



MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie

POLITEHNICA BUCUREȘTI
Ingineria Sistemelor Biotehnice

Ing. Cesar BANU
Rezumatul tezei de doctorat

Conducător științific:
Prof.Univ. Habil. Dr. Ing. Mihai BUGARU



MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie

POLITEHNICA BUCUREȘTI
Ingineria Sistemelor Biotehnice

**INVESTIGAȚII DUALE NUMERICO-
EXPERIMENTALE PRIVIND PREDICȚIA
DISTORSIUNILOR GEOMETRICE
INDUSE DE TENSIUNILE REMANENTE
GENERATE ÎN ELABORAREA
STRUCTURILOR ANIZOTROPE
MULTISTRATIFICATE**

Conducător științific:

Prof.Univ. Habil. Dr. Ing. Mihai BUGARU

Doctorand:

Ing. Cesar BANU

Cuprins

Nomenclator	1
INTRODUCERE	3
1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR TEORETICE PRIVIND PREDICȚIA DISTORSIUNILOR GEOMETRICE INDUSE DE TENSIUNILE REMANENTE GENERATE ÎN ELABORAREA STRUCTURILOR ANIZOTROPE MULTISTRATIFICATE	4
1.1 MECANISME CARE GENEREAZA TENSIUNI REMANENTE ȘI DISTORSIUNI GEOMETRICE	4
1.1.1 ANIZOTROPIA TERMICĂ	4
1.1.2 CONTRACȚIA RĂȘINII LA POLIMERIZARE	4
1.1.3 INTERACȚIUNEA MATRIȚĂ-PIESĂ	5
1.1.4 IMPREGNAREA FIBRELOR CU RĂȘINĂ ȘI COMPACTAREA STRATURILOR	5
1.1.5 VARIAȚIILE DE TEMPERATURĂ	6
1.2 MODELE FIZICE	6
1.2.1 TERMOCINETICA	6
1.2.2 REOLOGIE ȘI VARIAȚIA GRADULUI DE POLIMERIZARE	6
1.2.3 CONTRACȚIA VOLUMICĂ LA POLIMERIZARE	6
1.2.4 COMPACTAREA	7
1.3 MODELE CONSTITUTIVE DE MATERIAL	7
1.3.1 MODELUL LINEAR ELASTIC	7
1.3.2 RELAȚIA TENSIUNI-DEFORMAȚII	8
1.3.3 MODELUL VÂSCOELASTIC	8
1.3.4 MODELE SPECIFICE CU STRUCTURA DEPENDENTĂ DE MATERIALUL CONSTITUTIV	9
1.3.5 CONDIȚII DE ECHILIBRU	9
1.4 MODELAREA INTERACȚIUNII MATRIȚĂ-PIESĂ	9
BIBLIOGRAFIE – CAPITOLUL 1	10
2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR EXPERIMENTALE PRIVIND PREDICȚIA DISTORSIUNILOR GEOMETRICE INDUSE DE TENSIUNILE REMANENTE GENERATE ÎN ELABORAREA STRUCTURILOR ANIZOTROPE MULTISTRATIFICATE	15
2.1 INVESTIGAȚII EXPERIMENTALE ALE INTERACȚIUNII MATRIȚĂ-PIESĂ	15
2.2 MONITORIZAREA EXPERIMENTALĂ A PROCESULUI DE POLIMERIZARE	15
2.2.1 SENZORI OPTICI	15
2.2.2 SENZORI DIELECTRICI (DC)	16
2.3 DETERMINARI EXPERIMENTALE ALE MODIFICĂRILOR GEOMETRICE	16
2.4 MĂSURATORI SI EVALUĂRI EX-SITU	17
BIBLIOGRAFIE CAPITOLUL 2	18

3. EVALUARI EXPERIMENTALE ALE DISTORSIUNILOR GEOMETRICE INDUSE DE TENSIUNILE REMANENTE GENERATE ÎN ELABORAREA STRUCTURILOR ANIZOTROPE MULTISTRATIFICATE UTILIZATE ÎN INDUSTRIA AERONAUTICĂ (STRUCTURI ANIZOTROPE MULTISTRATIFICATE ELABORATE PRIN PROCESE OOA - OUT OF AUTOCLAVE)	21
3.1 SPECIMENELE DE TEST	22
3.1.1 FAZA 0	22
3.1.2 FAZA 1	23
3.1.3 FAZA 2	24
3.2 MONITORIZAREA CU SENZORI A SPECIMENELOR DE TEST	24
3.2.1 FAZA 0	24
3.2.2 FAZA 1	25
3.2.3 FAZA 2	29
BIBLIOGRAFIE CAPITOLUL 3	30
4. CALIBRAREA DETERMINĂRIILOR EXPERIMENTALE A DISTORSIUNILOR GEOMETRICE INDUSE DE TENSIUNILE REMANENTE GENERATE ÎN ELABORAREA STRUCTURILOR ANIZOTROPE, ESTIMAREA INCERTITUDINILOR ȘI A ERORILOR TEHNICILOR DE MĂSURARE A ACESTOR DISTORSIUNI	33
4.1 FUNDAMENTELE MĂSURĂTORILOR	33
4.1.1 MĂSURĂTOARE	33
4.1.2 DATUM EXPERIMENTAL	33
4.1.3 ERORI, EFECTE SI CORECȚII	33
4.1.4 INCERTITUDINI	34
4.1.5 CONSIDERAȚII PRACTICE	34
4.2 CALCULUL ERORILOR ȘI AL INCERTITUDINILOR LA MĂSURĂTORILE SPECIMENELOR TEST PRIN CMM	35
4.2.1 Incertitudinea măsurării datorată temperaturii piesei	35
4.2.2 ECHIPAMENTUL DE MĂSURĂ FOLOSIT	35
4.2.3 CALCULUL ERORILOR LA MĂSURĂTOAREA CMM A UNUI SPECIMEN TEST	36
4.2.4 CALCULUL INCERTITUDINILOR LA MĂSURĂTOAREA CMM A UNUI SPECIMEN TEST	37
BIBLIOGRAFIE CAPITOLUL 4	38
5. INVESTIGAȚII DUALE PENTRU ESTIMAREA DISTORSIUNILOR GEOMETRICE INDUSE DE TENSIUNILE REMANENTE GENERATE ÎN ELABORAREA STRUCTURILOR ANIZOTROPE MULTISTRATIFICATE UTILIZATE ÎN INDUSTRIA AERONAUTICĂ	39
5.1 DEZVOLTAREA INSTRUMENTULUI NUMERIC PENTRU SIMULARE	39
5.1.1 CONTEXTUL	39
5.1.2 INSTRUMENTELE NUMERICE EXISTENTE ȘI CAPACITĂȚILE LOR DE SIMULARE	39
5.1.3 STRATEGIA DE SIMULARE	40

5.1.4 MODELE MATEMATICE. DEZVOLTAREA LOGICII MODELULUI NUMERIC	41
5.1.5 STRUCTURA MODELULUI DE SIMULARE	42
5.1.6 CAZURI STUDIATE	43
5.2 REZULTATE	44
5.3 ANALIZA REZULTATELOR	48
BIBLIOGRAFIE CAPITOLUL 5	50
6. CERCETĂRI PRIVIND PREDICȚIA DISTORSIUNILOR GEOMETRICE INDUSE DE TENSIUNILE REMANENTE GENERATE ÎN ELABORAREA STRUCTURILOR ANIZOTROPE MULTISTRATIFICATE UTILIZATE ÎN INDUSTRIA AERONAUTICĂ UTILIZÂND SIMULĂRI NUMERICE	52
6.1 SIMULAREA DISTORSIUNII PE UN SPECIMEN LA SCARĂ	52
6.1.1 CONTEXTUL	52
6.1.2 STRATEGIA LUCRĂRILOR ȘI CONSIDERAȚII PRELIMINARE	52
6.1.3 CO-POLIMERIZAREA.....	53
6.1.4 MATERIALE	53
6.1.5 Problema distorsiunilor geometrice si demularea	53
6.1.6 SIMULAREA NUMERICĂ A DISTORSIUNILOR PE DEMONSTRATORUL LA SCARĂ.....	53
6.2 SIMULAREA NUMERICĂ A DISTORSIUNILOR PENTRU ARIPI DE 7 METRI	60
6.2.1 GEOMETRII ȘI MODEL CU ELEMENTE FINITE	60
6.2.2 REZULTATE SIMULĂRI SI ANALIZA REZULTATELOR.....	60
BIBLIOGRAFIE CAPITOLUL 6	62
7. CONTRIBUȚII ORIGINALE PRIVIND PREDICȚIA DISTORSIUNILOR GEOMETRICE INDUSE DE TENSIUNILE REMANENTE GENERATE ÎN ELABORAREA STRUCTURILOR ANIZOTROPE MULTISTRATIFICATE UTILIZATE ÎN INDUSTRIA AERONAUTICĂ	64
7.1 ASPECTE TEORETICE	64
7.2 ASPECTE EXPERIMENTALE	64
7.3 ASPECTE PRACTICE ORIGINALE PENTRU DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A TENSIUNILOR ȘI A DEFORMAȚIILOR REMANENTE	64
7.4 STRATEGII ORIGINALE DE SIMULARE	67
7.5 ABORDARE ORIGINALĂ ÎN PRIVINȚA CAPACITĂȚII DE SIMULARE DISTORSIUNILOR PE STRUCTURI AERONAUTICE ANIZOTROPE MULTISTRATIFICATE LA SCARĂ REALĂ.....	69
BIBLIOGRAFIE GENERALĂ.....	71
ANEXA 1 – LUCRĂRI PUBLICATE INDEXATE SCOPUS ȘI WoS	72

Nomenclator

2D / 3D – bidimensional/ tridimensional

ATL - (*Automated Tape Laying*) Stratificare automatizata cu depunere de benzi

C-SPAR1 - Specimen de tip profil “U” curbat cu suprafată desfășurată rectangulară (220x200 mm) și grosime de 3.0 mm

C-SPAR2 - Specimen de tip profil “U” curbat cu suprafată desfășurată rectangulară (220x200 mm) și grosime de 5.0 mm

C-SPAR3 - Specimen de tip profil “U” curbat cu suprafată desfășurată rectangulară (220x200 mm) și grosime variabilă de 3.0-5.0 mm

CAD - Computer aided design

CTE – (Coefficient of thermal expansion) Coeficient de dilatare termică

CLT – (*Classical lamination theory*) Teoria clasică a stratificatelor

CMM – (*Coordinate measuring machine*) Mașină de masurat în coordonate numerice

CFRP – (*Continuous fiber reinforced polymer*) Stratificat armat cu fibre continue

CHILE - (*Cure-hardening instantaneous linear elastic*) Metoda elasticității liniare instantanee cu consolidare prin polimerizare

CPU - Computațional

DC – Senzori dielectrice de curent continuu

DMA – (*Dynamic mechanical analysis*) Analiză mecanică dinamică

DSC – (*Differential scanning calorimetry*) Scanare calorimetrică diferențială

FBG – (*Fiber Bragg Gratings*) Senzori cu fibre optice Bragg

FE – (*Finite Elements*) Elemente finite

FEA – (*Finite Elements Analysis*) Analiza cu elemente finite

FEM – (*Finite Element Method*) Metoda Elementelor Finite

FOS – (*Fiber Optic Sensors*) Senzori cu fibre optice

OFDR - (*Optical Frequency Domain Reflectometer*) Reflectometru optic pe domenii de frecvențe

OOA – (*Out of Autoclave*) Proces de fabricatia fara autoclava

PBCs – (Periodic boundary conditions) Conditii la limita periodice

PVT – Instalație presiune, volum, temperatură

RTM - (*Resin transfer molding*) Transfer de rășină în matriță

RTM6 – Rășina HexFlow RTM6-2

SKIN1 – Specimen de tip inveliș curbat cu suprafață desfășurată rectangulară (280x200 mm) și grosime de 2.5 mm

SKIN2 – Specimen de tip inveliș curbat cu suprafață desfășurată rectangulară (280x200 mm) și grosime de 6.5 mm

SKIN3 – Specimen de tip inveliș curbat cu suprafață desfășurată rectangulară (280x200 mm) și grosime de 11.5 mm

UD - Unidirecțional

VARTM – (*Vacuum assisted resin transfer molding*) Transfer de rășină în matriță asistat de vacuum

INTRODUCERE

Materialele compozite cu fibre stratificate fabricate cu rășini termorigide prezintă distorsiuni ca urmare a procesului de fabricație. Forma unei piese compozite deviază ușor între debutul și finalul procesului de polimerizare, din cauza mai multor fenomene ireversibile. Dacă aceste distorsiuni nu sunt anticipate, asamblarea mai multor componente structurale poate necesita aplicarea unor forțe inacceptabile sau poate genera tensiuni interne care afectează comportamentul structural în exploatare. Din perspectiva extinderii rapide a utilizării materialelor compozite stratificate în construcția structurilor de înaltă performanță (aeronaute, autovehicule, nave, etc) tema de cercetare abordată este de o deosebită importanță și de actualitate.

Teza este structurată în șapte capitole care parcurg stadiul actual al cercetărilor privind predicția distorsiunilor geometrice la nivel teoretic și experimental (Cap.1, Cap. 2); evaluări experimentale ale distorsiunilor geometrice induse de tensiunile remanente (Cap. 3); calibrarea măsurătorilor, estimarea incertitudinilor și a erorilor (Cap. 4); dezvoltarea instrumentului numeric de simulare a distorsiunilor, simularea distorsiunilor și calibrarea instrumentului de simulare pe specimene test (Cap. 5); simularea distorsiunilor și studiul experimental al acestora pe structuri compozite aeronautice (Cap. 6); contribuții originale ale tezei și concluzii.

În ciuda numeroaselor studii privind distorsiunile induse de polimerizare, literatura de specialitate încă duce lipsă de metodologii testate și validate pentru evaluarea exhaustivă a acestora. Creșterea complexității structurilor construite din compozite stratificate face ca regulile empirice să devină învechite, iar bazarea pe secvențe experimentale de tip încercare-eroare implică costuri suplimentare prohibitive și întârzieri semnificative. Această teză se concentrează pe dezvoltarea unor instrumente numerice capabile să prezică forma și gradul de magnitudine a distorsiunilor. Utilizarea simulării numerice permite evitarea studiilor experimentale costisitoare. Este propusă o metodă duală numerico-experimentală având ca obiectiv predicția distorsiunilor geometrice a structurilor fabricate din compozite stratificate.

O altă contribuție a tezei constă în îmbunătățirea fezabilității și acurateței metodologiei de simulare a procesului de polimerizare, răspunzând nevoii stringente de caracterizare a proprietăților materialelor. În locul caracterizării materialului la nivel de compozit, se utilizează o metodă de omogenizare pentru a prezice proprietățile materialului multi-fază pe baza celor ale constituenților săi. Una dintre noutățile abordării constă în aplicarea metodei de omogenizare cu elemente finite la stratificate unidirectionale modelate grosier, unde reprezentarea geometrică a fibrelor se suprapune de obicei. În loc să se consume resurse pentru eliminarea acestor suprapuneri, ele sunt gestionate prin utilizarea unor rețele neconforme și a unei proceduri de realocare a volumului fibrelor în regiunile de suprapunere. O altă noutate este abordarea de tip holistic pentru a simula comportamentul la polimerizare și a putea estima forma și valorile de distorsiune pentru eșantioane și specimene structurale la scară 1:1.

1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR TEORETICE PRIVIND PREDICȚIA DISTORSIUNILOR GEOMETRICE INDUSE DE TENSIUNILE REMANENTE GENERATE ÎN ELABORAREA STRUCTURILOR ANIZOTROPE MULTISTRATIFICATE

În procesele de fabricare a materialelor compozite, formă finală a pieselor compozite nu este aceeași cu formă matriței la finalul procesului din cauza distorsiunilor induse în timpul fabricației. Distorsiunile geometrice sunt cauzate de procesul de fabricație în sine care induce în piesele compozite tensiuni remanente. Distribuția neuniformă a tensiunilor remanente în materialele compozite duce la deformare, fisurarea matriței polimerice și chiar delaminare. Aceste distorsiuni sunt denumite în industrie prin termeni consacrați precum: "spring-in/spring-out" pentru elementele curbate (racordări, unghiuri, etc) și ondulare superficială (warping) pentru elementele plate, panouri, învelișuri. Problemele cauzate de distorsiuni apar în timpul și după asamblarea pieselor compozite din cauza contactului deficitar între suprafețele de contact, cu excepția cazului în care magnitudinea acestor distorsiuni au fost anticipate și se află în limitele toleranțelor de asamblare.

1.1 MECANISME CARE GENEREAZA TENSIUNI REMANENTE ȘI DISTORSIUNI GEOMETRICE

1.1.1 ANIZOTROPIA TERMICĂ

Diferențele dintre coeficientul de dilatare termică (CTE) al fibrei și rășinii provoacă tensiuni remanente atât la scară micro cât și macro. Pentru panouri curbate diferența de CTE între direcția grosimii și direcția circumferenței induce micșorarea unghiului închis al piesei, pentru secțiunile curbate cunoscute sub numele de spring-in. Prima încercare de a calcula valoarea acestui unghi este propusă de Nelson și Cairns, prin ecuația 1.1:

$$\Delta\theta = \theta \frac{(\alpha_{\theta} - \alpha_R)\Delta T}{1 + \alpha_R\Delta T} \quad (1.1)$$

În care:

- $\Delta\theta$ - unghiul de spring-in;
- θ - unghiul exterior de racordare al piesei;
- α_{θ} - coeficient de dilatare termică pe circumferință (direcția fibrelor);
- α_R - coeficient de dilatare termică radial (direcția grosimii stratificatului);
- ΔT - variația temperaturii;

1.1.2 CONTRACȚIA RĂȘINII LA POLIMERIZARE

Pentru a lua în considerare efectul contracției la polimerizare asupra fenomenului de spring-in, Radford și Diefendorf [BC1.21] au adăugat un termen de contracție la polimerizare în ecuația 1.1, iar unghiul de spring-in este apoi exprimat astfel:

$$\Delta\theta = \theta \left[\frac{(\alpha_{\theta} - \alpha_R)\Delta T}{1 + \alpha_R\Delta T} + \frac{\varepsilon_{\theta} - \varepsilon_R}{1 + \varepsilon_R} \right] \quad (1.2)$$

În care:

- ε_{θ} - deformația în plan provocată de contracția la polimerizare
- ε_R - deformația pe direcția grosimii provocată de contracția la polimerizare

1.1.3 INTERACȚIUNEA MATRIȚĂ-PIESĂ

Acest fenomen inerent proceselor de fabricație duce la o distribuție neuniformă a tensiunilor, care devin remanente pe măsură ce rășina se întărește. Aceste tensiuni provoacă momente de încovoiere la îndepărtarea piesei din compozit din matriță, ceea ce duce la distorsiuni ale formei.

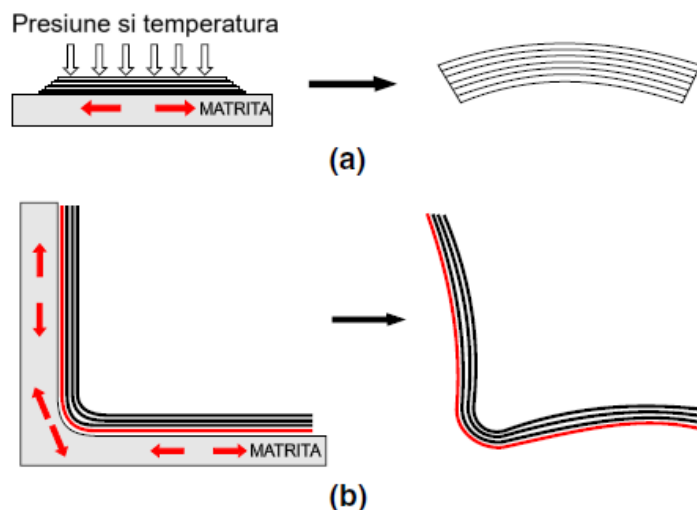


Figura 1.1. Efectul interacțiunii matriță-piesă: a) Piese de tip panou; b) Piese cu secțiuni profil

1.1.4 IMPREGNAREA FIBRELOR CU RĂȘINĂ ȘI COMPACTAREA STRATURILOR

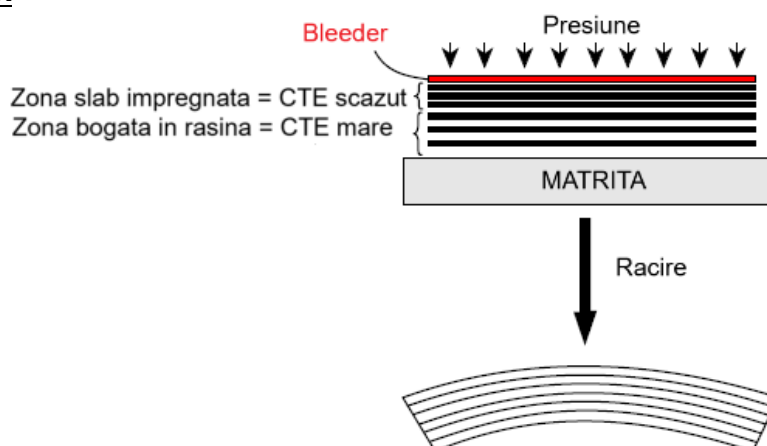


Figura 1.2 Efectul impregnării fibrelor asupra distorsiunii stratificatelor de tip panou

În figura 1.2 este ilustrată formarea regiunilor bogate în rășină la interfața cu matriță și a regiunilor slab impregnate în rășină la interfața stratificatului cu sacul de vid. Pe măsură ce grosimea piesei este redusă prin compactare indusă de presiunea atmosferică sau presiunea suplimentară aplicată în autoclavă (sacul de vid), frecarea între straturile de fibre (în special

pregreguri) le împiedică să urmeze fidel geometria matriței la colțuri. Presiunea aplicată este ineficientă la colțul piesei din cauza "bridging-ului fibrelor.

1.1.5 VARIAȚIILE DE TEMPERATURĂ

Gradientele de temperatură pe direcția grosimii sunt foarte mici pentru piesele subțiri și pot fi neglijate, dar pentru piesele mai groase, creșterea rapidă a temperaturii la fabricație, combinate cu o conductivitate termică scăzută a compozitului poate duce la un gradient semnificativ de temperatură în grosime și de polimerizare [BC1.23].

1.2 MODELE FIZICE

1.2.1 TERMOCINETICA

Expresia matematică a transferului de căldură dată în ecuația 1.3 este rezolvată pentru a prezice istoricul temperaturii pentru polimerul armat cu fibre.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + q_{gen} \quad (1.3)$$

În care:

- ρ – densitatea;
- C_p – căldura specifică;
- k – tensorul conductivității termice;
- ∇ - operator diferențial;

În general, pentru compozite se folosesc proprietăți de material "omogenizate". Termenul q_{gen} din ecuația 1.3 este legat de căldură generate în cadrul procesului exoterm al matricei polimerice iar acesta poate fi exprimat astfel [BC1.27, BC1.28]:

$$q_{gen} = (1 - V_f) \rho_r H_{tr} R_r(\psi, T) \quad (1.4)$$

În care:

- H_{tr} – căldura totală de reacție;
- ρ_r – densitatea răsinii;
- V_f – fracția volumică de fibră;
- ψ – gradul de polimerizare;
- $R_r(\psi, T)$ - reacția de polimerizare ca funcție de ψ și T .

1.2.2 REOLOGIE ȘI VARIAȚIA GRADULUI DE POLIMERIZARE

. Polimerizarea este definită cel mai adesea de gradul de polimerizare, α care poate fi determinat din raportul dintre căldura generată de proces ($H(t)$) la un anumit moment de timp și căldură generată pe întreg parcursul procesului (H_{tr}) [BC1.36] și care poate fi exprimată astfel:

$$\alpha = \frac{H(t)}{H_{tr}} \quad (1.5)$$

1.2.3 CONTRACȚIA VOLUMICĂ LA POLIMERIZARE

Contrația chimică a răsinii în timpul procesului de polimerizare poate fi exprimată ca variație volumică totală (V_{sh}), așa cum este explicat în continuare. Plecând de la premisa unei variații

uniforme per unitatea volumică, incremental izotrop (ϵ_r^c deformatia) se calculează pentru o rășină termorigidă cu următoarea relație [BC1.24]:

$$\epsilon_r^c = \sqrt[3]{1 + \Delta\alpha \cdot V_{sh}} - 1 \quad (1.6)$$

În care:

- $\Delta\alpha$ – variația gradului de polimerizare;
- V_{sh} – contracția volumetrică totală a rășinii termorigide;

Contracția volumică a rășinii începe după punctul de gelificare și urmează o dependență liniară cu gradul de polimerizare α [BC1.49].

1.2.4 COMPACTAREA

Procesul de producere a materialelor stratificate armate cu fibre poate fi modelat luând în considerare cele trei stări ale rășinii: vâscoasă, elastomerică (gel), vitroasă. În starea vâscoasă, lichidul curge și impregnează fibrele din cauza gradientilor de presiune din stratificat. Impregnarea fibrelor a fost modelată folosind un model 2D [BC1.60, BC1.61] pentru materiale compozite bazat pe legea lui Darcy pentru curgeri în medii poroase. Teoria dezvoltată de Darcy a fost cuplată cu eforturile interne de material în aceste studii. Pentru majoritatea compozitelor stratificate, una dintre dimensiuni este mult mai mare decât celelalte două, astfel justificând utilizarea unei stări plane de deformății asociate modelului [BC1.60, BC1.61]. Se consideră că rășină este un fluid newtonian incompresibil.

1.3 MODELE CONSTITUTIVE DE MATERIAL

În această secțiune vom descrie diferitele abordări de definire a modelelor constitutive și care sunt descrise în literatură de specialitate. Modelul linear elastic, modelul vâscoelastic și modele specifice cu structura dependență de materialul constitutiv. Relația dintre tensiuni și deformății este prezentată împreună cu modulul elastic al matricei polimerice. Proprietățile mecanice efective precum și contractile volumice termo-chimice pentru eșantioanele compozite sunt calculate folosind metode micromecanice.

1.3.1 MODELUL LINEAR ELASTIC

Modulul elastic al matricei polimerice este definit ca o funcție de gradul de polimerizare și se exprimă [BC1.24]:

$$E_r = (1 - \alpha_{mod})E_r^0 + \alpha_{mod} E_r^\infty + \gamma \alpha_{mod} (1 - \alpha_{mod})(E_r^\infty - E_r^0) \quad (1.7)$$

și

$$\alpha_{mod} = \frac{\alpha - \alpha_{mod}^{gel}}{\alpha_{mod}^{diff} - \alpha_{mod}^{gel}} \quad (1.8)$$

În care:

- E_r^0 și E_r^∞ – modulele elastice pentru rășina complet nepolimerizată, respectiv, modulul elastic pentru rășina complet polimerizată;
- α_{mod}^{gel} și α_{mod}^{diff} – sunt frontierele intervalului în care modulul elastic al rășinii crește de la valoarea inițială la valoarea finală;
- γ – parametru care descrie relaxarea tensiunilor interne la polimerizare [BC1.24]

În calcule se aproximează că $E_r^0 = E_r^\infty / 1000$ [BC24, BC50, BC67]. Ecuația 1.7 a fost modificată și s-a adăugat dependența de temperatură, sugerată în metoda CHILE [BC1.23, BC1.68] care indică atât solidificarea la polimerizare dar și variația modulului cu temperatura, așa cum arată ecuația 1.14:

$$E_r = \begin{cases} E_r^0 & T^* \leq T_{C1} \\ E_r^0 + \frac{T^* - T_{C1}}{T_{C2} - T_{C1}} (E_r^\infty - E_r^0) & T_{C1} < T^* < T_{C2} \\ E_r^\infty & T_{C2} < T^* \end{cases} \quad (1.9)$$

În care:

- T_{C1} și T_{C2} - sunt temperaturile critice ale intervalului de tranziție vitroasă;
- T^* - diferența instantanee dintre temperatura de tranziție vitroasă și temperatura T a răsinii. $T^* = T_g - T$ [BC1.23, BC1.68].

1.3.2 RELAȚIA TENSIUNI-DEFORMAȚII

Tensiunile și deplasările induse de procesul de polimerizare pot fi rezolvate incremental folosind FEM. La fiecare pas de calcul, deformația totală ($\dot{\epsilon}^{tot}$) este compusă din deformația mecanică ($\dot{\epsilon}^{mec}$), deformațiile termice ($\dot{\epsilon}^{th}$) și deformațiile chimice ($\dot{\epsilon}^c$) și poate fi scrisă că în ecuația 1.10:

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{ij}^{tot} &= \dot{\epsilon}_{ij}^{mec} + \dot{\epsilon}_{ij}^{th} + \dot{\epsilon}_{ij}^c \\ \dot{\epsilon}_{ij}^{pr} &= \dot{\epsilon}_{ij}^{th} + \dot{\epsilon}_{ij}^c \\ \dot{\epsilon}_{ij}^{mec} &= \dot{\epsilon}_{ij}^{tot} - \dot{\epsilon}_{ij}^{pr} \end{aligned} \quad (1.10)$$

$$\dot{\sigma}_{ij} = C_{ijkl} \dot{\epsilon}_{ij}^{mec} \quad (1.11)$$

Tensiunile induse de proces ($\dot{\epsilon}_{ij}^{pr}$) și calculate incremental sunt definite de suma $\dot{\epsilon}_{ij}^{th} + \dot{\epsilon}_{ij}^c$. Tensorul incremental al tensiunilor ($\dot{\sigma}_{ij}$) se calculează utilizând matricea de rigiditate (C_{ijkl}) care este o funcție de temperatură și grad de polimerizare, bazat pe tensorul incremental al deformației mecanice ($\dot{\epsilon}_{ij}^{mec}$).

La sfârșitul fiecărui pas (increment de timp n) tensorul de tensiune și de deformare este recalculat:

$$\sigma_{ij}^{n+1} = \sigma_{ij}^n + \dot{\sigma}_{ij}^n \quad (1.12)$$

$$\epsilon_{ij}^{n+1} = \epsilon_{ij}^n + \dot{\epsilon}_{ij}^n \quad (1.13)$$

1.3.3 MODELUL VÂSCOELASTIC

Modelele vâscoelastice sunt prezentate în literatură sub două forme: diferențială și integrală. În general, formă integrală a fost adoptată de cei mai mulți cercetători [BC1.50, BC1.70-BC1.78].

$$\sigma_{ij} = \int_0^1 C_{ijkl}(\psi, T, \xi - \xi') \frac{\partial \epsilon_{kl}(\xi')}{\partial \xi'} d\xi' \quad (1.14)$$

În care:

$$\xi(t) = \int_0^t \frac{dt}{\chi(\psi, T)} \quad (1.15)$$

$$\xi(t') = \int_0^{t'} \frac{dt'}{\chi(\psi, T)} \quad (1.16)$$

ξ și ξ' sunt parametrii timp redus curent și interval de timp redus al procesului, t și t' sunt timpul curent și durata procesului, χ și ψ sunt temperatura și gradul de polimerizare

dependente de factorul de multiplicare. Modulul matricei polimerice, fără tensiuni remanente, se poate aproxima utilizând o serie Prony [BC1.71]:

$$E_r(\psi, T, t) = E_r^{rel} + (E_r^{rel} - E_r^{unrel}) \sum_i^n w_i \exp \left[\frac{-\xi(\alpha, T)}{\tau(\psi)} \right] \quad (1.17)$$

În care E_r^{rel} este modulul fără tensiuni remanente, E_r^{unrel} este modulul cu tensiuni remanente, w_i este factorul de scalare a masei, $\tau(\psi)$ sunt momentele discrete de timp descrise ca funcție de factorul de polimerizare.

