Universitatea
Transilvania
din Brașov

ȘCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea de Inginerie Tehnologică și Management Industrial

Ing. Emilian-Ionuț CROITORU

Cercetări privind testarea la impact a panourilor compozite termorigide armate cu fibre de sticlă, carbon și kevlar-carbon

Research Regarding the Impact Testing of Thermoset Composite Panels Armed with Glass, Carbon and Kevlar-Carbon Fibers

REZUMAT / ABSTRACT

Conducător ştiinţific

Prof. univ. dr. ing. Gheorghe OANCEA

BRAȘOV, 2018

Universitatea Transilvania din Brașov

D-lui / D-nei.....

COMPONENȚA

Comisiei de doctorat

Numită prin ordinul Rectorului Universității Transilvania din Braşov
nr. ..... din .....

PREŞEDINTE:	prof. univ. dr. ing. Ramona CLINCIU Universitatea „Transilvania" din Brașov
CONDUCĂTOR ŞTIINȚIFIC:	prof. univ. dr. ing. Gheorghe OANCEA Universitatea „Transilvania" din Brașov
REFERENȚI:	prof. univ. dr. ing. Nicolae BÂLC Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca
	prof. univ. dr. ing. Cătălin FETECĂU Universitatea „Dunărea de Jos" din Galați
	conf. univ. dr. ing. Cristin-Olimpiu MORARIU Universitatea „Transilvania" din Brașov

Data, ora şi locul susținerii publice a tezei de doctorat: 10.01.2019, ora 11, sala VIII6

Eventualele aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării vor fi transmise electronic, în timp util, pe adresa emilian.croitoru@unitbv.ro

Totodată, vă invităm să luați parte la şedința publică de susținere a tezei de doctorat.

Vă mulțumim!

CUPRINS (lb. română)

	Pg. teza	Pg. rezumat
LISTA DE NOTAȚII	**7**	**9**
LISTA DE ABREVIERI	**8**	**10**
1 INTRODUCERE	**11**	**11**
1.1 Oportunitatea și importanța temei de cercetare	11	11
1.2 Strategia preliminară de cercetare	13	13
1.3 Structura și conținutul lucrării	16	16
2 STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND TESTAREA LA IMPACT A PANOURILOR COMPOZITE	**18**	**18**
2.1 Panourile compozite și testarea la impact a acestora	18	18
2.1.1 Materiale compozite – noțiuni introductive	18	18
2.1.2 Comportamentul mecanic al materialelor compozite	20	18
2.1.2.1 Comportamentul macromecanic al materialelor compozite	21	19
2.1.2.2 Comportamentul micromecanic al materialelor compozite	28	19
2.1.2.3 Concluzii referitoare la comportamentul materialelor compozite	33	20
2.1.3 Materiale compozite – tehnologii de fabricație	34	20
2.1.4 Testarea la impact a panourilor compozite	38	20
2.2 Analiza în mediu virtual a panourilor compozite	50	22
2.2.1 Noțiuni de bază privind FEM	50	22
2.2.2 Compania MSC.Software. Istoric și aplicațiile software dezvoltate	52	22
2.2.2.1 Patran – aplicație de pre și postprocesare a modelelor cu elemente finite	53	23
2.2.2.2 Solverul matematic Nastran	54	23
2.3 Cercetări experimentale privind testarea la impact a panourilor compozite	58	24
2.3.1 Noțiuni preliminare	58	24
2.3.2 Bazele cercetării experimentale	59	24

2.3.3 Aplicație software pentru cercetarea experimentală 66 26
2.4 Concluzii referitoare la stadiul actual al cercetărilor privind testarea la impact a panourilor compozite 71 26
3 OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT 73 28
4 ANALIZA FEM A UNOR PANOURI COMPOZITE SUPUSE LA IMPACT 75 30
4.1 Analiza FEM a unor panouri compozite, de formă simplă, necesare validării practice 76 31
4.2 Analiza cu elemente finite a unui panou sigilant al măștii de oxigen din componența unei aeronave 79 31
4.3 Proprietățile panourilor compozite armate cu fibră de sticlă și kevlar, din componența unei aeronave, supuse la impact 83 33
4.4 Efectul orientării laminelor din componența panourilor compozite, folosite în industria auto, armate cu fibră de sticlă și kevlar, supuse la impact 86 34
4.5 Analiza FEM a unei piese de geometrie complexă supusă la impactul cu o bilă 89 34
4.5.1 Obținerea modelului CAD necesar discretizării 89 34
4.5.2 Discretizarea modelului CAD 90 35
4.5.3 Finalizarea modelului cu elemente finite 92 35
4.5.4 Prezentarea testelor de impact simulate 94 37
4.5.5 Setarea modelului discretizat în vederea simulării 95 37
4.5.6 Prezentarea rezultatelor și interpretarea acestora 99 38
4.6 Concluzii privind analiza FEM a panourilor compozite supuse la impact 104 39
5 CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND TESTAREA LA IMPACT A PANOURILOR COMPOZITE ARMATE CU FIBRE DE STICLĂ, CARBON ȘI KEVLAR-CARBON 107 42
5.1 Testarea la impact a eșantioanelor necesare validării 107 42
5.1.1 Standarde internaționale 107 42
5.1.2 Desfășurarea cercetării experimentale 108 43

5.1.3 Rezultatele testelor de laborator 110 43
5.1.4 Validarea FEM și concluzii privind testele de laborator 116 45
5.2 Testarea la impact a piesei de tip aripă de autoturism 117 46
5.2.1 Considerații referitoare la fabricația piesei de tip aripă de automobil 117 46
5.2.2 Validarea practică a analizei FEM aferentă testării la impact a aripii de autoturism 119 47
5.2.3 Elemente teoretice privind realizarea testelor de laborator 121 48
5.2.4 Rezultatele testelor de laborator 123 49
5.2.5 Concluzii ale testării la impact a aripii de autoturism 124 50
5.3 Concluzii în urma cercetărilor experimentale 125 50
6 INSTRUMENT SOFTWARE DESTINAT TESTĂRII LA IMPACT A PANOURILOR COMPOZITE DE FORMĂ DREPTUNGHIULARĂ 127 52
6.1 Concepte matematice 128 52
6.2 Dezvoltarea instrumentului software 131 53
6.2.1 Considerente inițiale 131 53
6.2.2 Modalitatea de lucru 132 54
6.3 Validarea instrumentului software C-PIC 139 57
6.4 Concluzii referitoare la instrumentul software C-PIC 144 58
7 CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. DISEMINAREA REZULTATELOR. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE 145 59
7.1 Concluzii generale 145 59
7.2 Contribuții personale 146 60
7.3 Direcții viitoare de cercetare 147 61
8 BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ 148 62
REZUMATUL TEZEI 213 67
CURRICULUM VITAE 214 68

CUPRINS (lb. engleză)

	Pg. teza	Pg. rezumat
NOTATION LIST	**7**	**9**
ABBREVIATIONS	**8**	**10**
1 INTRODUCTION	**11**	**11**
1.1 Research theme opportunity and importance	11	11
1.2 Preliminary research strategy	13	13
1.3 Research structure and contents	16	16
2 CURRENT STATUS OF RESEARCH REGARDING IMPACT TESTING OF COMPOSITE PANELS	**18**	**18**
2.1 Composite panels and their impact testing	18	18
2.1.1 Composite materials – introduction	18	18
2.1.2 Mechanical behaviour of composite materials	20	18
2.1.2.1 Macromechanical behaviour of composite materials	21	19
2.1.2.2 Micromechanical behaviour of composite materials	28	19
2.1.2.3 Conclusions regarding the behaviour of composite materials	33	20
2.1.3 Composite materials – fabrication techniques	34	20
2.1.4 Composite panels impact testing	38	20
2.2 FEM analysis of composite panels	50	22
2.2.1 FEM basis concepts	50	22
2.2.2 MSC.Software company. History and developed software applications	52	22
2.2.2.1 Patran – pre and postprocessing application of finite element models	53	23
2.2.2.2 Mathematical solver Nastran	54	23
2.3 Experimental research regarding composite panels impact testing	58	24
2.3.1 Preliminary concepts	58	24
2.3.2 Experimental research basis	59	24
2.3.3 Software application for experimental research	66	26

2.4 Conclusions regarding the current status of research regarding impact testing of composite panels 71 26

3 PHD THESIS OBJECTIVES 73 28

4 FEM ANALYSIS OF COMPOSITE PANELS SUBJECTED TO IMPACT 75 30

4.1 FEM analysis of simple composite panels required for practical validation 76 31

4.2 FEM analysis of oxygen mask locking panel of aircraft 79 31

4.3 Impact properties of parts manufactured from fiberglass and Kevlar composite panels 83 33

4.4 Effect of laminates rientation on impact properties of fiberglass and Kevlar composite panels 86 34

4.5 FEM analysis of a complex geometric part subjected to ball impact 89 34

4.5.1 CAD modelling 89 34

4.5.2 Meshing 90 35

4.5.3 FEM finalization 92 35

4.5.4 Simulated impact tests presentation 94 37

4.5.5 Setup of meshed model for analysis 95 37

4.5.6 Results presentation and interpretation 99 38

4.6 Conclusions regarding FEM analysis of composite panels subjected to impact 104 39

5 EXPERIMENTAL RESEARCH REGARDING THE IMPACT TESTING OF COMPOSITE PANELS ARMED WITH FIBERGLASS, CARBON AND KEVLAR-CARBON 107 42

5.1 Impact testing of probes for validation 107 42

5.1.1 International standards 107 42

5.1.2 Development of research 108 43

5.1.3 Laboratory tests' results 110 43

5.1.4 FEM validation and conclusions 116 45

5.2 Impact testing of a car wing 117 46

5.2.1 Concepts regarding part fabrication 117 46

5.2.2 Practical validation of FEM analysis of car wing 119 47
5.2.3 Theoretical concepts regarding laboratory tests 121 48
5.2.4 Laboratory tests' results 123 49
5.2.5 Conclusions regarding car wing impact tests 124 50
5.3 Conclusions regarding experimental research 125 50
6 SOFTWARE INSTRUMENT FOR IMPACT TESTING OF RECTANGULAR COMPOSITE PANELS 127 52
6.1 Mathematical concepts 128 52
6.2 Software instrument development 131 53
6.2.1 Initial concepts 131 53
6.2.2 Way of work / Algorithm 132 54
6.3 Validation of software instrument C-PIC 139 57
6.4 Conclusions regarding C-PIC software instrument 144 58
7 FINAL CONCLUSIONS. PERSONAL CONTRIBUTIONS. RESULTS DISEMINATIONS. FUTURE RESEARCH DIRECTIONS 145 59
7.1 General conclusions 145 59
7.2 Personal contributions 146 60
7.3 Future research directions 147 61
8 SELECTED BIBLIOGRAPHY 148 62
PHD THESIS ABSTRACT 213 67
CURRICULUM VITAE 214 68

LISTA DE NOTAȚII

A – matrice a laminatului;

B – matrice a laminatului;

C – matrice de rigiditate;

CTRIA3 – element de discretizare de tip panou având trei noduri;

CQUAD4 – element de discretizare de tip panou având patru noduri;

D – matrice a laminatului;

E – modulul de elasticitate longitudinală;

G – modulul de elasticitate transversală;

L – deformație longitudinală;

m – masă;

M – raport masic;

M – moment;

N – forță;

p – presiune;

S – matrice de flexibilitate;

SHELL – element de discretizare de tip panou 2D;

T – temperatură;

v – volum;

V – raport volumic;

W – deformație transversală;

ε – alungire relativă;

η – coeficienți de influență de primă sau de a doua speță;

θ – unghiul de orientare al laminei;

ν – coeficienți de tip Poisson/Centov;

ρ – densitate;

σ – tensiune longitudinală;

τ – tensiune transversală;

i, j, k, m,n – indici de numerotare.

LISTA DE ABREVIERI

C-PIC – Composite Panels Impact Calculator;

CAD – Computer Aided Design;

CAM – Computer Aided Manufacturing;

CATIA – Computer Aided Three-dimensional Interactive Application;

DoE – Design of Experiments;

FEM – finite element model (model cu elemente finite);

FR – factor de rezervă;

GEO – geometrie;

Nastran – NASA Structural Analysis;

SOL – soluție din Nastran;

SWOT – Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats.

1 INTRODUCERE

1.1 Oportunitatea și importanța temei de cercetare

Interesul major față de dezvoltarea, analiza și proiectarea structurilor de orice fel din materiale compozite este atestat atât de creșterea spectaculoasă a utilizării materialelor compozite în domenii de vârf precum ingineria aerospațială (cazul aeronavei A350XWB-900/-1000 în cadrul căreia procentajul de materiale compozite atinge 53%) și domeniul auto (cazul automobilelor de Formula 1), cât și de numărul de articole publicate în ultimii ani, în diverse jurnale indexate în bazele de date internaționale.

Studiul materialelor compozite constituie un domeniu interdisciplinar, aflat la intersecția mai multor discipline cum ar fi: știința și ingineria materialelor, chimie, rezistența materialelor, proiectarea și calculul structurilor, toate acestea având o contribuție importantă asupra produsului finit [DOG08].

Cercetarea de față abordează aspecte teoretice și experimentale privind comportamentul la impact al materialelor compozite polimerice armate cu fibre de sticlă, fibre de carbon și fibre de kevlar, utilizate cu precădere în industria aeronautică și cea a construcțiilor de mașini.

Cercetarea a fost realizată pe baza interesului crescut existent în industrie față de utilizarea materialelor compozite, precum și datorită sensibilității crescute manifestată de acestea la deteriorările produse de impact.

Avantajele compozitelor armate cu fibre sunt date de posibilitatea optimizării acestora, putând fi impuse proprietățile finale ale materialului, corespunzătoare unei aplicații date, prin alegerea unei combinații unice a matricei, a fibrelor de armare, a orientării și a distribuției laminelor, ceea ce conduce la obținerea unor structuri ușoare și economice. Din păcate, necesitatea de a defini proprietățile materialului dintr-o multitudine de variante disponibile (combinații fibre–matrice, orientări ale laminelor în pachetul de laminate, secvența pachetului de laminate etc.) a determinat o anumită rezervă în ceea ce privește utilizarea materialelor compozite în anumite sectoare industriale [DOG08].

Avantajele materialelor compozite sunt multiple și dintre cele mai diverse. Acestea oferă posibilitatea inginerilor de a defini un material unic care să corespundă unei anumite aplicații. Caracterizarea și înțelegerea deplină a comportamentului mecanic al structurii panourilor compozite pentru diferite cazuri de încărcare necesită un instrument sau o metodă care poate considera în calcul posibilitățile imense de combinare a variabilelor de proiectare, precum și diversele proprietăți ale materialelor componente studiate.

Materialele compozite sunt folosite la realizarea structurilor performante, avantajul principal al acestora fiind raportul ridicat dintre rezistența materialului și greutatea sa volumică. Pentru a evidenția acest fapt, în Figura 1.1 și Figura 1.2 se prezintă consumul unor astfel de materiale într-un domeniu de top, și anume cel aerospațial, prin evidențierea acestora în cadrul a două aeronave de mare tonaj de transport pasageri și cargo – Boeing 787 Dreamliner și Airbus A350XWB-900/-1000, ambele reprezentând vârful de gamă al industriei aeronautice americane, respectiv europene.

Materiale compozite prezintă proprietăți mecanice superioare materialelor plastice obișnuite. Compozitele s-au impus datorită greutății scăzute, rezistenței la coroziune și radiații, proprietăților termoizolante și ușurinței cu care se pot prelucra.

Însă, accidentele de diferite tipuri (accidente rutiere sau lovituri în timpul asamblării) sunt frecvente, iar aceste materiale sunt sensibile. Astfel, studiul privind proprietățile materialelor compozite realizate sub formă de panouri și nu numai a devenit vital pentru dezvoltarea viitoare a acestora. Această activitate implică atât determinarea influenței factorilor externi asupra panourilor compozite, cât și analiza la impact sau degradare a acestora, lucru prezentat, de altfel, și în actuala teză de doctorat.

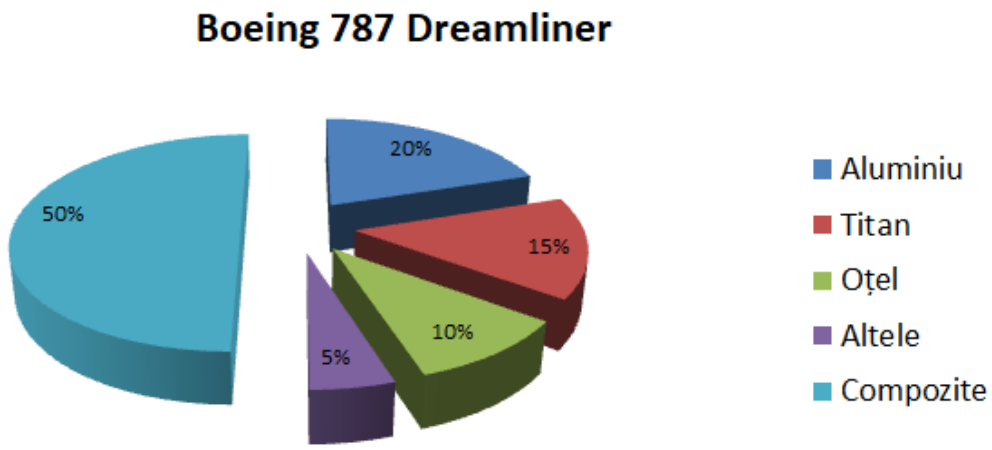


Figura 1.1 Consumul de materiale compozite în industria aeronautică – cazul aeronavei Boeing 787 [BOE08]

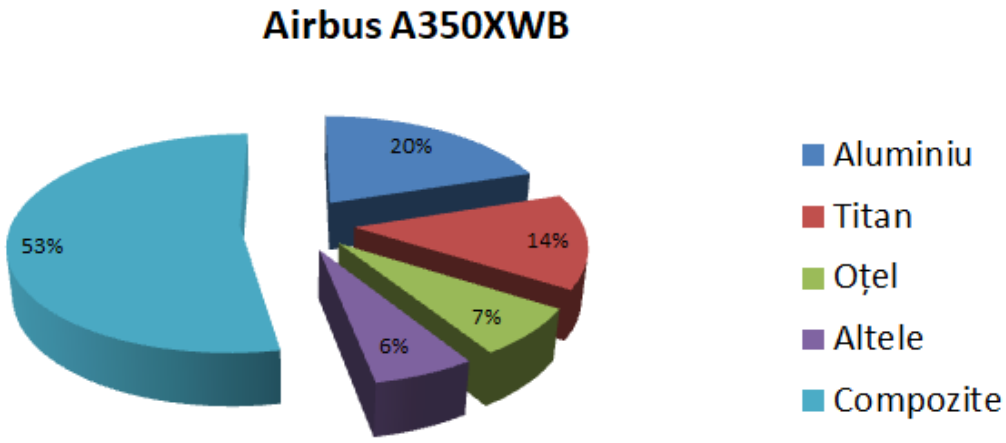


Figura 1.2 Consumul de materiale compozite în industria aeronautica – cazul aeronavei Airbus A350XWB [AIR06]

Sfera aplicațiilor acestor materiale este foarte mare, acestea fiind prezente în toate domeniile de activitate, în special în domeniul aeronautic și cel al construcțiilor de mașini. Industria de automobile reprezintă una din cele mai importante ramuri din economia globală ce generează un imbold pentru alte domenii industriale, un autovehicul fiind realizat dintr-o multitudine de piese. Acestea din urmă sunt realizate dintr-o paletă largă de materiale (metalice, plastice, textile etc.). Materialul de bază era metalul în trecut, însă apariția materialelor plastice a condus la o largă dezvoltare și folosire a acestora în domeniul industriei de automobile. Această dezvoltare s-a realizat cu precădere prin

armarea cu fibre (de sticlă, de carbon, de kevlar etc.) și recent prin utilizarea matricelor din rășini (epoxidice și nu numai). Astfel, numărul pieselor fabricate din aceste materiale a crescut, iar la momentul actual, materialele compozite constituie soluția optimă pentru dezvoltarea eficientă a autovehiculelor de orice tip și din orice gamă.

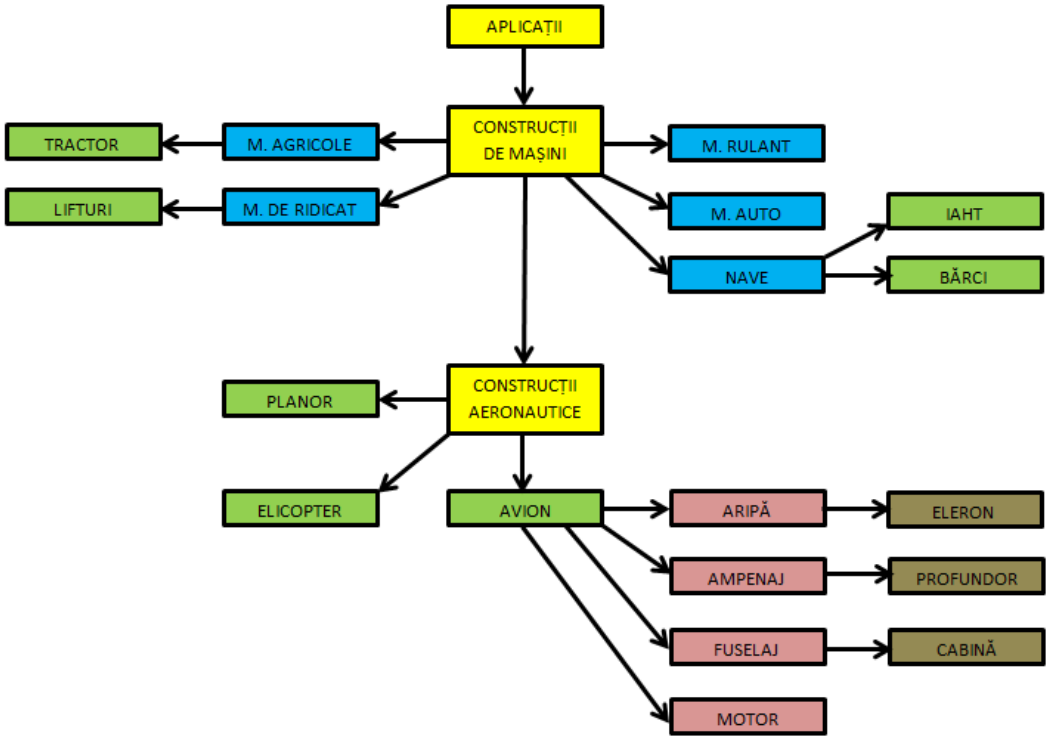


Figura 1.3 Schema aplicațiilor materialelor compozite în domeniul construcțiilor de mașini [GHE13]

Până în 2010, circa 10% din masa automobilului era construită din materiale compozite sub formă de mase plastice armate. Tendința a făcut ca acest procentaj să crească în următorii ani, astfel ajungându-se, în prezent, la un procentaj de 56% în privința construcției elementelor de caroserie: aripi, uși, pavilioane, capote din componența autovehiculelor sau panouri de fuselaj/aripă din componența aeronavelor.

