



UNIVERSITATEA DIN PITESTI
ACADEMIA MAGISTRA VITAE

ȘCOALA DOCTORALĂ – INGINERIA AUTOVEHICULELOR

TEZĂ DE DOCTORAT:

Contribuții Privind Utilizarea Materialelor La Autoturisme Ca Elemente De Siguranță rezumat

Conducător științific:

PROF. UNIV. DR. HABIL. ING. **ȘTEFAN TABACU**

Mentori:

PROF. UNIV. DR. HABIL. ING. **DINEL POPA**

PROF. UNIV. DR. ING. **VIOREL NICOLAE**

CONF. UNIV. DR. FIZ. **CATALIN DUCU**

Doctorand:

ING. **NIȚĂ RALUCA FLORENTINA**

PITEȘTI

2021

MULȚUMIRI

În primul rând doresc să adresez sincere mulțumiri conducătorului științific al acestei teze, d-lui Prof. Univ. Dr. Habil. Ing. Ștefan TABACU, pentru îndrumare, încurajare și susținere continuă pe tot parcursul elaborării lucrării, fapt ce a făcut posibilă finalizarea acestei teze.

Mulțumirile mele sincere se îndreaptă către D-ul Dr. C.S. III Cătălin DUCU – Directorul Centrului de Cercetare pentru Materiale Avansate și mentorilor D-ul Prof. Univ. Dr. Habil. Ing. Dinel Popa și Prof. Univ. Dr. Ing. Viorel NICOLAE (Universitatea din Pitești) de la care am acumulat cunoștințe temeinice în domeniul studiat.

Nu în ultimul rând, mulțumesc foarte mult familiei mele care mi-a fost întotdeauna alături și care prin răbdarea, înțelegerea și încurajările acordate pe toată perioada realizării lucrării m-a susținut în permanență și m-au ajutat să duc la bun sfârșit această teză.

Cuprins:

INTRODUCERE.....	4
CAPITOLUL 1 – Materialele utilizate la autoturisme ca elemente de siguranță	8
1.1. Clasificarea Materialelor.....	9
1.2. Stadiul Actual al Cunoașterii în Domeniu	11
1.3. Concluzii.....	14
CAPITOLUL 2 – Cercetări experimentale a materialelor de tip spumă	16
2.1. Descrierea ansamblului planșa bord	16
2.2. Testarea Experimentală A Spumelor Folosite Ca Structură De Siguranță.....	17
2.3. Concluzii.....	19
CAPITOLUL 3 – Studiu teoretic și experimental al structurilor auxetice	21
3.1. Analiza numerică și analitică a structurii tetra-anti-chirale 2D sub sarcini compresive	21
3.2. Analiza teoretică a structurii tetra-anti-chirale.....	25
3.3. Model teoretic pentru estimarea zonei de platou a forței pentru procesul de deformare a structurilor auxetice 3D anti-tetra-chirale	27
3.4. Concluzii.....	32
CAPITOLUL 4 – Modelarea numerică a ansamblului planșa bord	34
4.1. Modelarea numerică a planșei bord	34
4.2. Evaluarea numerică a performanțelor structurale ale planșei bord.....	35
4.3. Caracterizarea mecanică și modelarea numerică a pieselor realizate prin metode de fabricare aditivă	36
4.4. Studiul numeric al structurilor auxetice (tetra-anti-chirale) realizate prin metoda fabricării aditive	39
4.5. Concluzii.....	42
CAPITOLUL 5 – Cercetarea experimentală și simularea numerică a impactului cu planșa bord...	43
5.1. Cercetarea experimentală a impactului cu planșa bord	43
5.2. Evaluarea numerică a performanțelor structurale ale planșei bord.....	47
5.3. Concluzii.....	48
CAPITOLUL 6 – Concluzii generale	50
Bibliografie	54

INTRODUCERE

Teza de doctorat cu titlul “**Contribuții privind utilizarea materialelor la autoturisme ca elemente de siguranță**” realizată în perioada stagiului de doctorat efectuat în cadrul școlii doctorale “Ingineria autovehiculelor” este rezultatul studiilor teoretice și al cercetărilor experimentale efectuate în Centrul de Cercetare “Ingineria Automobilului” și laboratorul “Caroserii și Analiză Structurală” din Universitatea din Pitești.

Stadiul actual al cunoașterii în domeniul temei pe plan național și internațional

Creșterea spectaculoasă a consumului de materiale corelată cu rezultatele cercetărilor științifice ale ultimilor ani din domeniul materialelor cu proprietăți superioare, au condus la realizarea de noi materiale compozite, numite de specialiști “de generația a II-a”, caracterizate de avantaje certe pentru o gamă largă de produse și de utilizări.

Extinderea domeniilor de utilizare ca și dezvoltarea tehnologică sunt două modalități prin care materialele în concurență pentru ponderea lor în tehnică, își modifică locul în ierarhie. Evoluția materialelor și a proprietăților lor este determinată de progresele tehnologiei și inovațiile din acest domeniu. La rândul lor tehnologiile noi, apar ca răspuns al exigențelor din ce în ce mai severe privind confortul și siguranța omului, a necesității ocrotirii mediului înconjurător, etc.

Cercetătorii implicați activ în procesul de cunoaștere subscriu unanim la ideea că fără dezvoltarea cercetării fundamentale și teoretice nu se poate aștepta la un rezultat aplicativ, deși noile elaborări, de regulă, au tendința să apară cu o oarecare întârziere față de cercetarea teoretică. Pe de altă parte, este, de asemenea, absolut clar că niciun rezultat semnificativ în domeniul științei și tehnologiei nu poate fi obținut fără o argumentare preliminară și o interpretare teoretică ulterioară. Știința materialelor compozite a apărut din necesitatea unor studii multidisciplinare, pornind de la faptul că elaborarea acestora este complexă, condițiile de operare în care aceste materiale trebuie să funcționeze sunt severe, proprietățile fizice, chimice, magnetice, electrice și mecanice sunt influențate de compatibilitatea și modul de dispunere a elementelor componente.

Efortul oamenilor de știință se orientează către materialele noi, și implicit asupra tehnicilor de prelucrare și proiectare analitică a elementelor active necesare prelucrării acestora. Studiul unor tehnologii au scos la iveală că acestea ar putea fi aplicate la scară industrială pentru avantajele economice, performanța și simplitatea proiectării. O adevărată revoluție în știință au declanșat lucrările care au demonstrat posibilitatea creării metamaterialelor cu proprietăți pe care nu le posedă materialele obișnuite.

În prezent este de remarcă interesul din ce în ce mai mare față de materialele și structurile inteligente considerate materialele viitorului. Ele constituie una dintre ultimele descoperiri ale științei materialelor cu largi aplicații în toate domeniile de utilizare. Materialele compozite sunt obținute prin amestecarea și consolidarea amestecului dintre două sau mai multe tipuri de materiale distincte obținând un material nou cu proprietăți distincte de cele ale fiecărui component în parte. Prin combinarea acestor materiale se urmăresc combinații de proprietăți, ce nu pot fi regăsite la materialele tradiționale, având astfel posibilități nelimitate de aplicabilitate.

Structurile celulare au fost din ce în ce mai utilizate în aplicațiile moderne de inginerie în ultimul deceniu datorită proprietăților lor mecanice favorabile, deoarece prezintă o densitate

scăzută, un comportament bun la încărcare dinamică și capacități ridicate de absorbție a energiei (ca dispozitive de rezistență la impact).

Obiectivele și motivația tezei

În contextul cercetărilor științifice actuale din domeniul materialelor, prin prezenta teză de doctorat, dincolo de aspectele practice legate de înțelegerea aspectelor teoretice și experimentale aflate în legătură cu studiul abordat, obiectivul general este reprezentat de identificarea unor structuri funcționale noi și, implicit, a tehnicilor de prelucrare și proiectare analitică a elementelor active necesare prelucrării acestora, cu utilizare ca elemente de siguranță la autoturisme.

Tendențele actuale din industrie în general și din industria constructoare de automobile în special, de creștere a productivității muncii și a exigențelor calității produselor, impune o perpetuă cercetare, dezvoltate și implementare de noi tehnologii care să ducă în final la satisfacerea, pe de o parte a clientului (ca utilizator final), iar pe de altă parte a producătorului pentru obținerea de produse vandabile, cu calități superioare, cu un preț de cost cât mai mic, executate într-un timp cât mai scurt.

Având în vedere faptul că numărul autovehiculelor care circula pe drumurile publice a crescut considerabil, se impune crearea de autoturisme cât mai sigure atât pentru cei care circulă cu aceste autoturisme cât și pentru participanții vulnerabili.

Siguranța circulației este definită ca posibilitatea de deplasare rapidă și sigură cu autovehiculul, fără pierderea stabilității de mers pe traiectoria comandată de conducător și fără coliziuni care să provoace rănirea ocupanților și/sau a celorlalți participanți la trafic sau stânjenirea circulației normale a celorlalte vehicule rutiere, în toate condițiile previzibile de trafic. De asemenea, în cazul producerii unui accident de circulație, se impune un grad minim de risc pentru pasagerii autovehiculului, precum și pentru ceilalți participanți la trafic. Definită astfel, sfera circulației include următorii factori: omul, autovehiculul, calea rutieră, componența și volumul fluxurilor de trafic, precum și viteza de deplasare.

Față de conținutul tezei, concretizat în identificarea comportamentului materialelor celulare și testarea lor în condiții de încărcare statică și dinamică, pentru a estima performanțele acestora ca materiale incluse în sistemele de siguranță ale autoturismelor, obiectivele acestei teze de doctorat constau în parcurgerea și elaborarea unor concluzii referitoare la:

- 1. Stadiul actual privind materialele și parametrii ce caracterizează indicii de performanță ai materialelor utilizate la autoturisme ca elemente de siguranță.**
- 2. Rezultate preliminare privind analiza experimentală a materialelor și structurilor complexe.**
- 3. Cercetări experimentale privind modelarea numerică, analiza rezultatelor și definirea unui proces de îmbunătățire a performanțelor.**

în care sunt concretizate activitățile efectuate în domeniile:

A.1 documentare științifică (Ob. 1) privind:

- materialele utilizate la autoturisme ca elemente de siguranță,
- structurile auxetice care pot fi folosite în domeniu,
- metodele de modelare numerică și testare experimentală a acestor tipuri de structuri.

A.2 experimentale de caracterizare și testare a materialelor și structurilor complexe (Ob. 2):

- spume polimerice: spume de polipropilenă expandată (EPP), polistiren expandat (EPS) și Piocelan - spumă de polistiren extrem de versatil obținut prin adăugarea de poliolefină la

polistirenul convențional.

- structuri metalice auxetice tetra-anti-chirale 2D și 3D.
- structuri polimerice auxetice tetra-anti-chirale 3D obținute prin metode de fabricare aditivă.

A.3 experimentale de modelare numerică, simulare experimentală, validare a rezultatelor și optimizare a modelelor (Ob. 3).

A.4 de mediatizare și diseminare a rezultatelor (Ob. 1-3) prin participări la conferințe și publicare de articole.

Scurta prezentare a capitolelor tezei

Capitolul introductiv al tezei „Contribuții Privind Utilizarea Materialelor La Autoturisme Ca Elemente De Siguranță” prezintă stadiul actual al cunoașterii în domeniul temei pe plan național și internațional, obiectivele și motivația tezei, metodologia cercetării precum și gradul de noutate, valoarea științifică și practică a tezei.

Capitolul 1 sintetizează principalele considerații teoretice privind materialele și parametrii ce caracterizează indicii de preferință a materialelor utilizate la autoturisme ca elemente de siguranță. Concluziile cercetărilor prezentate în acest capitol sugerează faptul că, se poate dezvolta un model eficient, complex și particularizat de caracterizare a structurilor celulare datorită proprietăților lor mecanice favorabile, deoarece prezintă o densitate scăzută, un comportament bun la încărcare dinamică și capacități ridicate de absorbție a energiei (ca dispozitive de rezistență la impact).

Capitolul 2 prezintă o investigație a spumelor pentru a estima performanța ca dispozitive de siguranță pentru piesele interioare: răspunsul structural al materialului la impact (variație ridicată față de material) și teste aproape statice la încărcări dinamice pentru studierea efectului ratei de deformare asupra răspunsului spumei.

În **Capitolul 3** sunt prezentate investigații asupra structurilor tetra-anti-chirale, unde a fost elaborat un model numeric și încărcat în trepte, a fost implementată o curbă experimentală de tensiune, și a fost elaborată o soluție analitică pentru evaluarea raportului Poisson, pornind de la un model existent în literatura de specialitate. Soluția analitică propusă în acest capitol este simplă și poate fi aplicată direct la configurarea parametrilor de proiectare, a intrărilor necesare atunci când vine vorba de timp și resurse necesare pentru analiza aprofundată a structurilor.

Capitolul 4 prezintă modelele numerice ale planșei bord și ale unor piese realizate prin fabricare aditivă și prezentarea etapelor parcurse pentru definirea modelelor numeric, procesul de validare și posibilitățile de utilizare pentru îmbunătățirea performanțelor structurale ale produselor.