1.3.4 MODELE SPECIFICE CU STRUCTURA DEPENDENTĂ DE MATERIALUL CONSTITUTIV

O versiune simplificată a modelului vâscoelastic a fost propusă în [BC1.12, BC1.67, BC1.79, BC1.80] prin introducerea dependenței de evoluția în timp materialului. Astfel că relațiile tensiune-deformație se pot exprima după cum urmează:

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} C_{ijkl}^r \varepsilon_{kl}, & T^* \leq 0 \\ C_{ijkl}^g \varepsilon_{kl} - [(C_{ijkl}^g - C_{ijkl}^r) \varepsilon_{kl}]_{t=t_{vit}}, & T^* > 0 \end{cases}, \quad (1.18)$$

1.3.5 CONDIȚII DE ECHILIBRU

În cazul tensiunilor, gradientii se afla în echilibru static astfel încât pentru un volum de control putem să scriem următoarea ecuație de echilibru a forțelor pentru unitatea de suprafață $t(S)$ și de volum $f(V)$:

$$\int t dS + \int f dV = 0 \quad (1.19)$$

Matricea de tensiuni Cauchy într-un punct din S este definită prin:

$$t = n \cdot \sigma \quad (1.20)$$

În care n este normală la suprafața S în punctul considerat:

$$\int n \cdot \sigma dS + \int f dV = 0 \quad (1.21)$$

Folosind teorema lui Gauss, rescriem integrala de suprafață ca integrală de volum, astfel:

$$\int n \cdot \sigma dS = \int \nabla \sigma dV = 0 \quad (1.22)$$

1.4 MODELAREA INTERACȚIUNII MATRIȚĂ-PIESĂ

Majoritatea studiilor asupra interacțiunii dintre matriță și piesa, având în vedere și natura fenomenelor, sunt studii experimentale ale căror rezultate au avut ca scop calibrarea simulărilor numerice și a modelelor numerice.

Tensiunea de forfecare critică la care se produce alunecarea se exprima matematic cu ecuația 1.23:

$$\tau_{cr} = \mu \cdot P \quad (1.23)$$

BIBLIOGRAFIE – CAPITOLUL 1

- [BC1.1] Campbell FC. *Manufacturing technology for aerospace structural materials*. London: Elsevier; 2006
- [BC1.2] Li M, Tucker C L. *Optimal Curing for Thermoset Matrix Composites: Thermochemical and Consolidation Considerations*. Polymer Composites 2002; 23(5):739-757
- [BC1.3] Laurenzi S, Marchetti M (2012) Advanced composite materials by resin transfer molding for aerospace applications, composites and their properties. Ning Hu (ed). ISBN: 978-953-51-0711-8. InTech. doi:10.5772/48172.
- [BC1.4] Wisnom MR, Gigliotti M, Ersoy N, Campbell M, Potter KD (2006) Mechanisms generating residual stresses and distortion during manufacture of polymer-matrix composite structures. Compos A 37:522–529
- [BC1.5] Parlevliet PP, Bersee HEN, Beukers A (2006) Residual stresses in thermoplastic composites—a study of the literature—part I: formation of residual stresses. Compos A Appl Sci Manuf 37:1847–1857
- [BC1.6] Parlevliet PP, Bersee HEN, Beukers A (2007) Residual stresses in thermoplastic composites—a study of the literature—part II: experimental techniques. Compos A Appl Sci Manuf 38:651–665
- [BC1.7] Parlevliet PP, Bersee HEN, Beukers A (2007) Residual stresses in thermoplastic composites—a study of the literature—part III: effect of thermal residual stresses. Compos A Appl Sci Manuf 38:1581–1596
- [BC1.8] Ito Y, Obo T, Minakuchi S, Takeda N (2015) Cure strain in thick CFRP laminate: optical-fiber-based distributed measurement and numerical simulation. Adv Compos Mater 24(4):325–342
- [BC1.9] Nelson RH, Cairns DS (1989) Prediction of dimensional changes in composite laminates during cure. 34th International SAMPE symposium and exhibition, vol 34, pp 2397–2410
- [BC1.10] Sarrazin H, Kim B, Ahn SH, Springer GS (1995) Effects of processing temperature and lay-up on springback. J Compos Mater 29(10):1278–1294
- [BC1.11] Gigliotti M, Wisnom MR, Potter D (2003) Development of curvature during the cure of AS4/8552 [0/90] unsymmetric composite plates. Compos Sci Technol 63:187–197
- [BC1.12] Svanberg JM, Holmberg JA (2001) An experimental investigation on mechanisms for manufacturing induced shape distortions in homogeneous and balanced laminates. Compos A 32:827–838
- [BC1.13] Ersoy N, Potter K, Wisnom MR, Clegg MJ (2005) Development of spring-in angle during cure of a thermosetting composite. Compos A 36:1700–1706
- [BC1.14] Radford DW, Rennick TS (2000) Separating sources of manufacturing distortion in laminated composites. J Reinf Plast Compos 19(8):621–640
- [BC1.15] Garstka T (2005) Separation of process induced distortions in curved composite laminates. Ph.D. thesis, University of Bristol
- [BC1.16] Hahn HT, Pagano NJ (1975) Curing stresses in composite laminates. J Compos Mater 9(1):9–91
- [BC1.17] Weitsman Y (1979) Residual thermal stresses due to cool-down of epoxy-resin composites. J Appl Mech 46(3):563–567
- [BC1.18] Adolf D, Martin JE (1996) Calculation of stresses in crosslinking polymers. J Compos Mater 30(1):13–34
- [BC1.19] Sunderland P, Yu W, Manson JA (2001) A thermoviscoelastic analysis of process-induced internal stresses in thermoplastic matrix composites. Polym Compos 22(5):579–592
- [BC1.20] Kevin D, Beaumont PWR (1997) The measurement and prediction of residual stresses in carbon-fibre/polymer composites. Compos Sci Technol 57(11):1445–1455
- [BC1.21] Radford DW, Diendorf RJ (1993) Shape instabilities in composites resulting from laminate anisotropy. J Reinf Plast Compos 12(1):58–75
- [BC1.22] Hubert P, Poursartip A (1998) A review of flow and compaction modelling relevant to thermoset matrix laminate processing. J Compos Mater 17(4):286–318
- [BC1.23] Johnston A (1997) An integrated model of the development of process-induced deformation in autoclave processing of composite structures. Ph.D. thesis, The University of British Columbia

- [BC1.24] Bogetti TA, Gillespie JW Jr (1992) Process-induced stress and deformation in thick-section thermoset composite laminates. *J Compos Mater* 26(5):626–660
- [BC1.25] Bogetti TA, Gillipse JW (1989) Processing-induced stress and deformation in thick section thermosetting composite laminates. CCM report. University of Delaware, August, pp 89–21
- [BC1.26] Ruiz E, Trochu F (2005) Numerical analysis of cure temperature and internal stresses in thin and thick RTM parts. *Compos A* 36:806–826
- [BC1.27] Baran I, Tutum CC, Hattel JH (2013) The effect of thermal contact resistance on the thermosetting pultrusion process. *Compos B Eng* 45:995–1000
- [BC1.28] Baran I, Hattel JH, Tutum CC (2013) Thermo-chemical modelling strategies for the pultrusion process. *Appl Compos Mater* 20:1247–1263
- [BC1.29] Liu XL, Crouch IG, Lam YC (2000) Simulation of heat transfer and cure in pultrusion with a general-purpose finite element package. *Compos Sci Technol* 60:857–864
- [BC1.30] Baran I, Tutum CC, Hattel JH (2013) Optimization of the thermosetting pultrusion process by using hybrid and mixed integer genetic algorithms. *Appl Compos Mater* 20:449–463
- [BC1.31] Baran I, Tutum CC, Hattel JH (2013) Reliability estimation of the pultrusion process using the first- order reliability method (FORM). *Appl Compos Mater* 20:639–653
- [BC1.32] Ersoy N, Garstka T, Potter K, Wisnom MR, Porter D, Clegg M, Stringer G (2010) Development of the properties of a carbon fibre reinforced thermosetting composite through cure. *Compos A* 41:401–409
- [BC1.33] Akkerman R (2002) On the properties of quasi-isotropic laminates. *Compos B Eng* 33:133–140
- [BC1.34] Tsai SW, Hahn HT (1980) Introduction to composite materials. Technomic, Lancaster
- [BC1.35] Goetschel DB, Radford DW (1997) Analytical development of through-thickness properties of composite laminates. *J AdvMater* 28(4):37–46
- [BC1.36] Ersoy N, Tugutlu M (2010) Cure kinetics modelling and cure shrinkage behaviour of a thermosetting composite. *Polym Eng Sci* 50(1):84–92
- [BC1.37] Monti M, Puglia D, Natali M, Torre L, Kenny JM (2011) Effect of carbon nanofibers on the cure kinetics of unsaturated polyester resin: thermal and chemorheological modelling. *Compos Sci Technol* 71:1507–1516
- [BC1.38] Kosar V, Gomzi Z (2001) Thermal effects of cure reaction for an unsaturated polyester in cylindrical moulds. *Chem Biochem Eng Q* 15(3):101–108
- [BC1.39] Martin JL, Cadenato A, Salla JM (1997) Comparative studies on the non-isothermal DSC curing kinetics of an unsaturated polyester resin using free radicals and empirical models. *Thermochim Acta* 306:115–126
- [BC1.40] De la Caba K, Guerrero P, Mondragon I, Kenny JM (1998) Comparative study by and DSC FTIR techniques of an unsaturated polyester resin cured at different temperatures. *Polym Int* 45:333–338
- [BC1.41] Avella M, Martuscelli E, Mazzola M (1985) Kinetic study of the cure reaction of unsaturated polyester resins. *J Therm Anal* 30:1359–1366
- [BC1.42] Vilas JL, Laza JM, Garay MT, Rodriguez M, Leon LM (2001) Unsaturated polyester resins cure: kinetic, rheologic, and mechanical-dynamical analysis. I. Cure kinetics by DSC and TSR. *J Appl Polym Sci* 79:447–457
- [BC1.43] Kenny JM (1994) Determination of autocatalytic kinetic model parameters describing thermoset cure. *J Appl Polym Sci* 51:761–764
- [BC1.44] Kessler MR, White SR (2002) Cure kinetics of the ring-opening metathesis polymerization of dicyclopentadiene. *J Poly Sci A Poly Chem* 40:2373–2383
- [BC1.45] Baran I, Akkerman R, Hattel JH (2014) Material characterization of a polyester resin system for the pultrusion process. *Compos B Eng* 64:194–201
- [BC1.46] Chachad YR, Roux JA, Vaughan JG, Arafat E (1995) Threedimensional characterization of pultruded fiberglass-epoxy composite materials. *J Reinf Plast Comp* 14:495–512
- [BC1.47] Valliappan M, Roux JA, Vaughan JG, Arafat ES (1996) Die and post-die temperature and cure in graphite-epoxy composites. *Compos Part B Eng* 27:1–9

- [BC1.48] Khoun L, Centea T, Hubert P (2010) Characterization methodology of thermoset resins for the processing of composite materials - case study: CYCOM 890RTM epoxy resin. *J Compos Mater* 44:1397–1415
- [BC1.49] Khoun L (2009) Process-induced stresses and deformations in woven composites manufactured by resin transfer moulding. Ph.D. thesis, McGill University, Montreal
- [BC1.50] Nielsen MW (2012) Predictions of process induced shape distortions and residual stresses in large fibre reinforced composite laminates, Ph.D. thesis, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark
- [BC1.51] White SR, Hahn HT (1992) Process modelling of composite materials: residual stress development during cure. Part II. Experimental validation. *J Compos Mater* 26(16):2423–2453
- [BC1.52] Russell JD, Madhukar MS, Genidy MS, Lee AY (2000) A new method to reduce cure-induced stresses in thermoset polymer composites, part III: correlating stress history to viscosity, degree of cure, and cure shrinkage. *J Compos Mater* 34(22):1926–1947
- [BC1.53] Msallem YA, Jacquemin F, Boyard N, Poitou A, Delaunay D, Chatel S (2010) Material characterization and residual stresses simulation during the manufacturing process of epoxy matrix composites. *Compos A* 41:108–115
- [BC1.54] Prasatya P, McKenna GB, Simon SL (2001) A viscoelastic model for predicting isotropic residual stresses in thermosetting materials: effects of processing parameters. *J Compos Mater* 35(10):826–847
- [BC1.55] Madhukar MS, Genidy MS, Russell JD (2000) A new method to reduce cure-induced stresses in thermoset polymer composites, part I: test method. *J Compos Mater* 34(22):1882–1904
- [BC1.56] DA Darrow JR, Smith LV (2001) Isolating components of processing induced warpage in laminated composites. *J Compos Mater* 36(21):2407–2418
- [BC1.57] Hsiao KT, Gangireddy S (2008) Investigation on the spring-in phenomenon of carbon nanofibre-glass fibre/polyester composites manufactured with vacuum assisted resin transfer moulding. *Compos A* 39:834–842
- [BC1.58] Wisnom MR, Ersoy N, Potter KD (2007) Shear-lag analysis of the effect of thickness on spring-in of curved composites. *J Compos Mater* 41(11):1311–1324
- [BC1.59] Ersoy N, Garstka T, Potter K, Wisnom MR, Porter D, Stringer G (2010) Modelling of the spring-in phenomenon in curved parts made of a thermosetting composite. *Compos A* 41:410–418
- [BC1.60] Hubert P, Vaziri R, Poursartip A (1999) A two-dimensional flow model for the process simulation of complex shape composite laminates. *Int J Numer Meth Eng* 44(1):1–26
- [BC1.61] Min L, Yanxia L, Yizhuo G (2008) Numerical simulation flow and compaction during the consolidation of laminated composites. *Wiley Intersci Soc Plast Eng* 29(5):560–568
- [BC1.62] Dave R, Kardos JL, Dudukovic MP (1987) A model for resin flow during composite processing: part 1-general mathematical development. *Polym Compos* 8(1):29–38
- [BC1.63] Gutowski TG, Cai Z, Bauer S, Boucher D (1987) Consolidation experiments for laminate composites. *J Compos Mater* 21(7):650–669
- [BC1.64] Li M, Li Y, Zhang Z, Gu Y (2008) Numerical simulation flow and compaction during the consolidation of laminated composites. *Polym Compos* 29(5):560–568
- [BC1.65] Li M, Charles L, Tucker III (2002) Modelling and simulation of two-dimensional consolidation for thermoset matrix composites. *Compos A* 33:877–892
- [BC1.66] Dong C (2011) Model development for the formation of resinrich zones in composites processing. *Compos A* 42:419–424
- [BC1.67] Svanberg JM (2002) Predictions of manufacturing induced shape distortions-high performance thermoset composites. PhD thesis, Lulea University of Technology
- [BC1.68] Johnston A, Vaziri R, Poursartip A (2001) A plane strain model for process-induced deformation of laminated composite structures. *J Compos Mater* 35(16):1435–1469
- [BC1.69] Ersoy N, Potter K, Wisnom MR, Clegg MJ (2005) An experimental method to study frictional processes during composite manufacturing. *Compos A* 36:1536–1544

- [BC1.70] Kim YK (2004) Process-induced residual stress analysis by resin transfer molding. *J Compos Mater* 38(11):959–972
- [BC1.71] Kim YK, White SR (1996) Stress relaxation behavior of 3501–6 epoxy resin during cure. *Polym Eng Sci* 36(23):2852–2862
- [BC1.72] Kim YK, White SR (1997) Viscoelastic analysis of processing induced residual stresses in thick composite laminates. *Mech Compos Mater Struct* 4(4):361–387
- [BC1.73] 98. White SR, Kim YK (1998) Process-induced residual stress analysis of AS4/3501-6 composite material. *Mech Compos Mater Struct Int J* 5(2):153–186
- [BC1.74] 99. Kim YK, White SR (1999) Cure-dependent viscoelastic residual stress analysis of filament-wound composite cylinders. *Mech Compos Mater Struct* 5(4):327–354
- [BC1.75] 100. Ding A, Li S, Wang J, Zu L (2015) A three-dimensional thermos-viscoelastic analysis of process-induced residual stress in composite laminates. *Compos Struct* 129:60–69
- [BC1.76] 101. Ding A, Li S, Sun J, Wang J, Zu L (2015) A thermo-viscoelastic model of process-induced residual stresses in composite structures with considering thermal dependence. *Compos Struct*. doi:10.1016/j.compstruct.2015.09.014
- [BC1.77] 102. Zobeiry N (2006) Viscoelastic constitutive models for evaluation of residual stresses in thermoset composites during cure. PhD thesis, The University of British Columbia
- [BC1.78] 103. Zocher MA (1995) A Thermoviscoelastic finite element formulation for the analysis of composites. PhD. thesis, Texas AM University
- [BC1.79] Svanberg JM, Altkvist C, Nyman T (2005) Prediction of shape distortions for a curved composite C-spar. *J Reinf Plast Compos* 24(3):323–339
- [BC1.80] Svanberg JM, Holmberg JA (2004) Prediction of shape distortions. Part II. Experimental validation and analysis of boundary conditions. *Compos A* 35:723–734
- [BC1.81] Cinar K, Oztrk UE, Ersoy N, Wisnom MR (2014) Modelling manufacturing deformations in corner sections made of composite materials. *J Compos Mater* 48(7):799–813
- [BC1.82] Cinar K (2014) Process modelling for distortions in manufacturing of fibre reinforced composite materials. Ph.D. thesis, Bogazici University
- [BC1.83] Arafath ARA, Vaziri R, Poursartip A (2008) Closed-form solution for process-induced stresses and deformation of a composite part cured on a solid tool: Part I- flat geometries. *Compos A* 39:1106–1117
- [BC1.84] Arafath ARA, Vaziri R, Poursartip A (2009) Closed-form solution for process-induced stresses and deformation of a composite part cured on a solid tool: Part II- curved geometries. *Compos A* 40:1545–1557
- [BC1.85] Ferlund G, Rahman N, Courdji R, Bresslauer M, Poursartip A, Willden K, Nelson K (2002) Experimental and numerical study of the effect of cure cycle, tool surface, geometry, and lay-up on the dimensional fidelity of autoclave-processed composite parts. *Compos A* 33:341–351
- [BC1.86] Zhu Q, Geubelle PH, Li M, Tucker CL (2001) Dimensional accuracy of thermoset composites: simulation of process-induced residual stresses. *J Compos Mater* 35(24):2171–2205
- [BC1.87] Flanagan R (1997) The dimensional stability of composite laminates and structures. Ph.D. thesis, Queen's University of Belfast
- [BC1.88] Ozsoy OO, Ersoy N, Wisnom MR (2007) Numerical Investigation of tool-part interactions in composite manufacturing. *Proceedings of ICCM-16*
- [BC1.89] Twigg G, Poursartip A, Ferlund G (2004) Tool-part Interaction in composite processing. Part II: numerical modelling. *Compos A* 35:135–141
- [BC1.90] Sun J, Gu Y, Li Y, Li M, Zhang Z (2012) Role of tool-part interaction in consolidation of L-shaped laminates during autoclave process. *Appl Compos Mater* 19(3):583–597
- [BC1.91] 118. Hibbit, Karlson, Sorensen Inc. (2004) ABAQUS online documentation, version 6.5.1
- [BC1.92] Twigg G, Poursartip A, Ferlund G (2003) An experimental method for quantifying tool-part shear interaction during composites processing. *Compos Sci Technol* 63:1985–2002
- [BC1.93] Twigg G, Poursartip A, Ferlund G (2004) Tool-part interaction in composite processing. Part I: experimental investigation and analytical model. *Compos A* 35:121–133

- [BC1.94] Potter KD, Campbell M, Langer C, Wisnom MR (2005) The generation of geometrical deformations due to tool/part interaction in the manufacture of composite components. *Compos A* 36:301–308
- [BC1.95] Kappel E, Stefaniak D, Sprowitz T, Hhne C (2011) A semianalytical simulation strategy and its application to warpage of autoclave-processed CFRP parts. *Compos A* 42:1985–1994
- [BC1.96] Stefaniak D, Kappel E, Sprowitz T, Hhne C (2012) Experimental identification of process parameters inducing warpage of autoclave-processed CFRP parts. *Compos A* 43:1081–1091
- [BC1.97] Zeng X, Raghavan J (2010) Role of tool-part interaction in process-induced warpage of autoclave-manufactured composite structures. *Compos A* 41:1174–1183
- [BC1.98] Kaushik V, Raghavan J (2010) Experimental study of tool-part interaction during autoclave processing of thermoset polymer composite structures. *Compos A* 41:1210–1218
- [BC1.99] de Oliveria R, Lavanchy S, Chatton R, Costantini D, Michaud V, Salathe R, Manson JAE (2008) Experimental investigation of the mould thermal expansion on the development of internal stresses during carbon fibre composite processing. *Compos A* 39:1083–1090
- [BC1.100] Potter K, Campbell M, Wisnom MR (2003) Investigation of tool/part interaction effects in the manufacture of composite components. *Proceedings of ICCM-14*
- [BC1.101] Kim YK, Daniel IM (2002) Cure cycle effect on composite structures manufactured by resin transfer moulding. *J Compos Mater* 36(14):1725–1742
- [BC1.102] Antonucci V, Cusano A, Giordano M, Nasser J, Nicolais L (2006) Cure- induced residual strain build-up in a thermoset resin. *Compos A* 37:592–601
- [BC1.103] Martin CJ, Seferis JC, Wilhelm MA (1996) Frictional resistance of thermoset prepregs and its influence on honeycomb composite processing. *Compos A* 27:943–951

2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR EXPERIMENTALE PRIVIND PREDICȚIA DISTORSIUNILOR GEOMETRICE INDUSE DE TENSIUNILE REMANENTE GENERATE ÎN ELABORAREA STRUCTURILOR ANIZOTROPE MULTISTRATIFICATE

În literatura de specialitate se evidențiază trei categorii de abordări experimentale care își propun să cuantifice efectele interacțiunii la nivelul interfeței matriță-piesă, metode experimentale care să ajusteze modelele numerice care simulează tensiunile remanente prin monitorizarea procesului de polimerizare dar și prin monitorizarea deformațiilor și a evoluției tensiunilor remanente și a geometriei post-polimerizare.

2.1 INVESTIGAȚII EXPERIMENTALE ALE INTERACȚIUNII MATRIȚĂ-PIESĂ

Efectul interacțiunii dintre matriță și piesă asupra distorsiunilor a fost evidențiat în studii recente [BC2.1-BC2.24]. Twig și colab. [BC2.11, BC2.14, BC2.15] au desfășurat experimente pentru a înțelege comportamentul mecanic al interfeței matriță-piesă. Pentru a examina interacțiunea dintre piesă și matriță s-a folosit o metodă experimentală. Pentru a defini efortul critic de forfecare pentru care se produce alunecarea la interfață s-a folosit expresia:

$$\tau_{cr} = \mu \cdot P \quad (2.1)$$

Coeficienții de frecare pe parcursul procesului de polimerizare au fost mășurați și în alte studii [BC2.9, BC2.18, BC2.24]. Martin și colab. [BC2.24] precum și Flanagan și colab. [BC2.9] au măsurat doar valorile de frecare statică (fără alunecare) de pe intervalul de creștere a temperaturii ciclului. Observațiile lor [BC2.4, BC2.24] au indicat că interfața matriță-piesă suferă modificări pe parcursul ciclului de polimerizare. În [BC2.19], au fost mășurați atât coeficienții de frecare static cât și dinamici ca o funcție de gradul de polimerizare, rata de creștere a temperaturii [BC2.9, BC2.19]. S-a observat o relație neliniară între coeficienții de frecare, static și dinamic, și gradul de polimerizare. Acest fapt arăta că la interfața, condițiile se modifică de la mișcare (alunecare) în primele faze ale ciclului de fabricație până la încetarea complete a oricărei alunecări și fixare (aderență, "înțepenire", etc). S-a construit un model matematic pentru frecare [BC2.26] pentru a evalua forțele de frecare dintre un stratificat pe bază de polipropilenă și armat cu fibră de sticlă (Twintex) și o matriță rigidă la temperatură de topire.

2.2 MONITORIZAREA EXPERIMENTALĂ A PROCESULUI DE POLIMERIZARE

2.2.1 SENZORI OPTICI

Sistemele de monitorizare cu fibre optice sunt capabile să detecteze mai multor parametri și a pot fi încorporate în materiale stratificate armate cu fibre și utilizate pentru monitorizarea procesului de polimerizare în timpul etapei de fabricație. Aceiași senzori pot fi utilizați pentru măsurarea temperaturii și a deformațiilor pe durata de utilizare a structurii. Senzorii

de indice de refracție a fost testați cu succes pentru monitorizarea procesului de polimerizare a compozitelor pe bază de rășini termorigide. În fapt, aceștia pot fi utilizați în etapele de fabricație care implică modificări de densitate, modificări chimice sau tranziții de fază. Utilizarea tehnologiei FBG permite obținerea unor rezultate calitative și cantitative extrem de utile și precise în ceea ce privește măsurătorile distribuite de deformății și temperatură, comparativ cu sistemele convenționale de măsură și monitorizare.

2.2.2 SENZORI DIELECTRICI (DC)

Analiza experimentală cu senzori dielectrics este o tehnică larg folosită în industria producătoare de structuri compozite pentru că este o metodă foarte robustă pentru caracterizarea stării rășinii pe parcursul procesului de fabricare. Metodă de monitorizare folosind senzorii dielectrics se bazează pe prezența dipolilor în rășină în stare nepolimerizată. La începutul reacției de polimerizare monomerii se pot mișca liberi. Pe măsură ce reacția de polimerizare evoluează, monomerii formează lanțuri polimerice iar mobilitatea dipolilor este restricționată până la punctul de gelifiere când avem deja o rețea complexă de polimerizare cross-link (A+B) iar mobilitatea polimerilor formați tinde spre zero. De la acest punct viteza cu care crește parametrul α (grad de polimerizare) scade drastic iar rezistență electrică măsurată se stabilizează, marcând astfel din punctul de vedere al înregistrării cu senzori DC, finalul reacției de polimerizare [BC2.35]. În acest fel, un sensor DC reușește să măsoare în mod indirect evoluția rășinii termorigide și gradul acesteia de polimerizare prin variația rezistivității. Totuși, pentru a cuantifica în mod precis gradul de polimerizare α este necesară o analiză a evoluției termice a procesului pentru corelarea semnalului senzorilor cu evoluția parametrului α .

2.3 DETERMINARI EXPERIMENTALE ALE MODIFICARILOR GEOMETRICE

Măsurătorile distorsiunilor, în general, și ale unghiurilor de "spring-in" în particular, se fac prin metode optice - scanarea cu laser sau prin măsurarea cu mașini de măsurătoare în coordonate numerice (CMM). Măsurarea distorsiunilor este o operațiune care are nevoie de echipamente performanțe de măsură pentru a putea furniza informații de înaltă precizie atât pentru ajustarea geometriei matrițelor cât mai ales pentru pașii de calibrare ai simulărilor numerice ale proceselor de polimerizare.

În figura 2.8 este prezentat un rezumat al rezultatelor măsurătorilor prin metoda optică și prin CMM. În vederea evaluării distorsiunilor globale pentru speciamele fabricate se fac măsurători ale matriței care urmează să fie folosită la fabricarea speciameului de tip profil U. Rezultatele inspecției cu sistem optic se pot vedea în imaginile a și b din figura 2.1.

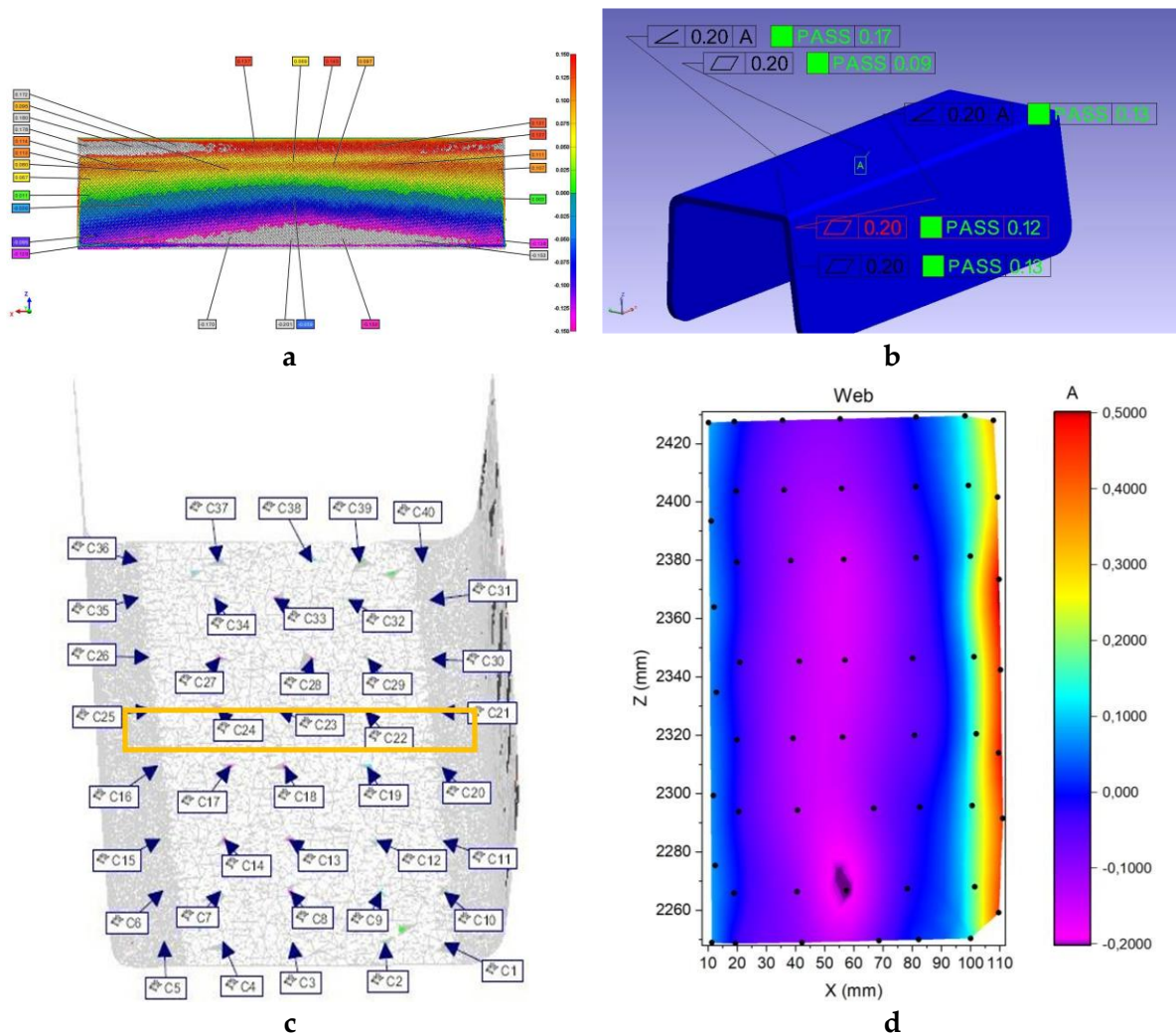


Figura 2.1. Măsuratori pe matrițe și specimene: **a)** scanare geometrică de matriță cu sistem optic PolyWorks; **b)** scanare geometrică de matriță cu sistem optic Laser Tracker FARO; **c)** specimen profil U măsurat cu metoda CMM – punctele de măsură; **d)** hartă de deviații dimensionale ale specimenului profil U

2.4 MĂSURATORI SI EVALUĂRI EX-SITU

O categorie de evaluări ale proprietăților de material deja consacrată în lumea științifică și inginerască este cea a evaluărilor de material pentru a determina cu precizie informații de interes. Spre deosebire de metodele care utilizează senzori, aceste din urmă metode, prin natura lor, nu pot fi utilizate în timpul fabricației structurilor sau speciimenelor compozite.