1.2 Strategia preliminară de cercetare

Cu scopul de a realiza o cercetare riguroasă din punct de vedere științific, care să aducă o soluție corespunzătoare unei asemenea tematici din domeniul tehnic, se menționează faptul că punctul inițial de pornire al acesteia este stabilirea unei strategii clare privind cercetarea însăși, precum și a unei modalități de investigare pentru crearea de „plus-valoare" în cadrul temei de cercetare propusă. Din aceste rațiuni, elaborarea prezentei lucrări a impus:

- studierea aspectelor teoretice privind analiza la impact a panourilor compozite ca bază de pornire;
- cercetarea modurilor practice de realizare în mediul virtual a acelorași analize;
- realizarea de experimente de laborator pentru validarea rezultatelor obținute în etapa de simulare.

În urma recenziilor asupra stadiului actual al acestor aspecte teoretice și practice, s-a constatat că o metodă pentru a realiza această investigație este o analiză locală în ceea ce privește tensiunile și deformațiile rezultate în urma încărcării respectivei componente. Această analiză locală utilizează modelarea și calculul cu elemente finite.

Acest tip de modelare include totalitatea metodelor de evaluare a unei multitudini de ecuații asociate unor elemente simple aflate în subdomenii mici, numite elemente finite, pentru a aproxima o ecuație complexă, majoră, dintr-un domeniu mai mare [ZIE05]. Această tehnică numerică este folosită pentru a găsi soluții aproximative ale unor ecuații diferențiale de diferite ordine [CRO14A].

Această abordare presupune analizarea unui model local mic independent de modelul global al structurii. De asemenea, se pot determina stări detaliate specifice de tensiuni locale utilizând modele discretizate independent. Un alt avantaj al acestei metode este și reducerea efortului de calcul necesar pentru obținerea stării de tensiune în comparație cu analizarea globală a structurii de componente [RAN90].

În cazul aplicării acestei metode pentru calculul panourilor compozite nu este necesară cunoașterea „a priori" a locației regiunii unde este necesară o astfel de analiză. În schimb, este necesară o anumită întelegere a panourilor compozite și a mecanicii lor complete, a proprietăților mecanice, a rezistenței, a ruperii, a mecanicii de cedare, a oboselii, a efectului mediului înconjurător, a îmbătrânirii, a testării non-distructive și a aspectelor tehnologice ale acestora [RAN90]. Atât comportamentul mecanic, cât și analiza tehnologică a panourilor compozite sunt prezentate în literatura de specialitate [JON99], [GIB94]. Aceste lucrări conțin explicații a numeroase concepte privind comportamentul panourilor compozite, precum și studii de caz teoretice și experimentale, descrieri de fibre, deformații și tensiuni, proprietăți, criterii de cedare, criterii de flambaj și probleme de vibrații.

După cum s-a menționat anterior, această tehnică numerică este folosită pentru a găsi soluții aproximative ale unor ecuații diferențiale de diferite ordine. Din acest motiv, tehnica numerică necesită validare, iar această validare se poate realiza doar experimental. Validarea presupune generarea unei comparații între cele două mijloace de investigare și este singura ce poate răspunde la întrebarea: Cât de aproape de realitate este simularea realizată in mediul virtual?

Metoda cercetării experimentale este folosită pretutindeni, de la mediul de afaceri până la cel academic sau de dezvoltare industrială, și se preocupă cu investigarea și îmbunătățirea proceselor și produselor acestor medii. În repetate rânduri, această metodă implică optimizare, în sensul de cum se obține performanță sau rezultate maxime într-un anume proces, iar în cercetare–dezvoltare și/sau fabricație mai mult de jumătate din resursele experimentale disponibile sunt îndreptate spre soluționarea problemelor de optimizare.

Metoda cercetării experimentale oferă răspunsul la numeroase întrebări. Spre exemplificare: "Cum se poate ajunge la condiții optime într-un proces de sinteză?" sau "Care combinație de factori generează cel mai bun rezultat, cu cele mai mici imperfecțiuni, la costul cel mai mic, utilizând consum redus de energie și materiale și producând cel mai mic grad de poluare?" Ținând cont că prețul realizării acestor experimente crește, este esențial ca răspunsul la aceste întrebări să fie oferit de către producător pentru a realiza un număr cât mai mic posibil de teste. Soluția la aceste întrebări trebuie să fie găsită ținând cont și de scopul final, și anume: numărul de experimente selectat și realizat să ofere maximum de rezultate din punct de vedere informativ. Pe baza tuturor acestor factori

interdependenți a luat naștere metoda cercetării experimentale și/sau așa-numitul "Design of Experiments" [ERI08].

Astfel, considerând cele trei direcții, și anume: studierea aspectelor teoretice, cercetarea privind modurile practice de realizare în mediul virtual a analizelor la impact prin intermediul metodei cu elemente finite și realizarea practică a experimentelor, se pot contura obiectivele prezentei teze de doctorat, precum și strategia de cercetare aferentă pentru crearea unei „plus-valori". Pe baza acesteia, este determinată metodologia de cercetare cu principalele sale componente:

- stadiul de cercetare teoretic – care presupune căutarea răspunsurilor pentru întrebări de genul: "Ce s-a realizat?" sau "Ce se cunoaște în acest moment?";
- stadiul de cercetare practic – care implică realizarea analizelor în mediul virtual și a experimentelor de laborator pentru efectuarea validării respectivelor analize FEM.

Urmărind această metodologie de cercetare a autorului, se obțin rezultatele necesare pentru prezenta cercetare și se conturează concluziile aferente. Întregul proces este prezentat sub formă grafică în Figura 1.4.

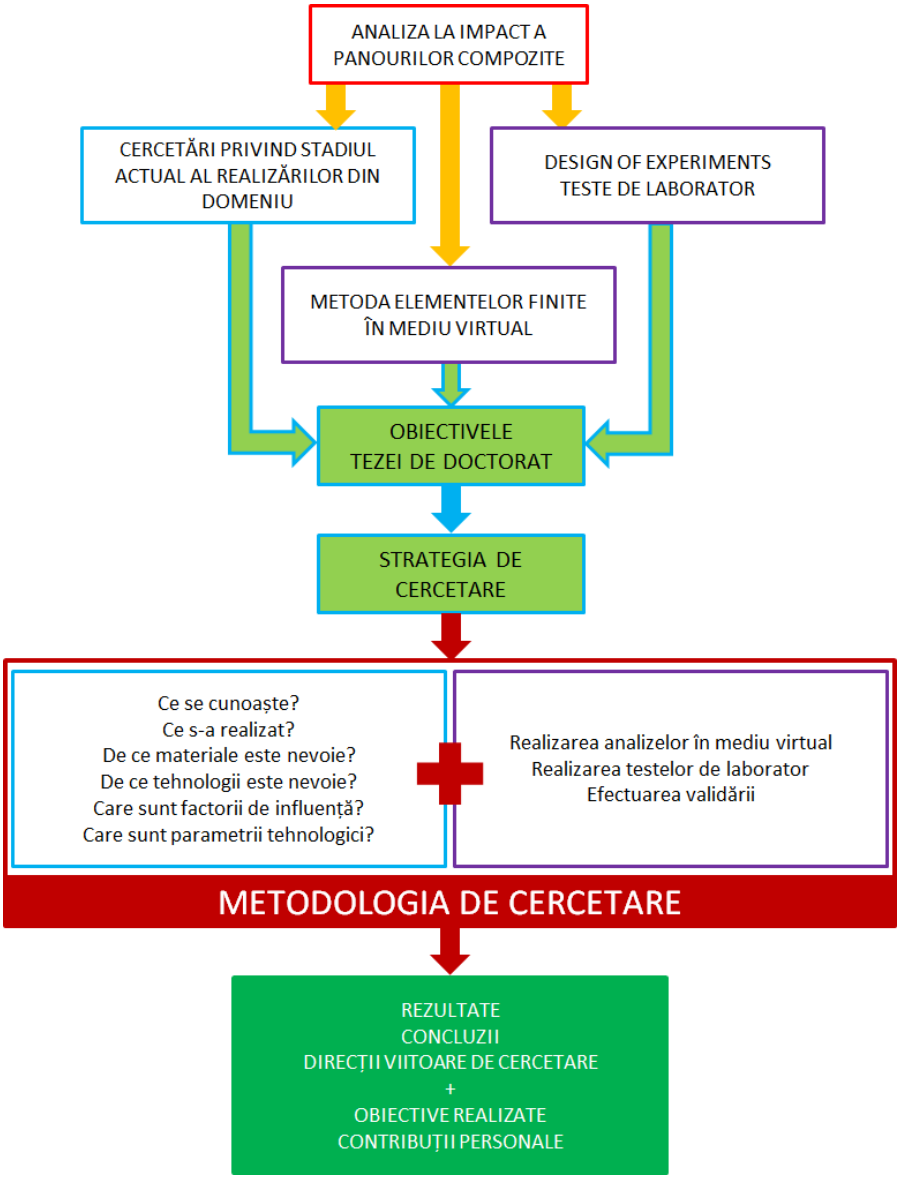


Figura 1.4 Strategia preliminară de cercetare

1.3 Structura și conținutul lucrării

Lucrarea de față prezintă cercetările întreprinse de autor în domeniul calculului, fabricării și testării panourilor compozite conținând fibre de sticlă, fibre de carbon și fibre de kevlar unite într-o matrice de rășină epoxidică. Cercetările întreprinse contribuie la clarificarea unor aspecte legate de comportamentul la impact al panourilor compozite fabricate din materialele menționate anterior.

Primul capitol, cel introductiv, este dedicat prezentării oportunității și importanței temei abordate precum și stabilirii strategiei și a metodologiei de cercetare. În vederea desfășurării cercetărilor și a formulării obiectivelor a fost necesară realizarea unui studiu bibliografic a cărui concluzie a fost că tema acestei lucrări este de actualitate și prezintă interes pentru companiile industriale.

Primul pas al metodologiei de cercetare, și anume studiul realizat asupra literaturii de specialitate din domeniile aerospațial și al construcțiilor de mașini prin intermediul articolelor publicate în special în ultima decadă, a construit o imagine a stadiului actual al temei luate în considerare, ce este prezentat în cadrul capitolului al doilea. Documentarea realizată în acest capitol al tezei de doctorat este realizată cu luarea în considerare a următoarelor trei direcții, astfel:

1. stadiul actual al principalelor caracteristici ale panourilor compozite:
    - definiții ale materialelor compozite și definirea panourilor compozite (diferite materiale, diverse grosimi, variate orientări ale laminelor etc.);
    - comportamentul macromecanic și micromecanic al panourilor compozite;
    - concepte matematice din cadrul teoriei de placă laminară;
    - tehnologii de fabricație a panourilor compozite;
    - stadiul actual al cercetărilor din domeniu.

    Aceste caracteristici sunt exprimate pentru panourile compozite în general și pentru placa laminată conținând fibre de sticlă, fibre de carbon și fibre de kevlar într-o matrice de rășină epoxidică, în special.
2. analize numerice realizate prin intermediul metodei cu elemente finite:
    - generalități despre una dintre cele mai importante analize în privința calculului diverselor structuri de rezistență și nu numai;
    - descrierea acestui instrument de calcul eficient, atât din punct de vedere pur tehnic, cât și din punctul de vedere al costurilor de implementare; acest tip de analiză se bazează pe un sistem software care utilizează metoda elementelor finite pentru a analiza un material sau obiect și pentru determinarea modului în care tensiunile și deformațiile afectează design-ul obiectului în cauză, în cazul de față panouri compozite; analiza cu elemente finite determină punctele de slăbiciune în design-ul obiectului de analizat, înainte de fabricarea efectivă a acestuia;
    - stadiul actual al cercetărilor din domeniul FEM.

    Această analiză a devenit un element cheie în metodologia de proiectare a diverselor piese și ansambluri din diverse domenii inginerești.

3. metodologia de lucru în laborator și echipamentele necesare experimentelor:
    - generalități despre cercetările experimentale;
    - bazele cercetărilor experimentale și modele de realizare practică a acestora;
    - modelarea tuturor datelor experimentale obținute în urma acestor cercetări pentru completarea și validarea studiului realizat în mediul virtual;
    - stadiul actual al testelor practice.

Capitolul al treilea prezintă obiectivele tezei de doctorat pornind de la stadiul actual al cercetărilor prezentate anterior, precum și de la motivarea temei alese.

Capitolul al patrulea prezintă cercetările întreprinse în mediul virtual utilizând aplicația software dedicată discretizării numită Patran împreună cu solverul său matematic Nastran, ca principale instrumente de modelare și analiză cu elemente finite, pentru determinarea caracteristicilor tehnice necesare proiectării unui panou compozit armat cu fibre de sticlă, fibre de carbon și fibre de kevlar, în matrice de rășină epoxidică, conform unor cerințe de încărcare și cost impuse. Procesul de impact este simulat numeric într-o manieră corespunzătoare, și anume ținând cont de valorile parametrilor de intrare care pot influența comportamentul la impact al panourilor compozite studiate, precum și deformațiile și tensiunile ce apar în aceste panouri. Astfel, se pun bazele aparatului matematic necesar pentru descrierea comportamentului la impact al panoului compozit respectiv și se analizează evoluția tensiunilor și a deformațiilor totale în timpul producerii impactului.

Capitolul al cincilea reprezintă partea practică a acestei lucrări de doctorat prin expunerea rezultatelor obținute în cadrul diverselor teste practice a unor panouri compozite de geometrie simplă și/sau complexă supuse la impact, în cadrul testelor Charpy/Izod. În acest capitol, se realizează și validarea rezultatelor obținute în mediul virtual cu cele obținute din experimentele practice pentru diferite panouri compozite. Simularea comportamentului la impact a panourilor compozite într-un mediu computerizat generează rezultatele validate prin intermediul aparatului matematic integrat în metoda „Design of Experiments” și a aplicației software Design Expert.

Prezentarea software-ului creat și a modalității de utilizare a acestuia, acest software fiind unul dintre obiectivele importante ale prezentei teze de doctorat, este expusă în cadrul capitolului al șaselea.

Ultimul capitol, al șaptelea, conține prezentarea concluziilor finale, a principalelor contribuții ale autorului aduse la rezolvarea temei abordate și a perspectivelor viitoare de cercetare în ceea ce privește studiul comportamentului la impact al panourilor compozite armate cu fibre de sticlă, fibre de carbon și fibre de kevlar, într-o matrice de rășină epoxidică.

2 STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND TESTAREA LA IMPACT A PANOURILOR COMPOZITE

2.1 Panourile compozite și testarea la impact a acestora

2.1.1 Materiale compozite – noțiuni introductive

Prezentul subcapitol al tezei de doctorat prezintă definiția cuvântului "compozit" pentru un inginer proiectant de structuri din diverse domenii și condițiile de îndeplinit pentru ca un material să fie într-adevăr compozit, și anume [DOG08]:

- să conțină cel puțin doi constituenți;
- obținerea compozitului în cauză să se realizeze astfel încât forma, mărimea și distribuția componentelor să poată fi controlate și/sau ajustate;
- să aibă performanțe superioare, unice care pot fi evaluate folosind principiile mecanicii, cunoscând proprietățile, mărimea și dispunerea componentelor sale.

De asemenea, este realizată o trecere în revistă a proprietăților materialelor compozite în comparație cu omoloagele lor, și anume materialele metalice omogene. La finalul subcapitolului, este realizată și o clasificare a materialelor compozite și sunt menționate fibrele și matricea compozitului utilizat pentru cercetarea de față.

2.1.2 Comportamentul mecanic al materialelor compozite

Materialele compozite sunt neomogene sau eterogene și anizotrope din punctul de vedere a proprietăților mecanice. Astfel, aceste proprietăți variază de la un punct la altul, fiind diferite pe direcții diferite, direcții ce au aceeași origine. Analiza din punct de vedere macroscopic a laminei are la bază ipoteza conform căreia materialul este omogen, iar proprietățile componentelor sunt relevante doar prin proprietățile globale ale acestuia [DOG08].

Această elasticitatea liniară a corpurilor implică relații liniare și omogene între cele 6 tensiuni și cele 6 deformații specifice, distincte [DOG08], guvernate de legea lui Hooke [UGU03].

Pe baza acestei legi, apar următoarele categorii de materiale compozite, în funcție de proprietățile lor mecanice [DOG08]:

- **materiale anizotrope** – reprezintă cazul cel mai general; pentru aceste materiale proprietățile elastice, în fiecare punct, diferă în funcție de orientarea sistemului de axe;
- **materiale ortotrope** – reprezintă materialele pentru care există 3 plane de simetrie elastică, perpendiculare între ele, care definesc plane de ortotropie;
- **materiale izotrope** – reprezintă materialele pentru care proprietățile sunt independente de orientare.

Aceste categorii de materiale pot avea două tipuri de comportament: macromecanic, compozitul privit ca ansamblu fibre–matrice pentru determinarea răspunsului acestuia la diferite tipuri de tensiuni, și micromecanic, care presupune studiul acestor materiale la nivel de constituenți.

2.1.2.1 Comportamentul macromecanic al materialelor compozite

Macromecanica materialelor compozite reprezintă studiul acestor materiale la nivel global. Scopul macromecanicii materialelor compozite este unul sau mai multe dintre următoarele:

- calculul răspunsului materialului la tensiunile de tracțiune–compresiune aplicate pe aceeași direcție;
- calculul răspunsului materialului în același plan cu tensiunile de forfecare aplicate;
- calculul cuplării deformațiilor specifice de tensiunile normale pe direcții diferite dată de contracția transversală sau cuplare tracțiune–tracțiune;
- calculul termenilor de cuplare tracțiune–forfecare;
- calculul termenilor de cuplare forfecare–forfecare.

Acest comportament este descris, din punct de vedere matematic, pentru cele trei categorii de materiale enunțate anterior în cadrul tezei de doctorat.

2.1.2.2 Comportamentul micromecanic al materialelor compozite

Micromecanica materialelor compozite reprezintă studiul acestor materiale la nivel de constituenți. Scopurile micromecanicii materialelor compozite sunt următoarele [DOG08]:

- calculul constantelor efective ale materialului combinat omogen pornind de la constantele specifice ale fiecărui constituent în parte;
- calculul tensorilor tensiunilor și deformațiilor în forma omogenă în fiecare constituent (fibre și matrice) pornind de la tensorul tensiunilor asociat laminei în forma omogenă și a constantelor fiecărui constituent.

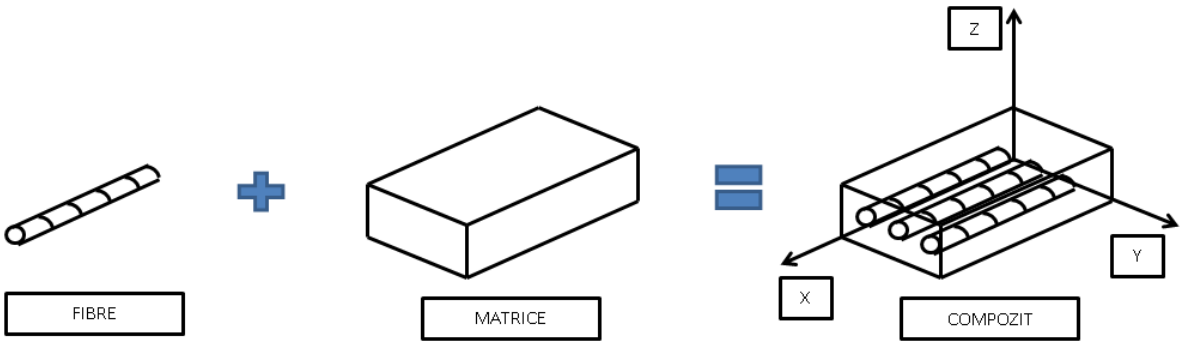


Figura 2.1 Scopurile micromecanicii materialelor compozite (prelucrare dupa [DOG08])

În cadrul tezei de doctorat, au fost determinate caracteristicilor masice și constantelor elastice din punct de vedere micromecanic.

2.1.2.3 Concluzii referitoare la comportamentul materialelor compozite

Pentru cele trei tipuri de materiale existente în acest moment: anizotrope, ortotrope și izotrope, au fost generate matricile de rigiditate/flexibilitate și au fost determinate relațiile dintre deformații și tensiuni sub formă matriceală, având ca punct de start legea lui Hooke. Prin acestea au fost explicate din punctul de vedere al semnificației fizice constantele elastice ce fac legătura între deformații și tensiuni, în cadrul respectivelor relații matematice și au fost determinate caracteristicile masice și constantele elastice din punct de vedere micromecanic.

Aceste aspecte teoretice reprezintă baza cercetării ce urmează a fi desfășurată din punct de vedere fizic și matematic, la care se va adăuga, în cele ce urmează, o trecere în revistă a tehnologiilor de fabricație a materialelor compozite, în general, și a fibrelor de sticlă, carbon și kevlar și a rășinii epoxidice, în special. De asemenea, o prezentare a testării la impact a panourilor compozite prin descrierea comportamentului acestora la solicitarea menționată anterior prin prisma teoriei de placă laminară, precum și expunerea principalelor direcții de cercetare în cadrul articolelor și lucrărilor științifice din ultima decadă, vor completa imaginea de ansamblu asupra stadiului actual al cercetărilor privind testarea la impact a panourilor compozite.

2.1.3 Materiale compozite – tehnologii de fabricație

După cum a fost prezentat anterior, pentru a avea o imagine de ansamblu asupra comportamentului macro și micromecanic a panourilor compozite indiferent de structura lor intrinsecă, se cuvine a prezenta tehnologia de fabricare a constituenților acestor panouri, pentru evidențierea avantajelor fiecărei componente în parte, dar și precizarea posibilelor erori de fabricare ce pot influența cele două comportamente menționate. Deoarece materialele compozite prezintă o multitudine de varietăți, în acest subcapitol, sunt descrise doar tehnologiile de fabricare a fibrelor de sticlă, de carbon și de kevlar, precum și a rășinii epoxidice, ce reprezintă constituenții aflați la baza panourilor compozite investigate în cadrul acestei lucrări de doctorat.

