aditivă cu pulberi metalice;
- Demonstrarea modului în care optimizarea topologică poate fi personalizată pentru tehnologia de fabricație dorită, fie ea fabricație aditivă sau variante clasice cum ar fi piese obținute prin sudare, frezare pe centre CNC etc.;
- Prezentarea, explicarea și documentarea stadiului actual al algoritmilor de optimizare topologică din literatură;
- Evidențierea erorilor generale din optimizarea structurală și a metodelor de prevenție a acestora;
- Elaborarea unor reguli de concept pentru cavități și a unor reguli de evacuare a pulberii în cazul introducerii acestora în cazul fabricației prin tehnologii aditive PBF;
- Realizarea unei metode rapide de interpretare și înțelegere a rezultatelor obținute în optimizarea structurală și diverse analize structurale;
- Stabilirea unor seturi de reguli de optimizare corelând rezultatele obținute pentru fiecare studiu de caz din capitolele 5-8;
- Elaborarea regulilor de concept în cazul fabricației aditive cu pulberi metalice pentru piese cu cavități și sintetizarea tabelară a acestora.

13.3. Direcții viitoare de cercetare

Metodologia de optimizare structurală dezvoltată, dar și metodele de personalizare a rezultatelor optimizării pentru tehnologiile de fabricație pre-selectate necesită o activitate de cercetare și dezvoltare temeinică, care trebuie continuată prin:

- Testarea componentelor personalizate în condiții de lucru reale. Parte din componente, cele produse, sunt utilizate ca piese de zbor componente fiecărui ansamblu prezentat în contextul fiecărui studiu de caz (DTV, Euclid) și au trecut cu succes etapa de testare în medii relevante realizată fie de INCAS (în cazul DTV) fie de Agenția Spațială Europeană (în cazul EUCLID);
- Analiza evoluției acestora în timp și urmărirea apariției posibilelor defecte și trasarea acestora pentru a identifica dacă personalizarea optimizării putea fi făcută preventiv. Componentele produse deja sunt utilizate ca piese de zbor de aproximativ 3 ani, iar până în acest moment nu prezintă defecte;
- Evaluarea rezistenței în timp și în condiții mecanice de lucru a parte a componentelor structurale obținute prin personalizarea optimizării structurale. Componentele produse deja sunt utilizate ca piese de zbor de aproximativ 3 ani, iar până în acest moment nu prezintă defecte.

BIBLIOGRAFIE (extras)

- [WOS1] **A.M. Cismilianu**, I. Chirita, A.G. Persinaru, A. Marin, C.E. Munteanu, A.M. Neculaescu, C. Dragoman, „Re-entry Vehicle Structural Optimization for Mass Minimization”. In: Machado, J., Soares, F., Trojanowska, J., Ottaviano, E. (eds) Innovations in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79165-0_9, 2021
- [WOS2] T.P. Afilipoae, A.M. Neculaescu, A.I. Onel, M. V. Pricop, A. Marin, A.G. Persinaru, **A.M. Cismilianu**, C.E. Munteanu, A. Toader, A. Sirbi, S. Bennani, T.V. Chelaru, "LV-MDO în the development of a Microlauncher", Transportation Research Procedia, 2352-1465 © 2017 The Authors. Published by Elsevier B.V., Peer-review under responsibility of the scientific committee of the 6th CEAS Air & Space Conference Aerospace Europe 2017;"
- [WOS3] Frunzulica, **A.M. Cișmilianu**, A. Boros, A. Dumitrache, and B. Suatean, University POLITEHNICA of Bucharest, Professor, "A new Vertical Axis Wind Turbine Design for Urban Areas", AIP Conference Proceedings 1738, 410008 (2016); doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4952209>, 13th edition of International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, ICNAAM 2015, Rodos Greece;
- [SCOPUS1] Nenciu, A.R. Petre, **A.M. Cișmilianu**, C.E. Munteanu, "VTVL Engine Attachment Structural Optimization", NMAS 2022, Romania.
- [SCOPUS2] **A.M. Cișmilianu**, I. Chirita, A.G. Persinaru, A. Marin, C.E. Munteanu, A.M. Neculaescu, C. Dragoman, "Re-entry vehicle structural optimization for mass minimization", ICIE 2020, Portugal;
- [SCOPUS3] **A.M. Cișmilianu**, M. Năstase, I.C. Oncescu, "Research on the optimal shape of high pressure tanks for vehicles with vertical take-off and landing", U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 83, Iss. 2, 2021
- [SCOPUS4] Toader, A.M. Neculăescu, A.G. Perșinaru, **A.M. Cișmilianu**, A. Marin, C.E. Munteanu, " GNC algorithms numerical and testing validation for VTVL demonstrator ", International Workshop on Numerical Modelling în Aerospace Sciences, NMAS 2019, Bucharest Romania;
- [SCOPUS5] C.E. Munteanu, **A.M. Cismilianu**, A.I. Chira & D. Baran – " Structural optimization of space components adapted for 3D printing ", DAAAM Proceedings, 28th Danube Adria Association for Automation & Manufacturing, DAAAM 2017, Zadar Croatia;
- [BDI1] **A.M. Cișmilianu**, C.E. Munteanu, I.C. Oncescu, R.P. Bibire, V. Stoenescu, M.V. Pricop de la INCAS; E. Rey, S. Eyrignoux de la LISI Aerospace Additive Manufacturing, "End to end process of hollow spacecraft structures with high frequency and low mass obtained with in-house structural optimization tool and additive manufacturing", INCAS BULLETIN, Volume 9, Issue 3, pag. 13, ISSN 2247-4528 (online), ISSN 2066-8201 (print), 5th International Workshop on Numerical Modelling în Aerospace Sciences, NMAS 2017, Bucharest Romania;
- [BDI2] **A.M. Cișmilianu**, A.R. Petre, C.D. Liliceanu, R.P. Bibire, "Topology optimization of a payload adapter for a launcher" Book of Abstracts NMAS 2017 and DVD, ISSN 2360–1809, 5th International Workshop on Numerical Modelling în Aerospace Sciences, NMAS 2017, Bucharest Romania;