Metodele ex-situ de evaluare a proprietăților de material nu sunt în mod direct de interes pentru evaluarea desfășurării proceselor de polimerizare și pentru distribuția tensiunilor remanente care duc la distorsiuni geometrice ale compozitelor stratificate, motiv pentru care nu vom intra în detalii tehnice ale acestor metode. Cu toate acestea, în numeroasele cazuri de utilizare a senzorilor cu scopul de monitorizare a dinamicii polimerizării dar și pentru a furniza informații din momente cheie ale procesului, citirea senzorilor are nevoie în mod obligatoriu de reverențiere și calibrare. Prin urmare, calibrarea senzorilor se face în mod obișnuit prin metode de evaluare ex-situ.

BIBLIOGRAFIE CAPITOLUL 2

- [BC2.1] Johnston A (1997) An integrated model of the development of process-induced deformation in autoclave processing of composite structures. Ph.D. thesis, The University of British Columbia
- [BC2.2] Johnston A, Vaziri R, Poursartip A (2001) A plane strain model for process-induced deformation of laminated composite structures. *J Compos Mater* 35(16):1435–1469
- [BC2.3] Khoun L, Hubert P (2010) Investigation of the dimensional stability of carbon epoxy cylinders manufactured by resin transfer moulding. *Compos A* 41:116–124
- [BC2.4] Ersoy N, Potter K, Wisnom MR, Clegg MJ (2005) An experimental method to study frictional processes during composite manufacturing. *Compos A* 36:1536–1544
- [BC2.5] Arafath ARA, Vaziri R, Poursartip A (2008) Closed-form solution for process-induced stresses and deformation of a composite part cured on a solid tool: Part I- flat geometries. *Compos A* 39:1106–1117
- [BC2.6] Arafath ARA, Vaziri R, Poursartip A (2009) Closed-form solution for process-induced stresses and deformation of a composite part cured on a solid tool: Part II- curved geometries. *Compos A* 40:1545–1557
- [BC2.7] Ferlund G, Rahman N, Courdji R, Bresslauer M, Poursartip A, Willden K, Nelson K (2002) Experimental and numerical study of the effect of cure cycle, tool surface, geometry, and lay-up on the dimensional fidelity of autoclave-processed composite parts. *Compos A* 33:341–351
- [BC2.8] Zhu Q, Geubelle PH, Li M, Tucker CL (2001) Dimensional accuracy of thermoset composites: simulation of process-induced residual stresses. *J Compos Mater* 35(24):2171–2205
- [BC2.9] Flanagan R (1997) The dimensional stability of composite laminates and structures. Ph.D. thesis, Queen's University of Belfast
- [BC2.10] Ozsoy OO, Ersoy N, Wisnom MR (2007) Numerical Investigation of tool-part interactions in composite manufacturing. *Proceedings of ICCM-16*
- [BC2.11] Twigg G, Poursartip A, Ferlund G (2004) Tool-part Interaction in composite processing. Part II: numerical modelling. *Compos A* 35:135–141
- [BC2.12] Sun J, Gu Y, Li Y, Li M, Zhang Z (2012) Role of tool-part interaction in consolidation of L-shaped laminates during autoclave process. *Appl Compos Mater* 19(3):583–597
- [BC2.13] Twigg G, Poursartip A, Ferlund G (2003) An experimental method for quantifying tool-part shear interaction during composites processing. *Compos Sci Technol* 63:1985–2002
- [BC2.14] Twigg G, Poursartip A, Ferlund G (2004) Tool-part interaction in composite processing. Part I: experimental investigation and analytical model. *Compos A* 35:121–133
- [BC2.15] Potter KD, Campbell M, Langer C, Wisnom MR (2005) The generation of geometrical deformations due to tool/part interaction in the manufacture of composite components. *Compos A* 36:301–308
- [BC2.16] Kappel E, Stefaniak D, Sprowitz T, Hhne C (2011) A semianalytical simulation strategy and its application to warpage of autoclave-processed CFRP parts. *Compos A* 42:1985–1994
- [BC2.17] Stefaniak D, Kappel E, Sprowitz T, Hhne C (2012) Experimental identification of process parameters inducing warpage of autoclave-processed CFRP parts. *Compos A* 43:1081–1091
- [BC2.18] Zeng X, Raghavan J (2010) Role of tool-part interaction in process-induced warpage of autoclave-manufactured composite structures. *Compos A* 41:1174–1183
- [BC2.19] Kaushik V, Raghavan J (2010) Experimental study of tool-part interaction during autoclave processing of thermoset polymer composite structures. *Compos A* 41:1210–1218
- [BC2.20] de Oliveria R, Lavanchy S, Chatton R, Costantini D, Michaud V, Salathe R, Manson JAE (2008) Experimental investigation of the mould thermal expansion on the development of internal stresses during carbon fibre composite processing. *Compos A* 39:1083–1090
- [BC2.21] Potter K, Campbell M, Wisnom MR (2003) Investigation of tool/part interaction effects in the manufacture of composite components. *Proceedings of ICCM-14*
- [BC2.22] Kim YK, Daniel IM (2002) Cure cycle effect on composite structures manufactured by resin transfer moulding. *J Compos Mater* 36(14):1725–1742

- [BC2.23] Antonucci V, Cusano A, Giordano M, Nasser J, Nicolais L (2006) Cure- induced residual strain build-up in a thermoset resin. *Compos A* 37:592–601
- [BC2.24] Martin CJ, Seferis JC, Wilhelm MA (1996) Frictional resistance of thermoset prepregs and its influence on honeycomb composite processing. *Compos A* 27:943–951
- [BC2.25] Garstka T (2005) Separation of process induced distortions in curved composite laminates. Ph.D. thesis, University of Bristol
- [BC2.26] ten Thije RHW, Akkerman R, Ubbink M, van der Meer L (2011) A lubrication approach to friction in thermoplastic composites forming processes. *Compos A Appl Sci Manuf* 42(8):950–960
- [BC2.27] Sachs U, Akkerman R, Fetfatsidis K, Vidal-Sall E, Schumacher J et al (2014) Characterization of the dynamic friction of woven fabrics: experimental methods and benchmark results. *Compos A Appl Sci Manuf* 67:289–298
- [BC2.28] Cornelissen B, Sachs U, Rietman B, Akkerman R (2014) Dry friction characterisation of carbon fibre tow and satin weave fabric for composite applications. *Compos A Appl Sci Manuf* 56:127–135
- [BC2.29] Cusano, A., Breglio, et al. Multifunction fiber optic sensing system for smart applications. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics* (2004)
- [BC2.30] García, I. et al. Optical fiber sensors for aircraft structural health monitoring. *Sensors* (Switzerland) (2015)
- [BC2.31] Kuang, K. S. C., et al. Embedded fibre Bragg grating sensors in advanced composite materials. *Compos. Sci. Technol.* (2001)
- [BC2.32] Kahandawa, G. C., et al. Use of FBG sensors for SHM in aerospace structures. *Photonic Sensors* (2012)
- [BC2.33] Takagaki K, Minakuchi S and Takeda N. 2017 *Compos. Part A Appl. Sci*, **103**, 236-251
- [BC2.34] Zhang G, Zhou Z, Ding G, Xu S, Xie C and Zhang J 2015 *Materials Research Innovations*, 19, S5-718,
- [BC2.35] Chaloupka A, Pflock T., Horny R., Rudolph N and Horn S R 2018 *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.* **56**: 907-913
- [BC2.36] A. Chaloupka, T. Pflock, R. Horny, N. Rudolph, S.R. Horn, Dielectric and rheological study of the molecular dynamics during the cure of an epoxy resin, *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.* 56 (2018) 907–913, <https://doi.org/10.1002/polb.24604>.
- [BC2.37] R. Hardis, J.L. Jessop, F.E. Peters, M.R. Kessler, Cure kinetics characterization and monitoring of an epoxy resin using DSC, Raman spectroscopy, and DEA, *Compos. Appl. Sci. Manuf.* 49 (2013) 100–108, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.01.021>
- [BC2.38] M. Demleitner, S.A. Sanchez-Vazquez, D. Raps, G. Bakis, T. Pflock, A. Chaloupka, S. Schmolzer, “ V. Altst” adt, Dielectric analysis monitoring of thermoset curing with ionic liquids: from modeling to the prediction in the resin transfer molding process, *Polym. Compos.* 40 (2019) 4500–4509, <https://doi.org/10.1002/pc.25306>.
- [BC2.39] J J.-P. Pascault, *Thermosetting Polymers*, Marcel Dekker, New York, 2002.
- [BC2.40] J H.L. Lee, *Handbook of Dielectric Analysis and Cure Monitoring*, Lambient Technologies, 2017.
- [BC2.41] N.W. Radebe, C. Fengler, C.O. Klein, R. Figuli, M. Wilhelm, -I.R. Rheo, A combined setup for correlating chemical changes via FTIR spectroscopy and rheological properties in a strain-controlled rheometer, *J. Rheol.* 65 (2021) 681–693, <https://doi.org/10.1122/8.0000251>.
- [BC2.42] M. Kempf, B. Dippel, O. Arnolds, Hyphenation of Rheology and Raman Spectroscopy - Investigation of Epoxy Curing Mechanism and Polyethylene Crystallization, *ANNUAL TRANSACTIONS OF THE NORDIC RHEOLOGY SOCIETY*, 2017, pp. 181–187
- [BC2.43] N. Liebers, F. Raddatz, et al., Effective and Flexible Ultrasound Sensors for Cure Monitoring for Industrial Composite Production, *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*, 2012.
- [BC2.44] H.E. Adabbo, R.J.J. Williams, The evolution of thermosetting polymers in a conversion–temperature phase diagram, *J. Appl. Polym. Sci.* 27 (1982) 1327–1334, <https://doi.org/10.1002/app.1982.070270422>

- [BC2.45] J.M. Svanberg, J.A. Holmberg., An experimental investigation on mechanisms for manufacturing induced shape distortions in homogenous and balanced laminates., *Composites: Part A* 32 (2001), 827-838
- [BC2.46] Y.K. Kim, S.R. White, Stress relaxation behavior of 3501-6 epoxy resin during cure, *Polym. Eng. Sci.* 36 (1996) 2852–2862, <https://doi.org/10.1002/pen.10686>
- [BC2.47] A. Courtois, M. Hirsekorn, M. Benavente, A. Jaillon, L. Marcin, E. Ruiz, M. L'évesque, Viscoelastic behavior of an epoxy resin during cure below the glass transition temperature: characterization and modeling, *J. Compos. Mater.* 53 (2019) 155–171, <https://doi.org/10.1177/0021998318781226>
- [BC2.48] D.J. O'Brien, P.T. Mather, S.R. White, Viscoelastic properties of an epoxy resin during cure, *J. Compos. Mater.* 35 (2001) 883–904, <https://doi.org/10.1177/a037323>
- [BC2.49] S. Saseendran, M. Wysocki, J. Varna, Evolution of viscoelastic behavior of a curing LY5052 epoxy resin in the glassy state, *Adv. Manuf. Polym. Compos. Sci.* 2 (2016) 74–82, <https://doi.org/10.1080/20550340.2016.1236223>
- [BC2.50] M. Zarrelli, A.A. Skordos, I.K. Partridge, Thermomechanical analysis of a toughened thermosetting system, *Mech. Compos. Mater.* 44 (2008) 181–190, <https://doi.org/10.1007/s11029-008-9009-x>
- [BC2.51] D.J. O'Brien, N.R. Sottos, S.R. White, Cure-dependent viscoelastic Poisson's ratio of epoxy, *Exp. Mech.* 47 (2007) 237–249, <https://doi.org/10.1007/s11340-006-9013-9>
- [BC2.52] S.R. White, P.T. Mather, M.J. Smith, Characterization of the cure-state of DGEBA/DDS epoxy using ultrasonic, dynamic mechanical, and thermal probes, *Polym. Eng. Sci.* 42 (2002) 51–67, <https://doi.org/10.1002/pen.10927>
- [BC2.53] D. Dykeman, Minimizing Uncertainty in Cure Modeling for Composites Manufacturing, PhD Thesis, 2008. Vancouver
- [BC2.54] R. Hardis, J.L. Jessop, F.E. Peters, M.R. Kessler, Cure kinetics characterization and monitoring of an epoxy resin using DSC, Raman spectroscopy, and DEA, *Compos. Appl. Sci. Manuf.* 49 (2013) 100–108, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.01.021>
- [BC2.55] F. Henning, L. Karger, "D. Dorr, " F.J. Schirmaier, J. Seuffert, A. Bernath, Fast processing and continuous simulation of automotive structural composite components, *Compos. Sci. Technol.* 171 (2019) 261–279, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.12.007>
- [BC2.56] C. Block, B. van Mele, P. van Puyvelde, G. van Assche, Time–temperature transformation (TTT) and temperature–conversion transformation (TxT) cure diagrams by RheoDSC: combined rheometry and calorimetry on an epoxy-amine thermoset, *React. Funct. Polym.* 73 (2013) 332–339, <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2012.05.009>
- [BC2.57] M. Müller, A. Winkler, M. Gude, H. Jäger, Aspects of reproducibility and stability for partial cure of epoxy matrix resin, *J. Appl. Polym. Sci.* 137 (2020), 48342, <https://doi.org/10.1002/app.48342>
- [BC2.58] R.S. Lakes, Viscoelastic measurement techniques, *Rev. Sci. Instrum.* 75 (2004) 797–810, <https://doi.org/10.1063/1.1651639>
- [BC2.59] I.M. Ward, J. Sweeney, *Mechanical Properties of Solid Polymers*, third. ed., Wiley, Chichester, 2013
- [BC2.60] R.A. Venditti, J.K. Gillham, Y.C. Jean, Y. Lou, Free volume after cure vs. fractional conversion for a high-Tg epoxy/amine thermosetting system, *J. Appl. Polym. Sci.* 56 (1995) 1207–1220, <https://doi.org/10.1002/app.1995.070561003>
- [BC2.61] J.B. Enns, J.K. Gillham, Effect of the extent of cure on the modulus, glass transition, water absorption, and density of an amine-cured epoxy, *J. Appl. Polym. Sci.* 28 (1983) 2831–2846, <https://doi.org/10.1002/app.1983.070280914>
- [BC2.62] F. Lionetto, A. Maffezzoli, Monitoring the cure state of thermosetting resins by ultrasound, *Materials* 6 (2013) 3783–3804, <https://doi.org/10.3390/ma6093783>

3. EVALUARI EXPERIMENTALE ALE DISTORSIUNILOR GEOMETRICE INDUSE DE TENSIUNILE REMANENTE GENERATE ÎN ELABORAREA STRUCTURILOR ANIZOTROPE MULTISTRATIFICATE UTILIZATE ÎN INDUSTRIA AERONAUTICĂ (STRUCTURI ANIZOTROPE MULTISTRATIFICATE ELABORATE PRIN PROCESSE OOA - OUT OF AUTOCLAVE)

Vom propune o strategie experimentală de monitorizare a procesului de fabricație și de măsuratori ale distorsiunilor geometrice plecând de la rezultatele evidente în al doilea raport de cercetare privind stadiul actual al cercetărilor experimentale ale tensiunilor remanente și a distorsiunilor geometrice pe care acestea le induc.

Alegerea geometriilor relevante ale speciimenelor compozite pentru programul experimental

Vor fi studiate diferite tipuri de speciime de test pentru a înțelege evoluția influenței fiecărui parametru în procesul de polimerizare. O descriere generică a speciimenelor de test este făcută în figura 3.1. Geometria speciimenelor test va crește treptat în complexitate. Pe lângă modificarea geometriei, speciimele test vor avea și multe valori ale grosimii stratificatului (număr de straturi). Din punctul de vedere al tipului de speciimen test, strategia studiului experimental va fi împărțită în trei faze:

- În **faza 0** se vor monitoriza speciime 2D (plane) fabricate doar din rasină;
- În **faza 1** se vor monitoriza speciime cu două geometrii: cu rază de curbura foarte mare (cvasi-plan) și speciimen profil "U";
- În **faza 2** se va monitoriza un ansamblu complex format din înveliș și profilul "U".

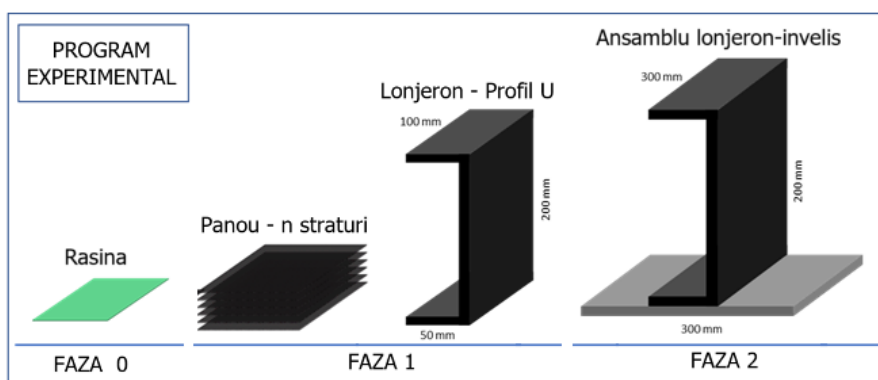


Figura 3.1. Programul experimental descrie pe faze ale speciimenelor de test

Monitorizarea cu senzori dielectrici de curent continuu

Proprietățile electrice ale unei matrici polimerice pot oferi informații despre starea polimerului, cum ar fi vâscozitatea, punctul de gelifiere, punctul de vitrifiere și temperatura de tranziție vitroasă (T_g) și încheierea procesului de polimerizare. Obiectivul final este de a corela aceste proprietăți electrice cu criteriile de calitate și performanță, astfel încât măsurătorile electrice și de temperatură să fie combinate cu modele ale materialelor pentru a le converti în vâscozitatea rășinii (η), gradul de întărire (α) sau temperatura de tranziție

vitroasă (Tg). Aceste modele pot fi utilizate offline pentru a determina ciclul optim al procesului de polimerizare/fabricație [BC3.1], dar și online, pentru a asigura controlul optim în timp real al procesului de fabricație a materialelor compozite [BC3.2].

Monitorizarea cu senzori optici FBG

Cei mai utilizați senzori optici pentru monitorizarea proceselor sunt senzorii FBG, deoarece: reprezintă cea mai avansată tehnologie cu senzori optici, au un cost redus comparativ cu senzorii optici cu fibre distribuite, oferă o sensibilitate punctuală ridicată pentru temperatură și deformatii, au un raport zgomot/semnal scăzut, ceea ce este foarte avantajos atunci când trebuie detectate variații de magnitudine scăzută (deformatii, temperaturi), timp de răspuns scurt și au o capacitate foarte bună de multiplexare (mai mulți senzori pe aceeași fibră optică).

3.1 SPECIMENELE DE TEST

Prin studierea experimentală pe diferite tipuri de specimene se intenționează înțelegerea influenței fiecărui parametru din procesul de polimerizare asupra tensiunilor remanente și a distorsiunilor geometrice [BC3.3-BC3.32].

O serie de elemente cheie au fost luate în considerare în procesul de concepție și proiectare a speciimenelor de test:

- Similitudinea geometrică a speciimenelor cu elemente de structură primară de aeronavă (învelișuri rigidizate, rigidizori de tip lonjeron, lisa, cadru, etc);
- Caracteristicile geometrice ale speciimenelor trebuie să servească la înțelegerea fenomenelor asociate procesului de polimerizare – determinarea factorilor cu influență cea mai mare în apariția tensiunilor remanente și, în consecință, a distorsiunilor;
- Geometria trebuie să fie suficient de simplă pentru a repeat în mod eficient un număr relevant de probe experimentale dar și într-atât de complexă încât să nu se rezume doar la studiul unor stratificate de tip înveliș plan și să fie capabilă să ofere informații complete pentru dezvoltarea unei software de simulare a distorsiunilor pentru o plajă cât mai largă de condiții reale de proces;
- Facilitarea siguranței a instrumentării cu senzori a speciimenelor având în vedere că senzorii optici pot fi afectați sau ruși dacă nu sunt amplasați în condiții avantajoase, în special în afara speciimenelor;
- Demularea facilă și sigură din matrice;
- Perfectarea unei proceduri practice de înglobare a senzorilor în speciimenele de test pentru monitorizarea procesului de polimerizare pe tot parcursul acestuia;
- Calibrarea și interpretarea măsurimilor citite cu senzori (semnal) pe parcursul procesului de polimerizare.

3.1.1 FAZA 0

Pentru Faza 0, în studiul comportamentului rășinii, s-a folosit un specimen plan, cât mai simplu, fiind de interes doar monitorizarea rășinii și nu comportamentul anizotrop al stratificatelor.

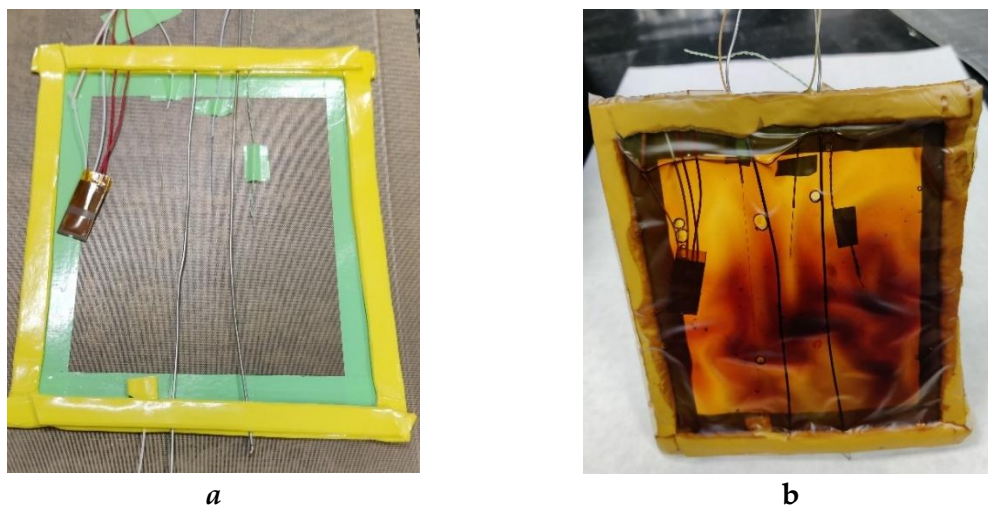


Figura 3.2. Montajul cu senzori în matriță pentru caracterizarea rășinii RTM6 (a) și rășina polimerizată cu senzori înglobați (b)

3.1.2 FAZA 1

Pentru toate sisteme de materiale folosite în experimente, au fost selectate specimene de tip înveliș stratificat ușor curbat și specimene cu profil în formă de „U” ca geometrii reprezentative pentru înveliș exterior (înveliș) și lonjeroane. Specimenele de tip înveliș sunt învelișuri cu o rază de curbură de 1475 mm (cu o cota măsurată la muchiile extreme de 7,65 mm), considerate a reproduce cel mai bine geometria unui profil generic de aripă.

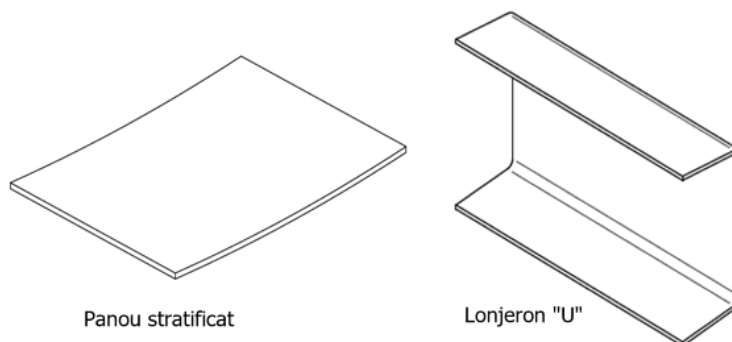


Figura 3.3. Specimene de test FAZA 1

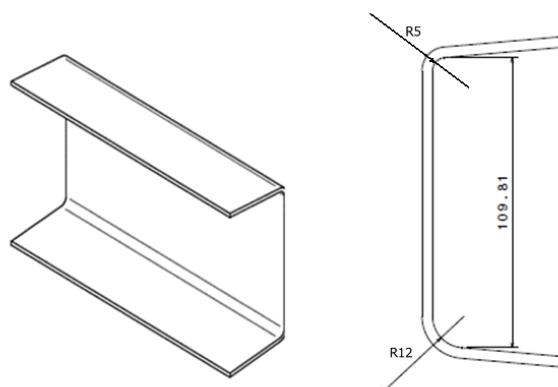


Figura 3.4. Specimen de tip lonjeron „U” și secțiunea acestuia

3.1.3 FAZA 2

Pentru faza a doua a monitorizării pe specimene de test s-a studiat posibilitatea construcției unui ansamblu de tip înveliș rigidizat, cu scopul de a permite culegerea de date pe o structură complexă la scară, foarte similară cu o secțiune dintr-o structură primară de aripă.

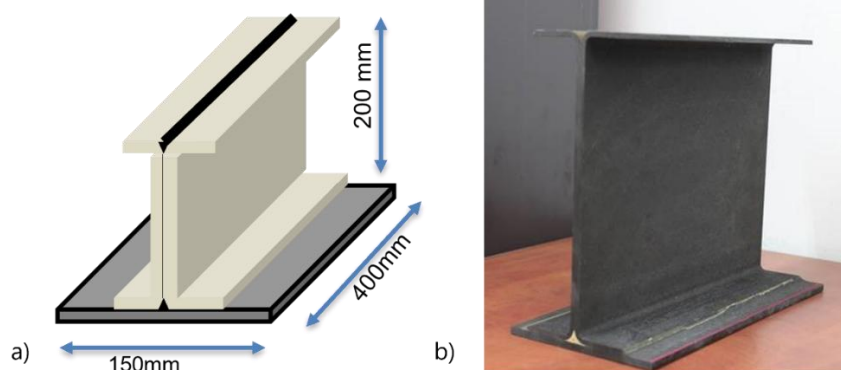


Figura 3.5. Specimen FAZA 2 – înveliș rigidizat; (a) geometrie teoretică. (b) specimen de referință

3.2 MONITORIZAREA CU SENZORI A SPECIMENELOR DE TEST

3.2.1 FAZA 0

Pentru a monitoriza comportamentul rășinii în timpul transformării sale de polimerizare, au fost încorporați în aceasta pe parcursul procesului de consolidare senzori cu fibră optică și senzori dielectrice (DC). În ceea ce privește senzorii cu fibră optică, au fost utilizate două tipuri de senzori: senzori **Fiber Bragg Grating (FBG)** și senzori optici distribuiți.

Datele obținute în urma analizei primare a senzorului FBG în timpul acestor teste sunt prezentate în figura 3.6.

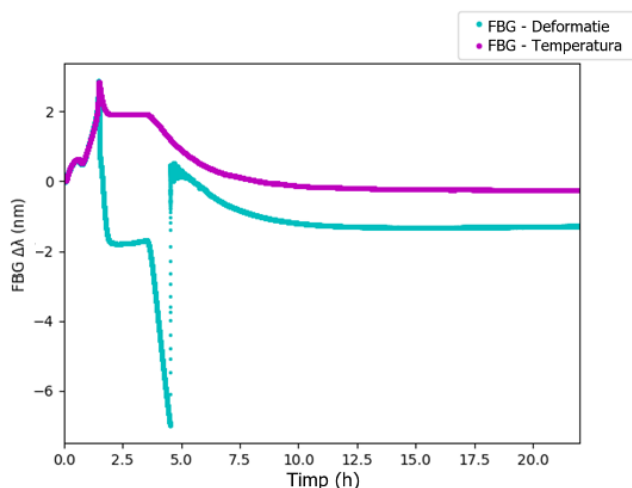


Figura 3.6. Date brute FAZA 0 – comportamentul rășinii RTM6

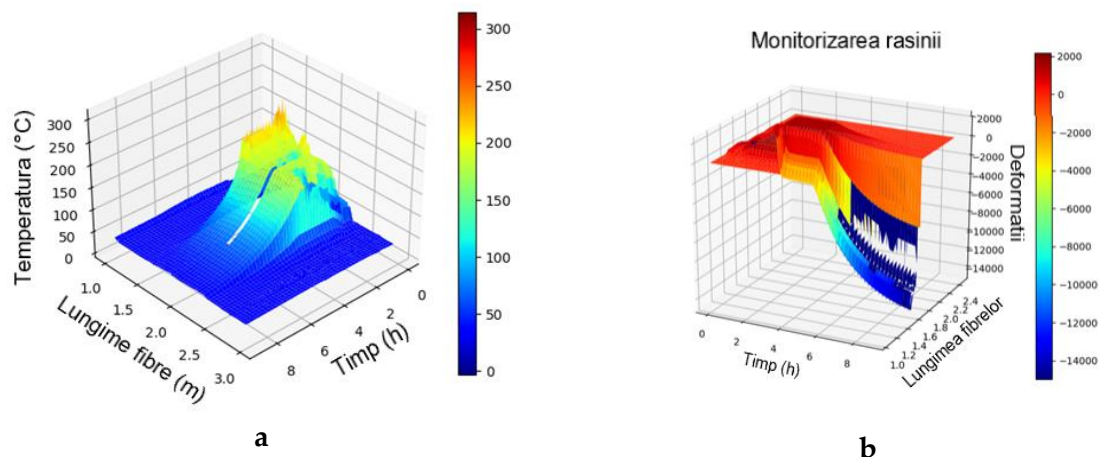


Figura 3.7. Harti 3D pentru (a) citiri ale temperaturii cu senzori FBG (b) Variația de deformare în funcție de distanța pe fibră și timp, măsurată de senzorul distribuit cu fibră optică în timpul ciclului de polimerizare a rășinii RTM6

După cum se poate observa în figura 3.7 a), temperatura atinge valori puțin mai mari de 200°C, deși aceasta nu este uniformă pe întreaga linie de măsurare.

3.2.2 FAZA 1

Specimenele de înveliș cu trei grosimi diferite si specimen lonjeron “U” cu doua grosimi diferite (tabelul 1) au fost fabricate prin infuzie de rășină lichidă (LRI – liquid resin infusion). Parametrii procesului au fost monitorizați cu ajutorul senzorilor descriși în secțiunea 3.1.1. .