2.1.4 Testarea la impact a panourilor compozite

În cadrul acestui subcapitol, au fost prezentate generalități ale testării la impact a panourilor compozite. Definirea termenului "cedare" reprezintă punctul de start al studiului ce oferă un exemplu relevant din cadrul domeniului aerospațial și subcapitolul se încheie cu calculul matricei ABD a unui panou compozit, având la baza teoria de placă laminară Mindlin–Reissner, care este o extensie a teoriei de bară a lui Timoshenko.

Relația generalizată dintre forțe/momente și deformații se poate defini astfel [DOG08]:

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ k \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} N^T \\ M^T \end{Bmatrix} \tag{2.1}$$

unde:

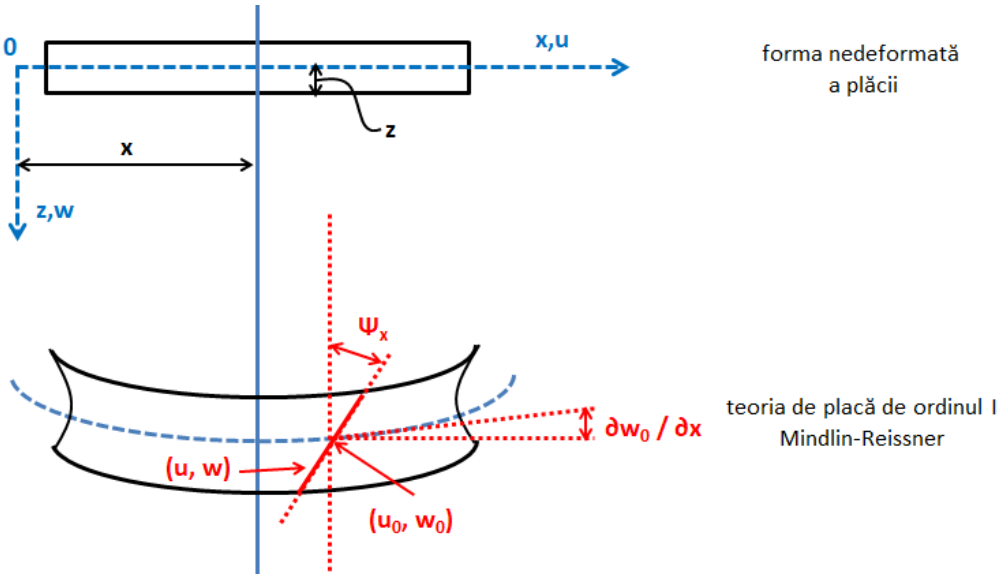


Figura 2.2 Cinematica deplasării plăcii (adaptare după [DOG08])

Matricea $[A]$

- forțele în plan median sunt diferite în plan median în tensiune sau în compresiune;
- matricea este independentă de secvența pachetului de laminate;
- A_{14} și A_{24} sunt termeni care reprezintă cuplarea dintre tensiune și forfecare și dintre forțele în planul median și deformațiile în plan median datorate forfecării.

Matricea $[B]$

- forțele în plan median sunt diferite de cuplarea dintre deformațiile datorate curbării plăcii și anume încovoiere și/sau răsucire;
- momentele în plan median sunt diferite de cuplarea dintre tracțiune și compresiune;
- matricea este egală cu 0 (zero) pentru laminate simetrice.

Matricea $[D]$

- momentele în plan median sunt diferite de încovoiere și răsucire;
- D_{14} și D_{24} sunt termeni care reprezintă cuplarea dintre încovoiere și răsucire și dintre momentele în plan median și îndoirea plăcii.

În continuare, se consideră că asupra plăcii laminate nu sunt exercitate încărcări de ordin termal. Termenii N^T și M^T sunt nuli, iar relația anterioară ia forma [DOG08]:

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ k \end{Bmatrix} \tag{2.2}$$

2.2 Analiza în mediu virtual a panourilor compozite

2.2.1 Noțiuni de bază privind FEM

Metoda elementelor finite (FEM) este un procedeu numeric prin care aceste ecuații pot fi rezolvate în mod aproximativ. Metoda elementelor finite este reprezentată prin funcțiile de aproximare alese pentru rezolvarea ecuațiilor menționate anterior. Modelarea cu elemente finite este folosită în diferite domenii industriale și nu numai. Astfel, problemele de analiză statică și/sau dinamică din domeniul mecanicii solidului deformabil, mecanicii fluidelor, biomecanicii etc., își găsesc rezolvare [PET12].

Analiza cu elemente finite aplicată structurilor mecanice reprezintă o metodă bazată pe cunoştințe din trei domenii [RAD06]:

- domeniul mecanicii structurilor, incluzând aici teorii precum teoria elasticității sau teoria plasticității, dar și rezistența materialelor, dinamica structurilor etc.;
- domeniul analizei numerice, prin utilizarea metodelor aproximative, rezolvarea sistemelor de ecuații algebrice liniare și a problemelor de valori proprii etc.;
- domeniul științei aplicate a calculatoarelor, prin preocuparea referitoare la dezvoltarea şi implementarea unor aplicații software specializate.

Metoda elementelor finite are drept obiectiv modelarea şi descrierea comportării mecanice a structurilor cu geometrie complexă. Acest obiectiv este îndeplinit prin rezolvarea unor probleme analitice de mari dimensiuni în cadrul aplicațiilor software specializate [RAD06].

Numeroși producători de sisteme software au dezvoltat analiza cu elemente finite de la apariția sa până în prezent. Cercetările realizate de autor, prezentate în această teză de doctorat, sunt efectuate utilizând pachetul de aplicații software Patran/Nastran de la MSC.Software datorită modalității relativ simple de utilizare și a acurateții rezultatelor în privința panourilor compozite.

2.2.2 Compania MSC.Software. Istoric și aplicațiile software dezvoltate

MSC.Software este o companie de produse software specializate pe simulări și analize structurale cu locația principală în Newport Beach, California, Statele Unite ale Americii.

În prezent, MSC Software face parte din grupul Hexagon AB, in divizia Hexagon Manufacturing Intelligence, lider în domeniul tehnologiilor care conduc la obținerea calității și productivității în varii ramuri ale industriilor, inclusiv industria fabricației [MIH18]. Principalele aplicații vizează analiza liniară și neliniară cu element finit, acustică, interacțiuni fluid–structură, multi-fizică, optimizare, oboseală și durabilitate, dinamica sistemelor multi-corp și simularea sistemelor de control [MIH18]. Pentru cercetările întreprinse în prezenta teză de doctorat a fost utilizat pachetul software constând din MSC Patran drept pre și postprocesor al analizei cu elemente finite și MSC Nastran drept solver matematic.

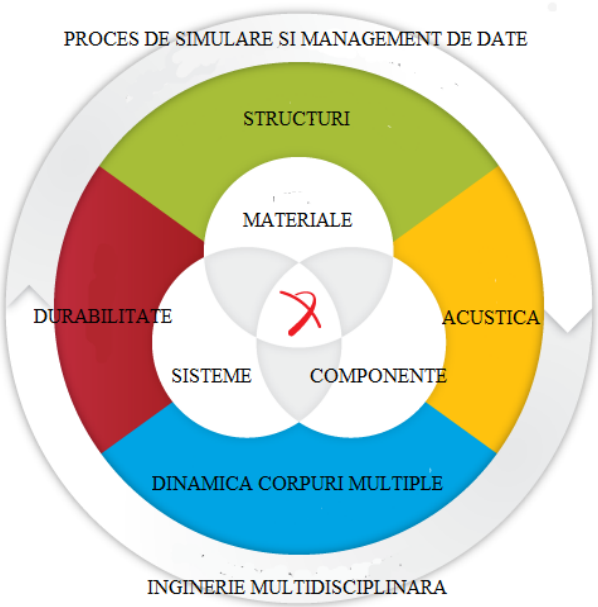


Figura 2.3 Dinamica companiei MSC Software (prelucrare după [MSC13])

2.2.2.1 Patran – aplicație de pre și postprocesare a modelelor cu elemente finite

Patran este o aplicație software care include funcționalități de import și simplificare a geometriei modelate în medii CAD, de discretizare cu elemente finite, de aplicare a constrângerilor, de aplicare a încărcărilor și de creare a fișierelor de date pentru solverul matematic Nastran. De asemenea, acest software permite importarea rezultatelor și vizualizarea lor grafică [MSC15B].

2.2.2.2 Solverul matematic Nastran

Nastran este un program de analiză cu elemente finite care a fost dezvoltat inițial de către Agenția Spațială Americană NASA la sfârșitul anilor 1960 cu fonduri din partea industriei aerospațiale. Corporația MSC Software a fost unul dintre principalii dezvoltatori ai codului Nastran destinat domeniului public. În acest moment, codul sursă Nastran este integrat unui număr mare de pachete software diferite, care sunt distribuite de o gamă mare de companii, în funcție de necesitățile clienților.

Codul Nastran este scris în FORTRAN și conține peste un milion de linii de cod, fiind compatibil cu o mare varietate de calculatoare și sisteme de operare, de la stații de lucru locale, până la supercomputere de mare capacitate.

Fiecare tip de analiză ce se poate realiza poartă denumirea de secvență de soluție. Cele mai dese astfel de secvențe sunt:

- 101 – Analiză Statică Liniară;
- 103 – Analiză Modală;
- 105 – Analiză de Flambaj;

- 106 – Analiză Statică Non-liniară;
- 108 – Analiză pentru Răspuns de Frecvențe;
- 144 – Analiză Statică Aeroelastică;
- 146 – Analiză Dinamică Aeroelastică;
- 153 – Analiză Statică Non-liniară cuplată cu Transfer de Căldură;
- 200 – Analiză de Optimizare de Design;
- 400 – Analiză Statică și Dinamică Non-liniară;
- 700 – Analiză Non-liniară Explicită.

Nastran este în primul rând un solver matematic pentru analizarea diverselor probleme cu elemente finite [MSC15A]. Toate intrările și ieșirile acestui sistem sunt sub formă de fișiere text. Acesta nu are funcții care să permită utilizatorului să construiască un model grafic sau să realizeze o discretizare. În schimb, multiplii creatori de software au pus la dispoziție aplicații de pre și post-procesare proiectate pentru a simplifica lucrul asupra unei analize cu elemente finite și de a interpreta apoi rezultatele.

2.3 Cercetări experimentale privind testarea la impact a panourilor compozite

2.3.1 Noțiuni preliminare

Design of Experiments (DoE) reprezintă o abordare sistematică și riguroasă referitoare la rezolvarea problemelor inginerești care implică aplicarea principiilor și tehnicilor din matematică și inginerie la stadiul de colectare a datelor pentru a asigura obținerea de concluzii valide, din punctul de vedere al fabricației [NIS15]. În mod adițional, toate acestea sunt realizate sub constrângeri legate de costuri (resurse, timp, bani).

Prezentul subcapitol are ca obiectiv găsirea răspunsurilor necesare privind realizarea unei astfel de cercetări experimentale privind panourile compozite.

2.3.2 Bazele cercetării experimentale

Observarea unui sistem sau proces în timpul operării sau realizării acestuia reprezintă o parte importantă din actul de învățare și face parte din mulțimea de procese de înțelegere a funcționării sistemelor și proceselor [MON12]. Leonardo da Vinci a menționat: "Learn how to see. Realize that everything connects to everything else." (Învață să vezi. Realizează că totul este conectat cu tot restul).

Cercetătorii realizează experimente în toate ariile de investigare științifice pentru a descoperi acel „ceva" ce definește sistemul sau procesul urmărit. Fiecare experiment reprezintă un test. Astfel, se poate defini un experiment ca o serie de teste în care schimbările sunt produse asupra parametrilor de intrare pentru a identifica motivele modificării parametrilor de ieșire. Totul pentru a genera un

model (matematic sau nu) pe baza căruia se optimizează sistemul sau procesul ca întreg în funcție de factorii mediului în care acesta funcționează [MON12].

Etapele care trebuie parcurse într-o cercetare experimentală sunt următoarele [MON12]:

- alegerea sistemului de investigat;
- formularea de ipoteze;
- identificarea obiectivului experimentului de realizat;
- proiectarea experimentului;
- realizarea experimentului;
- obținerea de rezultate;
- formularea de concluzii;
- repetarea experimentului cu alte mărimi de intrare;
- validarea ipotezelor;
- implementarea concluziilor în funcționarea sistemului ales.

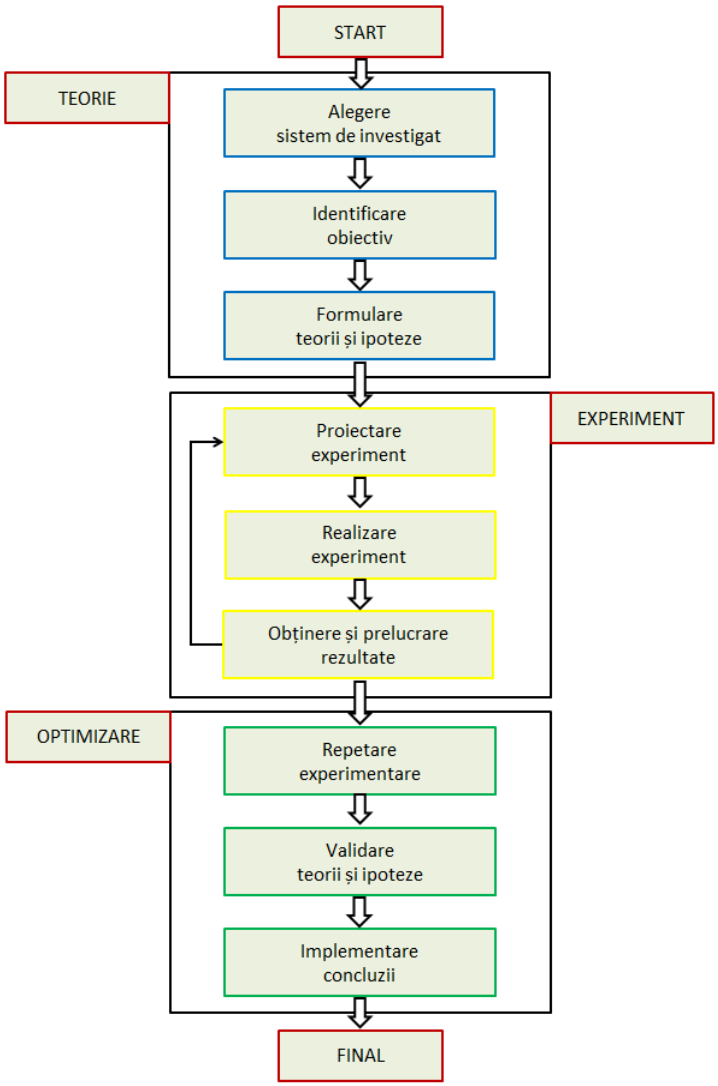


Figura 2.4 Etapele DoE – schema bloc a procesului de cercetare experimentală

2.3.3 Aplicație software pentru cercetarea experimentală

Design Expert este un pachet software al firmei Stat-Ease Inc. dedicat pentru implementarea DoE. El oferă teste comparative, caracterizări, optimizări, proiectare după parametri ficși, proiectări mixte și combinații ale acestora [TAN08]. Design Expert oferă o matrice pentru testarea a maximum 50 de factori, cu diverse nivele fiecare. Importanța statistică a acestor factori este stabilită cu ajutorul analizei de variație denumită ANOVA. De asemenea, instrumentele grafice ale interfeței acestui pachet software ajută la identificarea impactului fiecărui factor asupra rezultatului dorit, precum și descoperirea anormalităților datelor introduse în software [COR09].

2.4 Concluzii referitoare la stadiul actual al cercetărilor privind testarea la impact a panourilor compozite

Principalele concluzii referitoare la acest stadiu actual sunt precizate în cele ce urmează:

- trei direcții, și anume:
    1. materiale compozite – modelul matematic care descrie comportamentul macro și micromecanic al panourilor compozite și modalitățile de generare a proprietăților acestora în funcție de fibrele si matricea ce intră în componență, precum și tehnologiile de fabricație ale acestor fibre/matrice;
    2. analiza în mediul virtual – modelarea și analiza în aplicații software dedicate utilizând metoda elementelor finite – FEM în Patran/Nastran;
    3. cercetarea experimentală a panourilor compozite supuse la impact – prin intermediul abordării Design of Experiments și a aplicației Design Expert.
- fiecare dintre cele trei direcții prezintă avantaje și dezavantaje; prin abordarea integrată a acestora, unele dintre dezavantaje pot fi minimizate. Analize SWOT (Strengths/Weaknesses/Opportunities/Threats) pentru cele trei direcții sunt prezentate în cele ce urmează:
    1. analiza SWOT a primei direcții:

Tabelul 2.1 Analiza SWOT a materialelor compozite

Avantaje (S – Strengths)	**Dezavantaje (W – Weaknesses)**
greutate redusă proprietăți mecanice ridicate multitudine de secvențe de laminate posibile	model matematic complex comportament incomplet descris
Oportunități (O – Opportunities)	**Amenințări (T – Threats)**
noi metode de fabricație simplificare a procesului de fabricare actual	microfisuri fenomenul de oboseală

2. analiza SWOT a celei de-a doua direcții:

Tabelul 2.2 Analiza SWOT a modelarii FEM

Avantaje (S – Strengths)	**Dezavantaje (W – Weaknesses)**
model matematic computerizat implementat în diverse aplicații software descrierea bună a anumitor fenomene prin modelarea cu elemente finite	comportament incomplet descris factori externi referitori la mediu ce nu pot fi implementați matematic teste de convergență
Oportunități (O – Opportunities)	**Amenințări (T – Threats)**
dezvoltarea de „materiale virtuale” cu proprietăți îmbunătățite pentru diferite solicitări	microfisuri fenomenul de oboseală

3. analiza SWOT a celei de-a treia direcții:

Tabelul 2.3 Analiza SWOT a testării experimentale

Avantaje (S – Strengths)	**Dezavantaje (W – Weaknesses)**
model statistic prin încercarea mai multor mostre de testare pentru confirmarea modelului matematic	impurități în mostrele de încercat datorate tehnologiilor de fabricare
Oportunități (O – Opportunities)	**Amenințări (T – Threats)**
piață în plină dezvoltare pentru dezvoltarea de noi materiale cu proprietăți îmbunătățite	microfisuri fenomenul de oboseală

De asemenea, analiza stadiului actual al cercetărilor privind testarea la impact a panourilor compozite, conform celor trei direcții, permite stabilirea obiectivelor prezentei tezei de doctorat și a activităților care urmează a fi desfășurate în vederea îndeplinirii acestora, prezentate în capitolul § 3.

3 OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT

În urma prezentării stadiului actual și a analizei celor trei direcții enunțate anterior, principalele căi de cercetare pot fi sintetizate astfel:

- automatizarea proceselor de proiectare a panourilor compozite;
- utilizarea tehnologiilor moderne de realizare a proiectării panourilor compozite;
- utilizarea tehnicilor digitale moderne de analiză la impact a panourilor compozite prin metoda elementelor finite;
- utilizarea tehnologiilor moderne de analiză la impact a panourilor compozite prin testarea efectivă a acestora în condiții de laborator;
- eficientizarea fabricării panourilor compozite;
- optimizarea procesului de testare a panourilor compozite folosind realitatea virtuală.

Analiza efectuată asupra stadiului actual al cercetărilor privind testarea la impact a panourilor compozite, în general, și a celor din fibră de sticlă, fibra de carbon și fibra de kevlar aflate într-o matrice din rășină epoxidică, în special, a permis stabilirea următorului obiectiv principal al investigațiilor științifice:

Desfășurarea unor cercetări referitoare la testarea la impact a unor panouri compozite termorigide armate cu fibre de sticlă, carbon și kevlar-carbon și implementarea rezultatelor obținute într-un instrument software complex care să permită abordarea integrată a etapelor de calcul și testare la impact a panourilor compozite studiate.

Pentru îndeplinirea obiectivului principal, în cadrul activităților de cercetare, trebuie rezolvate următoarele obiective secundare:

- analiza la impact, utilizând metoda elementelor finite, a unor panouri compozite, de formă dreptunghiulară, armate cu fibre de sticlă, fibre de carbon și fibre de kevlar, în matrice de rășină epoxidică;
- analiza la impact, prin metoda elementelor finite, a unor panouri compozite utilizate în industria aerospațială și auto;
- analiza la impact a unei piese de formă complexă fabricată din materiale compozite, prin metoda elementelor finite;
- validarea practică a analizelor FEM efectuate pentru panourile compozite de formă dreptunghiulară și pentru piesa de formă complexă;
- elaborarea instrumentului software pentru panouri compozite de formă dreptunghiulară, testarea lui cu date existente în literatura de specialitate, cu rezultatele obținute în urma analizelor FEM și cercetărilor experimentale desfășurate în vederea validării acestora.

Principalele activități ce urmează a fi desfășurate sunt materializate în Figura 3.1 și sunt prezentate în cele ce urmează:

- studiul părții teoretice referitoare la panourile compozite, comportamentului acestora, modelului matematic pentru a descrie respectivul comportament, proprietățile lor, precum și realizarea unui studiu actual prin consultarea literaturii de specialitate;
- activitatea ce implică metoda elementelor finite presupune alegerea unui software dedicat analizei cu elemente finite, evidențierea diverselor convenții de modelare, utilizarea resurselor software-ului ales (sisteme de coordonate, tipuri de elemente, materiale, proprietăți, modelarea de legături între elemente, modelarea de încărcări și condiții de contur, obținerea de rezultate pe baza solverului ales, interpretarea acelor rezultate, verificarea modelului creat), în realizarea unor cazuri particulare de analiză cu elemente finite;
- activitatea ce implică DoE face referire la determinarea numărului de probe necesare validării analizelor FEM efectuate anterior pe baza factorilor considerați cei mai importanți în realizarea lucrării de față;
- testarea propriu-zisă a unor panouri compozite selectate (de formă dreptunghiulară și de formă complexă) pentru a valida simulările numerice;
- post-procesarea și validarea tuturor datelor și rezultatelor din activitățile menționate anterior în crearea instrumentului software ca unul dintre obiectivele derivate ale tezei de doctorat.