În **Capitolul 5** sunt prezentate aspecte referitoare la metodele, mijloacele și rezultatele obținute în cazul studiului performanțelor structurale ale planșei bord în cazul impactului cu pendul, în conformitate cu prevederile Regulamentului ECE 21. De asemenea, sunt abordate elemente referitoare la simularea numerică a impactului cu planșa bord. Rezultatele obținute în acest capitol sunt analizate pentru evidențierea aspectelor comune.

Lucrarea se încheie cu prezentarea concluziilor generale, a referințelor bibliografice și a listei cu propriile contribuții.

Gradul de noutate, valoarea științifică și practică a tezei

Gradul de noutate, valoarea științifică și practică a tezei constau într-o nouă abordare teoretică, practică și metodologică privind materialele și structurile complexe, cercetările experimentale

privind modelarea numerică, analiza rezultatelor și definirea unui proces de îmbunătățire a performanțelor.

Gradul de noutate și valoarea practică a acestei teze constau în faptul că, sunt proiectate, fabricate, testate și validate structuri auxetice noi 2D și 3D care pot fi folosite în industria auto ca elemente de siguranță pentru absorbția șocului la impact.

Un alt factor de noutate care susține valoarea științifică a tezei este dezvoltarea de modele numerice complexe pentru structuri auxetice originale și efectuarea de simulări experimentale privind comportamentul acestor structuri la solicitări mecanice cvasi-statice și dinamice care pot permite obținerea de materiale cu proprietăți proiectate.

Concluziile cercetărilor originale prezentate în această teză sugerează faptul că, se poate dezvolta un model eficient, complex și particularizat de proiectare și testare a unor structuri auxetice 2D și 3D anti-tetra-chirale pentru a fi folosite ca atenuatoare de șoc în planșa de bord a autoturismelor, iar acest model a fost validat cu succes prin teste experimentale de laborator pe structurile auxetice noi fabricate.

CAPITOLUL 1 – MATERIALELE UTILIZATE LA AUTOTURISME CA ELEMENTE DE SIGURANȚĂ

Conceptul de siguranță rutieră urmărește sesizarea, cunoașterea și modelarea factorilor care concură la evitarea producerii accidentelor de circulație rutieră sau, în extremis, la diminuarea consecințelor acestor accidente.

Deoarece la buna desfășurare a circulației rutiere concură toți factorii componenți ai sistemului, respectiv autovehicul, cale rutieră, conducător auto, pietoni, cunoașterea și modelarea acestor factori, prin prisma siguranței rutiere, se rezolvă de proiectanții și constructorii de autovehicule și drumuri, de responsabilii cu întreținerea, repararea și exploatarea autovehiculelor și a drumurilor, de instituțiile și factorii răspunzători de pregătirea conducătorilor auto, de cei ce răspund de coordonarea și controlul circulației rutiere.

Siguranța circulației privită prin elementele de securitate ale autovehiculului se realizează prin două mari grupe de măsuri:

- *măsuri de siguranță activă*, care urmăresc îmbunătățirea calităților autovehiculelor referitoare la evitarea producerii accidentelor;
- *măsuri de siguranță pasivă*, care au în vedere diminuarea consecințelor accidentelor de circulație

Siguranța activă a autovehiculelor urmărește eliminarea cauzelor obiective, aferente autovehiculului, de producere a accidentelor de circulație rutieră.

În general siguranța activă se obține prin realizarea cu fiabilitate maximă a sistemelor de direcție, de frânare, de rulare, de semnalizare și iluminare. Timpul minim de demarare, capacitatea maximă de accelerare în timpul efectuării depășirilor precum și capacitatea de a frâna pe un spațiu cât mai mic sunt parametrii dinamici care influențează, în mod deosebit, siguranța circulației rutiere prin evitarea producerii accidentelor.

Prin perfecționarea sistemelor de frânare se mărește sensibil siguranța activă a automobilelor. Perfecționările constructive urmăresc: o fiabilitate sporită; sporirea eficacității frânelor ca urmare a repartizării forței de frânare pe punți funcție de sarcina dinamică; aplicarea dispozitivelor de antiblocare cu comandă electronică care mențin manevrabilitatea și stabilitatea mișcării automobilului pe durata procesului de frânare chiar și în curbe.

În timpul conducerii automobilului, conducătorul auto depune o activitate fizică care îl obosește, măbind pericolul producerii accidentelor. Măsurile constructive pentru îmbunătățirea siguranței active au rolul de a reduce aceste eforturi. Astfel, activitatea fizică a conducătorului auto se compune din lucrul mecanic static pentru menținerea în poziție a corpului și a membrelor și din lucrul mecanic pentru acționarea dinamică a volanului, pedalelor și a manetelor. Căldura, frigul, oscilațiile și factorii psihici pot reduce forța musculară. Activitatea psihică cuprinde preluarea informațiilor, prelucrarea lor și luarea deciziei. Pentru preluarea informației canalul vizual – ochiul - este sistemul cel mai important. Ca urmare trebuie optimizate iluminarea parbrizului și tabloul instrumentelor de bord. Sesizarea auditivă și a oscilațiilor sunt mai puțin importante pentru conducerea automobilului dar participă împreună cu factorii climaterici la stresul general.

Siguranța pasivă a autovehiculelor urmărește diminuarea efectelor accidentelor, chiar în timpul producerii acestora. În construcția autovehiculelor, mai ales a autoturismelor, se urmărește asigurarea unor norme minime de securitate care, în principal, vizează evitarea accidentării grave sau mortale a

ocupanților cât și o protecție pentru pietoni sau bicicliști.

Siguranța pasivă a autovehiculelor este exprimată prin concepția unor structuri de securitate a autovehiculelor, a unor sisteme de reținere optime pentru ocupanții autovehiculelor, măsuri de protecție pentru bicicliștii și pietonii loviți, precum și măsuri de siguranță pentru perioada de după accident.

În scopul protecției interioare pentru pasager, la autovehicule au fost aduse o serie de îmbunătățiri atât caroseriei cât și altor sisteme de protejare a ocupanților. Astfel, celula pasagerilor (habitaclul) trebuie construită rigid, astfel încât să asigure spațiu de supraviețuire în cazul unor coliziuni. În schimb structurile care înconjoară habitaclul se construiesc astfel încât să poată prelua o cantitate de lucru mecanic de deformare cât mai mare.

În timpul coliziunii când autovehiculul este "frânat" pe un spațiu extrem de mic, pasagerii, în tendința de a-și păstra stare de mișcare, vor fi proiectați în față, în parbriz și pe bord, cu posibilități de ricoșare. Pentru a se elimina consecințele grave care apar în astfel de situații autovehiculele se echipează cu dispozitive de reținere a pasagerilor.

1.1. CLASIFICAREA MATERIALELOR

Materialele se clasifică luând drept criterii atât aspectul structurii, proprietățile și compoziția chimică, cât și domeniile de interes. Evoluția materialelor și a proprietăților lor este determinată de progresele tehnologiei și inovațiile din acest domeniu. La rândul lor tehnologiile noi, apar ca răspuns al exigențelor din ce în ce mai severe privind confortul și siguranța omului, a necesității ocrotirii mediului înconjurător, etc. Sectorul tehnologic de vârf al secolului 21, microelectronica a creat la rândul ei etape superioare tehnologice, nanotehnologia, fotonica, biotehnologia, materialele semiconductoare reprezentând adevărate vitamine pentru acestea. Drept criterii de clasificare, pot fi luate în considerare următoarele criterii:

- a) *Criterii de natură chimică*: - anorganice (clasificate după formula chimică, compoziție, etc.) - organice.
- b) *Criterii de stare fizică*: - elemente chimice; - aliaje monofazice; - compuși chimici; - aliaje heterofazice.
- c) *Criterii de utilizare (poate mai potrivit criterii de origine)*: - materiale metalice (metale și aliaje metalice); - materiale naturale (piatra, piei, cauciuc, lemn, etc.) - ceramice (uzuale și tehnice), - polimeri sintetici (cauciucuri, mase plastice), - materiale ingineresti (semiconductoare, compozite, sticle metalice, etc.)

Aproape toate materialele au un coeficient Poisson pozitiv, în sensul că acestea se micșorează atunci când se întind și se extind atunci când se comprimă. Acestea sunt, în principiu, denumite materiale convenționale, iar coeficientul lor Poisson (ν) variază de la 0,0 la 0,5. Spre deosebire de cele convenționale, **materialele auxetice** prezintă un coeficient Poisson negativ (NPR), care se extinde lateral atunci când este întins și se contractă lateral când este comprimat. Primele date despre materialele auxetice apar încă din anii 1800, în care Voigt ș.a. Descoperă deja NPR-ul în unele materiale. Mai târziu, în 1987, Lakes a raportat o structură din spumă auxetică care poate fi produsă cu ușurință prin tri-compresie și încălzire, proces considerat a fi fabricat de om. Ulterior, evoluțiile materialelor auxetice nu au încetat. În Figura 1.4 este arătat efectul care are loc atunci când se aplică o forță atât materialului convențional, cât și celui auxetic [44][45][46].

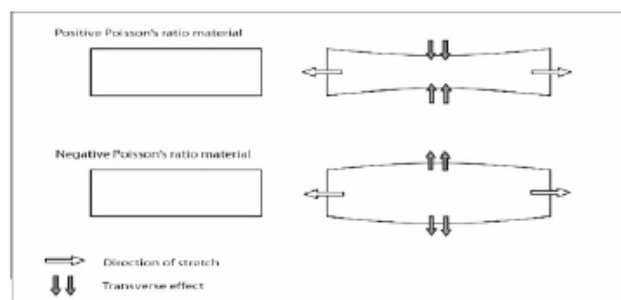


Figura 1.4. Efectul pe care îl produce o forță aplicată atât materialelor convenționale, cât și celor auxetice.[45]

Coeficientul Poisson, care descrie modificarea relativă a dimensiunii naturale a unui obiect atunci când o sarcină este aplicată pe o direcție longitudinală sau în alt mod[47], se exprimă matematic prin relația:

$$\nu = -\varepsilon_y / \varepsilon_x \quad (1.1)$$

Unde ε_x și ε_y sunt deformările relative măsurate pe direcție axială și transversală.

Metamaterialele mecanice auxetice conform Mizzi L. ș.a. [48] sunt sisteme care prezintă proprietatea macroscopică neobișnuită a coeficientului Poisson și anume negativ datorită structurii subunitare, mai degrabă decât a compoziției chimice. Auxeticul unui material depinde de structura sa geometrică și de sistemul și mecanismul de deformare al materialului atunci când se aplică o sarcină. Materialele auxetice sunt descrise ca fiind contraintuitive și pentru această proprietate, au atras interes în dezvoltarea auxeticelor.

Compozitele auxetice prezintă numeroase avantaje, cum ar fi rigiditatea și rezistența specifică ridicată și greutatea redusă. Materialele compozite auxetice au modulul de forfecare ridicat, o rezistență sporită la încovoiere, o rezistență mai bună la fisurare și o rezistență mai mare la amortizare decât materialele compozite convenționale. Aceste avantaje fac ca materialele compozite auxetice să fie aplicabile în inginerie[52][53]. De asemenea, materialele compozite auxetice au un raport putere/greutate ridicat iar consumul de energie este îmbunătățit, atunci când se reduce greutatea. Un alt avantaj al materialelor compozite auxetice este că proprietățile mecanice pot fi modificate prin schimbarea proporțiilor componentelor. Totuși, materialele compozite auxetice sunt dificil de fabricat.

Evoluția unor concepte importante legate de metamaterialele chirale sunt prezentate în Figura 1.6.

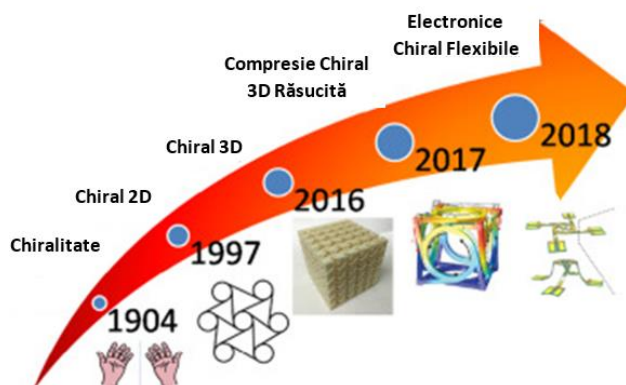


Figura 1.6. Concepte importante privind dezvoltarea metamaterialelor chirale [56]

1.2. STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII ÎN DOMENIU

Uzual, termenul spumă descrie o fază gazoasă dispersată într-o fază lichidă care are o vâscozitate îndeajuns de mare pentru a putea reține bulele gazoase. Dezvoltarea materialelor cu porozitate controlată și utilizarea lor pe scară largă în structuri ușoare a consacrat categoria materialelor celulare, caracterizate de un anumit model structural, și care sunt în mod uzual numite spume solide[71][23][24]. Această categorie de materiale acoperă toată gama de materiale ingineresti care prezintă o proporție considerabilă de fază gazoasă dispersată într-un solid.