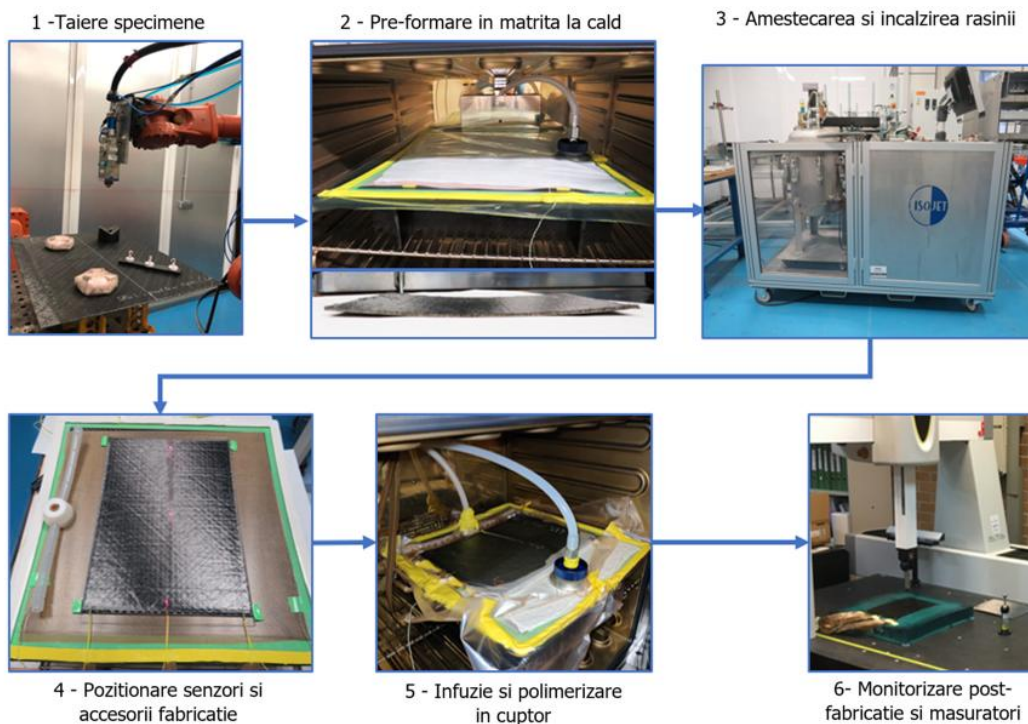


Figura 3.8. Procedura experimentală pentru producerea speci­menelor de înveliș

Configurația senzorilor pentru speci­me­nele de înveliș a fost realizată conform figurii 3.9.

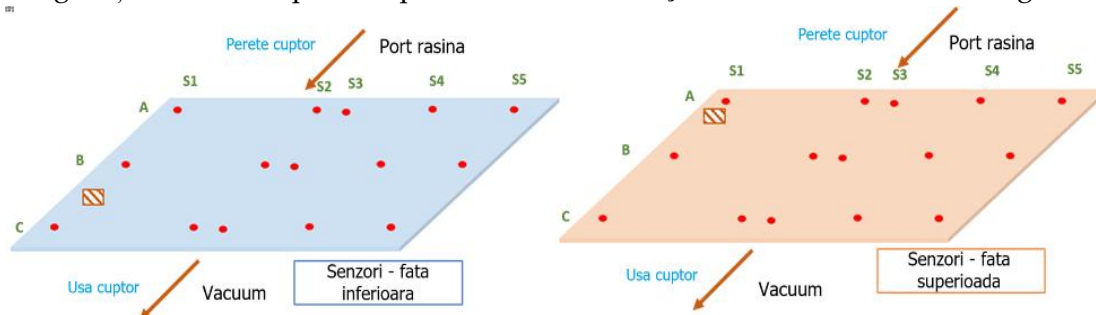


Figura 3.9. Distribuția senzorilor de temperatură pe speci­me­ne de înveliș: senzor FBG (puncte roșii) și senzor DC (pătrat)

Senzorii de temperatură FBG au fost plasați prin rețele care conțineau câte 5 senzori FBG fiecare (unul de-a lungul liniei imaginare care trece prin punctul A, altul prin B și altul prin C).

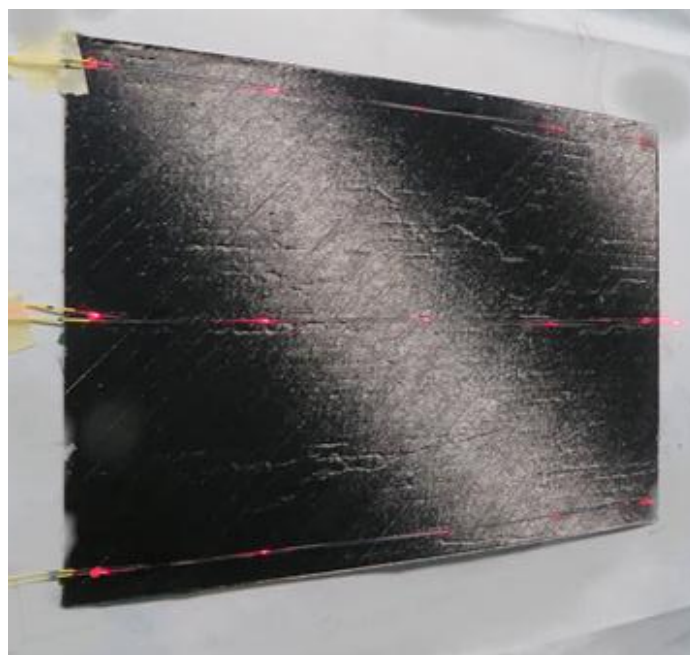


Figura 3.10. Fotografie a unui specimen de înveliș cu 3 rețele a câte 5 senzori FBG pentru măsurarea deformației (punctele roșii iluminate reprezintă locațiile unde se află senzorii FBG în fibra optică)

3.2.2.1 Rezultatele monitorizării temperaturilor

Profilul de temperatură înregistrat de senzorii de temperatură FBG este prezentat în figura 3.11. În acest grafic, ciclul de polimerizare a fost împărțit în mai multe etape: compactarea stratificatului și încălzirea matriței și a rășinii, procesul de infuzie, rampa de încălzire (creșterea controlată a temperaturii), menținerea la temperatura constantă de polimerizare (platou) și faza de răcire. Această împărțire a fost realizată pentru a facilita analiza rezultatelor.

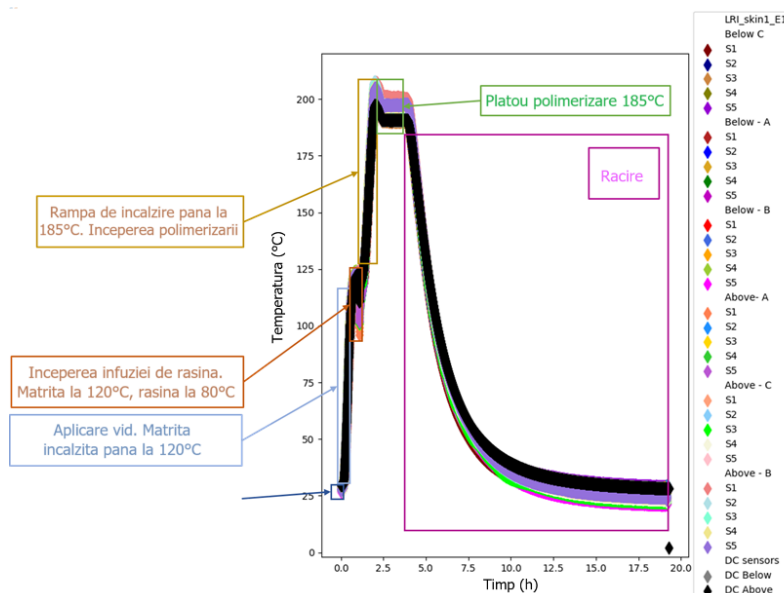


Figura 3.11. Rezultatele monitorizării temperaturii cu senzori FBG pentru întreg ciclul de polymerizare LRI al unui specimen de înveliș cu grosimea de 2,5 mm.

În figura 3.12, senzorii DC sunt reprezentați și comparați cu senzorii de temperatură FBG localizați în apropierea lor.

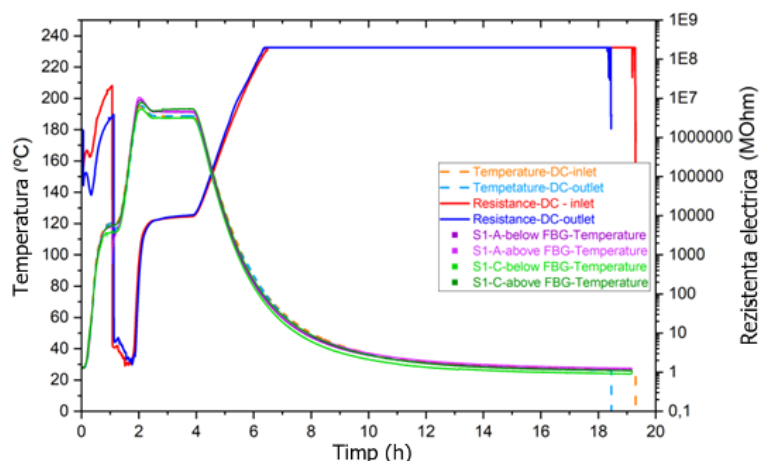


Figura 3.12. Comparație între rezultatele monitorizării temperaturii cu senzori FBG și DC și rezistența senzorilor DC, în timpul ciclului de polymerizare LRI al specimenului de înveliș 2.5mm

3.2.2.2 Rezultatele monitorizării deformațiilor

Analizând rezultatele obținute cu senzorii FBG pentru deformație, prezentate în figura 3.13, este posibil să se identifice aceleași faze de fabricație ca și în cazul datelor de temperatură. Totuși, valorile deformației prezentate în aceste grafice sunt obținute având în vedere că doar după punctul de gel, deformația resimțită de specimen (și senzorii) este datorată polymerizării. Monitorizarea ciclului de polymerizare a rășinii a arătat că doar după punctul de gelificare, deformația resimțită este datorată contracției rășinii. Deformația resimțită de senzorii înainte de acest punct este cauzată de fluctuațiile de presiune și temperatură. Astfel, pentru a analiza deformația provocată de contracția rășinii datorată reacției de polymerizare, la punctul de gel deformația este considerată zero.

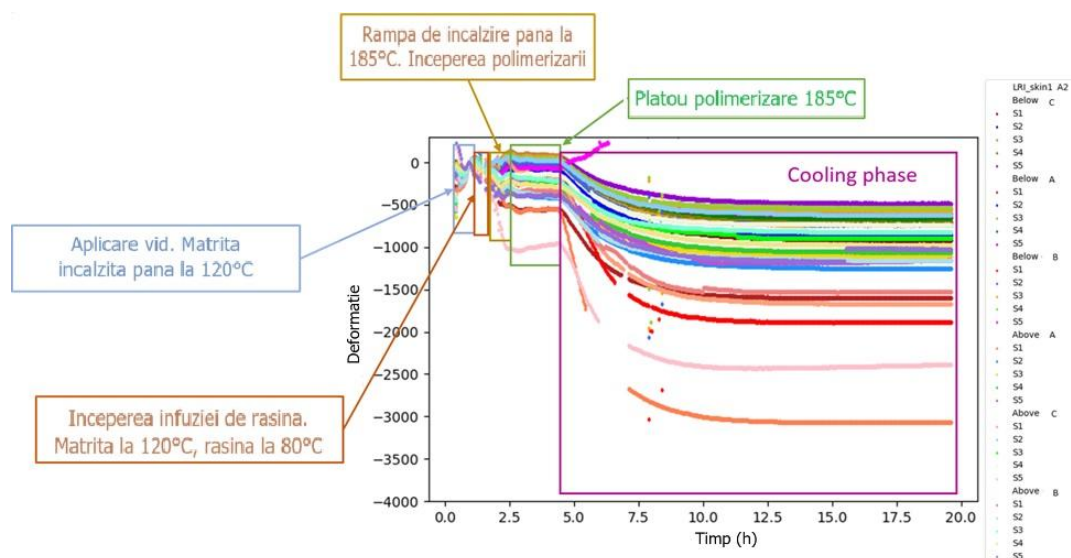


Figura 3.13. Rezultatele monitorizării deformației cu senzori FBG pentru întreg ciclul de polimerizare LRI al unui specimen Skin de 2,5 mm grosime

3.2.2.3 Monitorizare și măsurători post-fabricare

Pentru a analiza cum se schimbă forma acestor specimene, au fost utilizate grafice de contur pentru diferențele în coordonata Z. Figura 3.14 prezintă grafice de contur extrase din măsurătorile de coordonate la momente diferite după demulare, în care zonele mai calde indică valori mai mari ale coordonatei Z, ceea ce înseamnă că piesa se separă de uneltele de suport în acele puncte. Aceste grafice arată că există o deformare a părții centrale a specimenului, ceea ce înseamnă că curburile specimenului înveliș cresc în timp. Comparând apoi specimenul înveliș 2,5mm și înveliș 11,5mm, specimenul de 2,5 mm prezintă mai multe variații de formă după 7 zile decât specimenul de 11,5 mm.

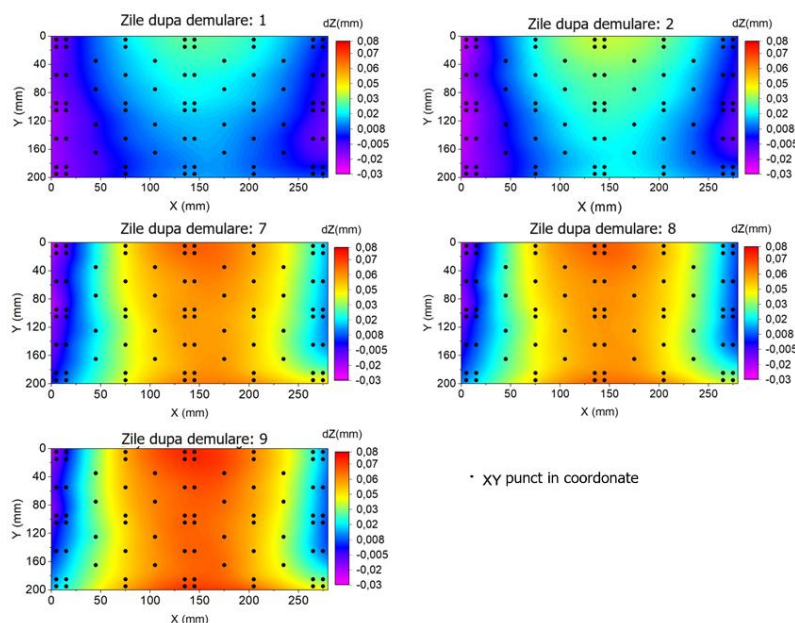


Figura 3.14. Rezultatele 3D CMM pentru specimenul înveliș 2,5mm, obținute după 1, 2, 7, 8 și 9 zile de la demulare, unde punctele negre sunt punctele de masurare în coordonate

3.2.2.4 Rezultate monitorizare deformații

Aceiași senzori de deformație utilizați pentru monitorizarea specimenelor în timpul fazei de fabricație (și care nu s-au rupt în timpul fazei de demulare) au fost utilizați pentru monitorizarea deformațiilor în timpul evaluării post-fabricare cu 3D CMM. Avantajul utilizării aceluiași senzori este că aceștia sunt deja integrați în specimen, astfel încât măsoară direct deformațiile generate de eliberarea tensiunilor remanente.

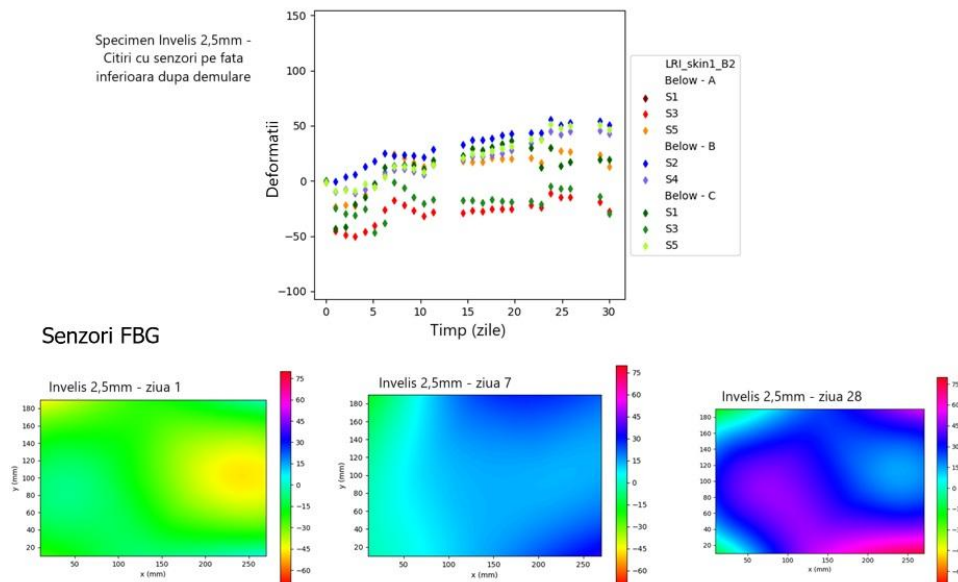


Figura 3.15. Evoluția răspunsului la deformație al senzorilor FBG integrați într-un specimen Învelis 2,5mm după procesul de demulare (graficul de sus). Hărți de deformație obținute pe baza răspunsului senzorilor în zilele: 1 (stânga), 7 (centru) și 28 (dreapta) pentru același specimen

3.2.3 FAZA 2

Harta rețelei de senzori pentru acest demonstrator cu geometrie complexă a fost realizată cu un total de 4 matrice FBG (linii din figura 3.32), conținând în total 36 de senzori FBG (puncte verzi în figura 3.32). Acești senzori au fost distribuiți așa cum este ilustrat în figura 3.32: unul dintre speciemenele lonjeron "U" avea o matrice poziționată cu 9 senzori FBG pentru măsurarea deformațiilor (linie roșie), suprafața inferioară a specimenului de învelis avea o matrice cu 12 senzori FBG poziționați pentru măsurarea deformațiilor (linie violet), iar suprafața superioară a specimenului de învelis avea două matrice, una pentru măsurarea deformațiilor cu 12 senzori FBG (linie violet) și alta pentru măsurarea temperaturii cu 3 senzori FBG (linie aurie).

Distribuția senzorilor cuprinde un total de 4 matrice FBG (linii din figura 3.16), conținând în total 36 de senzori FBG (puncte verzi în figura 3.16). Acești senzori au fost distribuiți așa cum este ilustrat în figura 3.16: unul dintre speciemenele lonjeron U avea o matrice poziționată cu 9 senzori FBG pentru măsurarea deformațiilor (linie roșie), suprafața inferioară a specimenului de învelis avea o matrice cu 12 senzori FBG poziționați pentru măsurarea deformațiilor (linie violet), iar suprafața superioară a specimenului de învelis avea două matrice, una pentru măsurarea deformațiilor cu 12 senzori FBG (linie violet) și alta pentru măsurarea temperaturii cu 3 senzori FBG (linie aurie).

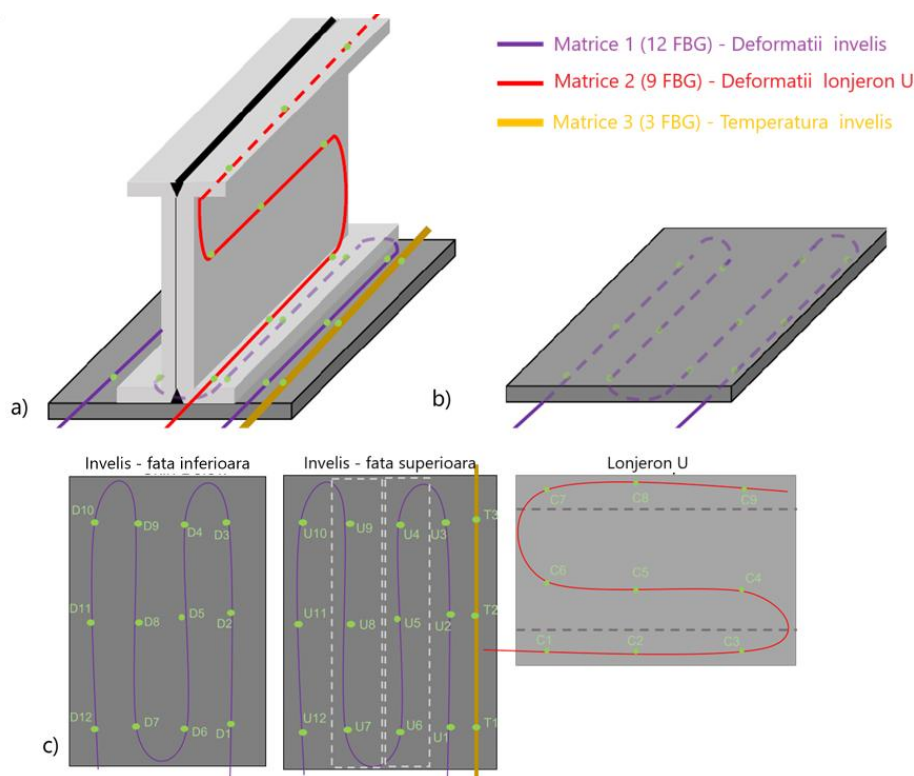


Figura 3.16. Distribuția senzorilor FBG în demonstratorul FAZA 2 (puncte verzi). a) Distribuția senzorilor de deformare pe lonjeron U (linie roșie), și senzorii de deformare și temperatură pe suprafața superioară a învelișului (linie violet – deformare, linie aurie – temperatură), b) Senzorii de deformare pe suprafața inferioară a învelișului (linie violet), și c) poziția fiecărui senzor FBG pe aranjamentele fibrelor optice de pe fiecare suprafață

Activitățile de fabricație au fost realizate similar cu FAZA 1. În timpul termoformării preformelor din fibră de carbon, ieșirile fibrelor optice au fost protejate într-o cutie pentru a le păstra integritatea. În plus, fibrele optice au fost fixate cu adeziv epoxidic pentru a le împiedica să se miște în timpul procesului. Monitorizarea specimenului de proba precum și graficele de informații au fost făcute conform procedurilor de lucru dezvoltate în FAZA 0 și FAZA 1.

BIBLIOGRAFIE CAPITOLUL 3

- [BC3.1] Pantelelis, Nikos "Optimised cure cycle in Resin Transfer Moulding." *Compos Sci Technol.* 63 (2003):249-264
- [BC3.2] Pantelelis, Nikos "Towards the dynamic optimization for the cure control of thermoset-matrix composite materials." *Compos Sci Technol.* 65 (2005): 1254-1263
- [BC3.3] Tajima Y. Monitoring Cure Viscosity of Epoxy Composite. *Polymer Composites*, 3, pp. 162-169 (1982)
- [BC3.4] Schwab S., Levy R., Glover G. Sensor System for Monitoring Impregnation and Cure During Resin Transfer Molding, *Polymer Composites* 17, pp. 312-316 (1996)
- [BC3.5] G.Boiteux, P.Dublineau, M.Feve, C.Mathieu, G.Seytre and J.Ulanski, Dielectric and viscoelastic studies of curing epoxy-amine model systems, *Polymer Bulletin* 30, 441-447 (1993)
- [BC3.6] C. Garschke, C. Weimer, P.P. Parlevliet, B.L. Fox, Out-of-autoclave cure cycle study of a resin film infusion process using in situ process monitoring, *Composites Part A* 43 (2012) 935-944
- [BC3.7] Pantelelis N., Bistekos E, Process monitoring and control for the production of CFRP components in "Proceedings of Conference SAMPE'10", Seattle, USA (2010)

- [BC3.8] N. Pantelelis, A. Bansal, I. Harismendy, R. Mezzacasa, E. Bistekos, Intelligent Monitoring of the Infusion of Large Carbon-fibre Reinforced Structural Parts, in: First International Symposium on Automated Composites Manufacturing, 2013, Concordia University, Montreal, Canada
- [BC3.9] Ramakrishnan, M.; Rajan, G.; Semenova, Y.; Farrell, G. Overview of Fiber Optic Sensor Technologies for Strain/Temperature Sensing Applications in Composite Materials. *Sensors* 2016, 16, 99
- [BC3.10] Di Sante, R. Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications. *Sensors* 2015, 15, 18666-18713
- [BC3.11] *Sensors* 2014, 14, 7394-7419; doi:10.3390/s140407394
- [BC3.12] Raymond M. Measures, Fiber optic sensing for composite smart structures, *Composites Engineering*, Volume 3, Issues 7–8, 1993, Pages 715-750, ISSN 0961-9526, [https://doi.org/10.1016/0961-9526\(93\)90093-Y](https://doi.org/10.1016/0961-9526(93)90093-Y)
- [BC3.13] Alfredo Guemes, Malte Frovel, Antonio Fernandez-Lopez, Jose Maria Pintado; “Computational Simulation and Experimental Validation of a Fiber-Optic Based SHM System Applied to a UAV Structure”; STO-MP-AVT-305, 2018
- [BC3.14] Nobuo Takeda and Shu Minakuchi; “Recent development of optical fiber sensor based structural health monitoring and in-process monitoring of CFRP structures in Japan”; 9th European Workshop on Structural Health Monitoring July 10-13, 2018, Manchester, United Kingdom
- [BC3.15] Johannes Mattheus BALVERS; “In situ strain & cure monitoring in liquid composite moulding by fibre Bragg grating sensors”; Thesis, Technische Universiteit Delft, 2014
- [BC3.16] S. Konstantopoulos, E. Fauster, R. Schledjewski; “Monitoring the production of FRP composites: A review of in-line sensing methods”; *eXPRESS Polymer Letters* Vol.8, No.11 (2014) 823–840
- [BC3.17] L. Khoun, R. de Oliveira, V. Michaud, P. Hubert; “Measurement of process-induced strains by fibre bragg grating optical sensor in resin transfer moulding”; ICCM17proceedings
- [BC3.18] Clara Andrea Pereira Sánchez; “Analysis of Shape Distortion Resulting from the Manufacturing Process of Thermoset Composites”; Master thesis, Joint master programme in Turbomachinery Aeromechanical University Training (THRUST), June 2017
- [BC3.19] Pierre Ferdinand, Sylvain Magne, Véronique Dewynter-Marty, Stéphane Rougeault, Laurent Maurin. Applications of Fiber Bragg Grating sensors in the composite industry. *MRS Bulletin*, Cambridge University Press (CUP), 2002, 27 (5), pp.400-407. <10.1557/mrs2002.126>. <cea-01841910>
- [BC3.20] Raffaella Di Sante; “Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications”; *Sensors* 2015, 15, 18666-18713; doi:10.3390/s150818666
- [BC3.21] X. W. Ye, Y. H. Su, and J. P. Han; “Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Using Optical Fiber Sensing Technology: A Comprehensive Review”; *The Scientific World Journal* Volume 2014 (2014), Article ID 652329, 11 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2014/652329>
- [BC3.22] Stephen J. Mihailov; “Fiber Bragg Grating Sensors for Harsh Environments”; *Sensors* 2012, 12, 1898-1918; doi:10.3390/s120201898
- [BC3.23] Kleiton de Moraes Sousa, Werner Probst, Fernando Bortolotti, Cicero Martelli and Jean Carlos Cardozo da Silva; “Fiber Bragg Grating Temperature Sensors in a 6.5-MW Generator Exciter Bridge and the Development and Simulation of Its Thermal Model”; *Sensors* 2014, 14, 16651-16663; doi:10.3390/s140916651
- [BC3.24] Co-PATCH project <http://www.co-patch.com/>
- [BC3.25] OXIGEN project http://cordis.europa.eu/project/rcn/106325_en.html
- [BC3.26] NEWSOL project http://cordis.europa.eu/project/rcn/207604_en.html
- [BC3.27] FOSAS project http://cordis.europa.eu/result/rcn/159516_en.html
- [BC3.28] Gabriele Chiesura, Alfredo Lamberti, Yang Yang, Geert Luyckx, Wim Van Paepegem, Steve Vanlanduit, Jan Vanfleteren and Joris Degrieck; “RTM Production Monitoring of the A380 Hinge Arm Droop Nose Mechanism: A Multi-Sensor Approach”; *Sensors* 2016, 16, 866; doi:10.3390/s16060866

[BC3.29] Damien Kinet, Patrice Mégret, Keith W. Goossen, Liang Qiu, Dirk Heider and Christophe Caucheteur; “Fiber Bragg Grating Sensors toward Structural Health Monitoring in Composite Materials: Challenges and Solutions”; *Sensors* 2014, 14, 7394-7419; doi:10.3390/s140407394

[BC3.30] G Luyckx, W De Waele, J Degrieck, W Van Paepegem, J Vlekken, S Vandamme and K Chah; “Three-dimensional strain and temperature monitoring of composite laminates”; *Insight* Vol 49 No 1 January 2007

[BC3.31] Shu Minakuchi, Takahide Umehara, Kazunori Takagaki, Yusaku Ito, Nobuo Takeda; “Life cycle monitoring and advanced quality assurance of L-shaped composite corner part using embedded fiber-optic sensor”; *Composites: Part A* 48 (2013) 153–161

[BC3.32] Ulrich A. Mortensen, Tom L. Andersen, Jacob Christensen, Marco Aurelio Miranda Maduro; “Experimental investigation of process induced strain during cure of epoxy using optical fibre bragg grating and dielectric analysis”; *ECCM18 - 18th European Conference on Composite Materials Athens, Greece 24-28th June 2018*

4. CALIBRAREA DETERMINĂRILOR EXPERIMENTALE A DISTORSIUNILOR GEOMETRICE INDUSE DE TENSIUNILE REMANENTE GENERATE ÎN ELABORAREA STRUCTURILOR ANIZOTROPE, ESTIMAREA INCERTITUDINILOR ȘI A ERORILOR TEHNICILOR DE MĂSURARE A ACESTOR DISTORSIUNI

Măsurătorile experimentale sunt fundamentale pentru analiza și înțelegerea comportamentului structurilor mecanice și compozite. Precizia acestor măsurători este esențială pentru validarea modelelor teoretice, evaluarea performanței materialelor iar în cazul nostru, estimarea precisă a distorsiunilor precum și garantarea siguranței structurilor utilizate în inginerie. Cu toate acestea, orice proces de măsurare este supus unor incertitudini și erori, care pot afecta interpretarea rezultatelor. Pentru a obține date experimentale relevante și fiabile, este necesară o calibrare riguroasă a instrumentelor de măsură, identificarea surselor de incertitudine și minimizarea erorilor sistematice și aleatorii.

4.1 FUNDAMENTELE MĂSURĂTORILOR

4.1.1 MĂSURĂTOARE

Obiectivul unei măsurători este determinarea valorii mărimii măsurate, adică valoarea mărimii particulare care trebuie măsurată. Prin urmare, o măsurare începe cu specificarea adecvată a mărimii măsurate, a metodei de măsurare și a procedurii de măsurare.