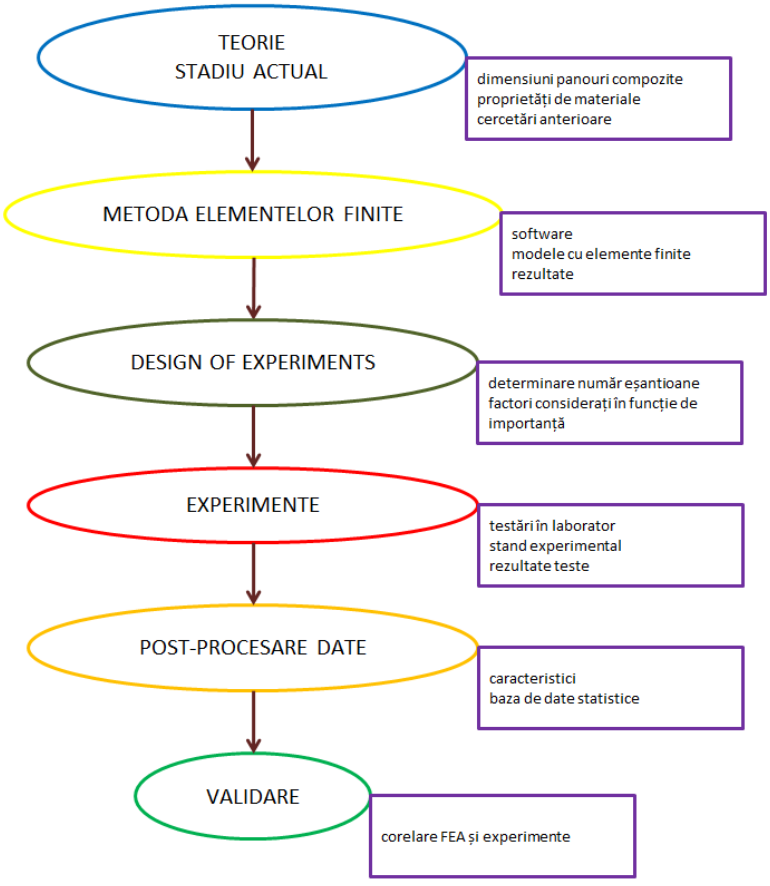


Figura 3.1 Schema-bloc a activităților desfășurate

4 ANALIZA FEM A UNOR PANOURI COMPOZITE SUPUSE LA IMPACT

Analiza utilizând metoda elementelor finite a panourilor compozite supuse la impact prezintă avantaje importante, principalele fiind următoarele:

- implementarea în diverse aplicații software (precum Patran/Nastran ale companiei MSC.Software descrise în cadrul subcapitolului § 2.2) a modelului matematic al comportamentului macro și micromecanic a materialelor compozite (ambele comportamente fiind expuse în paragrafele § 2.1.2.1 și respectiv § 2.1.2.2) supuse la impact;
- descrierea cvasi-perfectă a anumitor fenomene prin modelarea cu elemente finite, principalele lucrări fiind prezentate în subcapitole § 4.1 și § 4.5.

În vederea implementării în instrumentul software conceput de autor (prezentat în capitolul § 6) a unor caracteristici asociate unor materiale compozite și configurații geometrice diferite, în cele ce urmează, se analizează, utilizând FEM, câteva piese pentru care se alege materialul potrivit și se determină, în unele situații, modele matematice care materializează dependențe dintre diferite proprietăți și deformații/tensiuni. Pentru o parte din analizele FEM se realizează și validări practice, în capitolul § 5.

În cadrul analizei FEM efectuate pentru piesele luate în studiu se parcurg următoarele etape:

- stabilirea obiectivului simulării numerice, fie el compararea de rezultate între aceleași panou realizat din diferite tipuri de materiale sau determinarea de modele matematice între deformațiile și tensiunile aceluiași panou, dar cu configurații diferite de lamine;
- selectarea panoului din componența unor aeronave sau autoturisme;
- alegerea materialului compozit: diverse secvențe de lamine cu diferite tipuri de fibre (sticlă, carbon sau kevlar);
- optimizarea modelului CAD al panoului respectiv prin eliminarea tuturor aspectelor geometrice, și nu numai, al căror rol structural nu este semnificativ pentru simularea numerică;
- realizarea discretizării propriu-zise cu ajutorul elementelor specifice (de tip placă sau de tip legătură rigidă) și prin setarea condițiilor de contur specifice anumitor cazuri de încărcare;
- bținerea de rezultate prin intermediul solverului matematic Nastran;
- crearea de modele matematice reflectate prin relații și dependențe matematice dintre diferitele proprietăți ale panoului și deformațiile și/sau tensiunile rezultate în urma fenomenului analizat;
- formularea de concluzii cu privire la dependențele obținute la pasul anterior sau cu privire la materialul compozit ales.

Detalii privind fiecare etapă sunt prezentate în cadrul subcapitolelor aferente fiecărei simulări numerice a panoului selectat. În prezentul rezumat, sunt prezentate cele mai importante cercetări realizate în cadrul tezei de doctorat.

4.1 Analiza FEM a unor panouri compozite, de formă simplă, necesare validării practice

În acest subcapitol se realizează o cercetare detaliată asupra unor eșantioane dreptunghiulare realizate din 3 categorii de materiale: fibre de sticlă, fibre de carbon și fibre de kevlar [CRO17]. Cercetarea este prezentată în două părți: cea referitoare la analiza cu elemente finite (în acest subcapitol), iar cea referitoare la validarea practică a rezultatelor obținute în cadrul subcapitolului § 5.1.

Aceste probe, realizate din panouri compozite de dimensiuni 150 mm în lungime și respectiv 100 mm în lățime, sunt fabricate astfel: 1) fibre de sticlă în totalitate (MAT300 și ROVING300); 2) fibre de carbon în totalitate și 3) fibre de kevlar în combinație cu fibre de carbon. Acestea prezintă aceeași dispunere a laminelor componente și sunt supuse acelorași sarcini de impact sub formă de presiune uniform distribuită în mediul virtual Nastran, prezentat anterior, pentru a obține rezultate comparabile [CRO17].

Analiza la impact cu elemente finite este realizată în mediu virtual Nastran. După efectuarea analizei cu elemente finite, din fișierul cu extensia „xdb" generat de Nastran, se pot culege informații precum deplasările modelului, tensiuni, forțe de constrângere etc. Din fișierul cu extensia „f06" generat de aceeași aplicație se oferă informații cu privire la rularea efectivă, informații referitoare la corectitudinea modelării, aplicarea de forțe și condiții de contur și deformațiile maxime ale modelului sub format numeric [CRO17].

Rezultatele acestei analize sunt validate prin intermediul cercetării experimentale a acelorași eșantioane din fibre de sticlă, fibre de carbon și fibre de kevlar, cercetare prezentată în cadrul subcapitolului § 5.1. De asemenea, detalii referitoare la numărul de eșantioane testate, standardele impuse pentru realizarea acestor eșantioane, modul de testare în laborator pe standul experimental și rezultatele acestor încercări sunt prezentate în cadrul aceluiași subcapitol.

4.2 Analiza cu elemente finite a unui panou sigilant al măștii de oxigen din componența unei aeronave

Pentru a sublinia importanța și necesitatea utilizării materialelor compozite în domeniul industrial, a fost realizată o analiză FEM în care s-au comparat proprietățile de impact (generate sub formă de deformații și tensiuni) ale aceluiași panou realizat dintr-un material metalic și apoi materiale compozite [CRO14A]. Panoul selectat este reprezentat de un panou de închidere/sigilare a măștii de oxigen din cadrul diverselor aeronave de transport pasageri.

Panoul prezentat a fost discretizat utilizând următorii pași:

- a fost importat modelul CAD în software-ul specializat Patran și au fost eliminate găurile și razele ce nu au importanță structurală;
- a fost creată discretizarea cu elemente de tip SHELL (CQUAD4 și CTRIA3); acestea sunt elemente de tip placă ce modelează structura supusă analizei, fiind situate pe fibra medie a respectivei structuri;
- au fost create legăturile dintre diferitele părți ale panoului;

- au fost create proprietățile de material necesare;
- au fost create încărcările (solicitări de impact în 3 zone și condițiile de contur;
- au fost generate cazurile de încărcare, au fost inserați parametrii de rezultate necesari pentru realizarea analizelor cu elemente finite (fisiere *.bdf);
- au fost rulate aceste fișiere cu solver-ul matematic Nastran ce a generat fișierele de rezultate sub format *.xdb;
- au fost atașate fișierele de rezultate pentru vizualizarea acestora sub formă grafică în aplicația software de post-procesare Patran.

Rezultatele obținute sunt prezentate în Tabelul 4.1 [CRO14A]:

Tabelul 4.1 Rezultate FEA [CRO14A]

Tip de material / Caracteristică	Aluminiu		Fibră de carbon cu miez de Nomex		Fibră de sticlă cu miez de Nomex	
Greutate	13.92 kg		1.168 kg		1.147 kg	
Caz de încărcare	Deformație maximă [mm]	Tensiune maximă [MPa]	Deformație maximă [mm]	Tensiune maximă [MPa]	Deformație maximă [mm]	Tensiune maximă [MPa]
1	3.58	37.7	36.4	201.0	61.5	156.0
2	1.45	13.0	17.3	108.0	26.8	91.2
3	2.18	25.9	20.4	130.0	27.5	92.6

Luând în considerare tensiunea admisibilă a fiecărui material în parte, s-a calculat factorul de rezervă al fiecărui panou obținându-se valorile din Tabelul 4.2.

Tabelul 4.2 Factor de rezervă [CRO14A]

Tip de material / Încărcare	Aluminiu		Fibră de carbon cu miez de Nomex		Fibră de sticlă cu miez de Nomex	
Caz de încărcare	Tensiune admisibilă [MPa]	Factor de rezervă	Tensiune admisibilă [MPa]	Factor de rezervă	Tensiune admisibilă [MPa]	Factor de rezervă
1	450	11.93	210	1.04	280	1.79
2		34.61		1.94		3.07
3		17.37		1.61		3.02

Concluziile acestei cercetări sunt următoarele [CRO14A]:

- modelul din aluminiu este de 10 ori mai greu comparativ cu cel din material compozit (oricare ar fi acela);
- grosimea panoului metalic este foarte mare, ceea ce presupune prelucrări adiționale ce ridică costul piesei în sine;

- pe baza factorului de rezervă se poate concluziona că la o greutate de 10 ori mai mică panoul compozit prezintă suficientă rezervă în ceea ce privește încărcarea și poate înlocui cu succes panoul metalic.

Prin acest studiu, s-au demonstrat câteva dintre proprietățile de bază ale materialelor compozite, si anume:

1) raport greutate–rezistență mecanică mai bun decât în cazul materialelor metalice;
2) optimizarea structurii din punct de vedere geometric (în special prin subțierea acestuia);
3) capacitate de încărcare mai bună înseamnă tensiuni mai mari, dar factori de rezervă de același ordin de mărime ca în cazul materialelor metalice;
4) forma, mărimea și distribuția componentelor pot fi controlate și/sau ajustate în caz de necesitate.

4.3 Proprietățile panourilor compozite armate cu fibră de sticlă și kevlar, din componența unei aeronave, supuse la impact

Considerând faptul că fibra de sticlă și fibra de kevlar sunt destul de cunoscute, atât din punctul de vedere al procesului de fabricație, cât și al utilizării lor diverse, dar și faptul că se dorește dezvoltarea unui studiu în ceea ce privește panourile compozite realizate din aceste fibre, scopul acestei analize este acela de a obține relații și modele matematice privind dependențele dintre proprietățile de impact ale panourilor compozite luate în calcul și grosimea acestora [CRO15A]. Detalii referitoare la stadiul actual al cercetărilor acestor materiale au fost prezentate în cadrul capitolului § 2.

Panoul compozit selectat face parte din fuselajul unei aeronave având diferite configurații.

Panoul compozit a fost discretizat parcurgând etapele menționate în subcapitolul § 4.2 pe baza încărcărilor și condițiilor de contur prezentate în cadrul tezei de doctorat. Rezultatele au fost centralizate și, pe baza lor, au fost obținute relații și modele matematice ce descriu dependențele dintre proprietățile de impact ale panourilor compozite studiate și grosimea acestora.

De asemenea, a fost calculat și coeficientul de corelație R^2 [DRA98], iar valoarea sa de 0.9997 arată acuratețea modelului cu elemente finite creat din punct de vedere matematic.

Această simulare numerică demonstrează avantajele materialelor compozite utilizate în domeniul aerospațial și potențialul ca ele să fie folosite și în alte domenii, de exemplu în domeniul construcțiilor de mașini. De asemenea, diferitele orientări și grosimi ale laminelor din compoziția acestor panouri compozite se dovedesc a fi cheia de dezvoltare unor materiale ușoare, cu rezistență mecanică mare și rezistență la impact mare, flexibilitate și stabilitate dimensională bună la un nivel al deformațiilor mic [CRO15A].

4.4 Efectul orientării laminelor din componența panourilor compozite, folosite în industria auto, armate cu fibră de sticlă și kevlar, supuse la impact

Cercetarea prezentată anterior naște întrebarea: "Care este dependența dintre unghiul de orientare al laminatelor și caracteristicile acestuia la impact?" Simularea numerică prezentată în cele ce urmează răspunde acestei întrebări, luând în considerare un panou din componența caroseriei unui autoturism, și anume aripa stânga față [CRO15B].

Și în acest caz, pentru a obține rezultate relevante, panoul compozit este realizat din fibre de kevlar și fibre de sticlă în matrice de rășină epoxidică având diferite configurații.

Etapele pentru crearea modelelor cu elemente finite în aplicația specializată pentru discretizare Patran și obținerea de rezultate cu ajutorul solverului matematic Nastran au fost prezentate anterior în cadrul subcapitolului § 4.2.

Rezultatele sunt prelucrate cu ajutorul unei aplicații dezvoltate de autor în Excel, precum și prin determinarea de relații matematice ce justifică interdependența dintre unghiul de orientare al laminelor compozitului și caracteristicile acestuia la impact. Aceste rezultate sunt prezentate sub formă grafică, ca dependență dintre unghiul de orientare a laminelor pentru configurația optimă și tensiuni (componenta longitudinală și transversală).

Și în acest caz coeficientul de corelație R^2 [DRA98] și valoarea sa de 0.9877 arată acuratețea modelului obținut prin intermediul simulării FEM.

4.5 Analiza FEM a unei piese de geometrie complexă supusă la impactul cu o bilă

4.5.1 Obținerea modelului CAD necesar discretizării

Ultimul caz studiat, prezentat într-un subcapitol separat datorită complexității sale, este acela al analizei FEM a unei piese de geometrie complexă, reprezentată de aripa stânga față a unui automobil Renault Espace I. Și în acest caz, cercetarea este divizată în două părți, astfel că după simularea numerică se realizează validarea practică, această fiind prezentată în subcapitolului § 5.2. Modelul CAD al piesei de testat este obținut pe baza vederilor de sus, din lateral și din față prin intermediul aplicației software CATIA.

4.5.2 Discretizarea modelului CAD

Modelul CAD este cel care este discretizat pentru a se realiza analiza cu elemente finite a fenomenului de impact al piesei cu o bilă. După realizarea acestei discretizări, modelului cu elemente finite rezultat i se adăugă bila de impact, cu brațul pendul utilizat, pentru simularea testului de impact. Această simulare se dorește a fi transpunerea în mediul virtual al unui test de tip Charpy/Izod.

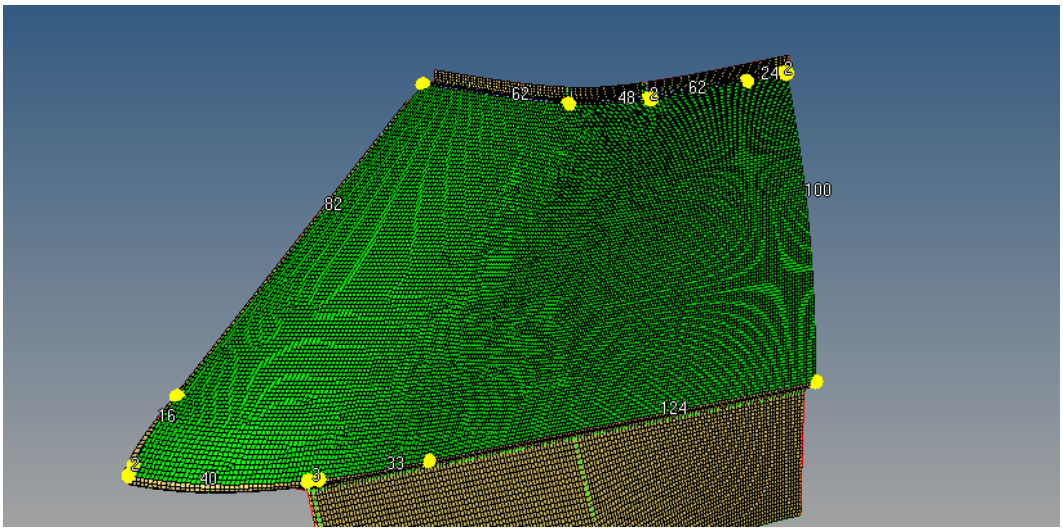


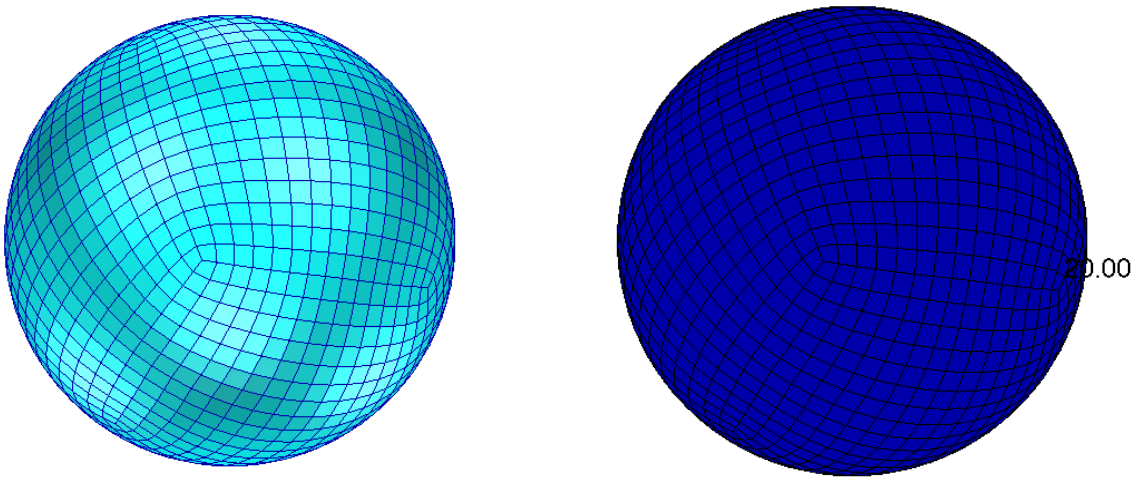
Figura 4.1 Modul de lucru pentru discretizarea și analiza piesei studiate

4.5.3 Finalizarea modelului cu elemente finite

Modelului discretizat al piesei de geometrie complexă reprezentată de aripa stânga față a automobilului Renault Espace I, i se adăugă o bilă de impact și brațul pendul pe care aceasta se află pentru finalizarea modelului cu elemente finite.

În Figura 4.2, Figura 4.3 și Figura 4.4 se prezintă modelul cu elemente finite al bilei de impact și brațul pendul corespunzător, proprietățile și caracteristicile asociate acestora.

Figura 4.2 Modelul cu elemente finite al bilei de impact și a brațului pendul

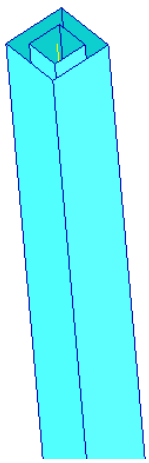


Mass Properties Display

Group Display of Center of Gravity, Principal Inertias, Radii of Gyration, Mass, and Volume

	CG(CID 0)	CG(CID 0)	I-Principal	Radii of Gyr.	Mass	Volume
1-xxxx	5.300E+002	5.300E+002	8.430E+000	4.101E+001	5.012E-003	6.187E+005
2	-9.46E+002	-9.46E+002	8.271E+000	4.062E+001		
3	2.000E+003	2.000E+003	8.270E+000	4.062E+001		

Figura 4.3 Proprietățile modelului cu elemente finite al bilei de impact



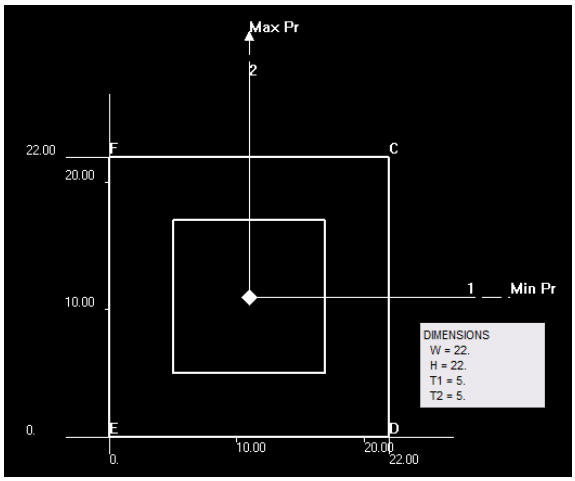


Figura 4.4 Caracteristicile modelului cu elemente finite asociat brațului pendul

4.5.4 Prezentarea testelor de impact simulate

Pentru o analiză riguroasă și cât mai amplă care să conducă la obținerea unor rezultate comparabile cu cele reale și care pot acoperi o varietate cât mai mare de simulări, se realizează combinații după următoarele criterii, pentru a genera o varietate de teste de impact ce vor fi simulate cu ajutorul aplicației software Patran:

- criteriul de material:

  elementelor ce reprezintă piesa de geometrie complexă studiată îi vor fi aplicate caracteristicile de material și proprietate referitoare la fibre de sticlă, carbon și kevlar-carbon într-o matrice de rășină epoxidică; elementelor suprafeței sferice a bilei de impact și brațului pendul vor avea proprietatea de material corespunzătoare pentru oțel.