Performanța spumelor din polipropilenă expandată (EPP) a fost studiată în funcție de parametrii, cum ar fi densitatea, microstructura și, de asemenea, rata de deformare impusă în timpul încărcării dinamice pe o gamă largă de viteze de deformare de la 0,01 la 1500 s⁻¹ pentru a demonstra efectele densității spumei și viteze de deformare asupra tensiunii inițiale de cedare și a modulului de întărire în regiunea platoului, de către Philippe Viot și Jean-Luc Lataillade în 2013.[36]

În 2018, dorind să contribuie la un mediu mai bun prin furnizarea de produse ușoare și sigure din spumă, Sekisui Plastics[39] au realizat un material din spumă care combină caracteristicile avansate ale polistirenului, cum ar fi rigiditatea și extensibilitatea ridicată, cu rezistența polyolefinei la impact, substanțe chimice și abraziune numit PIOCELAN (TOPF).

Zhao Ma ș.a. [84](2018) au dezvoltat un grup de structuri de materiale inspirate de tipul auxetic care se pot transforma în diverse forme la compresie (un mecanism material deformabil numit kinetix). Mecanismul de bază al materialului kinetix se bazează pe o legătură de patru bare conectate de patru articulații sferice prin care se poate transforma unitatea rigidă în modul plan cât și spațial (Figura 1.15).[85]

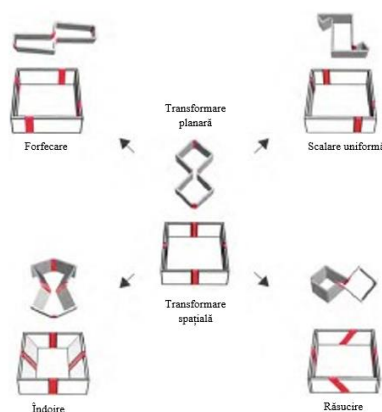


Figura 1.15. Paramaterii materialului Kinetix[84]

Deformarea kinetix, la limitele sale de deformare, depinde în mare măsură de contactul părților sale modulare[86], caz în care determinarea reală și fiabilă a suprafeței de contact și calculul interacțiunii este un factor important. Compoziții diferite ale acestor unități duc la o varietate de posibilități de schimbare a formei, cum ar fi scalarea uniformă, forfecarea, îndoirea și rotirea. Cu un instrument de simulare interactiv utilizatorii introduc structuri proiectate și previzualizează transformarea (Figura 1.16).

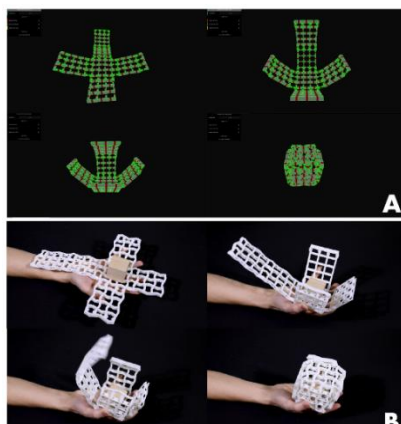


Figura 1.16. Un prototip pachet cubic poate fi pliat din plat atunci când partea de jos este comprimată. (A). O simulare a transformării pachetului. (B). Un pachet fabricat[84]

Având în vedere apariția mijloacelor de prototipare rapidă, cercetările actuale se bazează frecvent pe utilizarea acestei tehnici în fabricarea rapidă a noilor modele. Datorită posibilității de a utiliza imprimarea 3D pentru a fabrica direct structuri cu goluri, este necesară reexaminarea acestei posibilități pe producerea și analiza noilor structuri auxetice. Simulări numerice și teste experimentale au fost efectuate pe structuri FFF (fabricare cu filament), Figura 1.17.



Figura 1.17. Structura de fagure FFF[84]

Alt tip de materiale auxetice celulare investigate pe scară largă sunt modelele chirale (fig. 1.19 și fig. 1.20), pentru care cercetările teoretice și experimentale efectuate de Prall ș.a. pe un fagure chiral bidimensional, au indicat coeficientul Poisson în plan de -1 . [58][51][50]

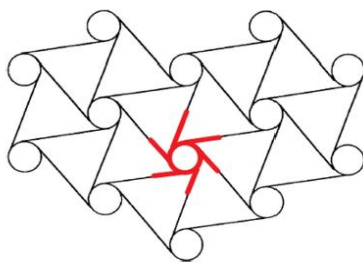


Figura 1.19. Structura chirală cu o celulă unitară evidențiată[54]

Grima ș.a.[54] au analizat o nouă clasă de structuri, denumită „meta-chiral”, construită din blocuri chirale și considerate ca fiind o structură intermediară între „chiral” și „anti-chiral”. Din Figura 1.20, în care sunt reprezentate câteva exemple de sisteme meta-chirale, se observă că pentru a forma subunitățile „chirale”, ligamentele sunt atașate tangențial la noduri, astfel încât acestea să iasă din cercuri în aceeași direcție.

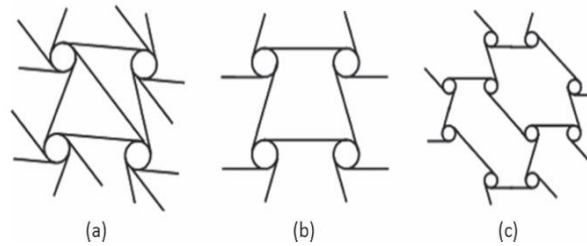


Figura 1.20. Sisteme meta-chirale cu un număr diferit de ligamente atașate la fiecare nod: (a) șase ligamente; (b) patru ligamente; (c) trei ligamente[54]

În Figura 1.26, au fost evidențiate, prin modulul materialului solid ce permite compararea celor două tipuri de spumă (EPP și EPS) pe același grafic valorile energetice și de tensiune.

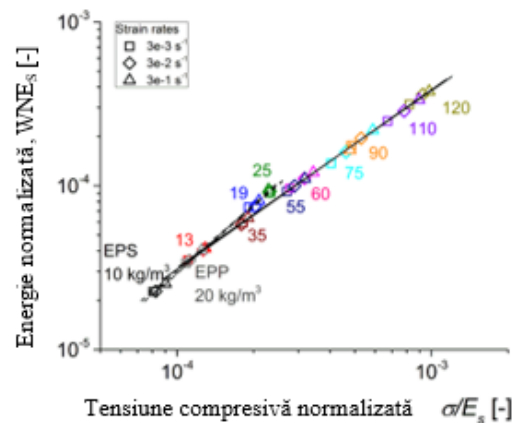


Figura 1.26. Schema de absorbție a energiei pentru spumele EPS și EPP. Culoarele diferite corespund densităților diferite;[11]

S-a constatat că modelul Gibson-Ashby poate oferi o descriere suficient de precisă a dependenței modului elastic și a tensiunii pentru majoritatea spumelor studiate, iar diagramele de absorbție a energiei Maiti obținute pentru ambele familii de spumă, permit selectarea densității optime bazate pe nevoia specifică a unei aplicații date. În ceea ce privește materialele și structurile care demonstrează un comportament auxetic, Sun ș.a.[92] au raportat comportamentul auxetic sub efort axial-longitudinal prin metoda teoretică a tuburilor chirale. Bazat pe mecanismul unităților rotative, Gatt ș.a.[48] au raportat un sistem 2D ierarhic cu comportament auxetic, prin utilizarea metodei numerice.

Folosind metodologia propusă pentru generarea de materiale și structuri metalice auxetice 3D, a fost aleasă valoarea PSF de 60%, metamaterialul auxetic 3D și structura tubulară auxetică 3D ar putea demonstra un comportament auxetic aproape identic atât la compresie și la tensiune. O altă lucrare interesantă și promițătoare este combinarea proprietății auxetice cu alți indici negativi, cum ar fi NC sau expansiunea termică negativă (NTE) pentru a genera unele materiale noi și avansate funcțional, care satisfac cerințele dispozitivelor multifuncționale.

Din referirile bibliografice mai sus amintite, se poate observa că cercetările asupra diferitelor tipuri de materiale mecanice chirale cresc rapid, incluzând:

- designul nou al metamaterialelor mecanice chirale cu proprietăți fără precedent.
- aplicații multifuncționale pentru aplicații industriale potențiale, cum ar fi: absorbția de energie la impact, absorbția sunetului, atenuarea vibrațiilor, performanțe de expansiune termică ajustabile etc.

c) sunt propuse diverse tipuri de aplicații conceptuale promițătoare[78][94][95].

Cu toate acestea, există încă unele probleme care ar trebui să fie cercetate în mod sistematic în viitor:

- a) tehnicile avansate de fabricație sunt necesare pentru fabricarea compozitelor bazate pe metamateriale chirale.
- b) cercetările privind optimizările de proiectare sunt încă destul de limitate, în special pentru metamaterialele chirale 3D.
- c) proprietățile mecanice ale metamaterialelor mecanice chirale 2D și 3D în condiții de deformare mai mari ar trebui să fie cercetate în continuare.
- d) ar trebui dezvoltate teorii mecanice constitutive pentru metamaterialele chirale compozite, unde trebuie inclusă anizotropia compozitelor.
- e) ar trebui propuse modele mai teoretice pentru înțelegerea performanțelor multifuncționale ale metamaterialelor chirale 2D și 3D, cum ar fi: teorii ale absorbției de energie de impact, etc
- f) ar trebui efectuate verificări mai experimentale pentru potențialele aplicații industriale.
- g) există, de asemenea, multe alte aplicații industriale pe care ar trebui să le folosească metamateriale chirale, cum ar fi: cuie auxetice chirale, îmbrăcăminte sport compusă chiral, structuri chirale pentru impact, aplicații de ecranare termică și electromagnetică, artă, design și arhitectură etc.[96][55][97][48]

1.3. CONCLUZII

Așa cum se menționa în prima parte a capitolului, dincolo de măsurile de siguranță pasivă importanța siguranței ocupanților autovehiculului în conceperea automobilului este evidențiată prin soluțiile promovate de constructorii de automobile, din care se amintesc: comportamentul caroseriei la deformare, sistemele de reținere a pasagerilor, comportamentul la impact al elementelor interioare ale habitaculului, protecția habitaculului la intruziunea elementelor de caroserie sau amenajărilor interioare în zona rezervată pasagerilor

Legat de obiectivele tezei și în contextul preocupărilor din ultimele două decenii, când industria automobilelor în ansamblu a pus un accent mai mare pe cercetarea și dezvoltarea în materie de siguranță și, mai precis, s-a concentrat pe protecția ocupantului în cazul unei coliziuni, atenția este îndreptată spre identificarea unor materiale cu proprietăți ridicate de absorbție a energiei impactului și care pot fi înglobate în soluțiile tehnologice de garnisire interioară a habitaculului, precum planșa bord sau panourile de uși.

În urma prezentării schematice a categoriilor de materiale disponibile fabricării în diverse domenii industriale sunt reținute, ca prezentând interes în studiul abordat, următoarele categorii de materiale:

- *spumele solide*, categorie de materiale care prezintă o proporție considerabilă de fază gazoasă dispersată într-un solid caracterizate de densitate scăzută și absorbție rapidă de energie.

Sunt prezentate: *polistirenul expandat EPS*, *polipropilena expandată EPP*, spuma hibridă *policelul ECO*, obținută prin combinația de polistiren (EPS) și polietilenă (PE) sau EPS și polipropilenă (PP);

Din analiza celor trei categorii de spume solide se reține că spuma hibridă piocelulă, care asigură o rezistență la impact mai bună în comparație cu spumele EPP și EPS, oferă o producție rentabilă de piese, deoarece poate fi modelată la densități mai mici decât EPP și are cele mai bune

proprietăți privind absorbția de energie.

- *materialele compozite*, categorie de materiale formate din mai multe componente și în mai multe moduri de organizare în funcție de utilizari. Avantajul major, esențial al compozitelor, constă în posibilitatea modulării proprietăților și obținerea în acest fel a unei game foarte variate de materiale, a căror utilizare se poate extinde în aproape toate domeniile de activitate tehnică

În ultimii ani s-a trecut la realizarea așa numitelor materiale compozite de generația a II-a, care prezintă o serie de avantaje certe pentru o mare gamă de produse, avantaje dintre care se menționează densitate redusă, rezistență mecanică sporită, rezistență la șoc ridicată, capacitate mare de amortizare a oscilațiilor, rezistență la coroziune.

- *metamaterialele mecanice auxetice*, sisteme din categoria materialelor compozite care prezintă proprietatea macroscopică neobișnuită a coeficientului Poisson și anume negativ datorită structurii subunitare.

Compozitele auxetice prezintă numeroase avantaje, cum ar fi rigiditatea și rezistența specifică ridicată, greutatea redusă au un raport putere/greutate ridicat iar consumul de energie este îmbunătățit, atunci când se reduce greutatea. Un alt avantaj al materialelor compozite auxetice este că proprietățile mecanice pot fi modificate prin schimbarea proporțiilor componentelor.