4.1.2 DATUM EXPERIMENTAL

Un datum experimental se referă la o singură măsurătoare înregistrată într-un experiment. În contextul structurilor compozite laminate, aceste date pot reprezenta erori, citiri de deformății sau distorsiuni unghiulare. Acuratețea și precizia acestor date sunt influențate de factori multipli, inclusiv sensibilitatea senzorilor, condițiile de mediu și erorile umane [BC4.1].

4.1.3 ERORI, EFECTE SI CORECȚII

În general, o măsurătoare prezintă imperfecțiuni care generează o eroare în rezultatul măsurătorii. Tradițional, o eroare este considerată a avea două componente, și anume, o componentă aleatorie și o componentă sistematică. Eroarea este un concept idealizat și nu poate fi cunoscută cu exactitate [BC4.2].

Componenta aleatorie a erorii apare, în mod presupus, din variații temporale și spațiale imprevizibile sau stohastice ale mărimilor de influență. Efectele acestor variații, denumite în continuare efecte aleatorii, determină variații în observațiile repetate ale mărimii măsurate. Deși nu este posibilă compensarea erorii aleatorii a unui rezultat de măsurare, aceasta poate fi, de obicei, redusă prin creșterea numărului de observații; valoarea sa așteptată sau valoarea medie este zero.

Eroarea sistematică, la fel ca eroarea aleatorie, nu poate fi eliminată, dar, de asemenea, poate fi adesea redusă. Dacă o eroare sistematică apare ca urmare a unui efect recunoscut al unei mărimi de influență asupra rezultatului unei măsurători, denumit în continuare **efect**

sistematic, acest efect poate fi cuantificat și, dacă este semnificativ în raport cu precizia necesară a măsurătorii, se poate aplica o **corecție** sau un **factor de corecție** pentru a compensa efectul. Se presupune că, după aplicarea corecției, valoarea așteptată a erorii cauzate de un efect sistematic este zero.

Incertitudinea unei corecții aplicate unui rezultat de măsurare pentru a compensa un efect sistematic nu este eroarea sistematică, adesea denumită factor de excentricitate (Eng. bias), a rezultatului măsurătorii cauzată de acel efect. În schimb, aceasta reprezintă o măsură a incertitudinii rezultatului datorită cunoașterii incomplete a valorii corecției necesare. Eroarea rezultată din compensarea imperfectă a unui efect sistematic nu poate fi cunoscută exact. Termenii „eroare” și „incertitudine” trebuie utilizați corect, iar diferența dintre ei trebuie tratată cu atenție.

4.1.4 INCERTITUDINI

Incertitudinea rezultatului unei măsurători reflectă lipsa cunoașterii exacte a valorii mărimii măsurate. Rezultatul unei măsurători, după corectarea efectelor sistematice recunoscute, rămâne doar o estimare a valorii mărimii măsurate, din cauza incertitudinii provenite din efectele aleatorii și din corectarea imperfectă a rezultatului pentru efectele sistematice.

Incertitudinea măsurătorilor este adesea estimată utilizând eroarea standard a măsurătorilor repetate

$$u = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4.1)$$

unde x_i sunt măsurătorile individuale, $\bar{x}$ este valoarea medie și i este numărul de măsurători.

Clasificarea metodelor de evaluare a componentelor incertitudinii, în locul clasificării componentelor în sine, evită această ambiguitate. În același timp, nu exclude posibilitatea de a grupa componente individuale, evaluate prin cele două metode diferite, în categorii desemnate pentru a fi utilizate într-un anumit scop [BC4.4].

4.1.5 CONSIDERAȚII PRACTICE

Pentru a decide dacă un sistem de măsurare funcționează corect, variabilitatea observată experimental a valorilor sale de ieșire, măsurată prin eroarea standard observată, este adesea comparată cu eroarea standard prevăzută, obținută prin combinarea diferitelor componente de incertitudine care caracterizează măsurătoarea. În astfel de cazuri, trebuie luate în considerare doar acele componente (fie obținute prin evaluări de Tip A, fie de Tip B) care ar putea contribui la variabilitatea observată experimental a acestor valori de ieșire. Această analiză poate fi facilitată prin gruparea separată a componentelor care contribuie la variabilitate și a celor care nu contribuie, etichetându-le corespunzător.

În unele cazuri, incertitudinea unei corecții pentru un efect sistematic nu trebuie inclusă în evaluarea incertitudinii rezultatului măsurătorii. Deși incertitudinea a fost evaluată, aceasta poate fi ignorată dacă contribuția sa la incertitudinea standard combinată a rezultatului măsurătorii este nesemnificativă. Dacă valoarea corecției în sine este nesemnificativă în raport cu incertitudinea standard combinată, aceasta poate fi, de asemenea, ignorată [BC4.6-BC4.8].

4.2 CALCULUL ERORILOR ȘI AL INCERTITUDINILOR LA MĂSURĂTORILE SPECIMENELOR TEST PRIN CMM

Mașinile de Măsurat prin Coordonate (CMM) sunt utilizate pe scară largă în industrie pentru verificarea preciziei componentelor mecanice. Pentru a asigura măsurători precise și repetabile, calibrarea corectă a CMM este esențială. Acest sub-capitol prezintă tehnicile de calibrare, pașii necesari și exemple relevante pentru aplicarea acestora.

4.2.1 Incertitudinea măsurării datorată temperaturii piesei

În mod ideal, întregul proces de măsurare ar putea fi modelat matematic, incluzând toți parametrii relevanți care ar putea influența măsurarea, așa cum este indicat în ecuația (2).

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (4.2)$$

Unde valoarea măsurătorii Y depinde de N măsurători.

Un model al incertitudinii măsurării ar putea fi apoi dezvoltat folosind legea propagării incertitudinii, adică ecuația (3), și estimarea varianței și covarianței termenilor individuali de incertitudine:

Incetitudinea lui y este data de:

$$u_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} u_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} u_{x_2}\right)^2 + \dots} \quad (4.3)$$

Unde u_{x_i} sunt incertitudinile măsurătorilor individuale.

4.2.2 ECHIPAMENTUL DE MĂSURĂ FOLOSIT

For the shape distortion estimations of the fabricated specimens, a Hexagon GLOBAL Advantage 20.40.18 coordinate measuring machine (CMM) equipped with a 2 mm diameter probe was used, for the purpose of comparing with the response of the FBG sensors and calibrating them.

Figure 4.1 illustrates a schematic representation of the equipment used for measurements, and Table 4.1 includes the general specifications of the same CMM equipment.

Table 4.1. CMM equipment general specs

Plajă de masură (mm)			Dimensiuni de gabarit (mm)				Platan (mm)	Masă max. suportată (kg)	Masă echipament (kg)
X	Y	Z	Lx	Ly	Lz	Dz	Py		
2000	4000	1800	2888	5240	5326	1950	5000	5000	17970

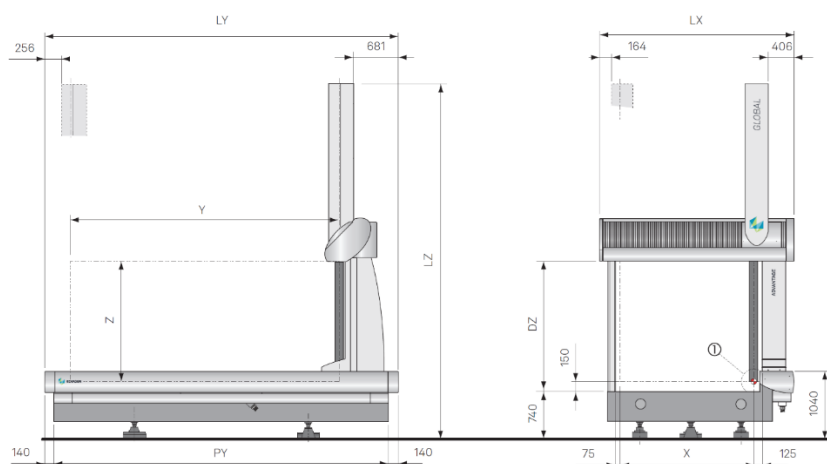


Figure 4.1. Mașină de măsurare în coordonate Hexagon GLOBAL Advantage 20.40.18

4.2.3 CALCULUL ERORILOR LA MĂSURĂTOAREA CMM A UNUI SPECIMEN TEST

Pentru evaluarea modificărilor coordonatei Z în primele 9 zile după fabricație, s-a utilizat o schemă de măsurare cu 80 de puncte distribuite uniform pe geometria specimenului (Figura 4.2).

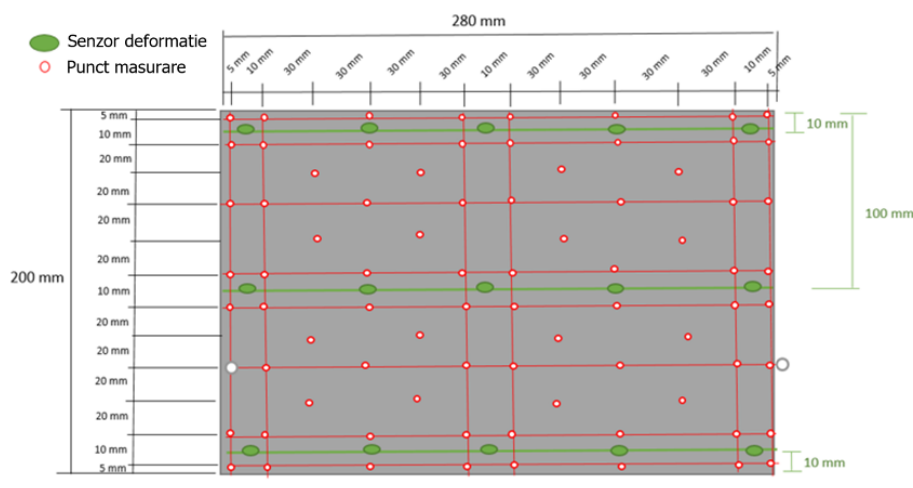


Figura 4.2. Distribuția punctelor de coordonate ale specimenului test panou pentru măsurători ale distorsiunilor de formă utilizând CMM 3D

Pornind de la rezultatele măsurătorilor din coloanele X, Y și Z am calculat coloana r pe baza relației:

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \text{ (mm)} \quad (4.4)$$

Pornind de la relația 4.1 am calculat eroarea pentru fiecare dintre direcțiile X, Y, Z, după cum urmează:

$$\Delta_{x,y,z} = \left(4,5 + 1 \cdot \frac{L}{250} \right) (\mu\text{m}) \quad (4.5)$$

Valoarea erorii absolute se calculează folosind relația:

$$\Delta_{abs} = \sqrt{\Delta_X^2 + \Delta_Y^2 + \Delta_Z^2} (\mu m) \quad (4.6)$$

În baza valorilor numerice cu masuratori se trasează graficul de variație a deviațiilor de măsurare functie de valoarea masurata, prezentat în figura 4.3.

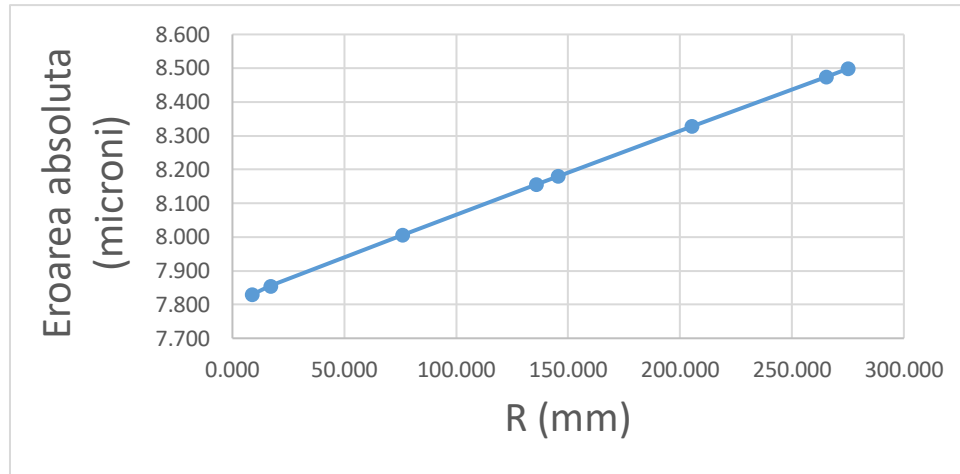


Figura 4.3. Variația erorilor de măsurare functie de valoarea masurată

4.2.4 CALCULUL INCERTITUDINILOR LA MĂSURĂTOAREA CMM A UNUI SPECIMEN TEST

Folosind datele detaliate în tabelul 4.8 și folosind relațiile matematice 4.7– 4.11 s-a făcut calculul incertitudinii aferente celor trei direcții și în raport cu unghiurile α , β și γ :

$$U_x(\alpha) = \frac{\Delta_{x_{max}} - \Delta_{x_{min}}}{2} = 5,6 - 4,52 = 0,54\mu m \quad (4.7)$$

$$U_y(\beta) = \frac{\Delta_{y_{max}} - \Delta_{y_{min}}}{2} = 5,28 - 4,52 = 0,38\mu m \quad (4.8)$$

$$U_z(\gamma) = \frac{\Delta_{z_{max}} - \Delta_{z_{min}}}{2} = 4,55 - 4,52 = 0,015\mu m \quad (4.9)$$

în continuare, se calculează incertitudinea de măsurare $U(\alpha, \beta, \gamma)$ în raport cu cele trei unghiuri cu relația 4.16:

$$U(\alpha, \beta, \gamma) = \max(U_x(\alpha), U_y(\beta), U_z(\gamma)) = 0,54\mu m \quad (4.10)$$

Incertitudinea de masurare totala a echipamentului CMM se calculeaza folosind relatia 4.17:

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} = 0,66\mu m \quad (4.11)$$

Se determina incertitudinea de măsurare a echipamentului $U=0,66\mu m$.

Incertitudinea de măsurare a echipamentului este calculată pe baza rezultatelor măsurătorilor și este mai mare decât incertitudinea indicată în certificatul de etalonare al echipamentului.

BIBLIOGRAFIE CAPITOLUL 4

- [BC4.1] JCGM 100:2008 - Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM).
- [BC4.2] ISO/IEC Guide 98-3:2008 - Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement.
- [BC4.3] Holman, J.P. (2012). Experimental Methods for Engineers. McGraw-Hill Education
- [BC4.4] Bendat, J. S., & Piersol, A. G. (2010). Random Data: Analysis and Measurement Procedures. Wiley.
- [BC4.5] Coleman, H.W., & Steele, W.G. (2009). Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers. Wiley.
- [BC4.6] Taylor, J.R. (1997). An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements. University Science Books.
- [BC4.7] BIPM (2019). International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM).
- [BC4.8] Dietrich, C.F. (1991). Uncertainty, Calibration and Probability: The Statistics of Scientific and Industrial Measurement. Adam Hilger.
- [BC4.9] Moffat, R.J. (1988). Describing the Uncertainties in Experimental Results. Experimental Thermal and Fluid Science.
- [BC4.10] Beckwith, T.G., Marangoni, R.D., & Lienhard, J.H. (2007). Mechanical Measurements. Pearson.
- [BC4.11] R.G. Easterling, M.E. Johnson, T.R. Bement, and C.J. Nachtsheim, Absolute and Other Tolerances, SAND88-0724, LA-UR 88-906 (Sandia National Laboratories) 1989.
- [BC4.12] VDWDE 2617 Accuracy of Coordinate Measuring Machines (1986), Beuth Verlag, D-1000 Berlin, Germany.
- [BC4.13] CMMA Accuracy Specification for Coordinate Measuring Machines (1989) London, England.
- [BC4.14] JIS B 7440 Test Code for Accuracy of Coordinate Measuring Machines (1987), Translated and Published by the Japanese Standards Association.

5. INVESTIGAȚII DUALE PENTRU ESTIMAREA DISTORSIUNILOR GEOMETRICE INDUSE DE TENSIUNILE REMANENTE GENERATE ÎN ELABORAREA STRUCTURILOR ANIZOTROPE MULTISTRATIFICATE UTILIZATE ÎN INDUSTRIA AERONAUTICĂ

Acest capitol din lucrarea de cercetare este scris pe baza articolului *Development of a Numerical Tool for Laminate Composite Distortion Computation Through a Dual-Approach Strategy* [BC5.1] publicat în *Appl. Sci.* **2024**, 14(22), 10656; <https://doi.org/10.3390/app142210656> de autorii ing. Cesar BANU și Prof. Univ. Habil. Dr. Ing. Mihai BUGARU.

5.1 DEZVOLTAREA INSTRUMENTULUI NUMERIC PENTRU SIMULARE

5.1.1 CONTEXTUL

Dezvoltările tehnologice și științifice prezentate în acest capitol sunt atribuite proiectului ELADINE—Evaluarea Distorsiunii Compozitelor Stratificate printr-o Abordare Numeric-Experimentală Integrată [BC5.2]. Proiectul a fost o activitate de sprijin (CfP) pentru proiectul OPTICOMS [BC5.3], dezvoltat în cadrul Programului European Clean Sky 2 și finanțat de Comisia Europeană. ELADINE a avut ca scop crearea unui instrument numeric inovator pentru predicția fenomenului de spring-in al componentelor structurale primare ale aripii unui avion de pasageri, utilizând o abordare în care dezvoltarea și validarea simulării numerice s-au bazat pe date experimentale de polimerizare.

O prezentare generală a acestor mecanisme și o abordare la nivel înalt pentru dezvoltarea unui instrument numeric de evaluare a distorsiunii compozitelor este descrisă în figura 5.1 [BC5.4].

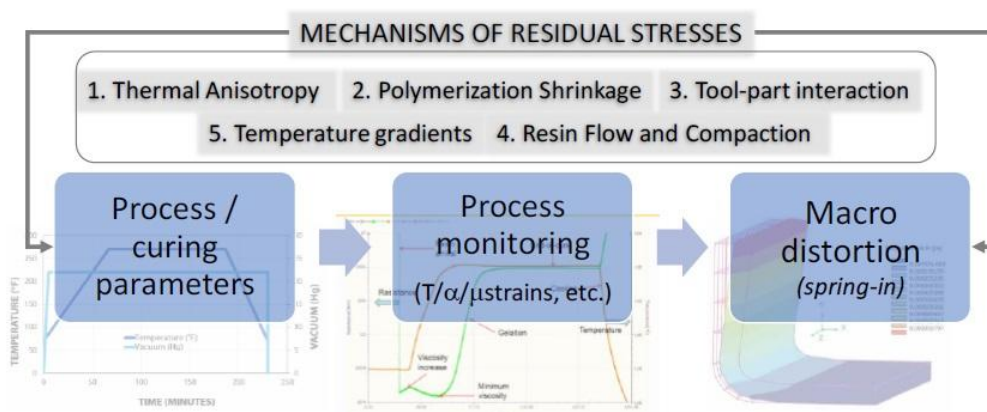


Figura 5.1. Ilustrarea a mecanismelor care produc distorsiunile [BC5.4]

5.1.2 INSTRUMENTELE NUMERICE EXISTENTE ȘI CAPACITĂȚILE LOR DE SIMULARE

În acest context, prima etapă a fost identificarea instrumentelor de simulare care reprezintă standardul industriei pentru predicția distorsiunii compozitelor. Unul dintre cele mai citate pachete software este ESI PAM DISTORTION [BC5.5], împreună cu un modul mai complex

numit PAM COMPOSITES. Conform paginii web ESI, acest instrument permite predicția tensiunilor remanente induse de fabricație și a distorsiunii formelor pieselor compozite fabricate din fibre continue și matrici termorigide. O soluție de simulare mai recentă, cu o abordare și capabilități similare cu PAM DISTORTION, este ALTAIR Advanced Cure Simulation [BC5.6], care promite utilizatorilor posibilitatea de a prezice polimerizarea, acumularea tensiunilor remanente și deformațiile în timpul procesării compozitelor.

5.1.3 STRATEGIA DE SIMULARE

Strategia de simulare ia în considerare subcapitolele studiate în secțiunea 1.1 MECANISME CARE GENEREAZA TENSIUNI REMANENTE ȘI DISTORSIUNI GEOMETRICE, după cum urmează:

5.1.3.1 Anizotropia termică

5.1.3.2. Contractia prin polimerizare

5.1.3.3 Interacțiunea matriță–piesă

5.1.3.4. Fluxul de rășină și compactarea

5.1.3.5. Gradienti de temperatură

5.1.3.6. Abordarea experimentală a monitorizării procesului de fabricație

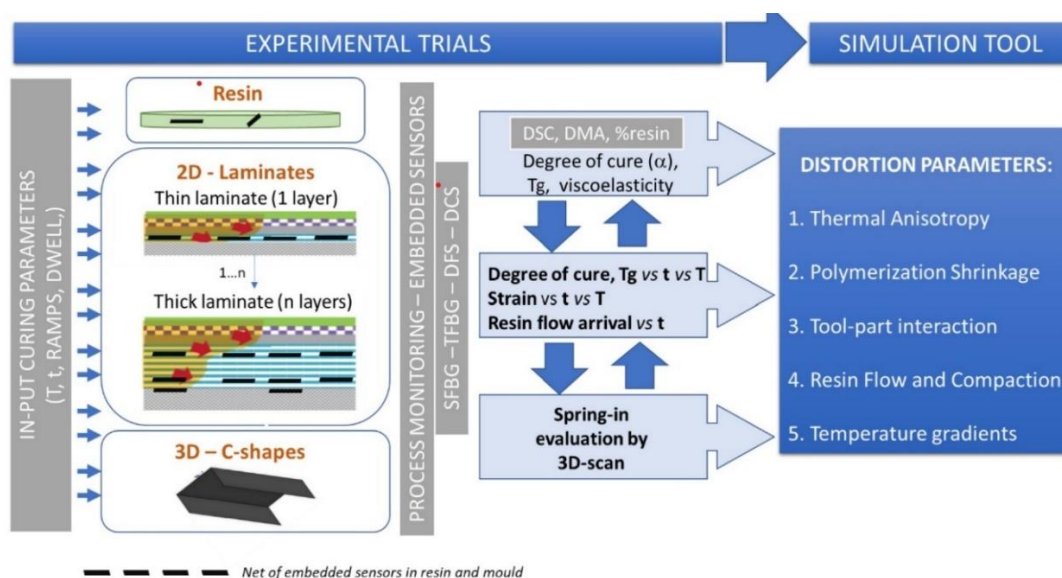


Figura 5.2. Ilustrarea scopului programului experimental [BC5.4]

Procesul de fabricație a fost atent monitorizat prin integrarea senzorilor optici cu rețea de difracție în fibră Bragg (FBG) și a senzorilor dielectrics (DC). Datele colectate din această monitorizare au fost utilizate pentru calibrarea unui instrument de simulare bazat pe metoda elementelor finite (FEM), destinat predicției distorsiunilor de formă în structurile aripilor compozite integrale de mari dimensiuni [BC5.4]. Programul experimental a utilizat senzori FBG pentru a evalua temperatura și deformațiile în specimene și probe de testare, în timp ce senzorii DC au fost folosiți pentru a determina gradul de polimerizare a rășinii [BC5.4].

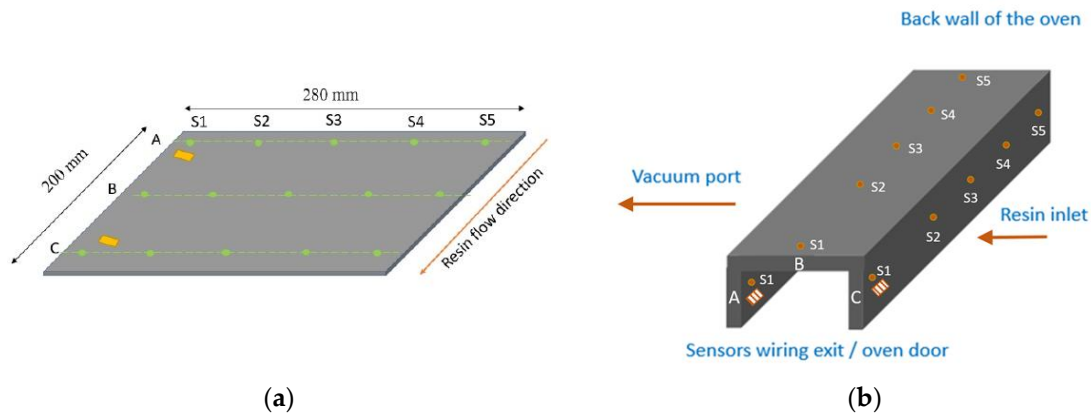


Figura 5.3. (a) Distribuția senzorilor pe specimen tip înveliș: senzori FBG (punctele verzi) și senzori DC (pătrățele). (b) Distribuția senzorilor pe specimen tip profil C senzori FBG (punctele portocalii) și senzori DC (pătrățele) [BC5.1, BC5.4].

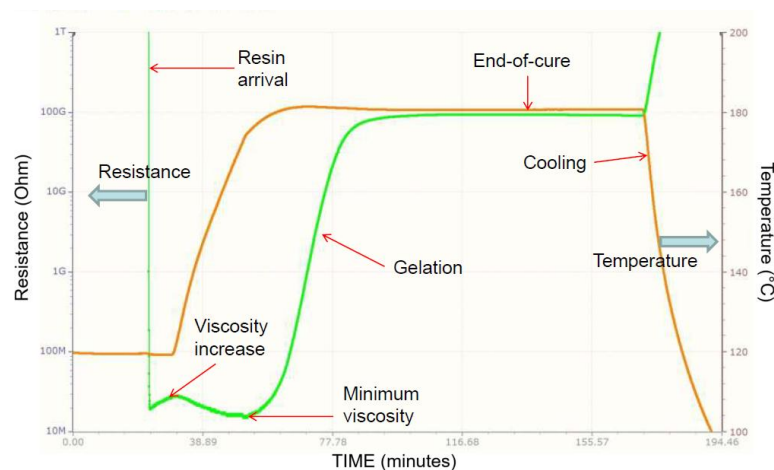


Figura 5.4. Rezultatele tipice de monitorizare ale ciclului rășinii epoxidice RMT6. Senzorii de unică folosință DC pot măsura diferite evenimente care au loc în timpul întăririi rășinii [BC5.1, BC5.4]

5.1.4 MODELE MATEMATICE. DEZVOLTAREA LOGICII MODELULUI NUMERIC

Dezvoltarea unui model numeric pentru a prezice distorsiuni complexe s-a bazat pe software-ul de simulare comercial stabilit, respectiv MSC PATRAN, MSC NASTRAN și MSC MARC. Pentru a efectua o analiză numerică a distorsiunii în fabricarea materialelor compozite, a fost definită o serie de etape ca strategie inițială pentru evaluarea capacităților operaționale ale unui model generic:

- Dezvoltarea configurației geometrice atât pentru probă, cât și pentru uneltele de fabricație;
- Specificarea caracteristicilor materiale termice și structurale relevante atât pentru probă, cât și pentru unealtă;
- Stabilirea sistemului unitar universal care va fi utilizat pe parcursul simulării; construirea modelului cu elemente finite (FEM), inclusiv plasarea rețelei și secvența de stratificare atât pentru probă, cât și pentru unealtă;

- Determinarea proprietăților materialelor din FEM pentru fiecare strat, incluzând atât atributele termice, cât și cele structurale;
- Definirea parametrilor de intrare necesari pentru realizarea unei analize termice cu elemente finite, care includ temperatura inițială a ansamblului probă/unelte, fluctuațiile de temperatură din cuptor, efectele de convecție asupra suprafeței exterioare a ansamblului, interacțiunile termice între probă și unealtă, precum și cerințele specifice pentru modelul matematic utilizat în soluționarea analizei cu elemente finite pentru a facilita calculele de polimerizare;
- Îmbunătățirea modelului termic pe baza datelor obținute prin monitorizarea experimentală și, în final, dezvoltarea și rezolvarea unui model cu elemente finite termic-structural care integrează proprietăți structurale, cum ar fi Modulul lui Young, contracția de polimerizare și vâscozitatea în funcție de temperatură și rata de polimerizare.

Secvențele dezvoltării modelului numeric:

5.1.4.1. Cinetica reacției de polimerizare

5.1.4.2 Contractia rășinii în tipul polimerizării

5.1.4.3. Variația modulului rășinii pe parcursul procesului de polimerizare

5.1.4.4. Proprietățile mecanice ale stratificatelor pe parcursul procesului de polimerizare

5.1.5 STRUCTURA MODELULUI DE SIMULARE

A fost construit un model Marc ca model termic-structural. Modelul include următoarele componente:

- componentă termică tranzitorie;
- componentă structurală quasi-statică.

Componenta termică tranzitorie gestionează elementele termice, cum ar fi variația temperaturii, căldura specifică, conducția termică și convecția termică.

Componenta structurală cvasi-statică gestionează componentele structurale, cum ar fi Modulul lui Young, Modulul de forfecare, coeficientul Poisson, deformațiile, tensiunile interne, etc.

Pentru a ilustra logica fluxului de lucru și pașii funcționali ai modelului, am definit un diagramă a arhitecturii modelului prezentată în figura 5.5.

1. Pentru fiecare valoare a gradului de polimerizare între 0 și 1, rășina are valori specifice ale proprietăților mecanice;
2. Fibrele impregnate cu rășină au proprietăți mecanice care pot fi considerate constante în intervalul de temperatură de lucru;
3. Folosind instrumentul software DIGIMAT 2019.1 și aplicând teoria omogenizării, au fost calculate proprietăți echivalente ale materialului ortotrop pentru o foaie impregnate cu rășină la diferite grade de polimerizare.

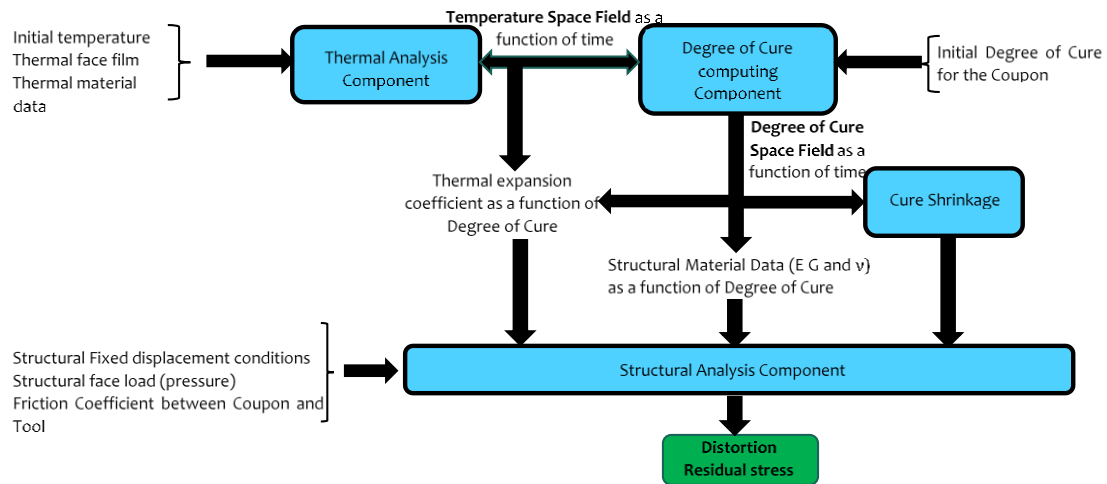


Figura 5.5. Arhitectura modelului numeric si pasii de simulare [BC5.1, BC5.2].