- criteriul de energie:

  energia cinetică generată în momentul impactului este egală cu energia potențială produsă de situarea bilei de impact și implicit a brațului pendul la un anumit unghi față de poziția verticală de echilibru stabil al ansamblului; factorul viteză din cadrul termenului energie cinetică din relația următoare depinde direct proporțional de accelerația gravitațională și înălțimea la care este ridicată bila de impact din cadrul termenului energie potențială; de altfel, ecuația descrie modul de calcul al unui pendul cu un singur grad de libertate utilizând metoda energiilor.

Luând în considerare faptul că trei tipuri de materiale vor fi utilizate pentru elementele piesei analizate și bila de impact va avea trei poziții inițiale (prima 45°, a doua 90° și a treia 160°), vor fi efectuate 9 simulări ale testului de impact al aripii stânga față a automobilului prezentat anterior.

4.5.5 Setarea modelului discretizat în vederea simulării

În urma finalizării modelului cu elemente finite, în vederea obținerii de rezultate prin intermediul solverului matematic Nastran, este necesară parcurgerea etapei de setare a modelului pentru a simula testul la impact, într-un mod cât mai real posibil. Se precizează faptul că această etapă este validă pentru toate testelor de impact ce vor fi simulate conform capitolului anterior.

Modul de lucru pentru setarea modelului discretizat în vederea rulării este descris în cele ce urmează:

- crearea de materiale;
- aplicarea condițiilor de contur;
- implementarea accelerației gravitaționale;
- introducerea contactului între piesă și bilă de impact;
- generarea cazului de încărcare;
- inserarea parametrilor necesari analizei;
- crearea fișierelor de tip *.bdf ce vor fi rulate cu solverul matematic Nastran;
- prezentarea rezultatelor și interpretarea acestora.

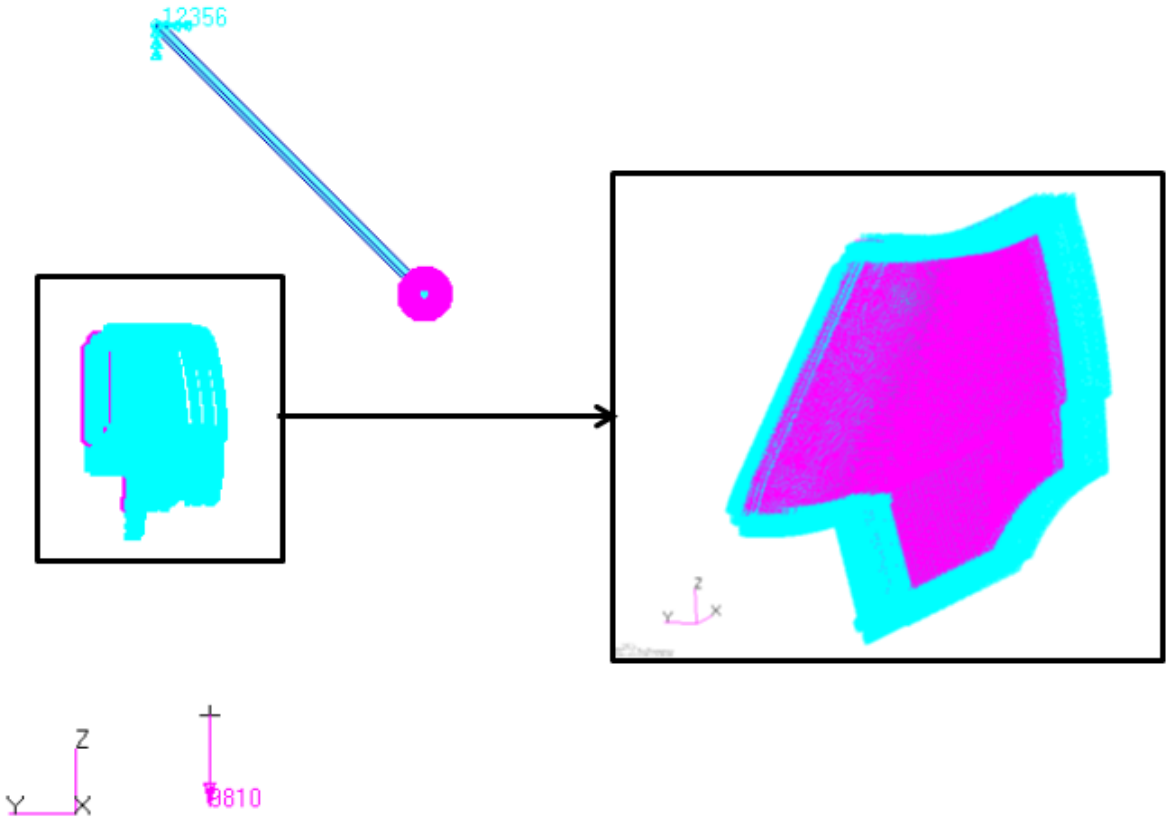


Figura 4.5 Setarea modelului discretizat pentru rulare

4.5.6 Prezentarea rezultatelor și interpretarea acestora

Ultima etapă pentru analiza FEM a piesei de geometrie complexă studiată, este cea a prezentării și interpretării rezultatelor obținute în urma rulării celor 9 simulări (3 materiale pentru piesa de studiat x 3 poziții inițiale ale ansamblului bilă de impact–braț pendul) cu solverul matematic Nastran.

În primul rând, pentru a determina corectitudinea rezultatelor obținute, cu ajutorul ecuației (4.9), este calculată viteza de impact în momentul în care ansamblul bilă de impact–braț pendul ajunge în poziție verticală. Diferența dintre cele două valori ale vitezei (calculată și simulată) este considerată acceptabilă.

În continuare, se poate trece la etapa de prezentare a rezultatelor obținute. Dintre acestea se pot evidenția următoarele caracteristici ale analizei cu elemente finite la impact:

- timpul din cadrul analizei;
- deformația maximă a piesei de geometrie complexă generată de impact, la diferitele momente;
- tensiunea von Mises, tensiunea principală de intindere și tensiunea principală de compresiune calculate în momentul impactului.

Un alt rezultat demn de menționat este cel al accelerației induse asupra piesei de configurație geometrică în momentul impactului. Privind prezentarea grafică a acestor rezultate, următoarele argumente pot fi luate în calcul pentru fiecare unghi de pendulare α:

- unghi de pendulare α de 45 grade – valoarea maximă de accelerație este de 18g;
- unghi de pendulare α de 90 grade – pragul maxim de accelerație este de 43g;
- unghi de pendulare α de 160 grade – limita superioară de accelerație este de 54g.

Aceste rezultate sunt coroborate cu cele din cadrul capitolului următor referitor la testarea experimentală.

4.6 Concluzii privind analiza FEM a panourilor compozite supuse la impact

Premergător prezentării concluziilor, este realizată o scurtă recapitulare a principalelor idei descrise și dezbătute în acest capitol. Dintre acestea, se pot aminti următoarele:

- descrierea anumitor fenomene prin modelarea cu elemente finite;
- implementarea modelului matematic al comportamentului macro și micromecanic al materialelor compozite în general și al anumitor panouri compozite în special în mediul virtual dedicat simulării numerice prin metoda elementelor finite;
- parcurgerea etapelor necesare pentru o bună organizare a cazurilor descrise în cadrul cercetării de față;
- modelare matematică prin relații și dependențe matematice între diferitele proprietăți și rezultate ale panoului compozit; spre exemplificare, dependența dintre deformațiile și/sau tensiunile rezultate în urma analizei la impact față de orientarea laminelor din componența unui panou compozit.

În prezentul capitol al tezei de doctorat s-a dorit evidențierea avantajelor analizei cu ajutorul metodei elementelor finite ale diverselor panouri compozite supuse la impact. Au fost realizate mai multe cercetări cu ajutorul aplicației de pre și post-procesare, Patran, și a solverului matematic Nastran. Aceste cercetări au avut un grad de dificultate diferit, plecând de la piese relativ simple din punct de vedere geometric și ajungând la piese de geometrie complexă, și, prin intermediul lor, au fost caracterizate și evidențiate diferite aspecte ale panourilor compozite, în primul rând, și ale analizei FEM, în al doilea rând.

Avantajele utilizării panourilor compozite ce au fost evidențiate pe parcursul capitolului sunt următoarele:

- utilitatea panourilor compozite în diferite domenii industriale, dar nu numai, datorită avantajelor pe care acestea le oferă; acest aspect poate fi urmărit în cadrul tuturor simulărilor efectuate și el completează datele furnizate în cadrul capitolului de prezentare a stadiului actual al panourilor compozite;
- utilizarea panourilor compozite în cele mai diverse aplicații din domeniul aerospațial și cel al construcțiilor de mașini, printre piesele analizate, numărându-se un panou sigilant al unei

măști de oxigen din cadrul unei aeronave, un panou compozit din cadrul fuselajului unei aeronave sau componente din cadrul caroseriei unui autoturism;

- analizarea diferitelor orientări și grosimi ale laminelor din componența panourilor compozite pentru a dovedi că acestea pot reprezenta cheia dezvoltării unor materiale ușoare având proprietăți îmbunătățite în raport cu materialele metalice; spre exemplu, se dorește realizarea unor panouri compozite cu rezistență mecanică mare și rezistență la impact mare, flexibilitate bună la un nivel mic al deformațiilor și stabilitate dimensională în ceea ce privește flambajul;
- răspunsul diferitelor panouri compozite (din același material sau nu și cu diverse configurații ale laminelor) la sarcini de impact sub formă de presiune uniform distribuită sau teste de tip Charpy/Izod.

În ceea ce privește analiza cu metoda elementelor finite a panourilor compozite supuse la impact, caracteristicile evidențiate sunt și ele numeroase:

- crearea sau importarea unui model CAD într-un mediu virtual de pre-procesare pentru discretizare și eliminarea elementelor de proiectare ce nu prezintă niciun rol din punct de vedere structural;
- realizarea discretizării cu ajutorul diferitelor elemente de tip placă și nu numai; de asemenea, alegerea acestor elemente pentru discretizare, a avantajelor și dezavantajelor ce aceste elemente le oferă în realizarea calculului structural, precum și modul lor de acționare în cadrul simulărilor efectuate;
- realizarea legăturilor dintre diferitele elemente ce presupune și cunoașterea mișcării acestora unele față de celelalte (fenomenele ce stau la baza mișcărilor dintre elemente);
- asocierea materialelor și implementarea proprietăților aferente elementelor modelului supus spre analiză, precum și introducerea condițiilor de contur pentru comprehensiunea modului de a reacționa a panourilor compozite simulate;
- efectuarea cazurilor de încărcare/simulare asupra diverselor piese analizate; în acest caz este pusă în valoare comparația dintre simulare și testele realizate experimental în cadrul diferitelor laboratoare;
- obținerea de rezultate și interpretarea acestora sub formă grafică și/sau relații matematice între două sau mai multe caracteristici, spre exemplu deformații și tensiuni; înregistrarea rezultatelor simulărilor în mediul virtual pentru coroborarea acestora cu cele oferite de către testele practice.

După cum se poate observa, pe baza aspectelor prezentate anterior, pentru cele două categorii investigate, accentul este pus pe răspunsul diferitelor panouri compozite în mediul virtual și compararea acestuia cu cel dat de activitățile experimentale, doar în cazul unei suprapuneri corespunzătoare între rezultate putându-se considera că simulările sunt corecte și generează efecte asemănătoare celor reale. De asemenea, trebuie ținut cont ca testele de laborator să fie realizate la un nivel tehnologic potrivit și în conformitate cu standardele în vigoare.

Din cadrul cercetărilor privind analiza cu metoda elementelor finite ale panourilor compozite supuse la impact, au fost selectate două dintre acestea pentru validarea lor practică în condiții de laborator.

Cele două simulări numerice selectate sunt: testarea eșantioanelor necesare validării și încercarea unei piese de configurație geometrică complexă – aripă stânga față a unui automobil de tip Renault Espace I. Alegerea acestor două studii nu este întâmplătoare, motivele de la baza selecției fiind următoarele:

- metoda de testare la impact a eșantioanelor este standardizată [ISO00], [ISO01], cunoscându-se direcția de lovire, lungimea și lățimea probelor, energia de impact, datele aferente impactorului etc.; întreaga cercetare experimentală este prezentată în subcapitolul § 5.1;
- în urma validării practice a eșantioanelor, aripa de automobil este fabricată din materialul cu cel mai bun comportament la impact, iar testarea la impact a piesei de configurație geometrică complexă este un proces laborios cu numeroase etape începând cu fabricarea propriu-zisă, încercarea acesteia pe un stand experimental cu o bilă de impact situată pe un braț pendul și înregistrarea rezultatelor cu ajutorul unui accelerometru și un sistem software corespunzător; toate detaliile acestor testări se regăsesc în subcapitolul § 5.2.

După realizarea acestor două cercetări experimentale privind testarea la impact a panourilor compozite armate cu fibre de sticlă, carbon si kevlar-carbon într-un mediu de laborator conform standardelor, precum și: evidențierea concluziilor și a direcțiilor viitoare de cercetare în ceea ce privește partea experimentală a tezei de doctorat, și coroborarea rezultatelor analizei FEM a panourilor compozite cu răspunsul testelor experimentale, se poate trece la materializarea rezultatelor într-un instrument software dedicat analizei la impact a panourilor compozite, acesta fiind și unul dintre obiectivele importante ale prezentei teze de doctorat.

5 CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND TESTAREA LA IMPACT A PANOURILOR COMPOZITE ARMATE CU FIBRE DE STICLĂ, CARBON ȘI KEVLAR-CARBON

În acest capitol se prezintă modul în care sunt validate două simulări numerice, prin desfășurarea unor cercetări experimentale. Cercetările experimentale presupun:

- testarea eșantioanelor necesare validării, probele de laborator fiind realizate din cele 3 categorii de materiale – fibre de sticlă, fibre de carbon și fibre de kevlar [CRO17] utilizate și în analiza FEM; aceste experimente permit validarea simulării prezentate în cadrul subcapitolului § 4.1;
- încercarea piesei de configurație geometrică complexă, aripă stânga față a unui automobil Renault Espace I, constituind validarea analizelor descrise în subcapitolul § 4.5.

Potrivit teoriei Design of Experiments expusă în rezumat, anterior, numărul de panouri compozite necesar pentru prima analiză FEM este determinat. Astfel, un număr de 10 probe sau eșantioane pentru fiecare categorie de materiale, cu dimensiuni de 150 mm lungime pe 100 mm lățime, sunt testate pentru validarea cercetăriilor experimentale [CRO17]. Rezultatele acestor teste, deformații și tensiuni, reprezintă datele de intrare pentru aplicația Design Expert [STA16] care permite obținerea de rezultate prin intermediul distribuțiilor statistice și probabilistice.

5.1 Testarea la impact a eșantioanelor necesare validării

5.1.1 Standarde internaționale

Metoda experimentală este standardizată [ISO00], [ISO01]. Eșantioanele studiate în cadrul acestei cercetări, în conformitate cu standardele menționate anterior, prezintă următoarele caracteristici:

- impact „flatwise" cu direcția normală de lovire;
- lungimea și lățimea probelor este de 150 mm și 100 mm respectiv;
- energia de impact are valoarea de 30J;
- impactorul folosit în cadrul standului experimental are un cap sferic de 15 mm.

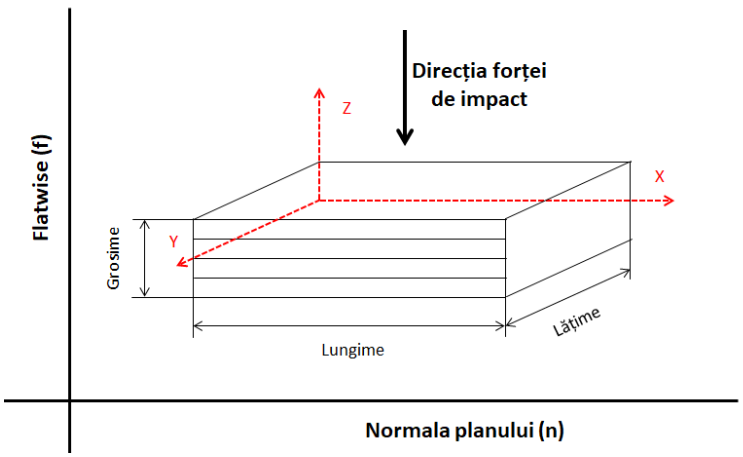


Figura 5.1 Caracteristici conform Standard ISO ([CRO17], adaptare după [ISO00], [ISO01])

5.1.2 Desfășurarea cercetării experimentale

Astfel, pentru prezenta cercetare experimentală se consideră 4 factori:

- forța de impact;
- lungimea amprentei;
- lățimea amprentei;
- tipul de cedare;

Odată cu determinarea statistică, valoarea maximă și minimă ce rezultă în urma testelor va fi ignorată. Conform cu [ISO00], [ISO01], numărul de probe necesare este de 10 (8 probe pentru calcul + 1 probă pentru valoarea maximă + 1 probă pentru valoarea minimă).

Experimentele au fost realizate pe standul prezentat în Figura 5.2. În acest fel, se obțin curbele de istorie ale forței de impact, ce se extind, în general, pe un interval de 5-10 ms.

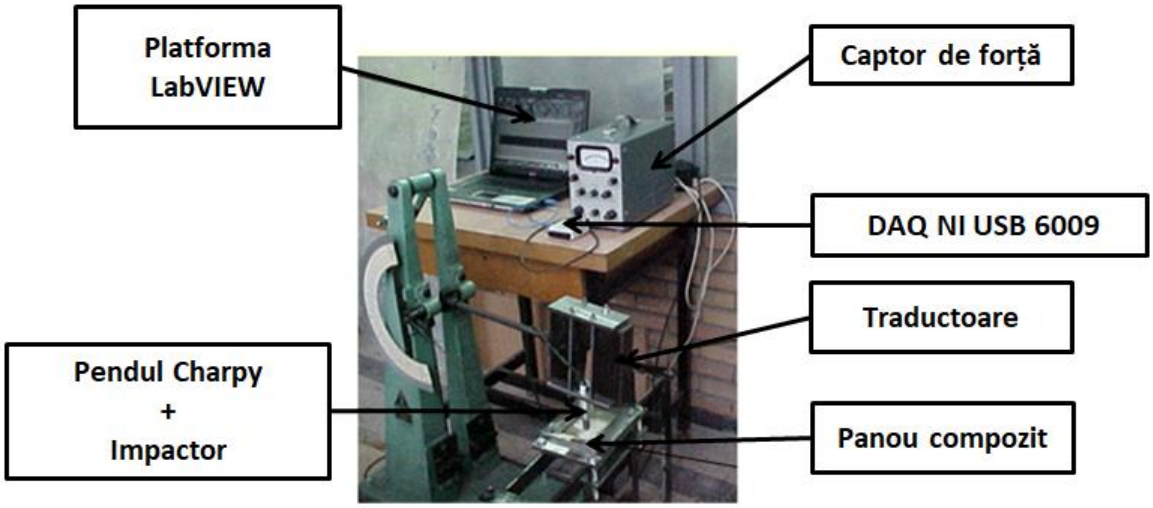
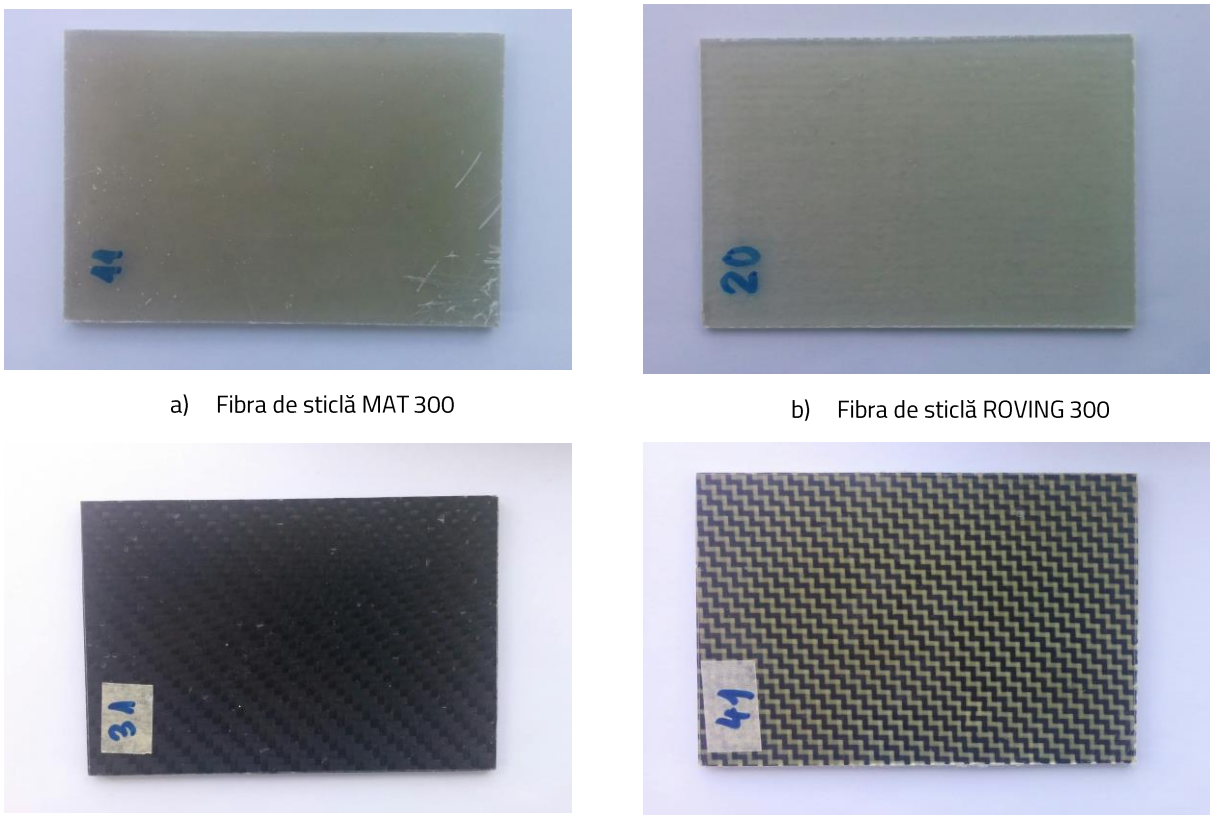


Figura 5.2 Stand experimental [CRO17]

5.1.3 Rezultatele testelor de laborator

După cum a fost menționat anterior, un număr de 10 eșantioane este realizat din cadrul fiecărei categorii de material. În Figura 5.3 sunt prezentate:

- fibra de sticlă MAT de 300 g/m^3 (Figura 5.3 a);
- fibra de sticlă ROWING de 300 g/m^3 (Figura 5.3 b);
- fibra de carbon 3K de 285 g/m^3 (Figura 5.3 c);
- fibra de kevlar-carbon de 215 g/m^3 (Figura 5.3 d).



a) Fibra de sticlă MAT 300

b) Fibra de sticlă ROVING 300

c) Fibra de carbon 3K

d) Fibra de kevlar-carbon 215

Figura 5.3 Eșantioane pentru testare la impact [CRO17]

Rezultatele sunt colectate cu ajutorul unei aplicații realizate în software-ului LabVIEW, pentru fiecare eșantion în parte, considerând o energie de impact de 30J pentru toate testele (această energie include accelerația gravitațională). Această aplicație prezintă, sub forma unei curbe pe un grafic, dependența dintre timp (s) și amplitudine (Volt). Această curbă este folosită pentru a determina forța de impact cu ajutorul unei alte curbe denumită curbă de calibrare [CRO17].