- *structuri chirale*, sisteme din categoria metamateriale auxetice tip fagure formate prin conectarea ligamentelor drepte la noduri centrale, fie sub forma unui cerc, a unui dreptunghi sau a oricărei alte forme geometrice.

În prezent, structurile chirale de fagure disponibile, includ structuri chirale cu 3 ligamente, numite faguri tri-chirale și anti-tri-chirale, structuri chirale cu 4 ligamente, cunoscută și sub denumirea de fagure tetra-chirale și anti-tetra-chirale, structuri chirale cu 6 ligamente, cunoscută și sub denumirea de fagure chiral hexagonal

În ultima parte a capitolului, într-o prezentare exhaustivă bazată pe studiu bibliografic, sunt prezentate principalele rezultate științifice legate de cercetările teoretice, simulările cu element finit și experimentale efectuate pentru evidențierea caracteristicilor fizice și de utilizare ale materialelor mai sus amintite.

CAPITOLUL 2 – CERCETĂRI EXPERIMENTALE A MATERIALELOR DE TIP SPUMĂ

Legat de funcția de protecție pasivă a habitaculului, optimizarea răspunsului structural al componentelor autovehiculelor se realizează avându-se în vedere parametrii biomecanici ai corpului omenesc în corelație cu parametrii care caracterizează structurile în ceea ce privește capacitatea acestora de a prelua energia de șoc. În acest sens sunt efectuate studii legate de evaluarea acestor parametri și identificarea unor metode și mijloace pentru încercarea experimentală. [98]

În timpul impactului, în funcție de tipul impactului, au loc atât deformarea autovehiculului implicat în accident cât și vătămarea ocupanților, parametrul comun al acestor două procese fiind energia cinetică a autovehiculului și energia cinetică a ocupantului. În timpul impactului o parte din energia cietică inițială a autovehiculului se transformă în energie de deformare și cealaltă parte este consumată prin deplasarea autovehiculului în faza postcoliziune[99][100].

În sistemul de referință asociat autovehiculului, energia cinetică inițială a ocupantului este nulă întrucât nu există deplasare relativă între ocupant și vehicul. Pe durata impactului, datorită decelerării bruște a autovehiculului, ocupantul se deplasează în raport cu acesta, pe direcția forței principale de impact. Energia cinetică a ocupantului asociată mișcării relative ocupant-vehicul se transformă în alte forme de energie cum ar fi:

- lucrul mecanic al forțelor de frecare dintre ocupant și scaun;
- lucrul mecanic al forțelor de reacțiune musculară la sprijinirea ocupantului cu picioarele în podeaua autovehiculului și respectiv a mâinilor în volan, planșa de bord, mânerul pentru sprijinul cu ajutorul mâinii;
- energia absorbită de sisemele de reținere a ocupantului: centura de siguranță, aerbaguri, tetiere, etc;
- energia de deformare a coponentelor interioare ale autovehiculului impactate cu diferite părți ale corpului: planșa de bord, panourile ușilor, volanul și coloana volanului, capitonaje interioare ale habitaculului, etc.

2.1. DESCRIEREA ANSAMBLULUI PLANȘA BORD

Planșa bord (Figura 2.1)[100], reprezintă un ansamblu constructiv compus din următoarele componente:

- poziția 1: panoul instrumentelor de bord(IP), sistemului audio, sistemului de navigație și diverse compartimente (cutia de acte);
- poziția 2: armătura de fixare a plansei bord de structura portantă a caroseriei;
- poziția 3: sistemul de fiuxare a coloanei de direcție și a siustemului de ventilație și condiționarea aerului;
- poziția 4: structura portantă și de rezistență a plansei bord.



Figura 2.1 Panșa bord[100]

2.2. TESTAREA EXPERIMENTALĂ A SPUMELOR FOLOSITE CA STRUCTURĂ DE SIGURANȚĂ

Spumele din polipropilenă expandată (EPP) sunt adesea utilizate pentru ambalare (structuri aeronautice, componente electronice, alimente etc.), pentru siguranța personală (genunchiere, căști etc.) Și, de asemenea, ca material de bază pentru structurile compozite sandwich utilizate în automobile , avioane sau industrii navale pe baza capacității lor mari de a absorbi energia și ușurința lor[101].

Pentru a estima performanțele spumelor de polipropilenă ca materiale pentru dispozitivele de siguranță pasivă din habitacul au fost testate, în condiții de încărcare statică și dinamică specifice utilizării materialului, o serie de materiale din spumă. Față de planșa bord, aflată din față a habitaculului, considerată zonă de referință susceptibilă pentru un posibil impact, din tensiunile care se impun în timpul unui impact frontal - în principal de compresie -, este firescă identificarea răspunsului materialului în compresie dinamică.

Pentru a suporta sarcini severe care implică rate de deformare ridicate, spumele menționate mai sus sunt proiectate pentru a absorbi energia maximă. Astfel, este foarte important ca înainte de a începe optimizarea proiectării acestor structuri, să se observe și să se înțeleagă mai întâi comportamentul acestor materiale supuse condițiilor reale de utilizare.

Un prim material avut în vedere este polipropilena expandată (EPP), caracterizată de densitate

redușă, elasticitate ridicată, rezistență la acțiunea acizilor, a substanțelor chimice alcaline, a uleiurilor și a solvenților. În plus, acest material nu absoarbe ușor apă, nu este toxic și poate fi ușor reciclat. Toate aceste proprietăți fac EPP-ul potrivit pentru ambalarea și expedierea produselor în care este necesară protecția la șocuri în timpul manipulării (electronice și dispozitive medicale). Cel mai important, poate servi drept material de bază pentru barele de protecție din industria producătoare de piese auto, datorită faptului că este puternic, ușor, rezistent la șocuri, izolează căldura și absoarbe zgomotul.[102]

Un alt material este polistirenul expandat EPS, care este o spumă rigidă și dură cu celule închise, format din granule de polistiren prezentând avantajul de a putea produce produse cu densități diferite, poate fi ușor turnat în foi cu grosimi variate sau, după caz, design flexibil. Polistirenul expandat este un material polimeric, semi transparent, amorf sau cristalin, termoplastic. Polistirenul expandat se fabrică prin polimerizare din monomeri de stiren, o hidrocarbură sub formă lichidă, având punctul de topire la aproximativ 100 de grade Celsius. Acest material devenit unul dintre cele mai răspândite mase plastice din lume, are un consum mondial anual de sute de milioane de tone fiind folosit în toate ramurile industriale dar mai ales în domeniul construcțiilor ca și izolator. Polistirenul expandat sau prescurtat EPS (în limba engleză = expanded polystyrene) are structura celulară deschisă. Materialul are o permeabilitate la vapori destul de redusă în funcție de tipul acestuia dar și de proprietăți fizico mecanice și termice. Pe de o parte polistirenul este un material care păstrează o temperatură constantă dar și protejează foarte bine la acțiuni mecanice ce pot deteriora produsele. În plus, proprietățile EPS-ului asociate sunt relativ insensibile la schimbările de temperatură în comparație cu majoritatea celorlalte spume cu celule închise. EPS-ul este utilizat în primul rând ca izolator structural pentru a îmbunătățirea eficienței energetice a pereților și podelelor clădirilor[34][11][29][103].

Al treilea material este Piocelan-ul, un tip de spumă de polistiren extrem de versatil obținut prin adăugarea de poliolefină la polistirenul convențional. Astfel, Piocelan-ul păstrează calitățile polistirenului (nivel ridicat de rigiditate și greutate redusă), îmbunătățind în același timp absorbția șocurilor, flexibilitatea, rezistența la substanțe chimice și proprietățile mecanice. Acest lucru îl face mai potrivit pentru ambalarea și suporturile de încărcare a componentelor electronice și de precizie și a modelelor robuste.

Proprietățile mecanice ale acestor tipuri de materiale celulare industriale sunt bine cunoscute la compresie cvasi-statică și, de asemenea, la solicitări mari. Pentru cele două teste sunt folosite, trei materiale din spumă: spume de polipropilenă expandată (EPP), polistiren expandat (EPS) și Piocelan (60 grame/litru). Eșantioanele de probă extrase din blocuri mari de spumă la 30 mm înălțime și 36x33 mm, iar pentru al doilea bloc de testare la 30 mm înălțime și 140x33 mm (Figura 2.2.) (<http://www.smat2019.ro/index.php/smat/2019/paper/view/183>)



a)



b)

Figura 2.2. Eșantioanele de probă folosite la mașina de testare (a) și bancul de testare(b)[104]

Pentru țările din UE (Uniunea Europeană), experimentele sunt efectuate în conformitate cu

specificațiile ECE 21. Încărcările de la cvasi-stactice până la dinamice sunt elaborate pentru a studia efectul ratei de deformare asupra răspunsului spumei folosind o mașină de testare convențională (Figura 2.3. b), pentru teste cvasi-stactice la rata de deformare de $0,01$ și $1s^{-1}$. Mașina de testare electronic universal controlată de microcomputer este capabilă să dezvolte o rată de deplasare de 500 mm/min la 1000 hertz și viteză de $0,01\text{ m/s}$.

În Figura 2.3a este prezentată o imagine de ansamblu a modului în care a fost realizat standul experimental compus din: planșa bord, impactorul, sistemul de achiziție, accelerometrul, traductorul, camera video, bariera optică.

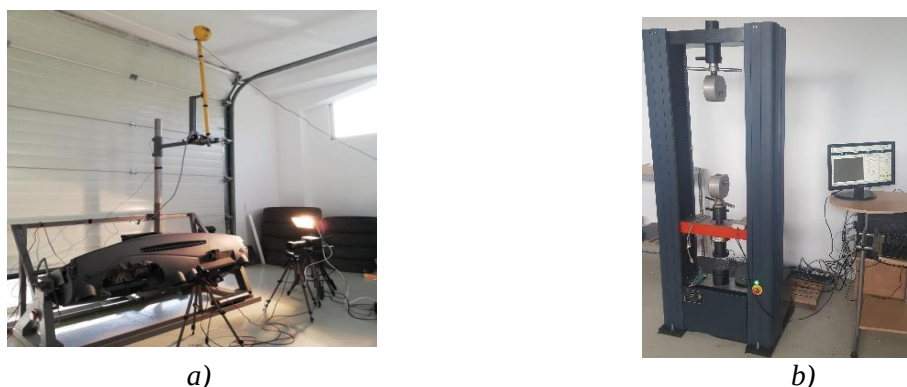


Figura 2.3. Infrastructura de încercare compusă din stand experimental pentru planșa bord (a) și mașina de încercat pentru eșantioanele de materiale (b)[104]

Corespunzător celor trei materiale supuse cercetării experimentale, respectiv materiale EPS, EPP, Piocelan. în figurile 2.6, 2.7 și 2.8 sunt reproduse aspectele eșantioanelor de probă în urma solicitării dinamice de compresiune conform regimului dinamic ilustrat în graficele atașate.

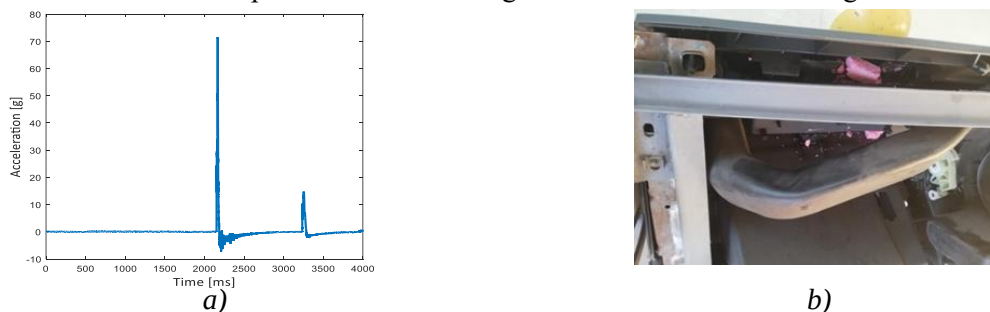


Figura 2.6. Materialul EPS după efectuarea experimentului și accelerația măsurată[104]

2.3. CONCLUZII

În conceptul de „siguranța pasivă a automobilului” măsurilor constructive destinate protecției ocupantului sunt concretizate, în principal, din sistemele de reținere a acestuia și din implementarea componentelor din habitacul cu proprietăți de a minimiza efectele impactului secundar, sens în aplicațiile maselor plastice demonstrează că acestea pot contribui nu numai la estetica interiorului automobilului dar și la asigurarea funcționalității impuse de cerințele regulamentare de protejare la impact, iar un exemplu în acest caz este reprezentat de planșa de bord.

În categoriilor de materiale disponibile amenajărilor din interiorul autoturismelor în scopul optimizării siguranței pasive, sunt reținut ca materiale de interes pentru capacitatea lor mare de a absorbi energia:

- *polipropilena expandată* (EPP), caracterizată de densitate redusă, elasticitate ridicată,

rezistență la acțiunea acizilor, a substanțelor chimice alcaline, a uleiurilor și a solvenților. În plus, acest material nu absoarbe ușor apa, nu este toxic și poate fi ușor reciclat.