5.1.6 CAZURI STUDIATE

Două tipuri de specimene au fost definite atât pentru programul experimental, cât și pentru lucrările de simulare—geometriile specimenelor sunt descrise în figurile 5.6 și 5.6. Specimenele pentru înveliș au fost alese cu o geometrie relevantă pentru învelișul ansamblului înveliș–lonjeron proiectat în cadrul proiectului european OPTICOMS [BC5.3], pentru care CfP ELADINE [BC5.2] a pregătit strategia de compensare a matriței și instrumentul numeric pentru simulare.

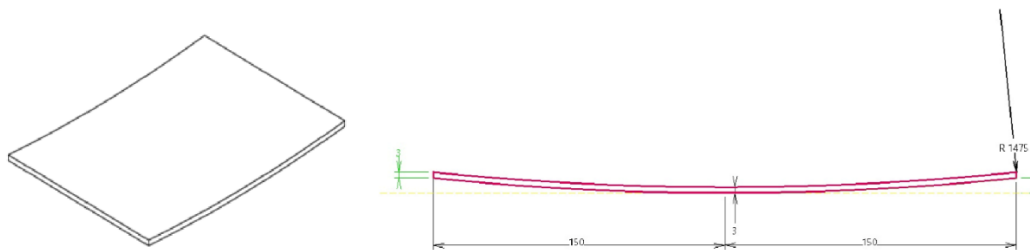


Figura 5.6. Specimen de tip înveliș și secțiunea acestuia

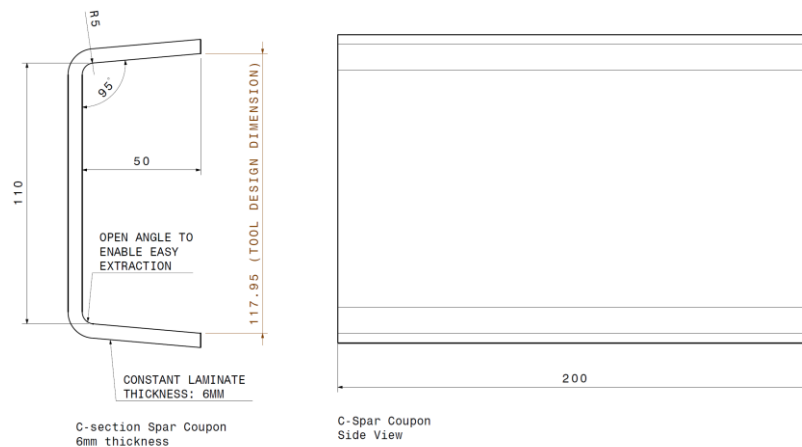


Figura 5.7. Specimen profil C [BC5.1-BC5.3].

5.2 REZULTATE

În timpul fazei inițiale de dezvoltare, au fost realizate încercări numerice pentru specimene de dimensiuni mici, cu geometrii identice celor din încercările experimentale. Înveliș cu curbură mică și speciamele profil C au fost analizate pe larg pentru a înțelege modelul și efectele constrângerilor sale asupra distorsiunii. Această primă fază a dezvoltării modelului numeric a fost și cea mai intensivă dintre speciamele test analizate.

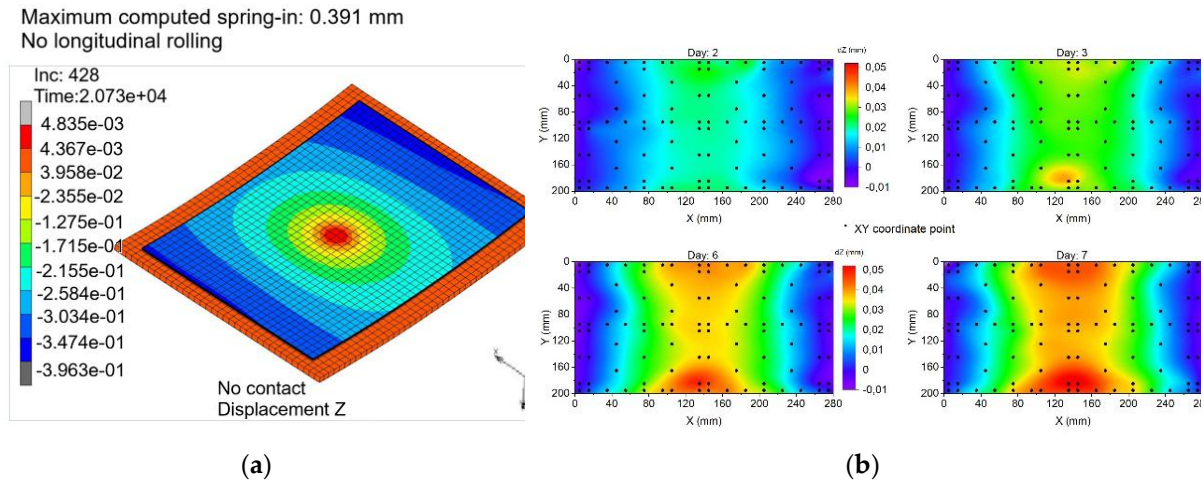


Figura 5.8. (a) Graficul calculat al deplasării de tip spring-in pentru un înveliș de 80 de straturi (Skin3).
(b) Măsurătoare CMM a unui înveliș de 80 de straturi (Skin3) pe o perioadă de 7 zile.

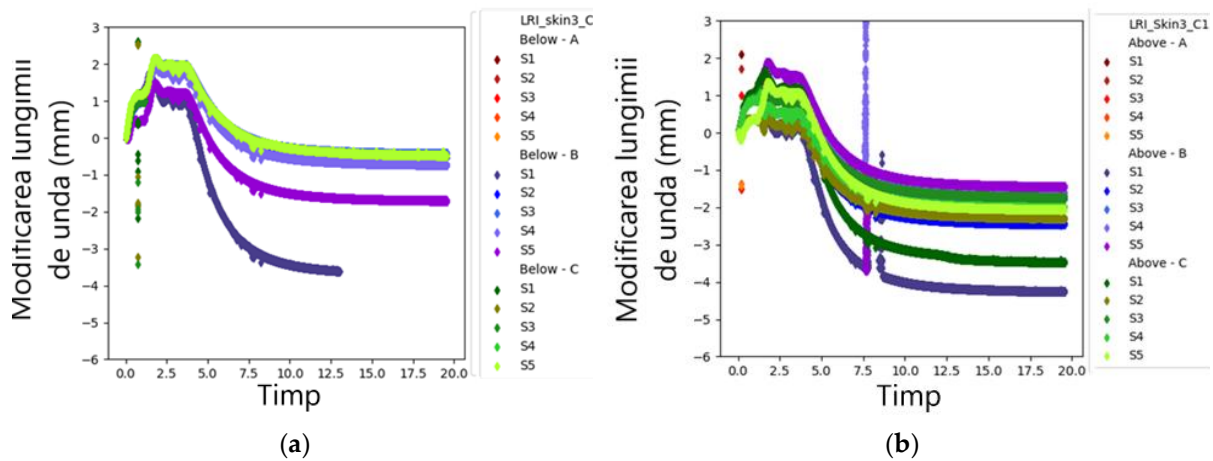


Figura 5.9. Răspunsul senzorilor FBG încorporați în timpul procesului de fabricație al specimenului Skin3: (a) suprafața de jos; (b) suprafața de sus.

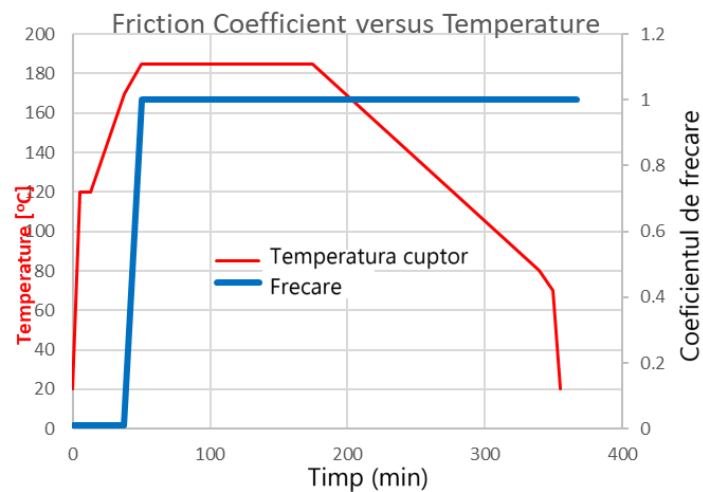


Figura 5.10. Variația coeficientului de frecare pe parcursul procesului de polimerizare.

După simularea mai multor scenarii și varierea diferitelor tipuri de parametri, abordarea finală și cea mai potrivită a fost aleasă datorită bunelor previziuni ale fenomenului de spring-in:

- Definirea și introducerea punctului de gel al rășinii în simulare a fost esențială pentru precizia rezultatelor;
- Definirea unei fracții constante de volum al fibrelor a arătat rezultate mai bune comparativ cu speciamele măsurate, chiar dacă abordarea inițială indica o posibilă ajustare a modelului prin varierea acestui parametru;
- Definirea unui coeficient de frecare variabil a fost dependentă de punctul de gel al rășinii.

În figura 5.11, sunt prezentate rezultatele obținute cu senzori FBG încorporați pe un specimen lonjeron C-spar2. La fel ca în cazul speciamele de tip inveliș, este posibil să se identifice fazele de fabricație prin măsurători ale deformațiilor.

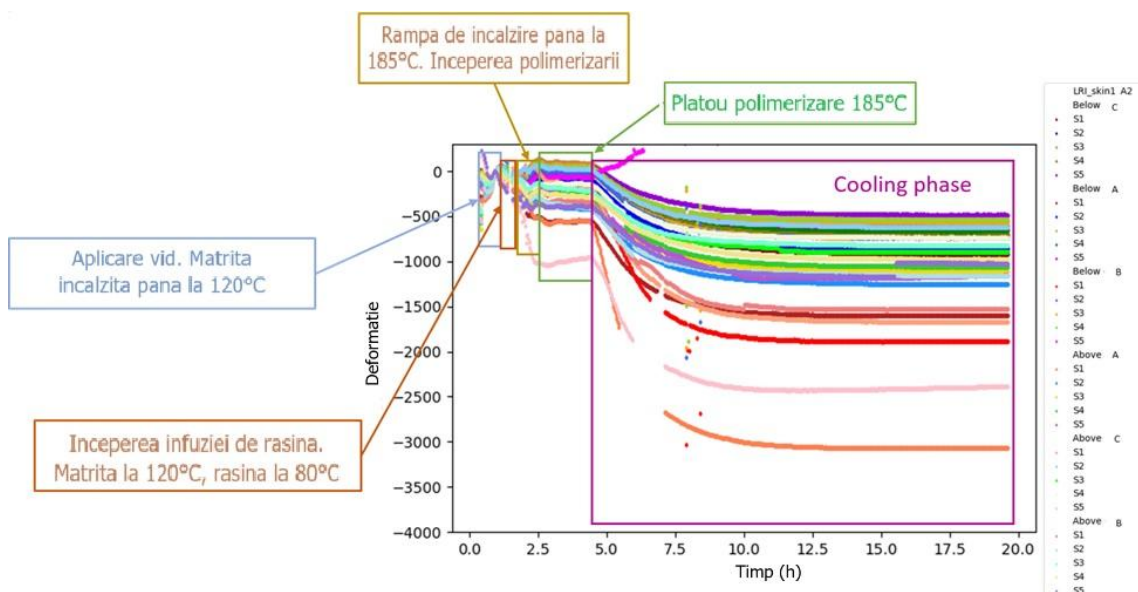


Figura 5.11. Rezultatele monitorizării de deformație cu senzori FBG pentru întregul ciclu de polimerizare LRI al unui specimen C-spar2.

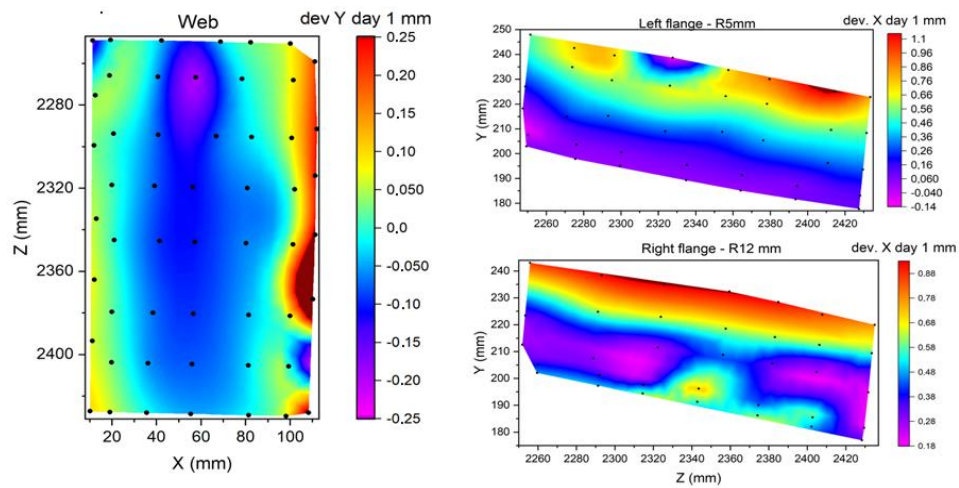


Figura 5.12. Hărți de contur măsurate cu 3D CMM pentru evaluarea distorsiunilor de formă pe inima și talpile R 12 mm și R 5 mm ale unui specimen C-spar2.

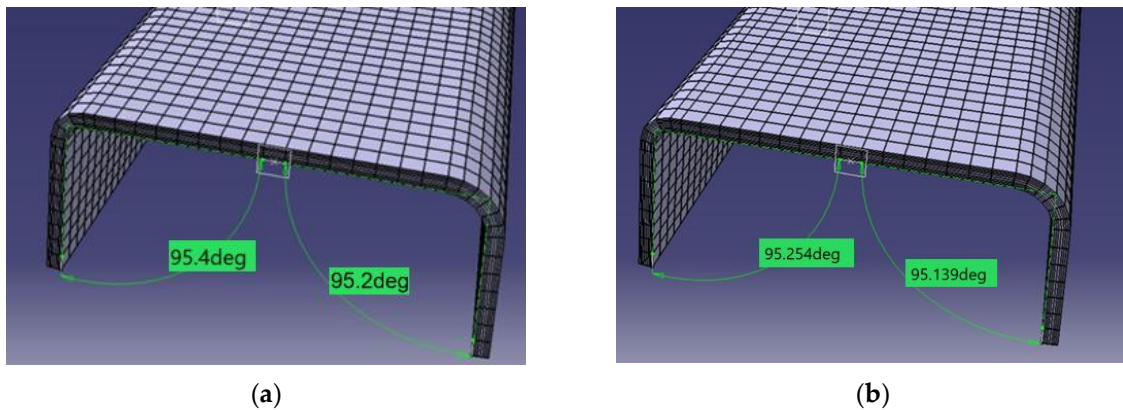


Figura 5.13. (a) Măsurarea unghiului geometriei teoretice. (b) Măsurarea unghiului calculat al deformării din cauza contracției.

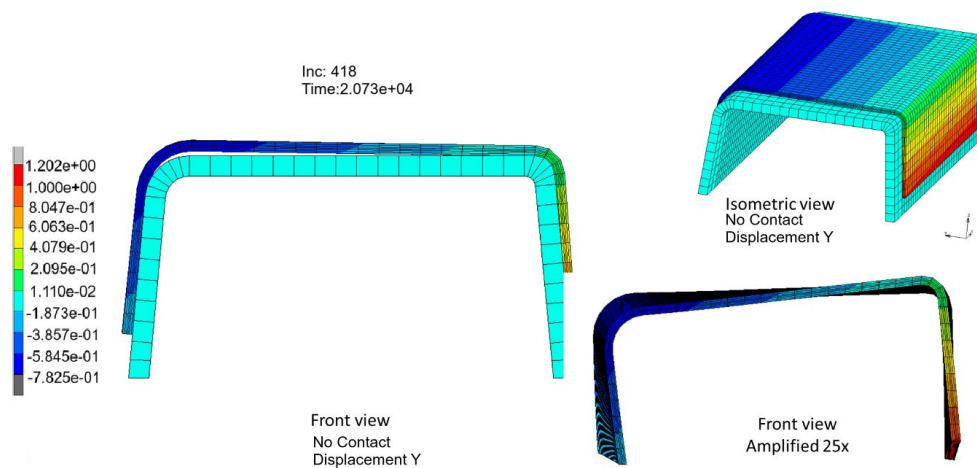


Figura 5.14. Graficul distorsiunii calculată pentru specimenul C cu grosimea de 3 mm.

După fabricarea și măsurarea specimenului C-spar, datele prezentate în figura 5.11 au fost utilizate ca referință pentru evaluarea valorilor de simulare numerică a distorsiunii. Am completat rezultatele experimentale și numerice ale distorsiunii pentru comparația numerică în Tabelele 5.1–5.3. A se vedea Figurile 5.13 și 5.14 pentru rezultatele numerice.

Tabelul 5.1. Rezumat rezultate al specimenului de test C cu grosimea de 2,5 mm – valori măsurate și calculate.

	Rază colț 5 mm	Rază colț 12 mm	Măsurare
Unghiurile matriței profilului C (°)	95.2	95.4	
Media experimentală (°)	93.511	93.58	Măsurat în ziua fabricării
Media experimentală (°)	93.51	93.537	Măsurat la 3 zile după fabricare
Deformație spring-in măsurată (°)	1.69	1.863	
Unghiul spring-in calculat (°)	93.618	93.5704	
Deformație spring-in calculate (°)	1.582	1.8296	

Tabelul 5.2. Rezumat rezultate al specimenului de test C cu grosimea de 3 mm – valori măsurate și calculate.

	Rază colț 5 mm	Rază colț 12 mm	Măsurare
Unghiurile matriței profilului C (°)	94.970	94.810	
Media experimentală (°)	93.821	93.702	Măsurat în ziua fabricării
Media experimentală (°)	93.813	93.693	Măsurat la 3 zile după fabricare
Deformație spring-in măsurată (°)	1.16	1.12	
Unghiul spring-in calculat (°)	93.645	93.679	
Deformație spring-in calculate (°)	1.325	1.131	

Tabelul 5.3. Rezumat rezultate al specimenului de test C cu grosimea de 5 mm – valori măsurate și calculate.

	Rază colț 5 mm	Rază colț 12 mm	Măsurare
Unghiurile matriței profilului C (°)	94.970	94.810	
Media experimentală (°)	93.943	93.62	Măsurat în ziua fabricării
Media experimentală (°)	94.128	93.518	Măsurat la 3 zile după fabricare
Deformație spring-in măsurată (°)	0.842	1.292	
Unghiul spring-in calculat (°)	93.706	93.787	
Deformație spring-in calculate (°)	1.264	1.023	

5.3 ANALIZA REZULTATELOR

În faza de calibrare care a fost realizată inițial pentru speci­menele de înveliș, am variat mai mulți parametri și am evaluat cum această variație a influențat deplasarea de spring-in:

- Varierea fracției volumetrice a fibrelor pe grosimea stratificatului de la 52% la 56% a dus la o reducere de 0,15 mm a valorii deplasării;
- O fracție volumetrică constantă a fibrelor pe grosimea stratificatului a adus o reacție imediată în comportamentul de distorsiune al stratificatului, reducând deplasarea maximă la 0,39 mm;
- O îmbunătățire suplimentară prin calibrarea modelului a fost obținută prin aplicarea unui coeficient de frecare variabil între piesă și matriță. Valorile parametrului au fost alese ca 0,01 înainte de punctul de gel și 0,1 după pragul punctului de gel. Această etapă nu a influențat valoarea deflecției;
- Un experiment care a redus suplimentar valoarea deplasării de spring-in calculată a modificat gradul inițial de polimerizare al rășinii și a aplicat un coeficient de frecare constant (valoare mare) = 1. Calibrarea rezultată a redus deplasarea maximă la 0,37 mm, ceea ce a fost considerat acceptabil, deoarece nici alte metode de calibrare nu au arătat îmbunătățiri semnificative în comparație cu măsurătorile din test;
- În cercetări anterioare [BC5.21] s-a arătat că valorile coeficientului de frecare pot fi atribuite unor valori mai mici rezonabile (0,2–0,5) împreună cu implementarea unui comportament ortotrop de frecare între piesă și matriță. Având în vedere dispunerea aproape izotropică a stratificatelor studiate, am considerat că această

opțiune are un impact limitat asupra distorsiunii în cadrul încercărilor experimentale și numerice [BC5.22].

Evaluând unghiurile de spring-in, am întâlnit câteva rezultate remarcabile:

- Atât în experiment cât și în simulări, unghiul de spring-in a crescut pentru raze de colț mai mari. Valoarea medie pentru un specimen de 3 mm grosime a fost o creștere de $1,34^\circ$ (1,78%) a unghiului de spring-in pentru o rază de colț de 12 mm. Pentru același specimen, raza de colț de 5 mm a prezentat doar o creștere de $1,03^\circ$ (1,34%) a unghiului de spring-in. În concluzie, distorsiunea măsurată experimental arată că spring-in are o magnitudine mai mare pentru raze de colț mai mari, necesitând măsuri de compensare mai atente.
- Inima (web) specimenului de tip C-shape a prezentat o deformare la măsurare și simulare. Acest comportament a fost observat inițial pentru simularea speciemenelor de înveliș și încercările experimentale. Este critic de menționat că axa de curbura va diferi pentru piesele care sunt mai rigide din cauza geometriei lor de design. Strategia de simulare trebuie să țină cont de rigiditatea geometrică moștenită pentru simularea unor geometrii mai complexe decât panouri plate sau ușor curbate.
- Având în vedere că speciemenele au fost monitorizate timp de două săptămâni după încheierea ciclului de fabricație (fără a se realiza post-curing), speciemenele au prezentat variații minore ale stresului rezidual intern, ceea ce a dus, la rândul său, la variații minore ale distorsiunii. Echipa de cercetare a observat această situație, dar deoarece valoarea schimbării deplasării măsurate pe întreaga perioadă de monitorizare a fost considerabil de mică, am ales să nu includem comportamentul post-curing al stratificatului în strategia de simulare.
- Faptul că rezultatele simulării au fost foarte apropiate de valorile experimentale, așa cum sunt rezumate în Tabelele 5.10–5.12, este remarcabil și încurajator pentru efortul de cercetare.

Un instrument de simulare numerică care poate prezice distorsiunea formelor complexe este un activ valoros atunci când este necesar să se proiecteze matrițe complexe. Un astfel de instrument de simulare poate fi integrat în cadrul general de proiectare a structurilor compozite și a matrițelor pentru structuri compozite în următoarele faze:

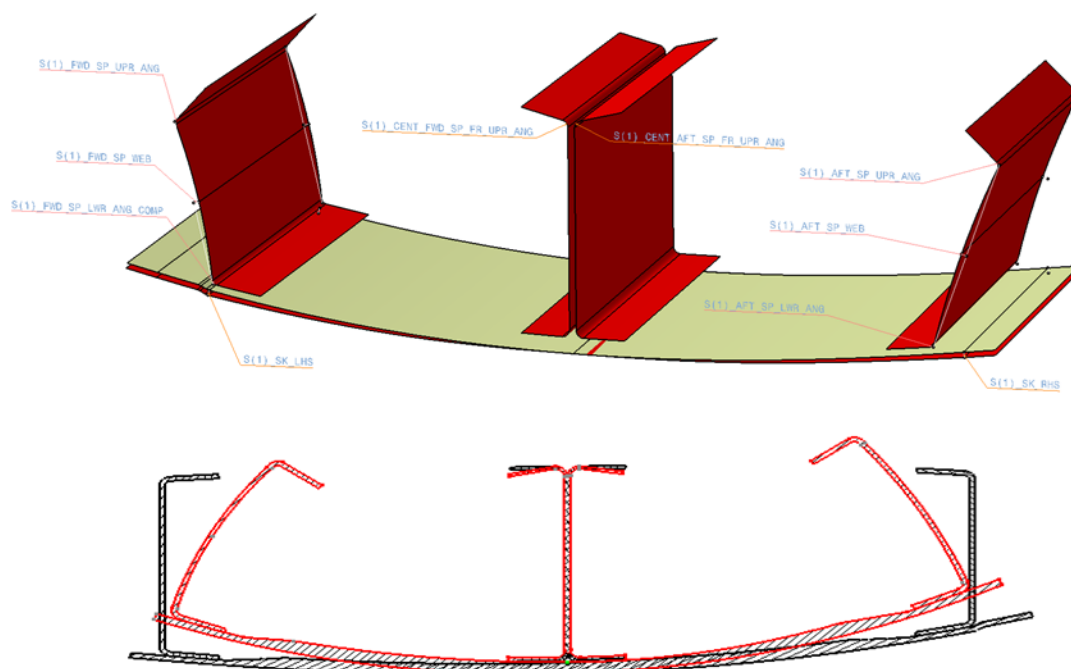


Figura 5.15. Scenariu de distorsiune pentru o structură aeronautică co-polimerizată formată din înveliș și lonjeroane [BC5.22].

BIBLIOGRAFIE CAPITOLUL 5

- [BC5.1] Banu, C.; Bugaru, M. Development of a Numerical Tool for Laminate Composite Distortion Computation Through a Dual-Approach Strategy. *Appl. Sci.* 2024, 14(22), 10656; <https://doi.org/10.3390/app142210656>
- [BC5.2] Clean Sky 2 ELADINE Project in the Frame of H2020 Frame Program. Disponibil online: <https://eladine-project.eu/> (accesat în 20 September 2024).
- [BC5.3] Clean Sky 2 OPTICOMS Project in the Frame of H2020 Frame Program. Disponibil online: <https://opticomshorizon2020.com/> (accesat în 20 September 2024).
- [BC5.4] Torre-Poza, A.; Pinto, A.M.R.; Grandal, T.; González-Castro, N.; Carral, L.; Travieso-Puente, R.; Rodríguez-Senín, E.; Banu, C.; Paval, A.; Bocioaga, M.; et al. ELADINE: Sensor monitoring and numerical model approach for composite material wing box shape distortions prediction. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2022**, 1226, 012001.
- [BC5.5] ESI PAM DISTORTION Simulation Module. Disponibil online: <https://www.esi.com.au/software/pamdistortion> (accesat în 31 October 2024).
- [BC5.6] ALTAIR Advanced Cure Simulation. Disponibil online: <https://altair.com/advanced-cure-simulation> (accesat în 31 October 2024).
- [BC5.7] ANSYS Composite PrepPost Simulation Module. Disponibil online: <https://www.ansys.com/resource-center/white-paper/simulating-composite-structures> (accesat în 31 October 2024).
- [BC5.8] ABAQUS/STANDARD Nonlinear Solver. Disponibil online: <https://www.3ds.com/products/simulia/abaqus/standard> (accesat în 31 October 2024).
- [BC5.9] COMSOL Multiphysics Nonlinear Structural Materials Module. Disponibil online: <https://www.comsol.com/nonlinear-structural-materials-module> (accesat în 31 October 2024).
- [BC5.10] MSC Marc Advanced Nonlinear Simulation Solution. Disponibil online: <https://hexagon.com/products/marc> (accesat în 31 October 2024).
- [BC5.11] Nelson, R.H.; Cairns, D.S. Prediction of dimensional changes in composite laminates during cure. In Proceedings of 34th International SAMPE symposium and exhibition, Reno, NV, USA, 8–11 May 1989; Volume 34, pp. 2397–24104.
- [BC5.12] Radford, D.W.; Diendorf, R.J. Shape instabilities in composites resulting from laminate anisotropy. *J. Reinf. Plast. Compos.* **1993**, 12, 58–75. <https://doi.org/10.1177/073168449301200104>.

- [BC5.13] Radford, D.W. Volume fraction gradient induced warpage in curved composite plates. *Compos. Eng.* **1995**, 5, 923–934. [https://doi.org/10.1016/0961-9526\(95\)00033-J](https://doi.org/10.1016/0961-9526(95)00033-J).
- [BC5.14] Johnston, A. An Integrated Model of the Development of Process-Induced Deformation in Autoclave Processing of Composite Structures. Ph.D. Thesis, The University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, 1997.
- [BC5.15] Hubert, P.; Johnston, A.; Poursartip, A.; Nelson, K. Cure Kinetics and Viscosity Models for Hexcel 8552 Epoxy Resin. In Proceedings of the SAMPE Conference, Long Beach, CA, USA, 6–10 May 2001.
- [BC5.16] Bogetti, T.A.; Gillespie, J.W., Jr. *Influence of Cure Shrinkage on Process-Induced Stress and Deformation in Thick Thermosetting Composites*; Technical report BRL-TR-3182; Army Ballistic Research Lab: Aberdeen Proving Ground, MD, USA, 1992.
- [BC5.17] White, S.R.; Hahn, H.T. Process Modeling of Composite Materials: Residual Stress Development during Cure. Part I. Model Formulation. *J. Compos. Mater.* **1992**, 26, 2402–2422. <https://doi.org/10.1177/002199839202601604>
- [BC5.18] Nawab, Y.; Shahid, S.; Boyard, N.; Jacquemin, F. Chemical shrinkage characterization techniques for thermoset resins and associated composites. *J. Mater. Sci.* **2013**, 48, 5387–5409. <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7333-6>.
- [BC5.19] Digimat Hexagon. Disponibil online: <https://hexagon.com/products/digimat> (accesat în 20 September 2024).
- [BC5.20] *MSC Software–MARC 2017.1–VOLUME A: Theory and User Information*; MSC Software: Newport Beach, CA, USA, 2017; pp. 945–954.
- [BC5.21] Yuksel, O.; Çınar, K.; Ersoy, N. Experimental and numerical study of the tool-part interaction in flat and double curvature parts. In Proceedings of the ECCM17-17th European Conference on Composite Materials, Munich, Germany, 26–30 June 2016.
- [BC5.22] Wucher, B.; Martiny, P.; Lani, F.; Pardoën, T. An example of mold compensation by means of numerical simulation on a generic curved CFRP C-spar. In Proceedings of the ECCM15–15th European Conference on Composite Materials, Venice, Italy, 24–28 June 2012.
- [BC5.23] Clean Sky 2 FITCOW Project in the Frame of H2020 Frame Program. Disponibil online: <https://cordis.europa.eu/project/id/831985/results/> (accesat în 20 September 2024).

6. CERCETĂRI PRIVIND PREDICȚIA DISTORSIUNILOR GEOMETRICE INDUSE DE TENSIUNILE REMANENTE GENERATE ÎN ELABORAREA STRUCTURILOR ANIZOTROPE MULTISTRATIFICATE UTILIZATE ÎN INDUSTRIA AERONAUTICĂ UTILIZÂND SIMULĂRI NUMERICE

6.1 SIMULAREA DISTORSIUNII PE UN SPECIMEN LA SCARĂ

6.1.1 CONTEXTUL

Dezvoltările tehnologice și științifice descrise în acest articol au fost realizate în cadrul proiectului intitulat Evaluarea Distorsiunii Stratificatelor Compozite printr-o Abordare Numeric-Experimentală Integrată – ELADINE [BC6.1]. Acest proiect a reprezentat o activitate de sprijin (CfP) pentru proiectul OPTICOMS [BC6.2], desfășurat în cadrul programului european Clean Sky 2.