Procesarea rezultatelor experimentale este realizată în aplicația Design Expert. Datele de intrare pentru aplicația Design Expert, în vederea validării analizelor la impact, sunt rezultatele experimentale. Aplicația returnează parametrii statistici precum media, abaterea medie pătratică, nivelul de încredere, diferite diagrame de probabilitate și calcul de reziduuri.

Pe baza rezultatelor obținute în Design Expert, pot fi desprinse următoarele concluzii:

- valoarea coeficientului Fisher-Olkin-Pratt a modelului de 374.19 implică faptul că acesta are semnificație statistică (un model cu această valoare având o probabilitate de a apărea de 0.01% datorită întâmplării);
- valoarea p mai mică de 0.0001 indică faptul că termenii modelului au semnificație statistică;
- abaterea medie pătratică este mică;
- raportul de corelație R^2 prezis de valoare 0.9682 se regăsește într-o bună corespondență cu cel calculat de 0.9757 (cel ajustat fiind de 0.9731);
- valorile abaterii medii pătratice, pentru fiecare tip de panou, sunt sensibil egale.

5.1.4 Validarea FEM și concluzii privind testele de laborator

Validarea modelului cu elemente finite este prezentată în Tabelul 5.1. Astfel, prin comparație, se identifică valorile necesare din cadrul modelului cu elemente finite al fiecărei configurații și cele din cadrul aplicației Design Expert pentru fiecare factor (forța de impact, lungime amprentă, lățime amprentă, tip de cedare). Prin verificare, se atribuie termenul de „potrivire" în cazul validării [CRO17].

Tabelul 5.1 Validare rezultate FEM versus EXPERIMENT [CRO17]

Categorie Material	Date Design Expert	Forța de impact	Lungime amprentă	Lățime amprentă	Tip de cedare	Rezultate FEM
[-]	[-]	[N]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
Fibra de sticlă MAT 300	Media	3606.46	25.13	23.00	1.00	potrivire
	Abaterea medie pătratică	229.54	4.36	1.85	0.00	
	Eroarea Standard	81.15	1.54	0.65	0.00	
Fibra de sticlă ROWING	Media	4223.25	37.75	24.75	1.00	potrivire
	Abaterea medie pătratică	126.92	2.49	1.39	0.00	
	Eroarea Standard	44.87	0.88	0.49	0.00	
Fibra de carbon 3K 285	Media	4610.40	25.50	16.63	0.00	potrivire
	Abaterea medie pătratică	55.37	3.07	2.45	0.00	
	Eroarea Standard	19.58	1.09	0.86	0.00	
Fibra de kevlar-carbon 215	Media	2110.75	24.63	17.50	0.38	potrivire
	Abaterea medie pătratică	177.14	3.16	2.45	0.52	
	Eroarea Standard	62.63	1.12	0.87	0.18	

Se poate concluziona că metoda de validare a rezultatelor analizei la impact cu elemente finite a panourilor compozite prin intermediul teoriei Design of Experiments și a testărilor experimentale/practice și-a dovedit avantajele și atributele benefice pentru cercetările viitoare efectuate în domeniul aeronautic și automotive. Datele rezultate din analiza cu elemente finite sunt comparate cu cele din experimentările de laborator, acestea din urmă fiind parametrizate în cadrul diferitelor standarde și calculate cu ajutorul planului factorial.

Această metodă de validare urmează a fi utilizată pentru diverse cercetări efectuate asupra unor componente din industria auto (și anume aripi sau bare de protecție). De asemenea, modelul matematic al planului factorial va fi utilizat și în dezvoltarea instrumentului software original. De asemenea, prin utilizarea metodei expuse, se asigură performanța crescută a panourilor compozite ce sunt fabricate conform specificațiilor și cerințelor industriei [CRO17].

5.2 Testarea la impact a piesei de tip aripă de autoturism

5.2.1 Considerații referitoare la fabricația piesei de tip aripă de automobil

Etapa premergătoare fabricării piesei de geometrie complexă este etapa de realizare a matriței acestei piese, această etapă fiind prezentată în întregime în cadrul tezei de doctorat.

Rezultatul final al acestei fabricații este prezentat în Figura 5.4.

Figura 5.4 Matrița piesei de analizat – prezentare față și spate

Procesul de realizare a matriței fiind încheiat, se trece la fabricarea piesei de geometrie complexă din materiale compozite, în acest caz, țesătură de kevlar-carbon 215 g/m^3. Pașii parcurși pentru realizarea piesei sunt descriși în cele ce urmează:

- executarea șabloanelor de croire după matriță cu ajutorul unei pânze textile, prin etape succesive, urmărindu-se conturul geometric al matriței în sine;
- croirea materialului piesei;
- prepararea și aplicarea unui strat de rășină epoxidică;
- uscarea întregului ansamblu;
- prepararea unei rășini de suprafață;
- impregnarea rășinii de suprafață în straturi;
- uscarea ansamblului rezultat;
- ajustarea ansamblului obținut prin tăierea surplusului de material;
- lustruirea suprafeței;
- tratamentul termic al piesei; această etapă presupune introducerea în cuptor a piesei pe suportul inițial pentru îmbunătățirea caracteristicilor mecanice ale piesei prin ridicarea treptată a temperaturii (5^{o}C/h), menținerea la temperatura de 120^{o}C timp de 5 ore, iar apoi răcirea treptată a ansamblului în aer liber.

Piesa de geometrie complexă, aripa stânga față a unui automobil Renault Espace , piesă rezultată prin parcurgerea procesului descris anterior, este prezentată în Figura 5.5.

Figura 5.5 Piesa de geometrie complexă supusă testelor la impact

5.2.2 Validarea practică a analizei FEM aferentă testării la impact a aripii de autoturism

În vederea efectuării cercetărilor experimentale, a fost configurat standul experimental prezentat în Figura 5.6, acesta fiind un ansamblu, având următoarele componente:

- suport rigid;
- braț pendul;
- bila de impact;
- cadru de adaptare;
- aripa de automobil.

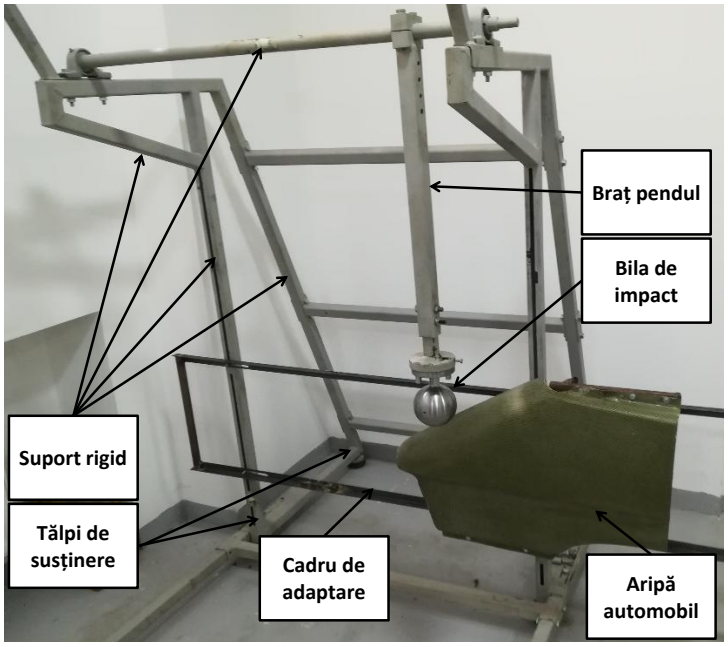


Figura 5.6 Stand experimental în ansamblu montat

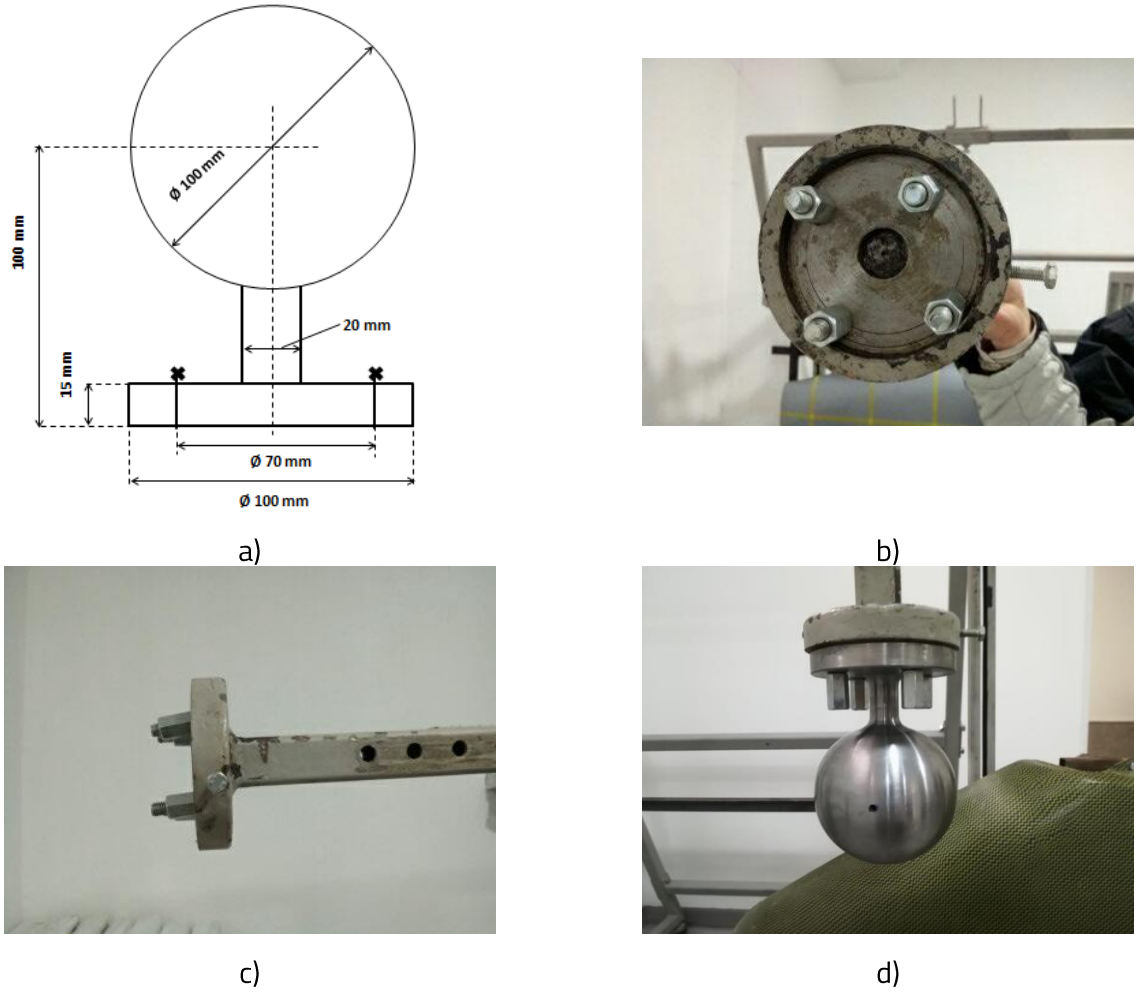


Figura 5.7 Ansamblul bilă de impact – braț pendul

5.2.3 Elemente teoretice privind realizarea testelor de laborator

Înaintea prezentării rezultatelor obținute în urma testelor de laborator, este necesară prezentarea a două aspecte, și anume: partea grafică a realizării experimentelor și calculul energiei maxime de impact, precum și prezentarea aspectelor tehnice a fiecărei situații de testare.

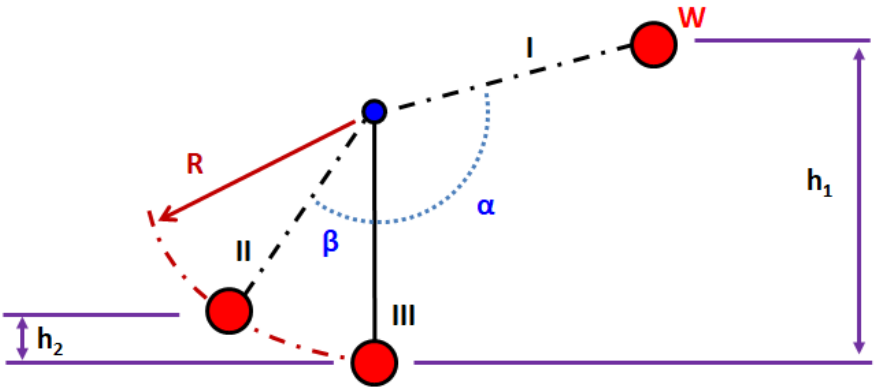


Figura 5.8 Expunerea grafică a experimentului de laborator

Având în vedere Figura 5.8, etapele experimentului de laborator sunt:

1. bila de impact se găsește în poziție de repaus, poziția III;
2. bila de impact este adusă în poziția inițială a testului, poziția I, de unde este eliberată pentru realizarea impactului cu piesa de testat;
3. bila de impact parcurge distanțele descrise de unghiurile de pendulare α si β pentru ca aceasta să lovească piesa de testat.

În cadrul tuturor testelor realizate pentru prezenta teză, unghiul de capăt β, precum și pierderea de energie L, s-au considerat a fi nule.

În ceea ce privește relația de calcul a energiei maxime de impact, trebuie ținut cont de faptul că pentru determinarea acesteia, se utilizează relația pentru diferența de energie potențială între două puncte aflate la înălțimi diferite, și anume:

$$\Delta U = U_1 - U_2 = m * g * h_1 - m * g * h_2 = m * g * (h_1 - h_2) \quad (5.1)$$

Înlocuind înălțimile ca funcții de unghiurile de pendulare, se obține următoarea relație:

$$E = W * g * R * (\cos\beta - \cos\alpha) - L \quad (5.2)$$

Se poate observa că, în cazul considerat cu unghiul de capăt β și pierderea de energie L nule, energia de impact va fi direct proporțională cu unghiul de pendulare α, celeilalți parametri fiind identici. Astfel, au fost realizate mai multe teste la următoarele unghiuri de pendulare: 45 de grade, 90 de grade și 160 grade. Valoarea de 160 grade reprezintă și unghiul maxim de pendulare al standului experimental. Astfel, conform formulei anterioare, energia maximă de impact ce ar putea fi absorbită de către piesa de testat, precum și echivalentul acesteia în accelerație, sunt:

- 29J și 2.9g pentru încercarea la 45 grade;
- 98J și 10.1g pentru încercarea la 90 grade;
- 190J și 19.4g pentru încercarea la 160 grade.

5.2.4 Rezultatele testelor de laborator

Rezultatele testelor de laborator au fost înregistrate utilizând echipamentele menționate anterior.

Privind expunerea grafică a acestor rezultate, pot fi prezentate următoarele concluzii pentru fiecare unghi de pendulare α:

- unghi de pendulare α de 45 grade:
    - ating valori maxime de accelerații de până la 20g;
    - maximele de accelerație atinse sunt 20.1g, 18.6g și 20.1g;
    - diferența maximă de accelerație dintre cele 3 încercări este de 1.5g;
- unghi de pendulare α de 90 grade:
    - ating valori maxime de accelerații de până la 45g;

- maximele de accelerație atinse sunt 34.2g, 44.7g și 44.6g;
- diferența maximă de accelerație dintre primele 2 încercări este de 10.5g, iar dintre următoarele 2 încercări este de 0.1g; astfel, se poate concluziona că prima încercare, în acest caz, nu este relevantă;

- unghi de pendulare α de 160 grade:
  - ating valori maxime de accelerații de până la 57g;
  - maximele de accelerație atinse sunt 47.9g, 56.5g și 55.0g;
  - diferența maximă de accelerație dintre primele 2 încercări este de 7.6g, iar dintre următoarele 2 încercări este de 1.5g; astfel, se poate concluziona că prima încercare, și în acest caz, nu este relevantă;

Testele experimentale considerate nerelevante au drept cauză principală faptul că experimentul este realizat manual, iar standul experimental nu dispune de un motor ce poate înclina brațul pendul la unghiul dorit, care apoi să efectueze testul prin decuplarea acestuia.

5.2.5 Concluzii ale testării la impact a aripii de autoturism

Validarea modelului cu elemente finite pentru piesa de geometrie complexă se poate realiza prin compararea accelerațiilor induse din analiza FEM și cele măsurate în cadrul testelor de laborator. Rezultatele acestei etape sunt prezentate în continuare:

- pentru un unghi de pendulare α de 45 grade, accelerațiile obținute sunt de 18g ca rezultat FEM și de 20g în urma testelor, ceea ce demonstrează o potrivire între cele două modalități de analiză;
- pentru un unghi de pendulare α de 90 grade, analiza FEM arată o accelerație indusă de 43g și testul de laborator 45g, rezultate ce dovedesc din nou concordanță între modurile de cercetare;
- pentru un unghi de pendulare α de 160 grade, accelerațiile sunt comparabile având valorile de 54g pentru FEM și 57g pentru testarea experimentală.

Astfel, datele rezultate din analiza cu elemente finite la impact a unei piese de geometrie complexă, o aripă de autoturism, sunt comparabile cu cele din experimentările de laborator și reflectă realitatea unui asemenea tip de test de impact.

5.3 Concluzii în urma cercetărilor experimentale

Principalele concluzii referitoare la cercetările experimentale privind testarea la impact a panourilor compozite sunt enumerate în continuare:

- testele de laborator sunt realizate conform standardelor în vigoare [ISO00], [ISO01];

- rezultatele testelor de laborator reprezintă datele de intrare pentru aplicația software Design Expert pentru calcularea anumitor parametri;
- înregistrarea rezultatelor testelor de laborator pentru coroborarea acestora cu cele oferite de către simulările realizate în mediul virtual și, implicit, validarea acestora din urmă;
- validarea și din punct de vedere matematic a celor precizate anterior.

După realizarea acestor teste de laborator și prezentarea concluziilor aferente, precum și după compararea acestora cu analizele FEM prezentate în capitolul precedent, urmează etapa finală a cercetării: crearea unui instrument software complex care să permită abordarea integrată a etapelor de calcul și testare la impact a panourilor compozite de formă dreptunghiulară.

6 INSTRUMENT SOFTWARE DESTINAT TESTĂRII LA IMPACT A PANOURILOR COMPOZITE DE FORMĂ DREPTUNGHIULARĂ

Calculul necesar în proiectarea unui panou compozit trebuie astfel realizat încât să conducă la fabricarea unui panou care, în practică, să corespundă scopului propus. Acesta reprezintă cea mai bună metodă de cercetare teoretică privind strategia de urmat cu privire la realizarea acestui deziderat, precum și aprofundarea modelului matematic necesar împreună cu noțiunile teoretice corespunzătoare. Acest mod de lucru oferă detalii despre evitarea cedării în cazul analizei la impact a diferitelor piese ce se prezintă sub formă de panouri. În același timp, este necesară menținerea unei greutăți cât mai mici la costuri competitive cu alte produse asemănătoare existente pe piață.

Implementarea etapelor de calcul într-un instrument software destinat testării la impact a panourilor compozite de formă dreptunghiulară conduce la obținerea unor panouri de calitate.

Situația implementată este cea a unui panou compozit având o încărcare de tip punctiformă precum cea prezentată în Figura 6.1;

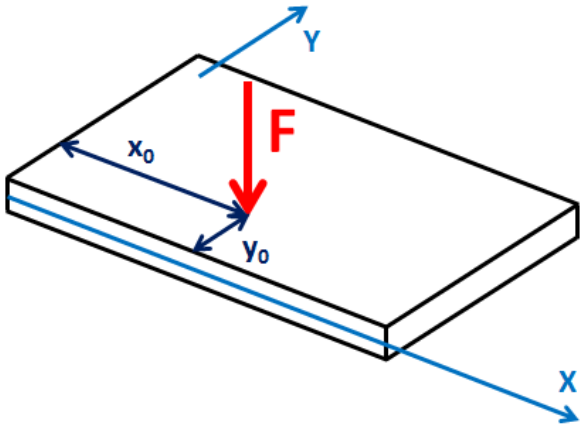


Figura 6.1 Situația reală implementată în instrumentul software

6.1 Concepte matematice

Placa de dimensiuni a x b este încărcată cu o forță verticală F. Coordonatele punctului unde încărcarea este aplicată sunt x_0 și y_0. Acest model poate fi utilizat pentru obținerea răspunsului structural al unei plăci solicitate la impact.

Scopul final îl reprezintă determinarea deformației în afara planului plăcii, notată cu w, ca o funcție a locației punctului de aplicare a forței de deformare. Ecuația de bază este reprezentată de prima ecuație a lui von Karman pentru descrierea comportamentului la îndoire a unei plăci [KAS13]:

$$D_{11} * \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 * (D_{12} + 2 * D_{66}) * \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 * \partial y^2} + D_{22} * \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} =$$
$$= N_x * \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2 * N_{xy} * \frac{\partial^2 w}{\partial x * \partial y} + N_y * \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - p_x * \frac{\partial w}{\partial x} - p_y * \frac{\partial w}{\partial y} + p_z \quad (6.1)$$

Ecuațiile anterioare reprezintă termeni non-lineari, care vor fi neglijați. Determinarea soluției se realizează doar pentru deformații mici, în domeniul liniar.