- *polistirenul expandat* (EPS), care prezintă avantajul obținerii de produse cu densități diferite, poate fi ușor turnat în foi cu grosimi variate sau, după caz, design flexibil; proprietățile EPS-ului asociate sunt relativ insensibile la schimbările de temperatură în comparație cu majoritatea celorlalte spume cu celule închise.

- *piocelan-ul*, un tip de spumă de polistiren obținut prin adăugarea de poliolefină la polistirenul convențional; spuma hibridă Piocelan oferă o rezistență mai mare la impact și rezistență mecanică comparativă cu spumele EPP și EPS.

În vederea efectuării de investigații experimentale pentru determinarea în cazul celor trei materiale prezentate a performanțelor ca dispozitive de siguranță pasivă în habitacul autoturismelor, sunt prezentate două metode și anume:

- prin răspunsul structural al materialului la impact (variație ridicată față de material) utilizând un stand experimental de probă,
- prin răspunsul la compresie cvasi-statică și, de asemenea, la solicitări mari pentru evidențierea proprietăților mecanice, folosind o mașină de testare convențională la viteza de deformare de 0,01 și 1 s⁻¹

Testele efectuate au relevat importanța efectului densității asupra comportamentului spumei. Astfel, testul a arătat o creștere a rezistenței proporțională cu densitatea spumei, grosimea mărgelui și pereții celulari, ca o consecință a creșterii materialului în vrac din spumă. Cele mai bune proprietăți în ceea ce privește absorbția de energie sunt cele ale polipropilenei expandate (EPP).

CAPITOLUL 3 – STUDIU TEORETIC ȘI EXPERIMENTAL AL STRUCTURILOR AUXETICE

Structurile auxetice pot fi simple molecule, cristale sau o anumită structură a materiei macroscopice. Termenul auxetic[105] derivă din limba greacă αὐξητικός (auxetikos) care înseamnă „ceea ce tinde să crească” și își are rădăcina în cuvântul αὐξήσις, sau auxesis, care înseamnă „creștere”. De fapt, în încercarea de a obține o mai bună cunoaștere a mecanismelor auxetice, au fost propuse și dezvoltate diverse modele bazate pe geometrie nu numai pentru a explica coeficientul Poisson negativ observat în materialele auxetice naturale, ci și pentru a acționa ca un model pentru proiectarea și fabricarea de noi materiale artificiale auxetice. Se spune că majoritatea materialelor cu coeficient Poisson negativ sunt solidele celulare, cum ar fi spumele[106][107][84].

Alderson[60] a propus proiectarea fagurilor tetra-chirali, anti-tetra-chirali, tri-chirali și anti-tri-chirali, la care ligamentul anti-chiral formează o formă de jumătate din lungimea pliului de deformare în timp ce ligamentul chiral formează o formă de undă completă. În afara acestor modele tradiționale de celule unitare, sunt propuse, după cum se ilustrează în Figura 3.2, noi metamateriale auxetice tetra-chirale și anti-tetra-chirale hibride.

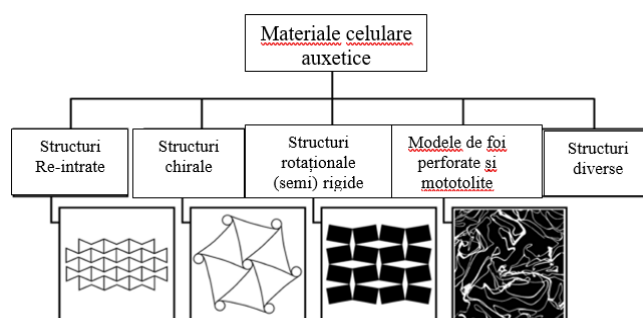


Figura 3.2. Clasificarea metamaterialelor celulare auxetice[113]

În ultimele trei decenii, de când Lakes[118] a raportat primele structuri auxetice reintrant de spumă în 1987, s-au făcut progrese uriașe în acest domeniu. Cu toate acestea, multe limitări importante trebuie abordate, înainte ca materialele auxetice să fie transformate în mărfuri pentru consumul larg. Aceste provocări care trebuie rezolvate includ costurile ridicate și limitările tehnicilor de fabricație aditivă, porozitatea inevitabilă în structurile auxetice fabricate suplimentar care le afectează negativ capacitatea mecanică sub sarcină și lipsa sistemelor 3D care demonstrează comportamentul secundar în compresie[119][94]. Aceste limitări pot compromite enorm performanța mecanică.

3.1. ANALIZA NUMERICĂ ȘI ANALITICĂ A STRUCTURII TETRA-ANTI-CHIRALE 2D SUB SARCINI COMPRESIVE

Investigarea a trei configurații ale unei structuri tetra-anti-chirale a fost selectată deoarece la

solicitări axiale de compresie sau de întindere prezintă deplasări de-a lungul axei orizontale deplasări simetrice.[61]

Prima configurație a structurii este construită cu lungimile ligamentelor în direcții ortogonale x și y definind un raport de 1:1; pentru a doua structură a fost utilizat un raport de 1,5:1; iar pentru a treia structură, lungimile ligamentelor definesc un raport de 1:1,5.

Având în vedere constrângerile impuse de procesul de fabricație utilizat pentru eşantioanele de studiu (tăiate cu laser- mașina – AMADA 3.5kW) și de echipamentele disponibile pentru testarea și analiza datelor, lungimea bazei ligamentelor a fost stabilită la 20 mm, în timp ce grosimea a fost stabilită la 3 mm. Raza nodului a fost determinată printr-o analiză parametrică folosind formula teoretică pentru estimarea coeficientului Poisson definit de Mousanezhad et al.: [54]

$$\nu_{xy} = - \frac{6 \cdot (r/L)^2}{6 \cdot (r/L)^2 + (t/L)^2} \quad (3.1)$$

unde L definește lungimea ligamentelor; r este raza nodului inelar, iar t este grosimea ligamentului.

Formula menționată mai sus poate fi utilizată exclusiv pentru structuri cu un raport de 1:1 între lungimile ligamentelor în direcțiile x și y. Rezultatele obținute folosind ecuația (3.1) sunt prezentate în Figura 3.4.

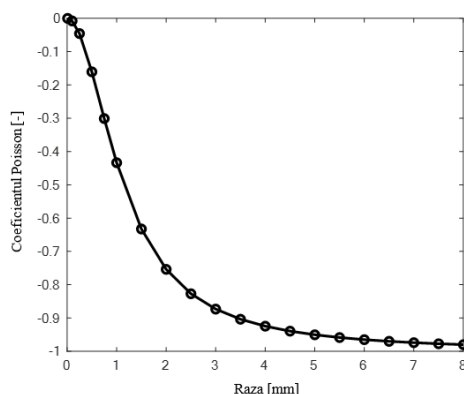


Figura 3.4. Variația coeficientului Poisson ca funcție a razei nodului.[61]

Setul selectat de parametri dimensionali (20 mm și 3 mm) oferă limita superioară pentru raza nodului de aproximativ 8 mm, ceea ce permite un decalaj de 1 mm disponibil pentru deformarea structurii. Rezultatul prezentat în Figura 3.4 relevă că, după o schimbare semnificativă a valorii coeficientului Poisson între o valoare nulă și o rază de 3 mm, acesta rămâne cvasistaționar pentru valori cuprinse între 5 mm și 8 mm.

În acest scop, utilizarea analizei elementelor finite a fost identificată ca o metodă eficientă pentru investigarea corectă a structurii. Modelul numeric a fost definit folosind numai elemente finite hexaedrice cu o dimensiune medie de 1 mm. Această soluție permite trei elemente de plasare prin grosimea și lățimea ligamentelor. Pentru analiza numerică, LS-Dyna a rezolvat implicit [57][68][70] (**LSOLVR** = 2 și **NSOLVER** = 12).

Modelul alocat structurilor deformabile este ***MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY**. Funcția de randament Von Mises (Φ) este implementată de:

$$\Phi = \frac{1}{2} \cdot s_{ij} \cdot s_{ij} - \frac{\sigma_y^2}{3} \leq 0 \quad (3.2)$$

unde s_{ij} este deviatorul de tensiune și σ_y este raza curentă a suprafeței de randament definită:

$$\sigma_y = \beta \cdot [\sigma_0 + f_h(\epsilon_{eff}^p)] \quad (3.3)$$

$f_h(\epsilon_{eff}^p)$ este funcția de întărire definită de datele tabelare, luând în considerare tensiunea plastică efectivă

Forța a fost aplicată în trepte, variind de la 0 la 4 [kN]. Figura 3.5a) prezintă starea de efort unitar, în timp ce Figura 3.5 b) prezintă starea deformată plastic la sfârșitul ciclului de încărcare.

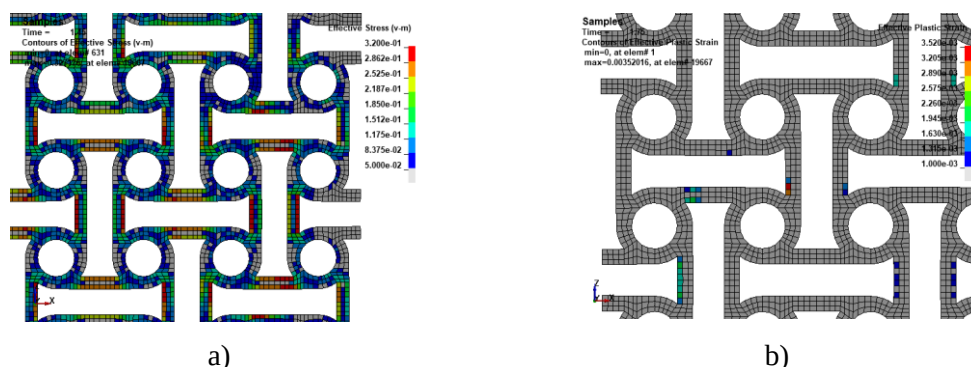


Figura 3.5. Rezultate obținute în urma analizei numerice. a) starea de tensiune; b) tensiunea plastică la sfârșitul ciclului de încărcare.[61]

Experimentele au fost efectuate pe o mașină de testare universală computerizată (clasa 0,5/sarcină maximă 50 kN) care are capacitatea de a efectua teste conform programului definit de utilizator. În cazul prezentat, programul a fost definit ca o serie de pași de încărcare de până la 2,0 kN, pentru care deplasarea a fost menținută constantă timp de 120 de secunde. Între aceste etape, pentru a oferi o condiție de încărcare cvasi-statică, viteza de deplasare a fost stabilită la 1 [mm/min].

Pentru metoda de corelare a imaginilor digitale pe eșantionul de încercare a fost inscripționat vizibil un câmp de linii, iar pentru a urmării modificărilor de formă ale marcajului în timpul probei a fost utilizată o cameră digitală, dotată cu cu macro lentile. Camera a fost acționată de un program pe calculator ce permite declanșarea printr-un interval de timp definit de utilizator (în acest caz, intervalul a fost setat la 10 secunde).

Figura 3.7 prezintă istoricul forței (axa verticală stângă) și a deplasării (axa verticală dreaptă) ca funcție a timpului de testare. Investigarea mai multor imagini este capabilă de a contabiliza poziționarea eșantionului în timpul sarcinii și posibilele erori de măsurare.

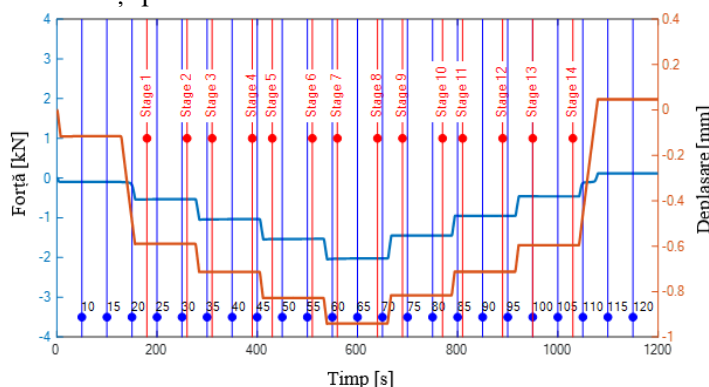


Figura 3.7. Istoricul forțelor și deplasărilor.[61]

Curbele de încărcare-descărcare urmează aceeași cale pentru structurile testate arătând, așa

cum s-a reliefat în studiul aferent identificării pe sarcina capabilă, că sarcina aplicată a deformat structura numai în domeniul elastic. Pentru fiecare etapă, s-a calculat valoarea medie a deplasărilor relative de-a lungul axei verticale, de încărcare și axa orizontală, delimitând intervalele între care s-au obținut datele necesare estimării valorii coeficientului Poisson. Procesul de corelare a imaginii digitale a fost realizat folosind aplicația software GOM Correlate.

Soluția analitică folosită ca referință pentru studiul curent a relevat că pentru o singură celulă, coeficientul Poisson ar putea fi determinat folosind deplasarea relativă de-a lungul axelor orizontale și verticale.