6.1.2 STRATEGIA LUCRĂRILOR ȘI CONSIDERAȚII PRELIMINARE

Atât programul experimental, cât și dezvoltarea instrumentului de simulare s-au desfășurat utilizând două sisteme de materiale:

- I. **Prepregul Toray P707AG-15**, bandă unidirecțională și sistemul de rășină **2510**;
- II. **Hexcel Dry Fiber Hi Tape**, bandă unidirecțională, și sistemul de rășină **RTM 6-2**.

În timpul fabricației, au fost încorporați senzori optică în poziții strategice atât în materiale, cât și în matrițe:

- **SFBG** (*strain FBG sensors*) – senzori FBG pentru măsurarea deformațiilor;
- **TFBG** (*temperature FBG sensors*) – senzori FBG pentru măsurarea temperaturii;
- **DFS** (*dielectric flow sensors*) – senzori dielectrics pentru monitorizarea fluxului de rășină;
- **DCS** (*dielectric curing sensors*) – senzori dielectrics pentru monitorizarea procesului de **polimerizare**.

Un set vast de date privind comportamentul materialelor în timpul polimerizării a fost obținut, variind de la epruvete plane simple până la epruvete mai complexe în formă de C, cu două raze distincte ale flanșei și ale peretelui (*web*). Măsurătorile post-polimerizare ale epruvetelor și a specimenelor fabricate au reprezentat ultimul pas pentru calibrarea și ajustarea fină a modelului numeric, astfel încât instrumentul de simulare să poată reproduce cu precizie fiecare dintre geometriile analizate.



Figura 6.1. Structura aeronautica la scară reală simulată pentru predicția distorsiunii:
 STÂNGA - aripa aeronavei Piaggio P180, DREAPTA SUS - matrița pentru învelișul
 integral și lonjeroane, DREAPTA JOS - piesa de 7 metri fabricată și demultată din matriță.

6.1.3 CO-POLIMERIZAREA

Soluția tradițională de fabricație utilizată pentru structurile compozite ale aeronavelor constă în asamblarea a două sau mai multe piese, polimerizate individual, prin fixare mecanică (prin nituire și/sau șuruburi) sau lipire adezivă. Deși fixarea mecanică este o metodă bine înțeleasă de ingineri, aceasta rămâne o soluție nedorită, deoarece generează discontinuități în rețeaua de armare și favorizează delaminarea.

6.1.4 MATERIALE

În ceea ce privește materialele utilizate, matrițele sunt fabricate din LTM 12 [BC6.4], un prepreg pentru matrițare produs de Solvay. Pe lângă un timp de lucrabilitate rezonabil la temperatura ambiantă (după scoaterea din congelator), acest *prepreg* permite polimerizarea la temperaturi scăzute într-un interval relativ scurt (cinci ore la 70°C), având totodată o temperatură maximă de operare de 200°C. Polimerizarea matrițelor la temperaturi reduse este esențială pentru a reduce diferențele de dilatare termică (*diferențe de coeficienți de dilatare termică - CTE*) dintre temperatura la care a fost prelucrat modelul epoxidic (matriță master) și temperatura necesară pentru polimerizarea matrițelor.

6.1.5 Problema distorsiunilor geometrice și demularea

Una dintre principalele provocări ale fabricației demonstratorului la scară [BC6.3] este reducerea distorsiunii geometrice a pieselor compozite. Spring-in-ul este rezultatul complex al tensiunilor remanente dezvoltate în piesa fabricată, acestea fiind influențate de numeroși parametri și interacțiuni complexe. Creșterea complexității designului a condus la necesitatea dezvoltării unor algoritmi de compensare, capabili să fie implementați în geometrii complicate și în diverse condiții de polimerizare.

6.1.6 SIMULAREA NUMERICĂ A DISTORSIUNILOR PE DEMONSTRATORUL LA SCARĂ

Aplicând metodele de modelare numerică perfectate anterior și prezentate în capitolul 5, am modelat ansamblul supus ciclului de polimerizare pentru a determina prin simulare

numerică distorsiunile specimenului demonstrator la finalul procesului de fabricație [BC6.13, BC6.14].

6.1.6.1. Geometria

În Figura 6.2, poate fi observat demonstratorul de 1,2 m împreună cu ansamblul său complet.

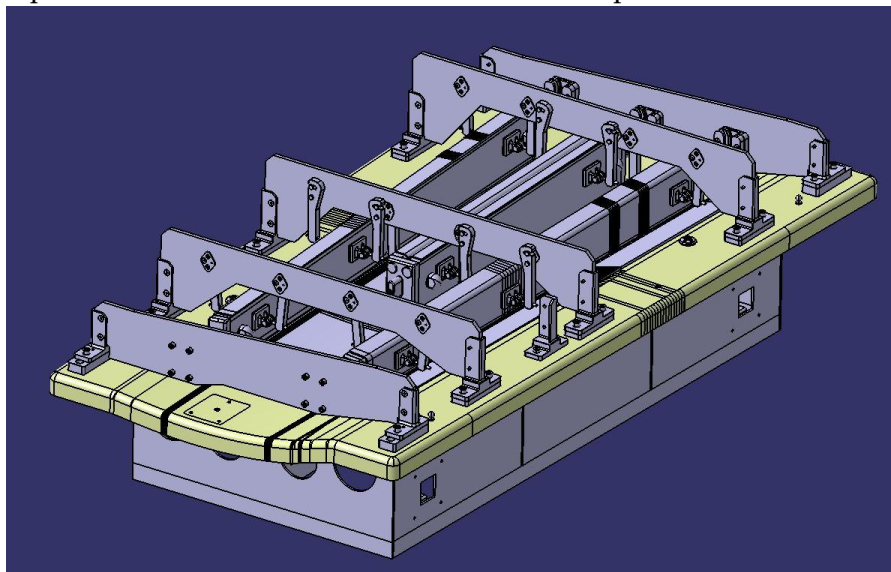


Figura 6.2 Demonstrator la scara 1.2m – ansamblu CAD

6.1.6.2. Discretizarea cu elemente finite

Geometria cu toate componentele sale prezintă un nivel ridicat de complexitate, prin urmare sunt necesare simplificări. Figura 11 arată modelul simplificat. Matrița de înveliș a fost definită ca o suprafață pe care, luând în considerare toate constrângerile geometrice (toate piesele și matrițele vor fi proiectate pe această suprafață), se va permite o proiectare fără efort a discretizărilor adiacente.

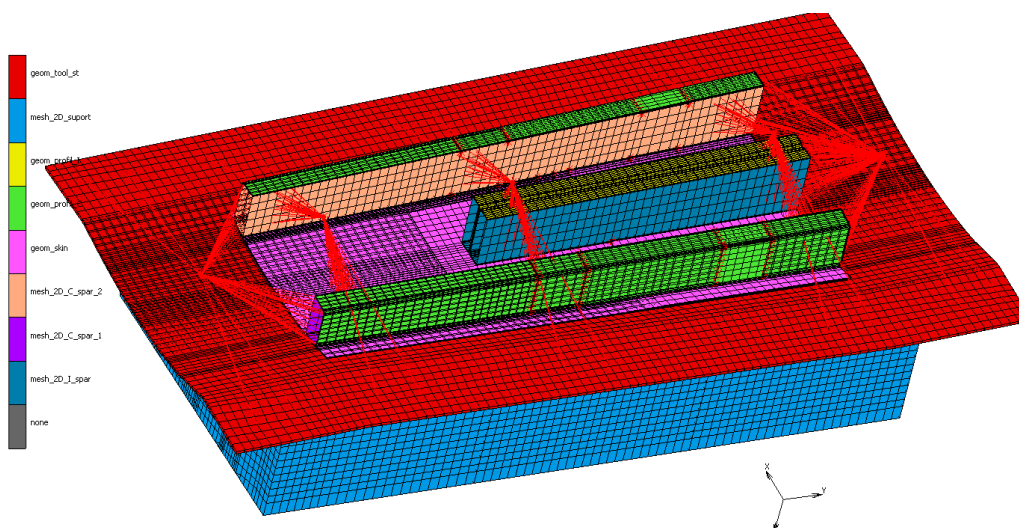


Figura 6.3 Model discretizat cu elemente finite al demonstratorului la scara

6.1.6.3. Proprietățile de material

În modelul cu elemente finite, grosimea totală a compozitului a fost împărțită în mai multe “felii” de elemente finite. Intern, fiecare “felie” de element finit este împărțit în straturile corespunzătoare compozite, conform secvenței de stratificare a compozitului definite în proiect. Chiar dacă, din punct de vedere geometric, modelul nu este simetric, configurația “feliilor” de elemente finite și segmentarea straturilor asociate pe “felie” elementului sunt simetrice în model.

6.1.6.4. Condiții la limită

- Componenta termică, cu proprietăți termice ale materialului, cum ar fi conducția, contactul termic, căldura specifică, încărcările termice, cum ar fi convecția între piesă și temperatura cuptorului;
- Polimerizarea, cu parametri care descriu evoluția polimerizării în funcție de timp și temperatură;
- Componenta structurală, cu proprietăți structurale ale materialului care depind de gradul de polimerizare, contracția asociată polimerizării, expansiunea termică structurală, contactul structural

6.1.6.5. Condiții inițiale

Ca abordare pentru modelarea numerică, începutul simulării a fost considerat a fi după punctul de gel în procesul de polimerizare [BC6.17]. Pentru a simula această abordare, pe baza datelor experimentale, au fost considerate două date inițiale:

- Temperatura cuptorului după punctul de gel;
- Gradul de polimerizare după punctul de gel.

Această abordare pentru condițiile inițiale ia în considerare contracția rășinii [BC6.18, BC6.19] în timpul polimerizării atât înainte, cât și după începutul simulării numerice a procesului, considerând contracția ca funcție a gradului de polimerizare. De asemenea, prin utilizarea acestei abordări numerice, este eliminată perioada de dinaintea punctului de gelificare, când materialul nu prezintă practic rigiditate.

6.1.6.6. Rezultate necalibrate – LRI

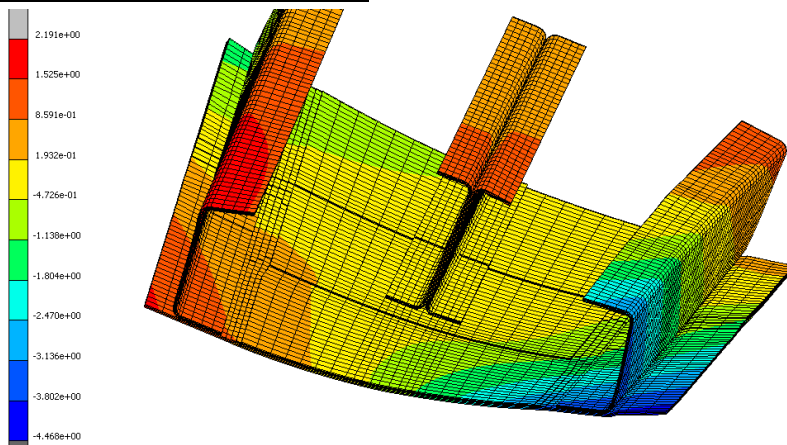


Figura 6.4. Distorsiunile demonstratorului amplificate de 10 ori. Hartă de culori a deplasărilor pe direcția Z [BC6.13, BC6.14]

Acțiuni suplimentare de calibrare:

- creșterea contracției volumetrice totale a polimerizării la datele experimentale: de la 2% la 5-6%. Această valoare este o valoare țintă. Asta înseamnă că, dacă la finalul procesului gradul de polimerizare al rășinii este 100%, atunci contracția totală devine 5-6%. Realitatea arată că gradul de polimerizare este mai mic. Acest lucru va duce la o valoare mai mică a contracției de polimerizare. Această acțiune de calibrare este conformă cu documentul: REZULTATELE REOLOGICE ALE RĂȘINII RTM6: Raportul de testare a contracției de polimerizare: 2020/38-TR-Lb-03 data 29/10/2020 întocmit în cadrul proiectului ELADINE;
- verificarea stabilității numerice a modelului;
- verificarea distorsiunii modelului în raport cu datele experimentale și rezultatele măsurătorilor.

6.1.6.7. Rezultate necalibrate - prepreg

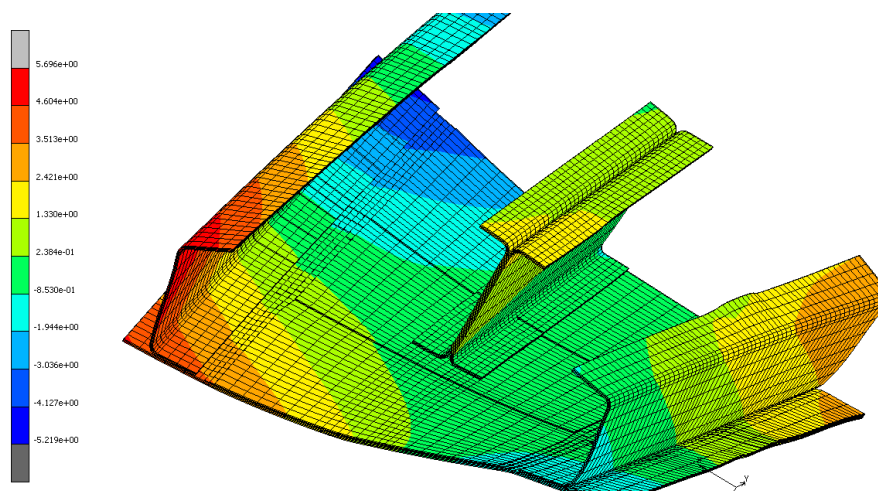


Figura 6.5. Distorsiunile demonstratorului amplificate de 10 ori. Hartă de culori a deplasărilor pe direcția Z [BC6.13, BC6.14]

Acțiuni suplimentare de calibrare:

- creșterea gradului de polimerizare la finalul procesului de la 74,8% la valoarea experimentală țintă de 75-77%
- creșterea contracției volumetrice totale a polimerizării la 3-4%
- verificarea distorsiunii modelului în raport cu datele experimentale și rezultatele măsurătorilor.

6.1.6.8. Rezultate calibrate

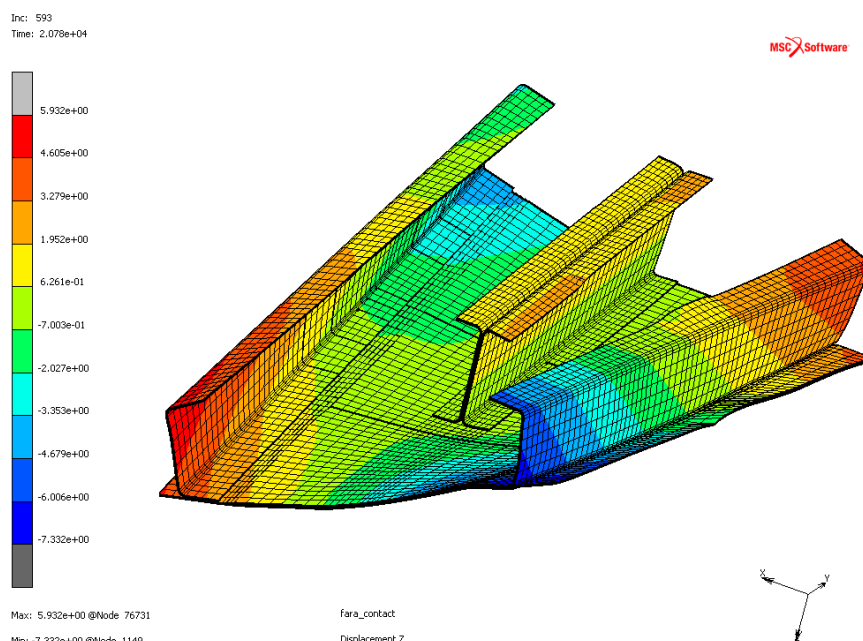


Figura 6.6 LRI calibrat. Distorsiunile demonstratorului amplificate de 10 ori. Hartă de culori a deplasărilor pe direcția Z. Distorsiunile sunt mai mari în modelul calibrat [BC6.13, BC6.14]

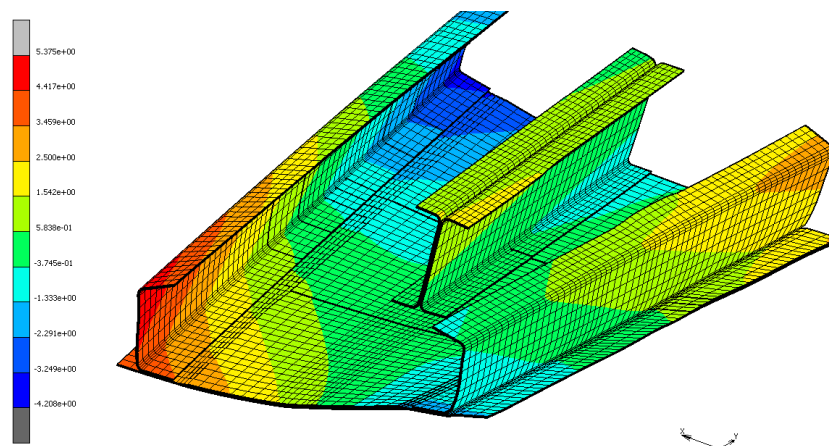


Figura 6.7 Prepreg calibrat. Distorsiunile demonstratorului amplificate de 10 ori. Hartă de culori a deplasărilor pe direcția Z. Distorsiunile sunt mai mari în modelul calibrat [BC6.13, BC6.14]

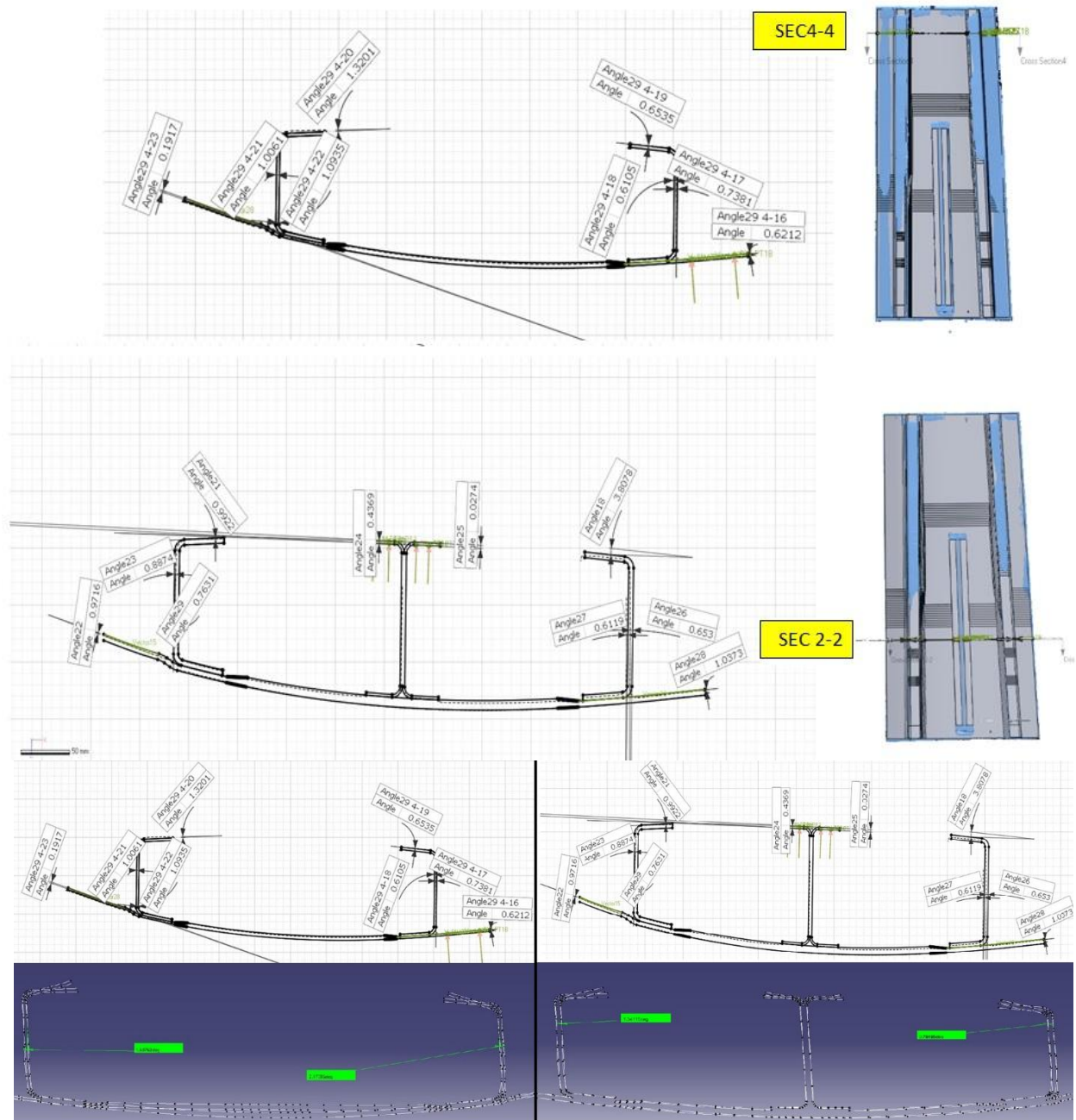
6.1.6.9. Concluzii pentru simulările numerice ale distorsiunilor pe demonstratorul la scară

Importanța acestui model numeric rezidă în rolul pe care îl are în fluxul proiectului de dezvoltare al instrumentului numeric de simulare. Complexitatea modelului este evident mai mare decât a specimenelor cu geometrie simplă, dar dimensiunea modelului (numărul de elemente și noduri) este mai mică decât a modelului de aripă la scară 7m [BC6.13, BC6.14]. Poziția acestui model la scară (1,2m) în fluxul dezvoltării instrumentului numeric: mic ca dimensiune și mare ca complexitate, ne oferă posibilitatea de a înțelege mai bine efectele unor elemente:

- tehnica de discretizare: modelul este compus doar din elemente brick hexaedrice împărțite în mai multe “felii” conectate.
- tipul de element: elementul folosit în model este un element neliniar. Acest element, ca entitate unică, poate fi împărțit în straturi pentru a modela materiale compozite. Comportamentul termic al elementului este neliniar deoarece fiecare strat are propriul punct de integrare. Comportamentul structural al elementului este probabil liniar deoarece elementul are doar 8 noduri, vârfurile sale, fără noduri intermediare.
- sarcini, condiții la limită și contacte: toate aceste componente afectează în mod esențial precizia și stabilitatea numerică a modelului. Ele afectează precizia și stabilitatea atât prin modul în care sunt plasate, dar și prin momentul în simularea procesului când devin active sau inactive.
- calibrarea: pentru a înțelege parametrii modelului numeric care pot calibra modelul conform experimentului, modul în care acești parametri afectează rezultatele și stabilitatea numerică.

Concluziile acestui model la scară mică au oferit posibilitatea de a avansa către modelul la scară mare.

6.1.6.10. Masuratori ale demonstratorului la scara



Secțiunea 4-4 A: unghi măsurat 0.7381 deg.
unghi calculat 2.172 deg

Section 4-4 A: unghi măsurat 0.6119 deg.
unghi calculat 0.7845 deg

Secțiunea 4-4 B: unghi măsurat 1.0935 deg. unghi
calculat 1.537 deg

Section 4-4 B: unghi măsurat 0.7631 deg.
unghi calculat 1.341 deg

Figura 6.8 Scanare 3D și comparație a deviațiilor (măsurători-calcul) în două secțiuni ale piesei de 1,2m
[BC6.13]

6.2 SIMULAREA NUMERICĂ A DISTORSIUNILOR PENTRU ARIPA DE 7 METRI

Luând în considerare faptul că la simularea demonstratorului – cheson de aripă compozit cu lungime 7 metri, se va folosi metodologia deja detaliată în capitolul al doilea al acestui studiu, în acest capitol ne vom rezuma doar la descrierea geometriei demonstratorului de 7 metri, a matrițelor și a rezultatelor simulării.

6.2.1 GEOMETRII ȘI MODEL CU ELEMENTE FINITE

Pentru dezvoltarea instrumentului de simulare, primul pas în analiza distorsiunii demonstratorului la scară completă a fost reprezentat de inspecția modelului CAD pentru a defini o abordare de modelare care să fie fiabilă în simularea procesului de polimerizare.

6.2.2 REZULTATE SIMULĂRI SI ANALIZA REZULTATELOR

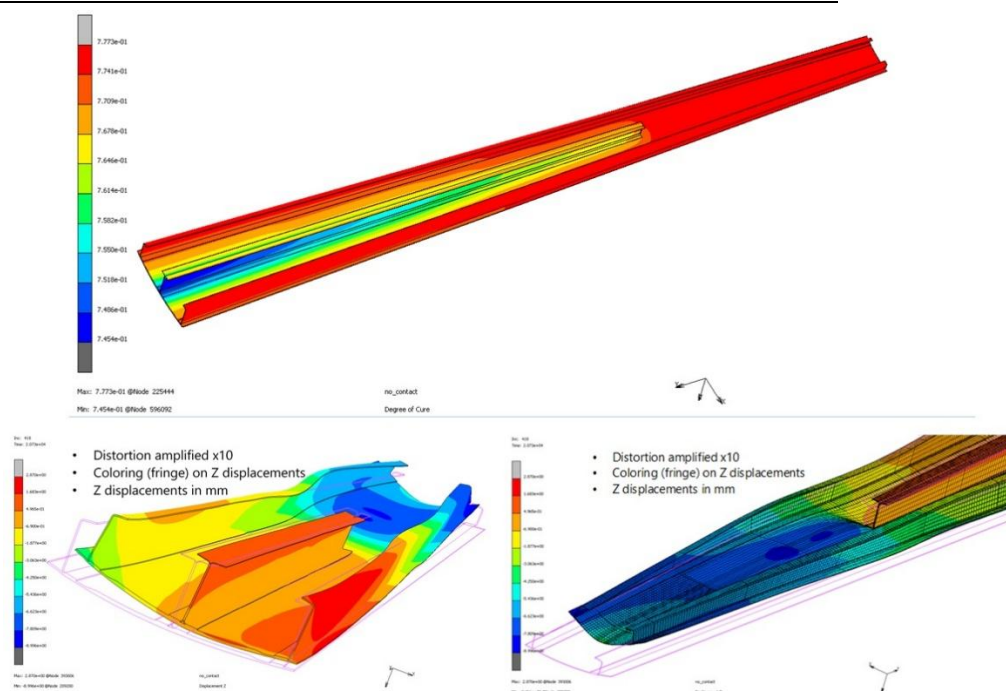


Figura 6.9 Simularea unui aripi de 7m. SUS – harta de gradienti ai gradului de polimerizare. JOS – capturi ale graficului de distorsiune de la ambele capete ale piesei simulate. [BC6.14]

Trecerea de la o geometrie simplă la o piesă complexă a adus noi provocări modelului de simulare. Deși acuratețea rezultatelor de distorsiune a fost destul de bună, după pasul de calibrare, tendința și tiparul distorsiunii au fost replicate de modelul numeric cu o fidelitate foarte bună [BC6.14].

Câteva lecții foarte importante au fost învățate după scalarea modelului numeric pentru o structură complexă:

- Tehnica de discretizare: modelul este compus doar din elemente brick hexaedrice împărțite în mai multe secțiuni conectate;
- Tipul de element: elementul folosit în model este un element nelinear. Acest element ca entitate unică poate fi împărțit în straturi pentru a modela materiale compozite.

Comportamentul termic al elementului este nelinear deoarece fiecare strat are propriul punct de integrare. Comportamentul structural al elementului este probabil liniar deoarece elementul are doar 8 noduri la vârfuri, fără noduri intermediare;

- Sarcini, constrângeri și contacte: toate aceste componente afectează într-un mod esențial acuratețea și stabilitatea numerică a modelului numeric. Ele afectează acuratețea și stabilitatea atât prin modul în care sunt plasate, dar și prin momentul în simularea procesului când devin active sau inactive;
- Înainte de calibrare: piesele de tip spar arată spring-in al flanșelor în intervalul de la 0.3mm până la 2.18mm [distorsiune pe direcția Z]. Secțiunea de skin a piesei arată un tipar de deformare diferit comparativ cu specișimenele de test de înveliș.
- Calibrarea: parametrii modelului numeric care ar putea calibra modelul conform experimentului și modul în care acești parametri afectează rezultatele și stabilitatea numerică necesită o investigație suplimentară.

Aripa de 7m nu a fost scanată 3D și nu am putut compara rezultatele de distorsiune calculate cu deviațiile din scenariul real. Prima concluzie care poate fi trasă este comparația cu lucrările anterioare realizate pe structuri mai mici fabricate cu același proces și aceleași materiale, fiind o lecție foarte valoroasă în sine. Încălzirea și răcirea structurii la scară mare determină un gradient de temperatură mult mai mare în întreaga structură, ceea ce duce la o influență mai puternică a variației temperaturii asupra gradientului de grad de polimerizare. Pentru o operațiune de fabricație reală, sunt luate în considerare elemente suplimentare de matrițe, care adaugă masă suplimentară modelului global, ceea ce nu poate fi simplificat în simulări. O decizie de a simplifica modelul și a exclude elementele grele ar putea duce la inexactități în rezultatele de spring-in.

Având în vedere că studiul nostru a considerat două sisteme de materiale, putem concluziona că pentru metoda de fabricație prin infuzie de rășină lichidă (LRI), gradul final de polimerizare este în intervalul 92.4% – 95.8%, în timp ce pentru metoda de fabricație cu prepreg intervalul este între 71.2% - 74.5%. Comparativ cu simulările anterioare la nivel de specimen de test din material compozit și demonstrator la scară mică, variația gradului este mai mare. Gradientul mediu al gradului de polimerizare în ambele procese de fabricație este aproximativ identic: 3.4%.

Această variație particulară a gradului de polimerizare poate fi atribuită dimensiunii mai mari a piesei pe anumite secțiuni, masei mai mari a caracteristicilor metalice de la capete. Creșterea dimensiunii zonei care va fi supusă procesului de convecție și conducție va crește și va influența procesul de încălzire, care va dura mai mult, rezultând într-o distribuție inegală a temperaturii, astfel o distribuție inegală a gradului de polimerizare. Referitor la diferențele dintre cele două metode de fabricație, chiar dacă variația gradului este similară, gradul final de polimerizare este cu 21.3% mai mare pentru metoda LRI comparativ cu metoda de fabricație cu prepreg.

Distorsiunile în metoda LRI sunt în intervalul de la -8.99mm la 2.87mm, în timp ce pentru metoda de fabricație cu prepreg intervalul este între -8.01mm și 3.55mm.

În simulările ambelor procese de fabricație, geometria finală a piesei este similară. De asemenea, în geometria finală a piesei se poate observa o combinație de spring-in și spring-out al skin-ului pe întreaga piesă. Pentru I-Spar se poate observa, așa cum era de așteptat, valorile de spring-in ale flanșelor superioare de 1-2mm.

În analiza numerică, gradul de polimerizare rezultat la sfârșitul procesului diferă între metoda LRI și metoda prepreg. Gradul de polimerizare rezultat pentru metoda prepreg este mai mic decât gradul de polimerizare rezultat pentru metoda LRI. Drept urmare, distorsiunea piesei diferă între cele două metode. Pentru metoda LRI, distorsiunea este mai mare decât pentru metoda prepreg.