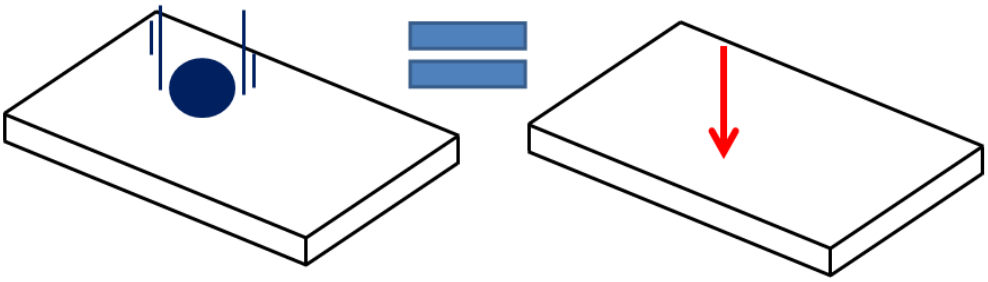


Figura 6.2 Testarea la impact modelată ca încărcare punctiformă

Ecuația de stare pentru deformația w este [KAS13]:

$$w = \sum\sum \frac{\frac{4*F}{ab} * \sin\frac{m*\pi*x_0}{a} * \sin\frac{n*\pi*y_0}{b} * \sin\frac{m*\pi*x}{a} * \sin\frac{n*\pi*y}{b}}{D_{11}*(\frac{m*\pi}{a})^4 + 2*(D_{12}+2*D_{66})*\frac{m^2*n^2*\pi^4}{a^2*b^2} + D_{22}*(\frac{n*\pi}{b})^4} \quad (6.2)$$

Calculul este unul iterativ, în sensul că dacă diferența dintre valoarea lui δ la pasul i (cu termenii M și N) și valoarea lui δ la pasul i+1 (cu termenii M+1 și N+1) este neglijabilă, mai mică de 0.01%, atunci calculul este oprit.

Singura problemă rămasă de rezolvat este determinarea secvenței de lamine care va avea drept rezultat o deformație maximă δ mai mică decât o valoare precizată. O modalitate de a realiza acest pas fără a recurge la utilizarea unui software de optimizare este prin maximizarea numitorului ecuației (6.17). Pentru o secvență de lamine dată, dacă m=n, atunci coeficientul D_{22} este cel mai mare dintre toți termenii matricei D. Următorul coeficient cel mai mare ar fi D_{66}. Astfel, secvența selectată va trebui să îndeplinească aceste două criterii. Modul de îndeplinire al acestor deziderate este selectarea unei secvențe care să aibă lamine orientate la 90^0 cât mai departe de axa neutră și numeroase lamine aflate orientate la 45^0/-45^0 depărtare de axele neutre ale plăcii. Panoul este constrâns astfel încât să aibă doar lamine orientate la 0^0, 45^0, -45^0 și 90^0.

6.2 Dezvoltarea instrumentului software

6.2.1 Considerente inițiale

Pentru realizarea instrumentului software a fost necesar să se parcurgă etapele privind modelarea matematică necesară prezentate în capitolul anterior. Următorii pași au fost parcurși în elaborarea instrumentului software:

- crearea unei interfețe grafice „user-friendly" ce ghidează utilizatorul în utilizarea instrumentului software;
- crearea meniurilor și ferestrelor necesare, cum ar fi:

- meniu principal, ce include:
  - prezentarea situației de analizat în format text și grafic;
  - condițiile de îndeplinit sub formă de „input from keyboard”;
  - dimensiunile panoului compozit;
  - butoane pentru încărcarea de fișiere externe cu conceptele de bază ale software-ului, pentru informațiile privind matricile ABD, pentru baza de date de materiale utilizate, pentru demonstrațiile în format video și pentru fereastra „Help”;
- meniu pentru introducerea secvenței de lamine ce compun panoul compozit ce se dorește a fi analizat la impact;
- meniu pentru implementarea calculului privind proprietățile panoului compozit pe baza proprietăților laminelor componente;
- meniu pentru prezentarea caracteristicilor panoului compozit descris anterior; acest meniu presupune expunerea unor detalii precum: matricea ABD, secvența de lamine și proprietățile elastice echivalente ale panoului compozit;
- meniu pentru efectuarea calculului privind analiza la impact a panoului compozit creat anterior;
- meniu pentru prezentarea rezultatelor aferente analizei la impact și a concluziilor referitoare la îndeplinirea condițiilor impuse.

- validarea software-ului prin intermediul rezultatelor obținute în cadrul capitolelor anterioare.

Instrumentul software creat a fost denumit de autor „C-PIC – Composite Panels Impact Calculator v1.0” și, așa cum a fost precizat anterior, se bazează pe teoria de placă laminară a unui panou compozit și presupune analiza la impact a acestui panou compozit. Instrumentul software a fost conceput utilizând codul Visual Basic for Application din cadrul aplicației Visual Studio [VIS17] și este livrat utilizatorului ca o aplicație executabilă, ale cărei etape, în utilizare, sunt prezentate în cele ce urmează. Autorul a recurs la această aplicație software datorită modului facil de lucru. O multitudine de alte limbaje de programare pot fi utilizate pentru a crea acest instrument software, printre care cele utilizate în [CRO14B], [CRO14C] şi [CRO16].

6.2.2 Modalitatea de lucru

Pentru crearea unei interfețe grafice „user-friendly” ce ghidează utilizatorul în cadrul instrumentului software, precum și a meniurilor și ferestrelor enumerate anterior, s-a avut în vedere schema-bloc din Figura 6.3 ce oferă o privire de ansamblu asupra instrumentului software creat.

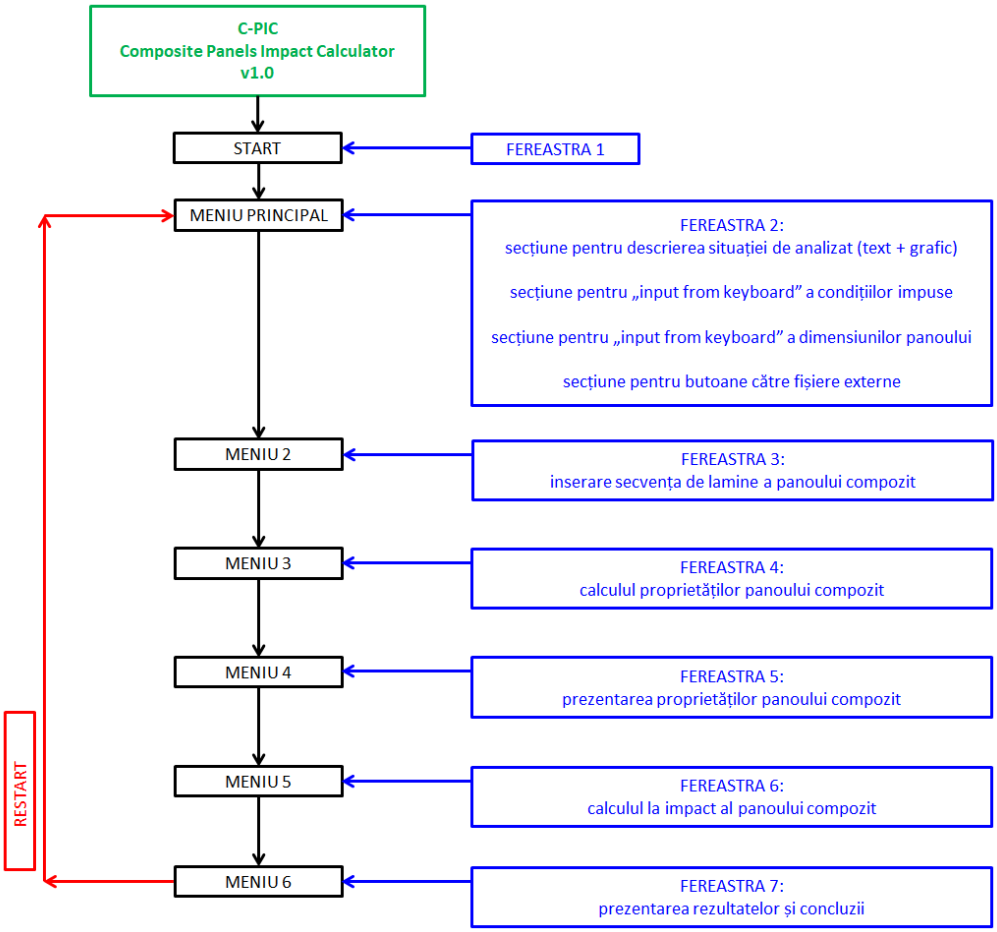


Figura 6.3 Schemă-bloc pentru modul de lucru al instrumentului software C-PIC

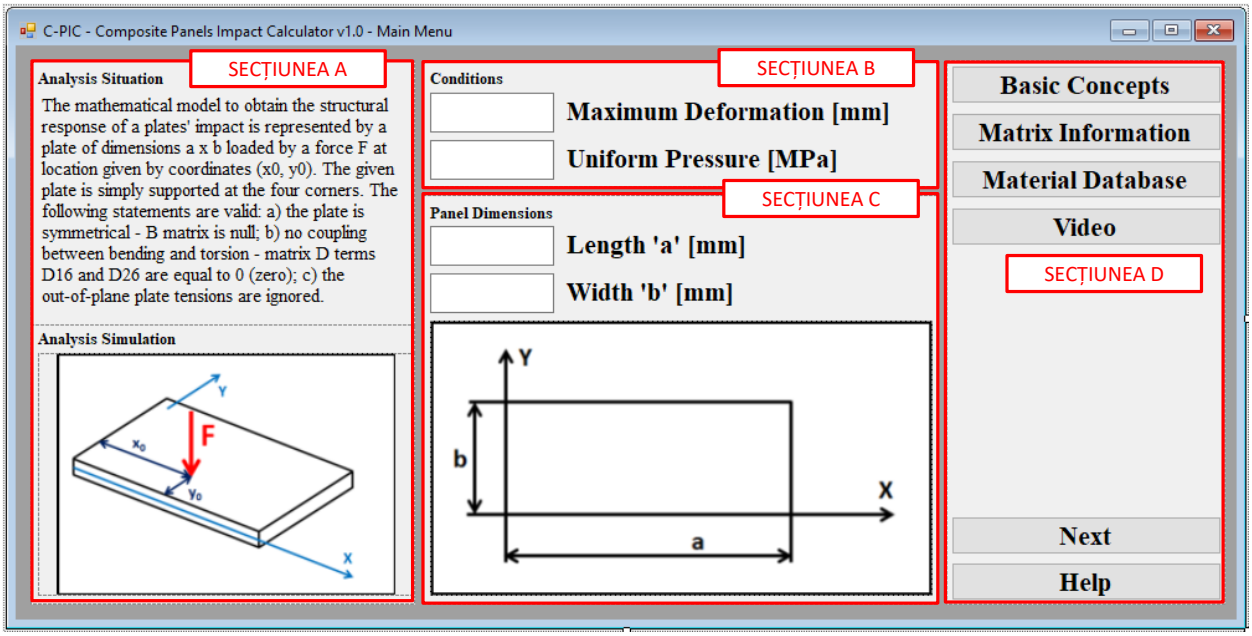


Figura 6.4 Meniul principal al software-ului și secțiunile acestuia

După lansarea în execuție a instrumentului software creat, pe ecran apare fereastra din Figura 6.4, se accesează meniul principal al aplicației care permite vizualizarea următoarelor secțiuni:

- secțiunea A ce descrie situația de analizat;
- secțiunea B ce necesită introducerea de la tastatură a condițiilor impuse prin setarea deformației maxime și a presiunii ce acționează asupra panoului compozit;
- secțiunea C unde se introduc dimensiunile panoului conform sistemului de coordonate;
- secțiunea D ce permite deschiderea fișierelor externe prin butoane, precum și trecerea către meniul de creare a secvenței de lamine a panoului compozit ce se dorește a fi analizat.

Un exemplu de calcul este generat prin inserarea următoarei secvențe pentru panoul compozit realizat din materialele „Unidirectional Tape" și „Plain-weave Fabric" [KAS13]:

„45/45/90/90/90/90/0/90/90/90/90/0/45/-
45/90/90/90/90/0/90/90/90/90/0/90/90/90/90/45/-
45/90/90/90/90/0/90/90/90/90/45/-45/90/90/90/90/0/0/90/90/90/90/-
45/45/90/90/90/90/0/90/90/90/90/-
45/45/90/90/90/90/0/90/90/90/90/0/90/90/90/90/-
45/45/0/90/90/90/90/0/90/90/90/90/45/45„

Caracteristicile panoului compozit descris anterior, ce presupune expunerea unor detalii precum matricea ABD, secvența de lamine și proprietățile elastice echivalente ale panoului compozit, sunt prezentate în Figura 6.5.

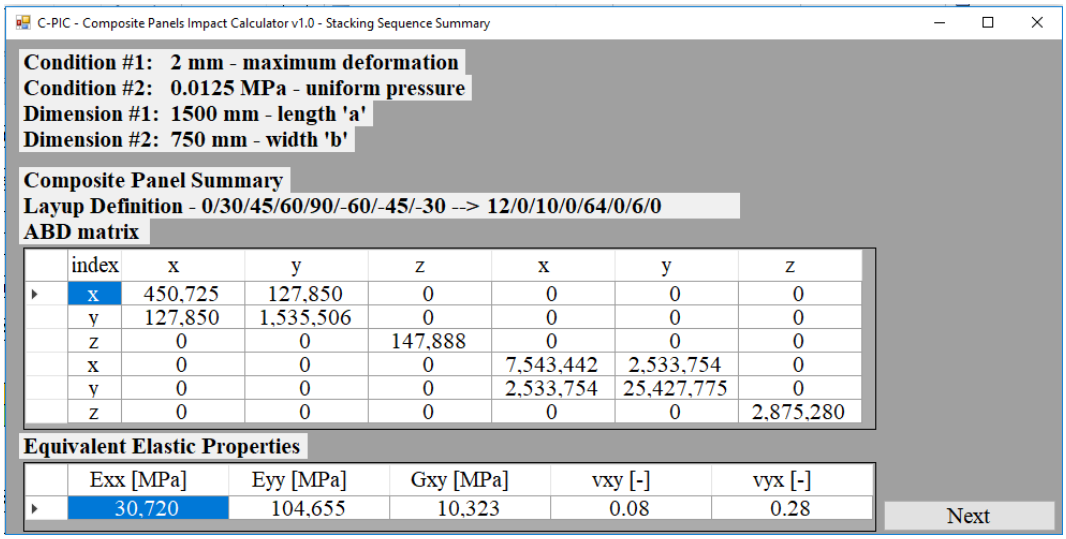


Figura 6.5 Fereastra de afișare a caracteristicilor panoului compozit de analizat

Prin apăsarea butonului „Next" din cadrul acestui ferestre, panoul compozit este analizat la impact conform ipotezelor și formulelor matematice prezentate în capitolul § 6.1. Rezultatele acestei analize sunt afișate în fereastra din Figura 6.6. Acestea sunt următoarele:

- condițiile impuse și dimensiunile panoului compozit de analizat;
- definiția panoului compozit sub formă de layup „0/30/45/60/90/-60/-45/-30";
- proprietățile elastice echivalente;

- rezultatele calculului iterativ al deformației maxime pentru primele 50 de valori;
- calculul diferenței dintre valorile deformației maxime la indice „i" și „i+1" pentru primele 49 de valori;
- concluzii privind condițiile impuse cu specificarea valorii deformației maxime obținute și compararea acesteia cu deformația maximă impusă.

După cum a fost menționat în cadrul capitolului referitor la aspectele matematice, calculul devine iterativ, în sensul că dacă diferența dintre valoarea lui δ la pasul i (cu termenii M și N) și valoarea lui δ la pasul i+1 (cu termenii M+1 și N+1) este neglijabilă, mai mică de 0.01%, atunci calculul este oprit. Calculul este repetat până la pasul 15 unde deformația maximă obținută este 1.9914 mm având o diferență între iterații de 0.0009%.

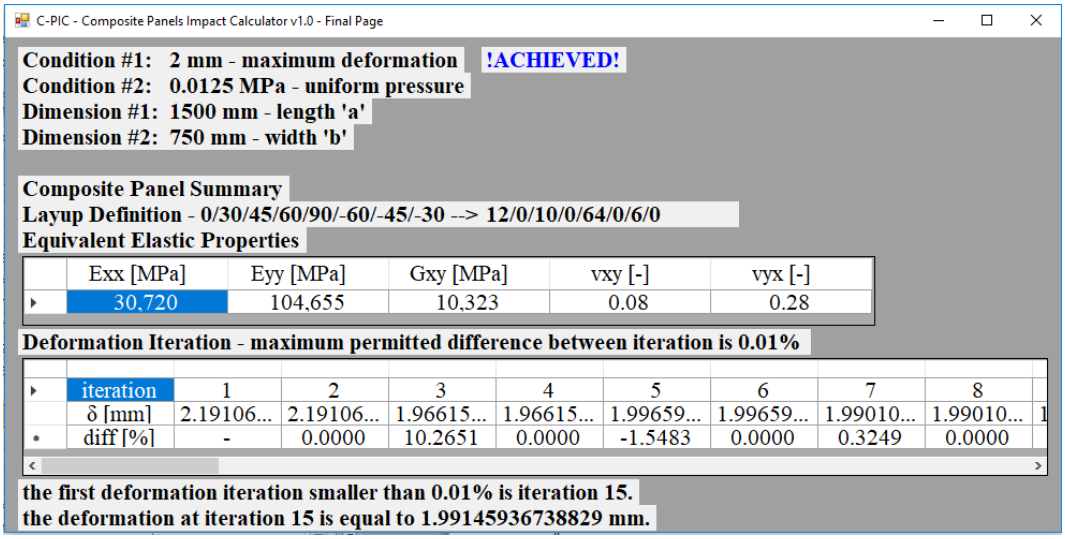


Figura 6.6 Fereastra de afișare a rezultatelor analizei la impact a panoului compozit

Considerând acest exemplu, conform [KAS13], modalitatea de lucru a instrumentului software este prezentată în totalitate și verificată cu cele identificate în literatura de specialitate. În subcapitolul următor se prezintă modul în care instrumentul software funcționează în cazul panourilor compozite de formă dreptunghiulară care au fost analizate FEM (analiză prezentată în subcapitolul § 4.1) și validate experimental (cercetare prezentată în subcapitolul § 5.1).

6.3 Validarea instrumentului software C-PIC

Validarea instrumentului software se realizează prin calculul deformației maxime a panourilor compozite prezentate în capitolul anterior, și anume: eșantioanele de formă dreptunghiulară necesare validării.

În urma comparării rezultatelor, se observă o bună corespondență între acestea, diferența pentru fibra de kevlar–carbon 215 folosită la fabricarea piesei de geometrie complexă fiind de doar 7.44%, procentaj acceptabil ținând cont de tipul de analize comparate.

6.4 Concluzii referitoare la instrumentul software C-PIC

Având drept puncte de pornire aparatul matematic pentru descrierea comportamentului macro și micromecanic al panourilor compozite, rezultatele analizelor FEM ale unor probe de formă dreptunghiulară realizate din fibre de sticlă, fibre de carbon și fibre de kevlar într-o matrice de rășină epoxidică, precum și scopul de a proiecta un panou compozit conform unor cerințe de încărcare, a fost creat instrumentul software descris în subcapitolele anterioare.

Conceptele matematice ale acestuia au fost prezentate pornind de la etapa determinării deformației în afara planului plăcii compozite ca o funcție a locației punctului de aplicare a forței de deformare, placa fiind încărcată cu o presiune uniform distribuită, și finalizând prin obținerea unei soluții/ecuații de stare pentru domeniul liniar al acestei probleme. Astfel, prin diferitele ipoteze și considerente referitoare la matricea de rigiditate și termenii ABD ai panoului compozit studiat, scopul definit pentru codul matematic ce stă la baza instrumentului software a fost îndeplinit, ecuația (6.17).

Dialogul în cadrul instrumentului software se realizează printr- interfață grafică prietenoasă care conține ferestre cu meniuri simple necesare pentru descrierea situației analizate, pentru introducerea de date referitoare la geometria panoului, dar și a structurii de lamine a acestuia, pentru prezentarea unor date intermediare calculate, pentru afișarea datelor finale sub forma unui sumar scurt și cuprinzător și pentru evidențierea concluziilor referitoare la deformația panoului compozit creat: spre exemplu, dacă panoul compozit creat se încadrează în limita dorită în ceea ce privește deformația sub acțiunea presiunii pretinse.

În ceea ce privește etapa validării rezultatelor obținute prin utilizarea aplicației software C-PIC, aceasta a fost efectuată prin compararea valorilor obținute în cadrul analizelor FEM și a testelor de laborator menționate anterior. Coroborarea rezultatelor a dovedit o bună corespondență între acestea, luând în considerare și tipul de analize efectuate.

7 CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. DISEMINAREA REZULTATELOR. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

7.1 Concluzii generale

Teza de doctorat intitulată "Cercetări privind testarea la impact a panourilor compozite termorigide armate cu fibre de sticlă, carbon și kevlar-carbon" este structurată în 7 capitole, acestea fiind detaliate în continuare:

- capitolul § 1, capitolul § 2 și capitolul § 3, sunt dedicate introducerii în cadrul temei de cercetare alese, a studiului stadiului actual al cercetărilor, precum și a prezentării obiectivelor principale și secundare stabilite în urma studierii literaturii de specialitate;
- capitolul § 4 conține contribuțiile autorului referitoare la analiza FEM a panourilor compozite din fibre de sticlă, de carbon si de kevlar-carbon aflate într-o matrice de rășină epoxidică supuse la impact, fiind prezentate mai multe simulări numerice realizate în cadrul sistemelor software Patran/Nastran pentru diversele componente structurale din cadrul aeronavelor (panou de fuselaj) sau automobilelor (aripă de mașină);
- cercetările experimentale necesare pentru a valida din punct de vedere practic, a unor analize FEM sunt prezentate în cadrul capitolului § 5;
- principiile și aspectele matematice principale prezentate în cele două capitole anterioare sunt utilizate în crearea unui instrument software pentru testarea la impact a panourilor compozite de formă dreptunghiulară, instrument prezentat în capitolul § 6;
- ultimul capitol prezintă concluziile generale, contribuțiile personale ale autorului și unele direcții viitoare de cercetare.