Analiza experimentală a relevat faptul că deplasarea relativă de-a lungul axei orizontale nu este constantă, ci crește de la capetele eșantionului (secțiunile care au fost utilizate pentru fixarea structurii) spre mijloc, astfel că pentru calculul coeficientului Poisson se pot folosi valorile medii ale deplasării relative de-a lungul axelor orizontală și verticală.

Exemple în acest sens sunt ilustrate în figurile 3.9, 3.10 și 3.11, pentru structurile corespunzătoare A, B și C, în care imaginile a) prezintă, deplasarea transversală ca rezultat al procesului de corelare a imaginii digitale, iar imaginile b) prezintă evoluția coeficientului Poisson și a valorii medii pe toate etapele analizei.

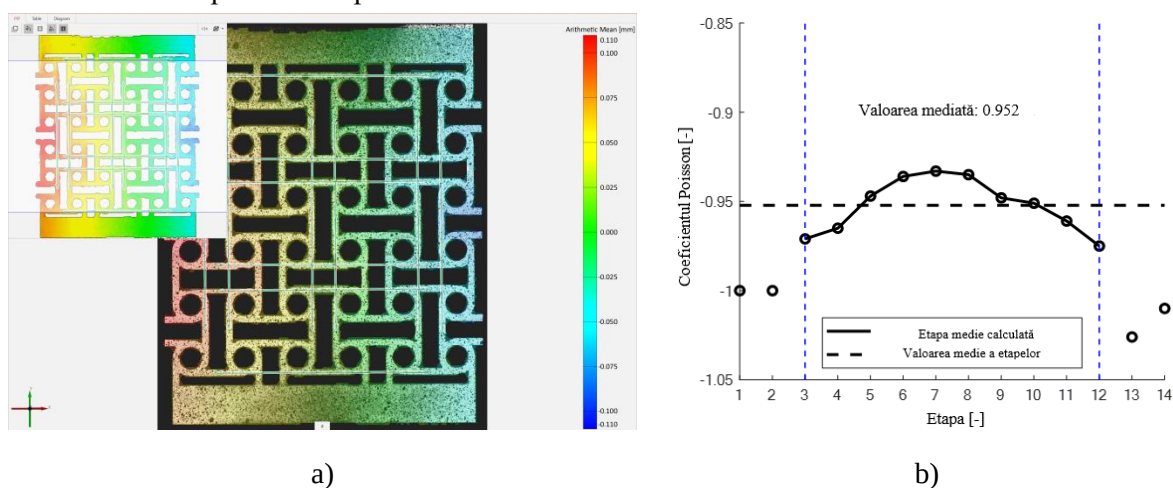


Figura 3.9. Structura A

a) deplasare X experimentală; b) Coeficientul Poisson comparativ cu sarcina aplicată.[61]

Având ca bază de referință pentru comportamentul real al materialelor considerate rezultatele cercetărilor experimentale mai sus prezentate, au fost dezvoltate și rezolvate folosind, Ls-Dyna, modele numerice 3D al structurilor cercetate utilizate ca repere pentru studiul analitic și numeric pentru modele de element finit cu ligament simplificat. Așa cum s-a demonstrat, modelul de element finit 3D, care este capabil să afișeze starea de stres în structură, este utilizat ca instrument complementar pentru analiza experimentală. În modelul 3D utilizat, pentru evaluarea coeficientului Poisson valoarea estimată fiind reprezentată ca o funcție a forței de compresie aplicate.

Pentru elementele finite hexaedrale 3D care compun modelul numeric utilizat pentru analiza numerică, i s-a atribuit un model matematic complet integrat (ELFORM = 2). Sarcina maximă aplicată a fost de 2 kN și a fost atinsă prin trei etape intermediare. Deși, așa cum s-a menționat anterior, s-a utilizat rezolvatorul implicit, pentru fiecare etapă specifică, încărcătura a fost menținută constantă pentru o perioadă scurtă de timp. Sunt raportate rezultatele care afișează

deplasarea X înregistrată de structuri, precum și coeficienții Poisson. Figura 3.12 prezintă rezultatele obținute pentru structura A. Deplasarea este simetrică față de axa verticală mediană. Valoarea obținută pentru coeficientul Poisson variază între -0.896 și -0.899. Diferența dintre aceste două valori este de doar 0,3%.

Analiza conduce la concluzia că sunt necesare mai multe etape de încărcare pentru structuri complexe pentru a se obține o soluție fiabilă pentru coeficientul Poisson.

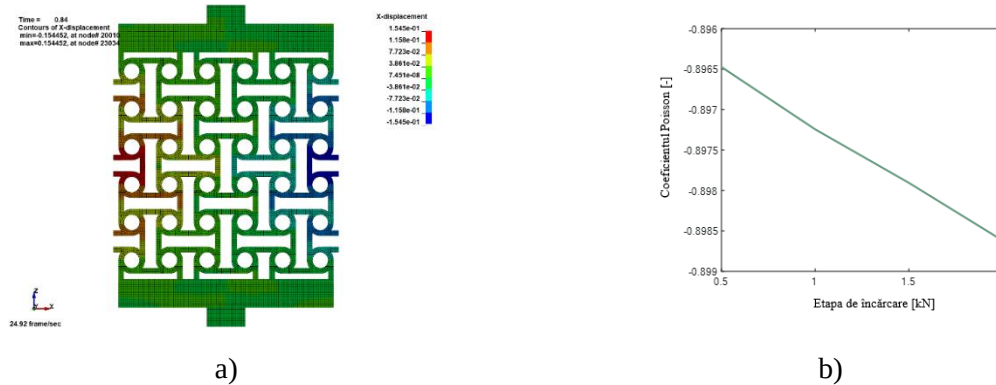


Figura 3.12. Structura A
a) deplasare X; b) Coeficientul Poisson comparativ cu sarcina aplicată.[61]

3.2. ANALIZA TEORETICĂ A STRUCTURII TETRA-ANTI-CHIRALE

În condiții de încărcare plană, deformarea dominantă a structurilor anti-tetra-chirale este reprezentată de îndoirea ligamentului, astfel că pentru derivarea soluției analitice a deplasării se utilizează teoria de deformare la încovoiere elastică liniară a lui Euler – Bernoulli în următoarele ipoteze:

- nodurile (sau cercurile) sunt considerate rigide;
- forțele interne orientate într-o direcție perpendiculară față de forțele exterioare aplicate;
- forțele interne sunt dictate de comportamentul cinematic observat (rotația nodurilor rigide);
- solicitările forfecare ale ligamentelor sunt neglijate.[54]

Principiul conservării lucrului mecanic afirmă că având în vedere poziția de echilibru a unui corp elastic, lucrul mecanic (W) al forțelor externe (F_i) ce produce o deplasare (δu_i) este egală cu energia consumată la deformare(U):

$$\delta W = \delta U \quad (3.4)$$

Energia potențială a unui sistem (Π) poate fi exprimată în:

$$\Pi = U - W \quad (3.5)$$

Figura 3.16 prezintă o comparație între rezultatele obținute folosind ecuația (3.1) și ecuația (3.31) în cazul unei structuri cu ligamente de lungimi egale ($l_x = l_y$) și o secțiune pătrată dreptunghiulară ($l_x = l_y$) (cu lățimea de 1 mm pentru structuri cu lungimi diferite ale ligamentelor).

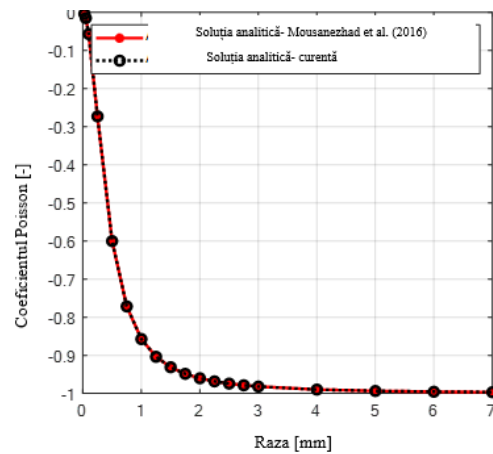


Figura 3.16. Coeficientul Poisson / ecuația (3.1) vs. ecuația (3.31)[54]

Pentru studiul de față, a fost dezvoltată o aplicație MATLAB pentru a investiga comportamentul structurilor tetra-anti-chirale. Figura 3.17 prezintă interfața proiectată pentru această aplicație.

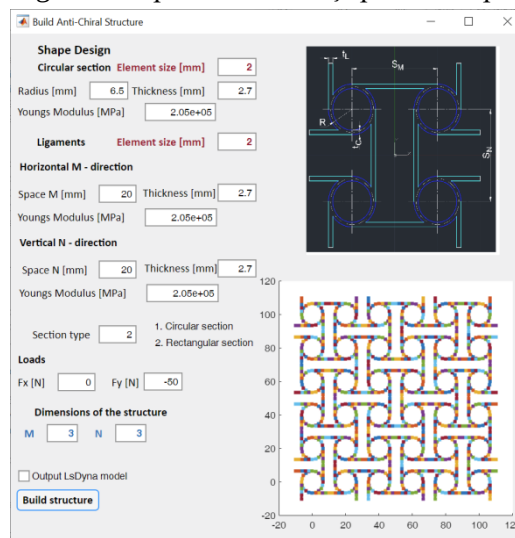
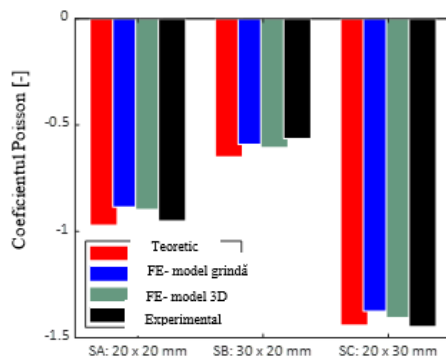
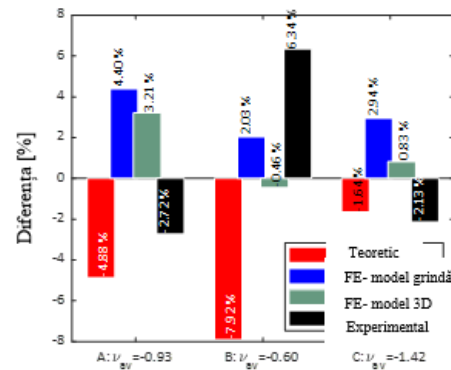


Figura 3.17. Aplicația MATLAB pentru definirea modelelor cu elemente finite.[120]

Sunt analizate patru metode pentru analiza structurilor tetra-anti-chirale (care pot fi aplicate și în alte configurații), metode care implică analize experimentale, modelare numerică și o soluție analitică.



a)



b)

Figura 3.25. Rezultate cumulate.[120]

- a) Valorile coeficientului Poisson estimat de diferite modele; b) diferențe între valorile individuale valoarea medie pentru fiecare conFigurație a structurii.

Folosind aplicația MATLAB, se pot cerceta modele complexe. La modulul folosit la construirea modelului numeric a fost adăugată o caracteristică definită ca “taper” și anume raportul dintre grosimile unui ligament la capăt (lângă nod) și în punctul de mijloc, grosimi liniar crescătoare. Figura 3.28 a) prezintă conFigurația modelului umerical pentru un raport conic de 0,25, iar Figura 3.28 b) pentru un raport conic de 2,0.

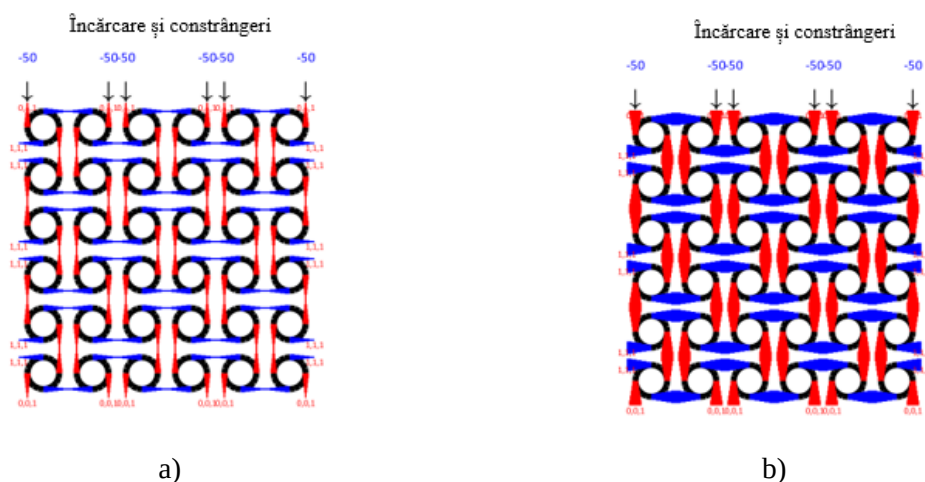


Figura 3.28. Struttură cu ligamente cu grosime variabilă.[120]

- a) raport mijloc până la capăt: 0,25; b) raport mijloc până la capăt: 2,0.