BIBLIOGRAFIE CAPITOLUL 6

[BC6.1] Clean Sky 2 ELADINE Project in the Frame of H2020 Frame Program. Disponibil online: <https://eladine-project.eu/> (accesat în 20 September 2024).

[BC6.2] Clean Sky 2 OPTICOMS Project in the Frame of H2020 Frame Program. Disponibil online: <https://opticomshorizon2020.com/> (accesat în 20 septembrie 2024).

[BC6.3] FITCoW - Full-scale Innovative integrated Tooling for Composite material Wing-box. Disponibil online: <https://cordis.europa.eu/project/id/831985/results> (accesat în 20 septembrie 2024).

[BC6.4] Disponibil online: <https://www.solvay.com/sites/g/files/srpend221/files/2021-01/Solvay-Tooling-Brochure-2021-01.pdf> (accesat în februarie 2025).

[BC6.5] Wisnom, M.R.; Gigliotti, M.; Ersoy, N.; Campbell, M.; Potter, K.D. Mechanisms generating residual stresses and distortion during manufacture of polymer-matrix composite structures. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.* **2006**, *37*, 522–529. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.019>.

[BC6.6] Parlevliet, P.P.; Bersee, H.E.N.; Beukers, A. Residual stresses in thermoplastic composites—A study of the literature—Part I: Formation of residual stresses. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.* **2006**, *37*, 1847–1857. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.12.025>

[BC6.7] Parlevliet, P.P.; Bersee, H.E.N.; Beukers, A. Residual stresses in thermoplastic composites—A study of the literature—Part II: Experimental techniques. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.* **2007**, *38*, 651–665. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.07.002>.

[BC6.8] Parlevliet, P.P.; Bersee, H.E.N.; Beukers, A. Residual stresses in thermoplastic composites—A study of the literature—part III: Effect of thermal residual stresses. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.* **2007**, *38*, 1581–1596. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.12.005>.

[BC6.9] Ito, Y.; Obo, T.; Minakuchi, S.; Takeda, N. Cure strain in thick CFRP laminate: Optical-fiber-based distributed measurement and numerical simulation. *Adv. Compos. Mater.* **2015**, *24*, 325–324. <https://doi.org/10.1080/09243046.2014.906914>.

[BC6.10] Twigg, G.; Poursartip, A.; Ferlund, G. An Experimental Method for Quantifying Tool-part Shear Interaction during Composites Processing. *Compos. Sci. Technol.* **2003**, *63*, 1985–2002. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00172-6](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00172-6).

[BC6.11] Twigg, G.; Poursartip, A.; Ferlund, G. Tool-part Interaction in Composite Processing. Part I: Experimental Investigation and Analytical Model. *Compos. Sci. Technol.* **2004**, *25*, 121–133. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(03\)00131-3](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(03)00131-3).

[BC6.12] Twigg, G.; Poursartip, A.; Ferlund, G. Tool-part Interaction in Composite Processing. Part II: Numerical Modelling. *Compos. Sci. Technol.* **2004**, *35*, 135–141. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(03\)00132-5](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(03)00132-5).

[BC6.13] Banu, C.; Bocioaga, M. Shape distortion prediction of high temperature curing laminates through a transient multi-physics numerical model. In Proceedings of the AIAA SCITECH 2024 Forum, Orlando, FL, USA, 8–12 January 2024.

[BC6.14] Banu, C.; Bugaru, M. Development of a Numerical Tool for Laminate Composite Distortion Computation Through a Dual-Approach Strategy. *Appl. Sci.* **2024**, *14*(22), 10656; <https://doi.org/10.3390/app142210656>

[BC6.15] MSC Marc Advanced Nonlinear Simulation Solution. Available online: <https://hexagon.com/products/marc> (accessed on 31 October 2024).

[BC6.16] *MSC Software–MARC 2017.1–VOLUME A: Theory and User Information*; MSC Software: Newport Beach, CA, USA, 2017; pp. 945–954

[BC6.17] Torre-Poza, A.; Pinto A.M.R.; Grandal T.; González-Castro, N.; Carral, L.; Travieso-Puente, R.; Rodríguez-Senín, E.; Banu, C.; Paval, A.; Bocioaga, M.; et al. ELADINE: Sensor monitoring and numerical model approach for composite material wing box shape distortions prediction. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2022**, *1226*, 012001

[BC6.18] Hubert, P.; Johnston, A.; Poursartip, A.; Nelson, K. Cure Kinetics and Viscosity Models for Hexcel 8552 Epoxy Resin. In Proceedings of the SAMPE Conference, Long Beach, CA, USA, 6–10 May 2001.

[BC6.19] Bogetti, T.A.; Gillespie, J.W., Jr. *Influence of Cure Shrinkage on Process-Induced Stress and Deformation in Thick Thermosetting Composites*; Technical report BRL-TR-3182; Army Ballistic Research Lab: Aberdeen Proving Ground, MD, USA, 1992.

7. CONTRIBUȚII ORIGINALE PRIVIND PREDICȚIA DISTORSIUNILOR GEOMETRICE INDUSE DE TENSIUNILE REMANENTE GENERATE ÎN ELABORAREA STRUCTURILOR ANIZOTROPE MULTISTRATIFICATE UTILIZATE ÎN INDUSTRIA AERONAUTICĂ

7.1 ASPECTE TEORETICE

În capitolele anterioare au fost prezentate strategiile necesare modelării fenomenelor asociate proceselor de fabricație precum termocinetică, reologia și curgerile vâscoase punând accent ulterior pe analiza termo-mecanică. S-au prezentat cele trei modele constitutive de material, modele ce au fost tratate pe larg în literatura de specialitate. Dintre acestea, modelele constitutive linear-elastic și cel specific produc rezultate de o acuratețe mai bună decât modelul vascoelastic, sunt mai ușor de implementat și caracterizarea componentelor este relativ accesibilă. Modelul CHILE modificat este unul elegant dar în același timp este o cale simplă pentru a lua în considerare comportamentul neliniar al materialelor [BC1.45].

7.2 ASPECTE EXPERIMENTALE

În mod complementar, monitorizarea proceselor de fabricație cu ajutorul senzorilor optici FBG și a senzorilor dielectrics (analiza DEA) este de natură a descrie în mod global dar și local procesul de polimerizare, parametrii acestuia precum și variațiile acestor parametri pe parcursul fabricației. Luând în considerare faptul că variația gradului de polimerizare este unul dintre factorii hotărâtori în determinarea apariției și distribuției tensiunilor remanente, iese în evidență clar că metodele de monitorizare cu senzori au potențialul cel mai promițător în a furniza datele experimentale necesare atât calibrării metodelor numerice de simulare cât și pentru a rafina și dezvoltă formalismele matematice aflate la ora actuală în uz pe această temă.

Sensibilitatea majoră a monitorizării proceselor de fabricație cu senzori este atât de natură tehnică cât și una a costurilor. Pentru a putea furniza date de încredere și de calitate, măsurătorile cu senzori au nevoie de o calibrare riguroasă iar în cazul senzorilor optici de o grijă sporită în instrumentare, având în vedere că aceștia se pot rupe și deconecta foarte ușor la manipularea specimenelor de probă sau a structurilor la scara 1:1. În ceea ce privește costurile, deși atât senzorii Bragg cât și cei dielectrics se pot achiziționa la prețuri foarte accesibile, costurile echipamentului de achiziție și procesare a datelor sunt ridicate.

7.3 ASPECTE PRACTICE ORIGINALE PENTRU DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A TENSIUNILOR ȘI A DEFORMAȚIILOR REMANENTE

Pentru a studia efectul parametrilor de fabricație asupra distorsiunilor de formă ale specimenelor finale, a fost realizată o abordare experimentală pe trei geometrii diferite

(specimene înveliș, lonjeron U și ansamblu înveliș-lonjeron). Aceasta ultima geometrie este un sector de structură primară de aripă.

Pentru partea experimentală, a fost folosită o combinație de senzori FBG și DC, precum și o analiză 3D CMM pentru monitorizarea mai multor parametri în timpul diferitelor etape ale fabricării și post-fabricării specimenului. Datele experimentale colectate din testele de laborator au fost utilizate pentru calibrarea și validarea unui instrument numeric conceput pentru predicția distorsiunilor geometrice provocate de tensiuni remanente în stratificatele anizotrope.

Strategia experimentală a fost concepută pentru a colecta maximum de informații, pentru a înțelege mai bine parametrii care afectează distorsiunile de formă și pentru a colecta date ce vor duce la obținerea unei metode și a unui instrument de simulare precis și exact, capabil să prezică deformațiile pieselor compozite.

Cu schema de distribuție a senzorilor selectată pentru fabricarea specimenelor, au fost detectate și monitorizate următoarele caracteristici ale procesului de fabricație:

- Sosirea rășinii, vâscozitatea minimă, punctul de gel și sfârșitul procesului de polimerizare au fost detectate de senzorii DC;
- Un gradient de temperatură a fost detectat de senzorii FBG-temperatură amplasați pe ambele suprafețe ale specimenului. O temperatură mai mare este atinsă pe speciamentele cu mai multe straturi, însă gradientul de temperatură este mai mic decât în cazul specimenelor mai subțiri. Mai mult, pe suprafața în contact cu matrita au fost înregistrate temperaturi mai mari pentru speciamentele groase, în timp ce suprafața în contact cu sacul de vid a fost cea mai caldă pe speciamentele subțiri. S-a concluzionat că acest fenomen apare din cauza limitărilor în transferul de căldură pe speciamentele groase, deoarece există mai mult material de întărire.
- Senzorii FBG pentru măsurarea deformațiilor au reușit să detecteze polimerizarea și contracția termică datorită evoluției polimerizării rășinii pe parcursul ciclului de fabricație. Monitorizarea exclusivă a rășinii a condus la concluzia că o evaluare mai bună a deformației generate în timpul ciclului de polimerizare a fost realizată luând în considerare punctul de gel ca origine sau coordonată zero a deformației. Zonele uscate sau zonele cu un conținut mai mic de rășină au fost, de asemenea, corelate cu citirile senzorilor de deformație.
- Analiza geometriei realizată cu 3DCMM a fost corelată cu deformația înregistrată de aceiași senzori (acolo unde a fost posibil) care au fost utilizați în timpul fabricării. Această monitorizare post-fabricare a fost realizată imediat după demoulare și pe parcursul mai multor zile.
- S-a observat o reducere a razei de curbură a speciamentele înveliș, deoarece măsurătorile 3DCMM au revelat distorsiuni ale părții centrale a specimenului;
- Zonele cu mai multe distorsiuni de formă au fost și cele cu valori de deformație diferite și evoluții diferite ale deformației după câteva zile de la demoulare. Prin urmare, 3DCMM este în acord cu răspunsul FBG (deformație);

- Măsurătorile 3DCMM au arătat că cea mai mare deformare a specimenului a avut loc imediat după demulare și în primele 3-4 zile. După aceea, geometria specimenului a rămas stabilă. Aceste rezultate au fost consistente cu senzorii de deformăție, care au înregistrat și cea mai mare evoluție a deformăției în primele zile de la eliberarea sculei. Totuși, semnalul de deformăție nu s-a stabilizat așa cum a făcut-o forma specimenului, însă s-a concluzionat că deformăția rămasă nu a fost suficientă pentru a provoca distorsiuni mari pe specimen. Au fost realizate studii de caz pentru diferite simulări pentru calibrarea instrumentului numeric.

După compararea rezultatelor experimentale și numerice, concluziile principale extrase pentru specimenelor înveliș au fost:

- Variația gradului de polimerizare este apropiată de datele experimentale (în jur de 95-96% atât în încercările experimentale, cât și în modelul numeric).
- Variația temperaturii este în concordanță cu încărcătura de temperatură (temperatura în cuptor).

După compararea rezultatelor experimentale și numerice, concluziile principale extrase pentru specimenelor lonjeron U au fost:

- Senzorii DC au detectat, de asemenea, sosirea rășinii, vâscozitatea minimă, punctul de gel și sfârșitul procesului de polimerizare, obținând rezultate foarte similare cu cele obținute pentru specimenelor înveliș, ceea ce nu este surprinzător, având în vedere că ambele piese au fost fabricate cu același ciclu de polimerizare.
- În ceea ce privește monitorizarea temperaturii, senzorii amplasați pe aripa R5 au înregistrat temperaturi mai mici datorită proximității față de portul de vid. Mai mult, așa cum s-a observat și pentru specimenelor înveliș 2,5mm, partea specimenului în contact cu sacul de vid este de obicei mai caldă.
- Senzorii de deformăție au arătat o generare mai scăzută a deformăției în timpul fabricării comparativ cu specimenelor înveliș și există o distribuție clară inegală a deformățiilor, întrucât au existat diferențe între senzorii amplasați pe ambele suprafețe ale specimenului. Aceste diferențe au fost observate și în analiza post-fabricare: variația deformăției a fost mai mică pe suprafața care a fost în contact cu matrita în timpul fabricării și mai multă deformăție a fost observată pe flanșa cu raza de curbura mai mare, care este și cea care prezintă o reducere mai mare a unghiului, conform 3D CMM. Astfel, se poate concluziona că există diferențe de deformăție în direcția grosimii piesei și că acestea par a fi cauza cea mai probabilă a distorsiunilor de formă: deformarea inimii de lonjeron care duce la arcuirea (spring-in) talpilor.

În cazul demonstratorului construit în FAZA 2 se pot trage un număr de concluzii specifice. Din lecțiile învățate în timpul fabricării acestui ansamblu, au fost trase mai multe concluzii care au fost utile pentru proiectarea părții experimentale a demonstratorului la scară redusă de 1,2 m propus pentru studiul numeric:

- Ajustarea corectă a strategiilor de încorporare a senzorilor pentru structuri complexe 3D;
- Poziționarea ieșirii fibrei optice, pentru a-i păstra integritatea;

- Alegerea materialelor de protecție mai bune pentru conexiunile fibrei optice, pentru a minimiza îndoirea și, astfel, atenuarea semnalului;
- Geometria corespunzătoare a materialelor auxiliare pentru protecția fibrei optice;
- Compromisul între numărul de FBG-uri per fibră și ieșirile redundante.

Aceste lecții învățate sunt utile la proiectarea hartii de rețea a senzorilor FBG pentru demonstratorul la scară redusă de 1,2 m.

7.4 STRATEGII ORIGINALE DE SIMULARE

În faza de calibrare care a fost realizată inițial pentru speci­menele de înveliș, am variat mai mulți parametri și am evaluat cum această variație a influențat deplasarea de spring-in:

- Varierea fracției volumetrice a fibrelor pe grosimea stratificatului de la 52% la 56% a dus la o reducere de 0,15 mm a valorii deplasării;
- O fracție volumetrică constantă a fibrelor pe grosimea stratificatului a adus o reacție imediată în comportamentul de distorsiune al stratificatului, reducând deplasarea maximă la 0,39 mm;
- O îmbunătățire suplimentară prin calibrarea modelului a fost obținută prin aplicarea unui coeficient de frecare variabil între piesă și matriță. Valorile parametrului au fost alese ca 0,01 înainte de punctul de gel și 0,1 după pragul punctului de gel. Această etapă nu a influențat valoarea deflecției;
- Un experiment care a redus suplimentar valoarea deplasării de spring-in calculată a modificat gradul inițial de polimerizare al rășinii și a aplicat un coeficient de frecare constant (valoare mare) = 1. Calibrarea rezultată a redus deplasarea maximă la 0,37 mm, ceea ce a fost considerat acceptabil, deoarece nici alte metode de calibrare nu au arătat îmbunătățiri semnificative în comparație cu măsurătorile din test;
- În cercetări anterioare [BC5.21] s-a arătat că valorile coeficientului de frecare pot fi atribuite unor valori mai mici rezonabile (0,2–0,5) împreună cu implementarea unui comportament ortotrop de frecare între piesă și matriță. Având în vedere dispunerea aproape izotropică a stratificatelor studiate, am considerat că această opțiune are un impact limitat asupra distorsiunii în cadrul încercărilor experimentale și numerice [BC5.22].

După ce am învățat aceste lecții, a fost simulat o geometrie diferită – speci­menele de tip C-shape. Acestea au fost extrem de valoroase în cadrul general al proiectului ELADINE, mai ales pentru furnizarea de date pentru compensarea geometrică a matrițelor privind distorsiunea unghiului dintre flanșa spar și web. Speci­menele de tip C-shape au fost fabricate, monitorizate și măsurate urmând aceeași procedură care a fost utilizată pentru speci­menele de înveliș.

Evaluând unghiurile de spring-in, am întâlnit câteva rezultate remarcabile:

- Atât în experiment cât și în simulări, unghiul de spring-in a crescut pentru raze de colț mai mari. Valoarea medie pentru un specimen de 3 mm grosime a fost o creștere de 1,34° (1,78%) a unghiului de spring-in pentru o rază de colț de 12 mm. Pentru același specimen, raza de colț de 5 mm a prezentat doar o creștere de 1,03°

(1,34%) a unghiului de spring-in. În concluzie, distorsiunea măsurată experimental arată că spring-in are o magnitudine mai mare pentru raze de colț mai mari, necesitând măsuri de compensare mai atente.

- Inima (web) specimenului de tip C-shape a prezentat o deformare la măsurare și simulare. Acest comportament a fost observat inițial pentru simularea speciemenelor de înveliș și încercările experimentale. Este critic de menționat că axa de curbura va diferi pentru piesele care sunt mai rigide din cauza geometriei lor de design. Strategia de simulare trebuie să țină cont de rigiditatea geometrică moștenită pentru simularea unor geometrii mai complexe decât panouri plate sau ușor curbate.
- Având în vedere că speciemenele au fost monitorizate timp de două săptămâni după încheierea ciclului de fabricație (fără a se realiza post-curing), speciemenele au prezentat variații minore ale stresului rezidual intern, ceea ce a dus, la rândul său, la variații minore ale distorsiunii. Echipa de cercetare a observat această situație, dar deoarece valoarea schimbării deplasării măsurate pe întreaga perioadă de monitorizare a fost considerabil de mică, am ales să nu includem comportamentul post-curing al stratificatului în strategia de simulare.
- Faptul că rezultatele simulării au fost foarte apropiate de valorile experimentale, așa cum sunt rezumate în Tabelele 5.1–5.3, este remarcabil și încurajator pentru efortul de cercetare.

Rezumatul rezultatelor simulării demonstrează că instrumentul numeric dezvoltat este fiabil pentru prezicerea spring-in și warping pentru geometrii precum panouri aproape plate și geometria flanșelor/colțurilor. Această capacitate de simulare poate fi utilizată pentru a estima distorsiunea pentru practic orice structură de panou sau colț/flanșă compozită, cu condiția ca comportamentul sistemului de materiale să fie înțeles pe deplin și ca datele și parametrii procesului de fabricație să fie cunoscuți și controlați cu precizie. Dezvoltarea curentă a simulării poate constitui o bază solidă pentru geometria mai complexă și pentru ansamblurile compozite co-călite. Totuși, strategia de simulare necesită mai multe verificări și validări decât modelele de distorsiune ale geometriei complexe. În această etapă a dezvoltării, instrumentele de simulare numerică pot fi utilizate fiabil pentru a prezice distorsiunea geometriei simple, dar maturitatea tehnică este insuficientă pentru a obține rezultate fiabile pentru forme și ansambluri complexe.

Un instrument de simulare numerică care poate prezice distorsiunea formelor complexe este un activ valoros atunci când este necesar să se proiecteze matrițe complexe. Un astfel de instrument de simulare poate fi integrat în cadrul general de proiectare a structurilor compozite și a matrițelor pentru structuri compozite în următoarele faze:

- Modelarea formei structurale – evaluarea preliminară a abaterilor geometrice critice;
- Verificarea tridimensională a întăririlor structurale pentru distorsiuni locale ale geometriei (unghiurile flanșei și colțurile);
- Modele de matrițe și compensare a geometriei matriței pentru a preveni fabricarea pieselor distorsionate;

- Verificări locale pentru creșterea frecării și aderenței pieselor la matriță cauzate de distorsiune, care pot duce la dificultăți în extragerea pieselor.

Aceste matrițe complexe trebuie să țină cont de anumite condiții și faze critice de fabricație, cum ar fi demularea pieselor, iar matrițele trebuie proiectate corespunzător. În acest sens, nu doar că spring-in trebuie prezis, dar și manufacturabilitatea piesei și strategia de compensare a distorsiunii trebuie definite. Scenariile de distorsiune, cum ar fi cel descris în figura 5.34, iau în considerare probabilitatea distorsiunii pentru toate suprafețele piesei: învelișul aripii, web-urile spar-ului și capacele. Scenariul din figura 5.15 a fost studiat ca parte dintr-un proiect dedicat construcției unei matrițe compozite [BC5.23]. Sarcina de compensare a matriței pentru astfel de scenarii este provocatoare, dar într-un mediu de software de compensare a matriței compozite, un instrument numeric care se ocupă de prezicerea spring-in al stratificatelor este o îmbunătățire naturală. Cercetătorii iau în considerare extinderea capacităților instrumentului de simulare a distorsiunii într-un sistem CAD însoțitor pentru compensarea geometrică a matrițelor compozite.

7.5 ABORDARE ORIGINALĂ ÎN PRIVINȚA CAPACITĂȚII DE SIMULARE DISTORSIUNILOR PE STRUCTURI AERONAUTICE ANIZOTROPE MULTISTRATIFICATE LA SCARĂ REALĂ

Atunci când utilizăm simulările numerice pentru a prezice spring-in-ul și distorsiunea, trebuie să luăm în considerare mai multe condiții pentru a ghida activitatea în funcție de obiectivul stabilit.

La ce servește efortul nostru? Putem folosi simulările pentru a reduce numărul de încercări pe care un producător trebuie să le efectueze pentru a obține geometrii excelente și constante ale pieselor, reducând astfel costurile recurente. Simulările sunt extrem de utile în faza de proiectare a matriței. De asemenea, le putem folosi pentru a replica mai fidel condițiile de fabricație pentru sisteme de materiale noi unui anumit producător, optimizând astfel procesul de fabricație înainte de producția în masă. Cu toate acestea, utilizarea exclusivă a simulărilor implică un risc ridicat; fără date experimentale solide privind comportamentul materialelor alese și fără informații precise despre parametrii procesului, rezultatele predicției distorsiunii vor fi inexacte și nesigure.

Care este factorul cu cea mai mare influență asupra distorsiunii? După finalizarea activităților experimentale și a simulărilor numerice și după analiza rezultatelor studiului nostru, parametrul esențial în controlul valorilor distorsiunii este gradientul gradului de reticulare. Pe baza sensibilității modelului numeric la modificarea parametrilor în timpul fazei de calibrare, putem identifica mecanismele cu cea mai mare influență asupra distorsiunii:

- Interacțiunea matriță-piesă;
- Gradientii fracției volumice de fibre;
- Consolidarea și variațiile fracției volumice de fibre prin grosimea stratului;
- Variabilitatea gradului de reticulare, care determină gradientul contracției chimice a rășinii.

Care este complexitatea geometrică pe care dorim să o simulăm? Această întrebare este deosebit de relevantă în cazul în care sunt fabricate piese relativ simple, iar producătorul deține deja o bază de date valoroasă și reguli practice precise pentru obținerea unor piese de înaltă calitate. Alți cercetători au studiat anterior comportamentul distorsiunii și compensarea matriței pentru piese complexe cu dublă curbura, pentru a evalua performanța simulării [BC5.22]. Cu toate acestea, pentru a obține predicții precise și exacte ale distorsiunii structurilor aeronautice la scară completă, va fi necesară o investigație suplimentară și o dezvoltare avansată a modelului numeric.

Din punct de vedere general asupra dezvoltării modelului numeric, mai multe aspecte pot fi clar menționate ca lecții învățate în proces:

- Alegerea protocoalelor și modelelor matematice, filosofia simulării și fluxul modelului au fost critice;
- Definirea condițiilor la limită a fost probabil cea mai dificilă sarcină de finalizat [BC6.20];
- Găsirea soluției corective, adecvate în procesul de calibrare, deoarece NU TOATE ideile inițiale au funcționat cu modelul cu maturitatea cea mai bună [BC6.21];
- Modelul de simulare trebuie să găsească un echilibru între flexibilitate (capacitatea de a calibra) și robustețe (modelul trebuie să poată rula pentru condiții diferite);
- Comportamentul materialelor – această problemă a fost una recurentă care a necesitat soluționare cu date de intrare realiste și robuste în procesul de simulare. Nu de fiecare dată am reușit să obținem datele materialelor necesare și în unele cazuri am folosit informațiile disponibile din literatură;
- Un model la scară mică se comportă FOARTE diferit față de o structură mare. Gradienții de temperatură și variația gradului de polimerizare sunt parametrii care influențează starea finală a distorsiunii. Urmarea unei abordări non-robuste duce la dificultăți de scalare de la specimene-test mici la structuri de dimensiuni mari. Uneori, scalarea este chiar imposibilă.

BIBLIOGRAFIE GENERALĂ

- [BG.1] Baran, I.; Cinar, K.; Ersoy, N.; Akkerman, R.; Hattel, J. A Review on the Mechanical Modeling of Composite. *Arch. Comput. Methods Eng.* **2017**, *24*, 365–395. <https://doi.org/10.1007/s11831-016-9167-2>.
- [BG.2] Hubert P, Poursartip A (1998) A review of flow and compaction modelling relevant to thermoset matrix laminate processing. *J Compos Mater* 17(4):286–318
- [BG.3] Johnston A (1997) An integrated model of the development of process-induced deformation in autoclave processing of composite structures. Ph.D. thesis, The University of British Columbia
- [BG.4] Bogetti TA, Gillespie JW Jr (1992) Process-induced stress and deformation in thick-section thermoset composite laminates. *J Compos Mater* 26(5):626–660
- [BG.5] Bogetti, T.A.; Gillespie, J.W., Jr. *Influence of Cure Shrinkage on Process-Induced Stress and Deformation in Thick Thermosetting Composites*; Technical report BRL-TR-3182; Army Ballistic Research Lab: Aberdeen Proving Ground, MD, USA, 1992
- [BG.6] White SR, Hahn HT (1992) Process modelling of composite materials: residual stress development during cure. Part II. Experimental validation. *J Compos Mater* 26(16):2423–2453
- [BG.7] Hubert, P.; Johnston, A.; Poursartip, A.; Nelson, K. Cure Kinetics and Viscosity Models for Hexcel 8552 Epoxy Resin. In Proceedings of the SAMPE Conference, Long Beach, CA, USA, 6–10 May 2001
- [BG.8] Banu, C.; Bocioaga, M. Shape distortion prediction of high temperature curing laminates through a transient multi-physics numerical model. In Proceedings of the AIAA SCITECH 2024 Forum, Orlando, FL, USA, 8–12 January 2024.
- [BG.9] Banu, C.; Bugaru, M. Development of a Numerical Tool for Laminate Composite Distortion Computation Through a Dual-Approach Strategy. *Appl. Sci.* **2024**, *14*(22), 10656; <https://doi.org/10.3390/app142210656>
- [BG.10] Torre-Poza, A.; Pinto A.M.R.; Grandal T.; González-Castro, N.; Carral, L.; Travieso-Puente, R.; Rodríguez-Senín, E.; Banu, C.; Paval, A.; Bocioaga, M.; et al. ELADINE: Sensor monitoring and numerical model approach for composite material wing box shape distortions prediction. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2022**, *1226*, 012001
- [BG.11] MSC Marc Advanced Nonlinear Simulation Solution. Available online: <https://hexagon.com/products/marc> (accessed on 31 October 2024).
- [BG.12] *MSC Software–MARC 2017.1–VOLUME A: Theory and User Information*; MSC Software: Newport Beach, CA, USA, 2017; pp. 945–954
- [BG.14] Clean Sky 2 ELADINE Project in the Frame of H2020 Frame Program. Disponibil online: <https://eladine-project.eu/> (accesat în 20 September 2024).
- [BG.14] Clean Sky 2 OPTICOMS Project in the Frame of H2020 Frame Program. Disponibil online: <https://opticomshorizon2020.com/> (accesat în 20 septembrie 2024).
- [BG.15] FITCoW - Full-scale Innovative integrated Tooling for Composite material Wing-box. Disponibil online: <https://cordis.europa.eu/project/id/831985/results> (accesat în 20 septembrie 2024).
- [BG.16] Cesar Banu, *FITCoW – Co-polymerizing large-scale structures through OOA processes*, JEC Composites Magazine, **April-May 2022**. Disponibil online: <https://digital-magazine.jeccomposites.com/jec-composites-magazine/jec-composites-magazine/n145-2022> (accesat în 18 martie 2025).

ANEXA 1 – LUCRĂRI PUBLICATE INDEXATE SCOPUS ȘI WoS

Indexate SCOPUS

1. Cesar Banu, FITCoW – Co-polymerizing large-scale structures through OOA processes, JEC Composites Magazine, **April-May 2022**. Disponibil online: <https://digital-magazine.jeccomposites.com/jec-composites-magazine/jec-composites-magazine/n145-2022> (accesat în 18 martie 2025). *JEC Composites Magazine*, Issue 145, Pages 26 - 28, SCOPUS INDEXED ISSN:1639965X, <https://0d10e1015-y-https-www-scopus-com.z-e-nformation.ro/record/display.uri?eid=2-s2.0-85170530679&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=f2d43e27c434cb272e0f829b0dbfd15d&sot=anl&sdt=aut&s=AU-ID%28%22Banu%2C+Cesar%22+58571368900%29&sl=32&sessionSearchId=f2d43e27c434cb272e0f829b0dbfd15d&relpos=2>
2. Banu, C.; Bocioaga, M. Shape distortion prediction of high temperature curing laminates through a transient multi-physics numerical model. Conference Paper, Conference Proceedings, ISBN 978-162410711-5, DOI :10.2514/6.2024-2352, AIAA SciTech Forum and Exposition, 2024, Orlando, USA, 8 January through 12 January 2024, SCOPUS INDEXED, <https://0d10e1015-y-https-www-scopus-com.z-e-nformation.ro/record/display.uri?eid=2-s2.0-85196172544&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=f2d43e27c434cb272e0f829b0dbfd15d&sot=anl&sdt=aut&s=AU-ID%28%22Banu%2C+Cesar%22+58571368900%29&sl=32&sessionSearchId=f2d43e27c434cb272e0f829b0dbfd15d&relpos=1>

Indexate WoS

3. Banu, C.; Bugaru, M. Development of a Numerical Tool for Laminate Composite Distortion Computation Through a Dual-Approach Strategy. MDPI-Applied Sciences, e-ISSN 2076-3417, **2024**, Volume14, Issue: 22, DOI:10.3390/app142210656, Article number: 10656, Published : November 2024, Indexed: 06/12/2024, WOS:001366851500001, <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:001366851500001>, IF=2,5, Q1.

Conferinte

4. Banu, C.; Bugaru, Development of a numerical tool for laminate composites distortion computation through a dual approach strategy. 11th International Conference from “Scientific Computing to Computational Engineering”, 11th IC-SCCE, 3-6 July, Loutraki, Greece, **2024**, pp. 75-84, ISSN: 2241-8865, ISBN: 978-618-84028-6-7