În ceea ce privește concluziile generale referitoare la lucrarea de față, acestea sunt enumerate în continuare:

1. materialele compozite reprezintă materialele structurilor viitorului, prin prisma faptului că acestea pot avea caracteristicile dorite și necesare pentru a optimiza performanțele componentelor din cadrul diverselor structuri importante ale unor produse din cadrul unor industrii de top (aeronautică, construcții de mașini);
2. studiul materialelor compozite constituie un domeniu interdisciplinar, fiecare ramură având o contribuție importantă asupra produsului final;
3. costurile ridicate ale fabricării acestor materiale a generat necesitatea cercetării acestora în prealabil, iar analiza cu metoda elementelor finite a reprezentat unul dintre răspunsurile valide pentru această etapă;
4. implementarea într-un mediu FEM a aspectelor importante ale comportamentului materialelor compozite a condus către nevoia de validare a rezultatelor obținute;
5. cercetarea experimentală este instrumentul prin care se certifică și validează rezultatele obținute în urma simulărilor numerice;

6. numărul mare de factori externi și interni ale testelor experimentale a condus la o abordare sistematică și riguroasă care implică aplicarea unor tehnici de modelare matematică și cunoștințe inginerești de colectare și prelucrare de date, totul pentru a asigura concluzii valide din punctul de vedere al fabricării acestor structuri;
7. pornind de la aspectele prezentate anterior, se evidențiază rolul benefic al automatizării în ceea ce privește utilizarea pe scară largă a întregului proces de către cunoscători și nu numai, astfel, apare nevoia de creare de instrumente digitale ce pot permite realizarea acestor pași într-un mod logic;
8. instrumentele software create trebuie să genereze rezultate valide care să corespundă tuturor cerințelor structurii analizate.

7.2 Contribuții personale

Având în vedere cercetările teoretice și experimentale realizate și prezentate în lucrarea de față intitulată "Cercetări privind testarea la impact a panourilor compozite termorigide armate cu fibre de sticlă, carbon și kevlar-carbon", se poate considera că autorul a adus o serie de contribuții în domeniul testării la impact a panourilor compozite. Acestea pot fi sintetizate în:

1. elaborarea unei sinteze referitoare la stadiul actual al cercetărilor în domeniul testării la impact a panourilor compozite, pe trei direcții:
    - materiale compozite – aspecte matematice privind comportamentul macro și micromecanic al acestora și tehnologii de fabricare a fibrelor de sticlă, de carbon, de kevlar și a rășinii epoxidice (subcapitolul § 2.1);
    - analiza în mediu virtual FEM a acestor panouri compozite (capitolul § 2.2);
    - cercetările experimentale privind testarea la impact a panourilor compozite selectate (capitolul § 2.3);
2. realizarea unor analize cu elemente finite pentru testarea la impact a unor panouri compozite, de formă dreptunghiulară, fabricate din fibre de sticlă, fibre de carbon și fibre de kevlar în matrice de rășină epoxidică, și evidențierea materialului cu cele mai bune proprietăți (subcapitolul § 4.1);
3. realizarea unei analize cu elemente finite pentru testarea la impact cu o bilă a unei piese de formă complexă (o aripă de automobil) fabricată din materialul selectat anterior, fibre de carbon și fibre de kevlar într-o matrice de rășină epoxidică (subcapitolul § 4.5);
4. realizarea unor analize cu elemente finite în vederea testării la impact a unor panouri compozite din domeniul aerospațial și auto;
5. desfășurarea unor cercetări experimentale pentru validarea analizelor FEM elaborate în cazul panourilor compozite de formă dreptunghiulară (subcapitolul § 5.1);
6. configurarea unui stand experimental pentru testarea la impact a piesei de formă complexă, cu o bilă (subcapitolul § 5.2);

7. desfășurarea unor cercetări experimentale privind validarea practică a analizei FEM a impactului piesei de formă complexă (o aripă de automobil) cu o bilă (subcapitolul § 5.2);
8. elaborarea unui instrument software original dedicat analizei la impact a panourilor compozite de formă dreptunghiulară și validarea practică a acestuia, prin utilizarea unor date din literatura de specialitate și a rezultatelor obținute din cercetări proprii, teoretice și experimentale (capitolul § 6).

Rezultatele analizelor, studiilor și cercetărilor efectuate în cadrul acestei teze de doctorat au fost diseminate prin publicarea a șapte articole ştiințifice, ca prim autor, care au fost prezentate în cadrul unor conferințe internaționale sau publicate în jurnale, după cum urmează:

- un articol publicat într-un jurnal indexat ISI cu FI 1.248 [CRO17];
- un articol indexat ISI–WoS–CPCI [CRO14A];
- cinci articole indexate în baze de date internaționale [CRO14B], [CRO14C], [CRO15A], [CRO15B] şi [CRO16].

7.3 Direcții viitoare de cercetare

Ca direcții viitoare de cercetare, pot fi menționate următoarele:

a) implementarea planului experimental expus în capitolul § 7.1 în cadrul instrumentului software creat;

b) generarea unui modul nou pentru instrumentul software pentru proiectarea parametrizată și testarea panourilor compozite de geometrie complexă asemenea cu piesa evidențiată în capitolul § 5.2;

c) realizarea unui modul nou pentru inserarea de materiale împreună cu proprietățile aferente acestora;

d) elaborarea unui modul dedicat pentru elaborarea desenului de ansamblu al pieselor testate cu evidențierea zonelor critice de impact.

8 BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

[AGA16] Agarwal, A., Bakshi, S. R., Lahiri, D., *Carbon Nanotubes: Reinforced Metal Matrix Composites*, CRC Press, 2016

[AGA17] Agarwal, B. D., Broutman, L. J., Chandrashekhara, K., *Analysis and Performance of Fiber Composites*, John Wiley & Sons, 2017

[AIR06] Airbus A350: Composites on Trial Part I, *A350XWB Intelligent Airframe*, available at: http://scribol.com/technology/aviation/airbus-a350-composites-on-trial-part-i/, 2006, accessed 16.12.2014

[ANS16] Ansari, M. M., Chakrabarti, A. *Progressive damage of GFRP composite plate under ballistic impact: experimental and numerical study*, Polymers & Polymer Composites, vol. 24, p. 579, 2016

[BAN16A] Bandaru, A. K., Chavan, V. V., Ahmad, S., Alagirusamy, R., Bhatnagar, N., *Ballistic impact response of Kevlar reinforced thermoplastic composite armors*, International Journal of Impact Engineering, vol. 89, p. 1-13, 2016

[BAN16B] Bandaru, A. K., Chavan, V. V., Ahmad, S., Alagirusamy, R., Bhatnagar, N., *Low velocity impact response of 2D and 3D Kevlar/polypropylene composites*, International Journal of Impact Engineering, vol. 93, p. 136-143, 2016

[BOE08] Boeing 787, *From the Ground Up*, available at: http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_2.html, 2008, accessed 16.12.2014

[CAT17A] CATIA by Dassault Systems, available at: https://www.3ds.com/products-services/catia/, accessed 20.12.2017

[CAT17B] CATIA by Dassault Systems, Generative Shape Design Tutorial, available at: http://www.catia.com.pl/tutorial/z2/generative_shape_design.pdf, accessed 20.12.2017

[CHE16] Chen, P. H., Li, N., *Experimental investigation on edge impact damage and Compression-After-Impact (CAI) behavior of stiffened composite panels*, Composite Structures, vol. 138, p. 134-150, 2016

[COR10] Cornley, J., *Design of Experiments: useful statistical tool in assay development or vendor disconnect!*, Drug Discovery World, 2009/2010

[CRO14A] **Croitoru, E. I.**, Oancea, Gh., *Impact Analysis of an Oxygen Mask Locking Panel of Aircraft using Finite Element Modelling*, Switzerland, Applied Mechanics and Materials, vol. 657, p. 735-739, Trans Tech Publications Ltd., 2014

[CRO14B] **Croitoru, E. I.**, *Analiza multi-criterială a soluțiilor constructive pentru un profil aerodinamic/Multi-criterial analysis of constructive solutions for an aerodynamic profile*, România, Revista Creativitate și Inventică, vol. 6, p. 32-41, 2014

[CRO14C] **Croitoru, E. I.**, *Integrarea numerică a problemei celor 2 corpuri în spațiu pentru generarea Sistemului Solar/Numerical integration of the 2-body problem for Solar System generation*, România, Revista Creativitate și Inventică, vol. 6, p. 42-49, 2014

[CRO15A] **Croitoru, E. I.**, Oancea, Gh., *Impact Properties of Parts Manufactured from Fiberglass and Kevlar Composite Panels*, Switzerland, Applied Mechanics and Materials, vol. 809, p. 938-943, Trans Tech Publications Ltd., 2015

[CRO15B] **Croitoru, E. I.**, Oancea, Gh., *Effect of Laminates Orientation on Impact Properties of Fiberglass and Kevlar Composite Panels*, Switzerland, Applied Mechanics and Materials, vol. 808, p. 119-124, Trans Tech Publications Ltd., 2015

[CRO16] **Croitoru, E. I.**, Oancea, Gh., *Satellite Tracking using NORAD Two-Line Element Set Format*, România, Scientific Research and Education in Air Force, vol. 18, p. 423, 2016

[CRO17] **Croitoru, E. I.**, Oancea, Gh., Constantin, N., *Impact Testing on Composite Panels of Fiberglass, Carbon and Kevlar-Carbon – A Comparison and Validation Study*, România, Revista Materiale Plastice, vol. 54, p. 700-707, 2017

[DIE17] Diez, D. M., Barr, C. D., Cetinkaya-Rundel, M., *Open Intro Statictics*, Open Intro, 2017

[DOG08] Dogaru, F., *Mecanica compozitelor laminate*, Brașov, România, Editura Universității „Transilvania" din Brașov, 2008

[DRA98] Draper, N. R., Smith, H., *Applied Regression Analysis*, Wiley – Interscience, 1998

[ERI08] Eriksson, L., Johansson, E., Kettaneh-Wold, N., Wikström, C., Wold, S., *Design of Experiments: Principles and Applications*, MKS Umetrics AB, 2008

[GHE13] Gheorghe, V., *Structuri cu rigiditate ridicată din materiale compozite utilizate in construcția de autovehicule*, Brașov, România, Editura Universității „Transilvania" din Brașov, 2013

[GIB94] Gibson, R. F., *Principles of Composite Material Mechanics*, McGraw-Hill Higher Education, 1994

[GIN17] Ginzburg, D., Pinto, F., Iervolino, O., Meo, M., *Damage tolerance of bio-inspired helicoidal composites under low velocity impact*, Composite Structures, vol. 161, p. 187-203, 2017

[GON18] González, E. V., Maimí, P., Martín-Santos, E., Soto, A., Cruz, P., de la Escalera, F. M., de Aja, J. S., *Simulating drop-weight impact and compression after impact tests on composite laminates using conventional shell finite elements*, International Journal of Solids and Structures, vol. 144, p. 230-247, 2018

[GOS17] Gosz, M. R., *Finite element method: applications in solids, structures, and heat transfer*, CRC Press, 2017

[HEN16] Hensher, D. A., *Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications*, vol. 42, Elsevier, 2016

[HEX17A] Hexcel Corporation, *Product Data Sheet for HexPly® M49 120°C curing epoxy matrix, 3K High Strength Carbon*, available at: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexPly_M49_eu_DataSheet.pdf, accesed 22.07.2017

[HEX17B] Hexcel Corporation, *Product Data Sheet for HexPly® F155 Resin Systems for Advanced Composites, Epoxy Resin with Kevlar Fabric K285*, available at: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexPly_F155_us_DataSheet.pdf, accesed 22.07.2017

[IMR18] Imran, M., Khan, R., Badshah, S., *Finite Element Analysis to Investigate the Influence of Delamination Size, Stacking Sequence and Boundary Conditions on the Vibration Behavior of Composite Plate*, Iranian Journal of Materials Science & Engineering, vol. 15, 2018

[ISO00] ISO 179:1, *Plastics – Determination of Charpy impact properties – Part 1: Non-instrumented impact test*, 2000

[ISO01] ISO 179:2, *Plastics – Determination of Charpy impact properties – Part 2: Instrumented impact test*, 2001

[JON99] Jones, R. M., *Mechanics of Composite Panels*, Taylor Francis, 1999

[KAS13] Kassapoglou, C., *Design and Analysis of Composite Structures with Applications to Aerospace Structures*, John Wiley & Sons, 2nd Edition, 2013

[KUR16] Kurşun, A., Şenel, M., Enginsoy, H. M., Bayraktar, E., *Effect of impactor shapes on the low velocity impact damage of sandwich composite plate: experimental study and modelling*, Composites Part B: Engineering, vol. 86, p. 143-151, 2016

[LIA17] Liao, B. B., Liu, P. F., *Finite element analysis of dynamic progressive failure of plastic composite laminates under low velocity impact*, Composite Structures, vol. 159, p. 567-578, 2017

[LIU16] Liu, P. F., Liao, B. B., Jia, L. Y., Peng, X. Q., *Finite element analysis of dynamic progressive failure of Carbon fiber composite laminates under low velocity impact*, Composite Structures, vol. 149, p. 408-422, 2016

[MA16] Ma, H. L., Jia, Z., Lau, K. T., Leng, J., Hui, D.. *Impact properties of glass fiber/epoxy composites at cryogenic environment*, Composites Part B: Engineering, vol. 92, p. 210-217, 2016

[MIH18] Mihail, L., *MSC Software la HxGN LIVE 2018 #rethink quality pentru #smart factory (II)*, Revista Tehnică și Tehnologie Online, available at: https://www.ttonline.ro/revista/calitate-control/msc-software-la-hxgn-live-2018-rethink-quality-pentru-smart-factory-ii, accesed 10.10.2018

[MON12] Montgomery, D. C., *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons Inc., 2012

[MSC13A] MSC Software Corporation, *MSC Software Company History*, available at: http://www.mscsoftware.com/msc-software, 2013, accessed 08.03.2015

[MSC13B] MSC Software Corporation, *The MacNeal-Schwendler Corporation Changes Name to MSC.Software Corporation*, available at: http://web.mscsoftware.com/press, 2013, accessed 08.03.2015

[MSC15A] MSC Software Corporation, *MSC Nastran*, available at: http://www.mscsoftware.com/product/msc-nastran, 2015, accessed 08.03.2015

[MSC15B] MSC Software Corporation, *MSC Patran*, available at: http://www.mscsoftware.com/product/patran, 2015, accessed 08.03.2015

[NIS15] Nist/Sematech, *e-Handbook of Statistical Methods*, available at: http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pmd/section3/pmd31.html, 2015, accessed 31.10.2015

[NOT16] Noton, B. R., *Engineering Applications of Composites*, Elsevier, 2016

[OST16] Ostré, B., Bouvet, C., Minot, C., Aboissière, J., *Finite element analysis of CFRP laminates subjected to compression after edge impact*, Composite Structures, vol. 153, p. 478-489, 2016

[PET12] Petrescu, I., *Metoda elementelor finite*, București, România, 2012

[RAD06] Radeș, M., *Analiza cu elemente finite*, Bucuresti, România, 2006

[RAN90] Ransom, J. B., Knight Jr., F., *Global/local stress analysis of composite panels*, Hampton, USA, Computers & Structures, vol. 37, p. 375-395, NASA Langley Research Centre, 1990

[REI16] Reinoso, J., Blázquez, A., *Application and finite element implementation of 7-parameter shell element for geometrically nonlinear analysis of layered CFRP composites*, Composite Structures, vol. 139, p. 263-276, 2016

[RIC16A] Riccio, A., Ricchiuto, R., Saputo, S., Raimondo, A., Caputo, F., Antonucci, V., Lopresto, V. *Impact behaviour of omega stiffened composite panels*, Progress in Aerospace Sciences, vol. 81, p. 41-48, 2016

[RIC16B] Riccio, A., Saputo, S., Sellitto, A., *A user defined material model for the simulation of impact induced damage in composite*, Key Engineering Materials, vol. 713, p. 14-17, Trans Tech Publications, 2016

[ROZ17] Rozylo, P., Debski, H., Kubiak, T., *A model of low-velocity impact damage of composite plates subjected to Compression-After-Impact (CAI) testing*, Composite Structures, vol. 181, p. 158-170, 2017

[STA16] Stat-Ease, Inc., *Design Expert*, available at: http://www.statease.com/dx10.html, 2016, accessed: 12.05.2016

[STA15] Stat-Ease, Inc., *Simple Sample Design*, available at: http://www.statease.com/software/dx9-tut.html, 2015, accesed: 07.11.2015

[TAN08] Tanco, M., Viles, E., Ilzarbe, L., Alvarez, M. J., *Dissecting DoE Software*, Six Sigma Forum Magazine, 2008

[TAY16] Taya, M., Arsenault, R. J., *Metal Matrix Composites*, Elsevier, 2016

[TOP17] Topac, O. T., Gozluklu, B., Gurses, E., Coker, D., *Experimental and computational study of the damage process in CFRP composite beams under low-velocity impact*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 92, p. 167-182, 2017

[UGU03] Ugural, A. C., Fenster, S. K., *Advanced Strength and Applied Elasticity (4th ed.)*, Prentice-Hall, ISBN 978-0-13-047392-9, 2003

[VIS17] Visual Studio by Microsoft, available at: https://www.visualstudio.com/, accessed at 20.11.2017

[YOO17] Yoo, D. Y., Kang, S. T., Banthia, N., Yoon, Y. S., *Nonlinear finite element analysis of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams*, International Journal of Damage Mechanics, vol. 26, p. 735-757, 2017

[ZIE05] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., Zhu, J. Z., *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, Butterworth-Heinemann, 2005

[ZOU16] Zouggar, K., Boukhoulda, F. B., Haddag, B., Nouari, M., *Numerical and experimental investigations of S-Glass/Polyester composite laminate plate under low energy impact*, Composites Part B: Engineering, vol. 89, p. 169-186, 2016

REZUMATUL TEZEI

Rezumatul tezei în limba română

Conducător științific
prof. univ. dr. ing. Gheorghe OANCEA

Doctorand
ing. Emilian-Ionuț CROITORU

Cercetări privind testarea la impact a panourilor compozite termorigide armate cu fibre de sticlă, carbon și kevlar-carbon

Rezumat

Cercetările desfășurate în cadrul tezei de doctorat abordează problematica calculului și analizei la impact a panourilor compozite termorigide armate cu fibre de sticlă, fibre de carbon și fibre de kevlar-carbon, urmărind trei direcții, și anume: stadiul actual al cercetărilor din literatura de specialitate cu accent asupra conceptelor matematice și a investigațiilor experimentale necesare descrierii modului de cedare la impact, metoda elementelor finite și modul de aplicare a acesteia în cadrul unor cercetări efectuate asupra unor panouri compozite din industria aerospațială si auto, și cercetările experimentale referitoare la testarea la impact a unor panouri compozite de formă dreptunghiulară și a unei piese de geometrie complexă (aripă de automobil) pentru validarea analizelor realizate în mediul virtual. Simulările numerice realizate și cercetările experimentale sunt materializate într-un instrument software original. Instrumentul software este validat prin compararea rezultatelor care se obțin în urma utilizării efective a acestuia cu cele prezentate în literatura de specialitate și cu cele obținute în cadrul cercetărilor efectuate de autor.

Thesis Summary in English Language

Scientific Advis r
prof. univ. dr. ing. Gheorghe OANCEA

PhD Candidate
ing. Emilian-Ionuț CROITORU

Research Regarding the Impact Testing of Thermoset Composite Panels Armed with Glass, Carbon and Kevlar-Carbon fibers

Summary

The research carried out within the PhD thesis addresses the issues of calculus and impact analysis of thermoset composite panels armed with glass fibers, carbon fibers and Kevlar-carbon fibers, following three directions, namely: the current state of research in the specialty literature with emphasis on mathematical concepts and experimental investigations necessary for the description of the impact failure mode, the finite element method and its application in research of composite panels in the aerospace and automotive industry, and experimental research on impact testing of some rectangular composite panels and a complex geometry part (car wing) to validate the analyses performed in the virtual environment. Numerical simulations and experimental research are materialized in an original software tool. The software tool is validated by comparing the results obtained from its actual use with those presented in the specialty literature and those obtained in the author's research.

CURRICULUM VITAE

CV în limba română

Emilian-Ionuț CROITORU

Informații personale:

Data naşterii:

Domiciliu stabil:

Telefon:

Adresă de e-mail:

Educație şi formare:

Tipul de formare: studii universitare de doctorat (Ciclul III) – doctorand cu frecvență

Perioada: 2013 – prezent

Instituția de învățământ: Universitatea „Transilvania" din Braşov

Departamentul: Ingineria Fabricației

Domeniul: Inginerie Industrială

Domeniul fundamental: Științe Inginerești

Tipul de formare: studii universitare de masterat (Ciclul II) – masterand cu frecvență

Perioada: 2009 – 2011

Instituția de învățământ: Universitatea „Transilvania" din Braşov

Departamentul: Ingineria Fabricației

Domeniul: Inginerie Industrială

Facultatea: Inginerie Tehnologică și Management Industrial

Specializarea: Inginerie și Fabricație Inovativă

Tipul de formare: studii universitare de licență (Ciclul I) – inginer cu frecvență

Perioada: 2005 – 2009

Instituția de învățământ: Universitatea „Transilvania" din Braşov

Departamentul: Ingineria Fabricației

Domeniul: Inginerie Industrială

Facultatea: Inginerie Tehnologică și Management Industrial

Specializarea: Construcții Aerospațiale

Experiență profesională:

Ocupație conform fișa postului: inginer proiectant aeronave

Perioada: 2011 – prezent

Compania: S.C. Consaro Engineering S.R.L. din Brașov

CV in english language

Emilian-Ionuț CROITORU

Personal information:

Date of birth:

Address:

Mobile number: +

E-mail address:

Education and Training:

Type: PhD universitary studies (3rd cicle) – PhD student

Period: 2013 – present

Education Institution: „Transilvania" University Braşov

Department: Manufacturing Engineering

Domain: Industrial Engineering

Fundamental Domain: Engineering Sciences

Type: MSc universitary studies (2nd cicle) – MSc student

Period: 2009 – 2011

Education Institution: „Transilvania" University Braşov

Department: Manufacturing Engineering

Domain: Industrial Engineering

Faculty: Tehnological Engineering and Industrial Management

Study program: Innovative Engineering and Manufacturing

Type: BSc universitary studies (1st cicle) – BSc student

Period: 2005 – 2009

Education Institution: „Transilvania" University Braşov

Department: Manufacturing Engineering

Domain: Industrial Engineering

Faculty: Tehnological Engineering and Industrial Management

Study program: Aerospace Engineering

Professional experience:

Occupation: aerospace stress engineer

Period: 2011 – present

Company: S.C. Consaro Engineering S.R.L. from Brașov