3.3. MODEL TEORETIC PENTRU ESTIMAREA ZONEI DE PLATOU A FORȚEI PENTRU PROCESUL DE DEFORMARE A STRUCTURILOR AUXETICE 3D ANTI-TETRA-CHIRALE

O analiză a rezultatelor experimentale a arătat că forța etapei platoului ar putea fi estimată folosind caracteristicile geometrice ale modelului și modelul teoretic al lui Bernoulli pentru elementul ligament. Cercetările științifice existente în legătură cu mecanica celulei unitare care alcătuiește structura auxetică, nu au folosit ca intrare poziția relativă (marginea de mijloc) [13, 25] ci au fost orientate numai spre estimarea raportului Poisson. Prin urmare, unele dintre aceste rezultate sunt aplicate structurilor circulare investigate în această lucrare.

Structura studiată este o structură 3D este de tip anti-tetra-chiral și este derivată dintr-o structură plană - auxeticul 3D fiind fabricat prin tăierea cu laser din semifabricat de tip țevă. Avantajul unei structuri 3D constă în faptul că poate oferi autoportanță sub sarcini de compresie și de tensiune cu lățimi relativ subțiri (în acest caz, grosimea piesei de prelucrare a țevii). Mai mult, structura anti-chirală nu prezintă o deplasare transversală (asemănătoare forfecării) a capetelor sub sarcini verticale. Deplasarea transversală înregistrată în acest caz este consecința comportamentului auxetic. Modelul teoretic al acestei lucrări se bazează pe formarea unei articulații plastice și urmează trei ipoteze:

- I: nodul rămâne nedeformat - este o consecință a analizei imaginilor de lucru experimentale.

- a-II^a : modelul ipotezei Bernoulli - se bazează pe revizuirea literaturii menționată anterior și a fost considerat a simplifica modelul.
- a-III^a : forțele radiale dezvoltate în timpul compresiei pot fi neglijate - este o consecință a analizei rezultatelor simulării numerice folosind un model validat experimental.

O etapă de platou poate fi o bază de plecare pentru dezvoltarea unei structuri de siguranță capabile să ofere un răspuns prescris sub sarcini compresive. Mai mult, există posibilitatea grupării structurilor pentru a se obține un răspuns programat în mai multe etape. Cu toate acestea, discuția prezentată în această lucrare indică atât aplicarea, cât și limitările modelului teoretic propus, aplicabil pentru dezvoltarea structurilor pliabile.

Eșantioanele pentru investigații experimentale au fost fabricate prin tăierea cu laser dintr-o țeavă (mașină cu laser TRUMPF) din oțel S320, având diametrul exterior de 40 mm, și grosimea peretelui tubului de 2,0 mm.

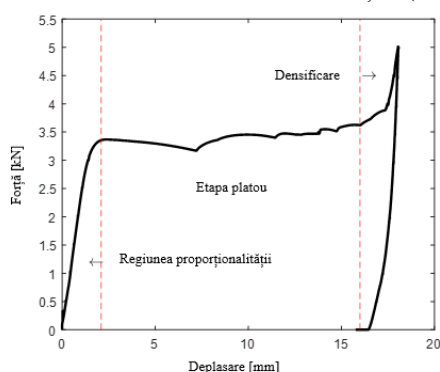
Modelul structurii auxetice este de tip tetra-anti-chiral[115], având următoarele caracteristici:

- raza interioară a nodului: 4,2 mm;
- grosimea ligamentului: 3,1 mm;
- lungimea ligamentelor: 20,9 mm (definită de dimensiunile piesei de prelucrat)

Figura 3.31 a) prezintă dependența grafică dintre forța deformatoare și deplasare, iar Figura 3.31 b) prezintă aspectele fizice ale eșantionelor utilizate pentru lucrări experimentale. Din Figura 3.31 a), în care se prezintă graficul forță-deplasare sunt relevante următoarele trei zone: prima zonă este zona de proporționalitate între forța deformatoare și deformația produsă, a doua zonă definește zona platoului, respective zona în care forța deformatoare este menținută constantă, (forța de deformare), iar a treia zonă este definită de densificarea (creșterea densității) structurii;

Din Figura 3.31.b), în care sunt prezentate aspectele fizice ale eșantionului de probă în două stări și anume nedeformat (C_0) și deformat (C_d), rezultă în principal următoarele:

- față de înălțimea eșantionului nedeformat ($L_0=140$ mm), la eșantionului deformat ($L_d=131,8$ mm), deformarea relativă verticală, este ($\varepsilon_v=0,1$).
- față de circumferința eșantionului nedeformat ($S_0=125,66$ mm) circumferința eșantionului deformat se reduce ($S_d=112,72$ mm), astfel obținându-se o deformare relativă a circumferinței ($\varepsilon_H=0,103$).



a)



b)

Figura 3.31. Rezultate experimentale[115]. a) Graficul forță-deplasare: b) aspectele fizice ale eșantionului în starea nedeformată și respectiv în starea deformată

Corespunzător măsurărilor efectuate, pentru eșantionul de probă mai sus analizat, pentru coeficientul Poisson, definit ca rapori între deformațiile specifice pe cele două direcții se obține

valoarea:

$$v_{HV} = -\frac{\varepsilon_H}{\varepsilon_V} = -\frac{0.103}{0.1} \approx -1 \quad (3.45)$$

Respectiv în cazul în care ligamentele sunt de lungime egală:

$$v_{HV} = -\frac{\frac{1}{2 \cdot l_H} \cdot \left[\frac{l_V}{l_V} \cdot (l_V \cdot l_H)^2 + \frac{l_H}{l_H} \cdot (l_H \cdot l_V)^2 \right] \cdot \frac{2 \cdot r^2}{(l_V \cdot l_H + l_H \cdot l_V)^2}}{\frac{1}{2 \cdot l_V} \cdot \frac{2 \cdot l_H}{A} + \left[\frac{l_V}{l_V} \cdot (l_V \cdot l_x)^2 + \frac{l_H}{l_H} \cdot (l_H \cdot l_V)^2 \right] \cdot \frac{2 \cdot r^2}{(l_V \cdot l_H + l_H \cdot l_V)^2}} = -0.953 \quad (3.46)$$

Unde:

$$A = t \cdot w; \quad l_H = \frac{t^3 \cdot w}{12}; \quad l_V = \frac{t^3 \cdot w}{12}; \quad l_H = L_H/2; \quad l_V = L_V/2 \quad (3.47)$$

Procesul complet pentru analiza imaginii este prezentat în Figura 3.32.

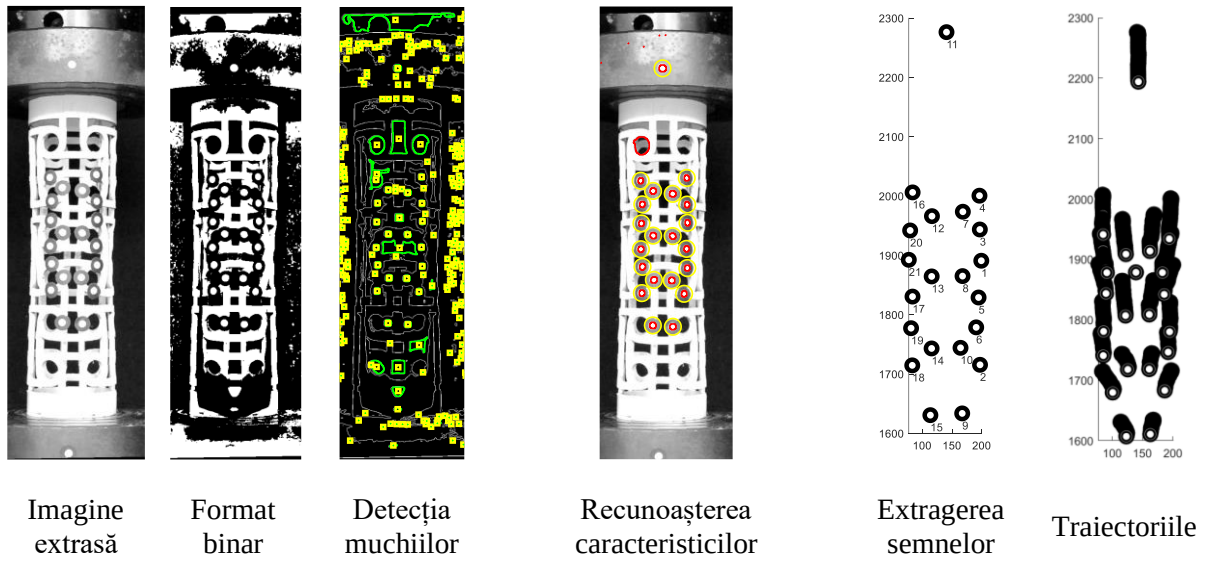


Figura 3.32. Metodologia de procesare a imaginii digitale.

La procesarea imaginilor digitale, pentru a păstra doar informațiile semnificative, imaginea epruvetei a fost extrasă. Funcțiile de îmbunătățire a imaginii în Matlab au fost realizate pentru a îmbunătăți calitatea acestora într-un format binar. În această etapă a fost aplicată procedura de detecție a muchiiilor pentru a extrage contururile din imagine. Contururile au fost analizate ca seturi de date, iar recunoașterea caracteristicilor a fost efectuată pentru a identifica formele care seamănă cu niște cercuri.[115] Pentru a completa informațiile studiului experimental și pentru a furniza datele necesare pentru analiza numerică, un eșantion de probă a fost supus alungirii prin solicitare la tensiune conform programului de testare prezentat Figura 3.33.

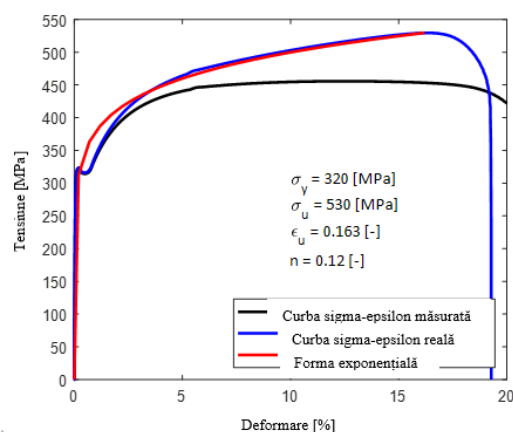


Figura 3.33. Programul de testare la tracțiune [115]

Modelul numeric a fost dezvoltat în conformitate cu nomenclatura Ls-Dyna, definit folosind elemente finite hexaedrice. În acest scop, a fost dezvoltată o procedură MATLAB pentru a obține un model numeric capabil de parametrizare. Modelul de bază, prezentat în Figura 3.34 a), este nodul împărțit între secțiuni Figura 3.34 b) pentru a permite o lungime diferită a ligamentelor în direcția orizontală și verticală.

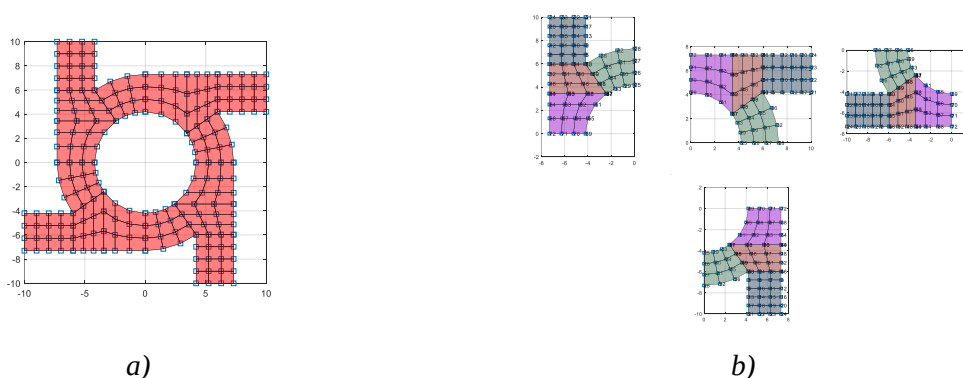


Figura 3.34. Modelul numeric al nodului inițial. a) Secțiunea și zonele exterioare; b) Identificarea zonelor cu diferite culori pentru a permite definirea unui model numeric care conține doar opt noduri ale elementului.[115]

Figura 3.35. Trecerea de la modelul 2.5D la 3D.[115]

Ținând seama că lungimea modelului 2,5D devine circumferința modelului 3D, ($L=2 \cdot \pi \cdot R$), iar lățimea modelului 2,5D devine înălțimea modelului 3D, coordonatele au fost actualizate, unghiul (α) fiind rezultat din lungimea curentă (l) măsurată de-a lungul axei orizontale de la stânga la dreapta. Ulterior coordonatele fiecărui nod 3D sunt determinate de un set de coordonate cilindrice. Coordonata de-a lungul axei verticale este păstrată din modelul 2.5D.

Modelul material alocat structurilor deformabile este *** MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY**. Contactul general ***CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE** este implementat. Structura este zdrobită de un perete rigid în mișcare definit *** RIGIDWALL_GEOMETRIC_FLAT_MOTION**.

Suportul inferior este definit de un perete rigid simplu *** RIGIDWALL_PLANAR** și o constrângere suplimentară este adăugată la primul rând de noduri de jos de către *** CONSTRAINED_GLOBAL**.

Figura 3.37 a) prezintă rezultatul obținut din experimente și simularea numerică, în timp ce Figura 3.37 b) prezintă un detaliu al forței dezvoltate în timpul platoului conturat.

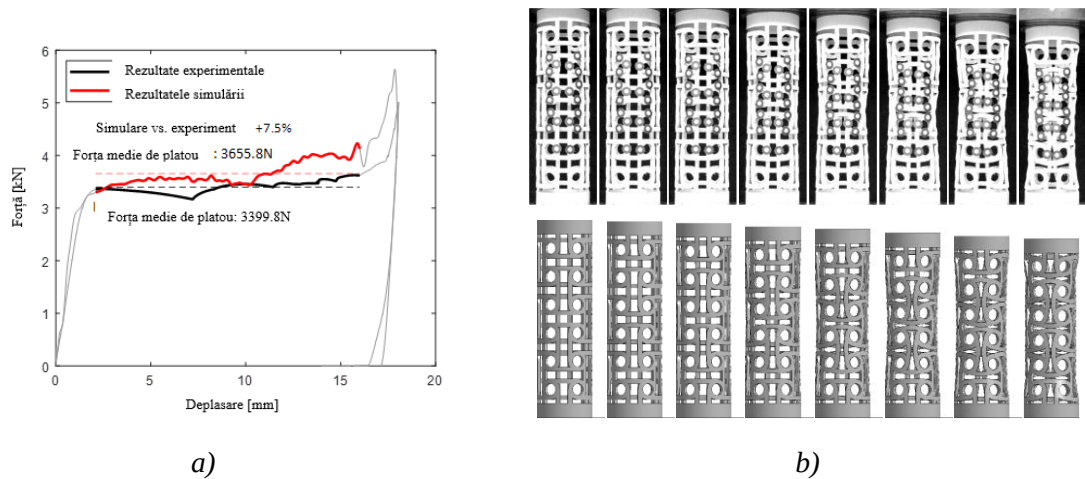


Figura 3.37. Experiment vs. simulare: a) curba forță-deplasare cu zona platoului conturată; b) procesul de deformare al structurii în timpul experimentului comparat cu simularea numerică.[115]

În timpul procesului de deformare, forțele care acționează asupra nodurilor produc un moment de încovoiere care se aplică ulterior ligamentelor. Dacă centrul nodului este considerat ca o referință, ligamentele sunt îndoite spre exterior, închizând decalajul inițial (δ) dintre celule, așa cum este prezentat în Figura 3.39 b). Prin urmare, decalajul inițial dintre celule poate fi considerat o referință pentru deplasarea maximă capabilă a ligamentului (la mijloc) sub sarcină de îndoire și, atunci când ligamentele sunt în contact, decalajul curent (δ^*) devine zero, așa cum este prezentat în Figura 3.39 c).

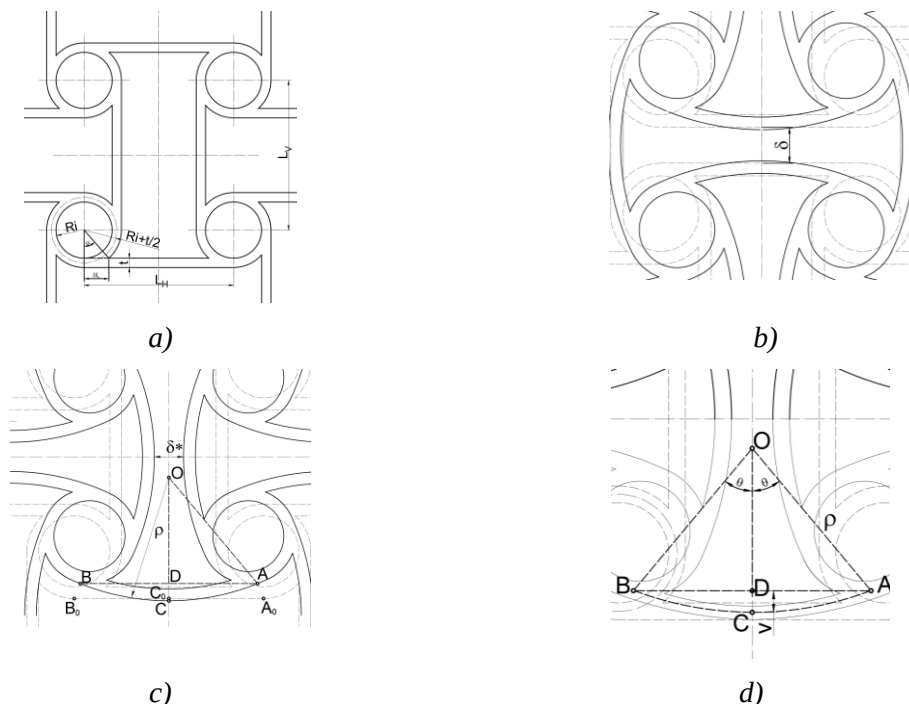


Figura 3.39. Caracteristici geometrice: a) dimensiunea geometrică a celulei unitare; b) definiția decalajului inițial; c) formularea modelului geometric; d) devierea ligamentului[115]

Deplasarea verticală a marginii ligamentului (v) este determinată folosind raza de curbură (ρ) și lungimea ligamentelor.

Modelul numeric prezentat în lucrare este versatil și a fost dezvoltat pentru a adapta diverși parametri utili pentru procesele de validare și investigație. Parametrii care influențează

coeficientul Poisson au fost utilizați pentru a defini configurațiile specifice modelului numeric, iar rezultatele au fost comparate cu rezultatele teoretice. Dacă ligamentele se află într-un raport rezonabil în comparație cu raza nodului, modelul analitic poate oferi rezultate bune. Modelul teoretic prezentat în secțiunea anterioară a fost implementat într-o aplicație MATLAB, iar rezultatele sunt discutate în această secțiune. În același timp, au fost construite modele numerice pentru a surprinde caracteristicile geometrice.

3.4. CONCLUZII

Structurile auxetice, fie simple molecule, cristale sau o anumită structură a materiei macroscopice, au fost propuse și dezvoltate în diverse modele nu numai pentru a explica coeficientul Poisson negativ, observat la materialele auxetice naturale, ci și pentru a acționa ca un model pentru proiectarea și fabricarea de noi materiale auxetice, reținându-se că majoritatea materialelor cu coeficient Poisson negativ sunt solidele celulare de tipul spumelor.

Datorită structurii celulare și modului de deformare la îndoire sau la răsucire a elementelor din structura materialele auxetice, aceste materiale, cu rigiditate relativ scăzută, și-au găsit aplicații la fabricarea de piese cu rigiditatea redusă, fără cerințe deosebite de rezistență mecanică și duritatea, dar cu absorbția mărită de energie, caracteristici conform cărora în prezenta cercetare este investigată posibilitatea utilizării acestor materiale ca materiale de protecție pasivă a ocupanților din autoturisme.

În sensul celor de mai sus, un prim demers al cercetării științifice efectuate asupra structurilor tetra-anti-chirale, este reprezentat de corelarea metodelor de studiu experimental, analitic și virtual, prin modelare numerică.

Investigațiile experimentale s-au făcut pentru trei configurații ale unei structuri tetra-anti-chirale constituite cu lungimile ligamentelor în direcții ortogonale x și y aflate în raportul 1:1 pentru prima structură, pentru a doua structură a fost utilizat un raport de 1,5: 1 iar pentru a treia structură, lungimile ligamentelor definesc un raport de 1: 1,5.

Având în vedere constrângerile impuse de procesul de fabricație utilizat pentru eșantioanele de studiu și de echipamentele disponibile pentru testarea și analiza datelor, lungimea bazei ligamentelor a fost stabilită la 20 mm, în timp ce grosimea a fost stabilită la 3 mm. Raza nodului, cuprinsă între 5 ... 8 mm, a fost determinată printr-o analiză parametrică în funcție de valorile coeficientului Poisson.

Corespunzător celor trei eșantioane supuse probelor, din seturile de date forță-deplasare obținute în timpul experimentelor, când sarcina aplicată a deformat structura numai în domeniul elastic, analiza experimentală a relevat faptul că deplasarea relativă de-a lungul axei orizontale nu este constantă, ci crește de la capete eșantionului spre mijloc, astfel că pentru calculul coeficientului Poisson se pot folosi valorile medii ale deplasării relative de-a lungul axelor orizontală și verticală.

Având ca bază de referință pentru comportamentul real al materialelor considerate rezultatele cercetărilor experimentale, au fost dezvoltate și rezolvate folosind, Ls-Dyna, modele numerice 3D al structurilor cercetate, utilizate ca repere pentru studiul analitic și numeric pentru modele de element finit cu ligament simplificat.

Pentru evaluarea coeficientului Poisson, având ca bază de pornire teoria de deformare la încovoiere elastică liniară a lui Euler – Bernoulli în următoarele ipoteze:

- nodurile (sau cercurile) sunt considerate rigide;

- forțele interne orientate într-o direcție perpendiculară asupra stresului aplicat extern;
- forțele interne sunt dictate de comportamentul cinematic observat (rotația nodurilor rigide);
- deformările de forfecare ale ligamentelor sunt neglijate.

a fost elaborată o metodologie analitică de studiu

Pe măsură ce au fost obținute rezultatele numerice pentru modelul analitic al elementului cu ligament, a fost elaborată o procedură pentru exportarea modelului în format LsDyna.

Rezultatele obținute în urma simulării LsDyna sunt de acord cu rezultatele obținute anterior și, de asemenea, cu rezultatele obținute prin rezolvarea soluției analitice. Din prezentarea în mod cumulat a rezultatelor obținute prin experimente, simularea numerică 3D, folosind modelul elementului finit al ligamentului și soluția analitică a rezultă că diferențele variază între $-7,92\%$ și $6,34\%$, respectiv într-un interval de valori prin care se confirmă, în general, că există un acord bun între toate seturile de date.

În ultima parte a capitolului se propune un model teoretic pentru estimarea zonei de platou a forței pentru procesul de deformare a structurilor auxetice 3D anti-tetra-chirale. Modelul prezentat în lucrare este versatil în sensul că este dezvoltat pentru a se putea adapta la diverși parametri utili pentru procesele de validare și investigație, iar parametrii care influențează coeficientul Poisson au fost utilizați pentru a defini configurațiile specifice modelului numeric.

CAPITOLUL 4 – MODELAREA NUMERICĂ A ANSAMBLULUI PLANȘA BORD

Pentru optimizare structurilor sunt utilizate metode extensive de testare însă acestea, dincolo de faptul că sunt costisitoare, sunt distructive astfel că pentru fiecare test sunt necesare noi echipamente. Alternative cu performanțe ridicate sunt reprezentate de definirea și utilizarea metodelor și mijloacelor de calcul numeric. Metode de calcul performante sunt studiate prin utilizarea calculului paralel sau prin dezvoltarea unor noi tehnici de optimizare.

Față de conținutul tezei, concretizat în identificarea comportamentului materialelor celulare pentru a estima performanțele acestora ca materiale incluse în sistemele de siguranță pasivă ale autoturismelor, în obiectivele acestei teze de doctorat, concretizate prin activități efectuate în diferite domenii, un loc important este acordat activităților de modelare numerică și simulare experimentală legate de validarea numerică a produselor, de dezvoltarea unor soluții tehnice specifice pentru sporirea gradului de securitate ca structuri celulare, cu structuri compozite și investigarea unor secțiuni specifice ale pieselor. Sunt avute în vedere modelele numerice ale planșei bord și ale unor piese realizate prin fabricare aditivă.

4.1. MODELAREA NUMERICĂ A PLANȘEI BORD

În industrie utilizarea modelelor numerice reprezintă un mijloc prin care se asigură calitatea produselor și în același timp se pot obține reduceri semnificative ale timpului și costurilor alocate dezvoltării unui produs nou. Produsul virtual este utilizat pentru simularea diferitelor condiții și regimuri de funcționare astfel că se pot verifica diverse scenarii pentru care baza materială pentru cercetarea experimentală nu este suficientă sau nu poate să asigure obținerea unor rezultate concludente.

Modelul numeric al planșei bord, prezentat în această lucrare, este o evoluție a modelului existent în baza de cercetare a Centrului „Ingineria Autovehiculelor”. Modelul a fost dezvoltat și validat în cadrul unor cercetări efectuate ale căror rezultate au fost publicate sub forma unor articole științifice [121] [122] sau în cadrul unor Teze de doctorat.

Reiterând aspecte referitoare la procesul de realizare, se face mențiunea că modelul numeric este conform cu modelul geometric, model utilizat pentru realizarea echipamentelor de producție astfel că reprezintă corect grosimea materialului precum și modul de asamblare a elementelor componente. De asemenea s-a ținut cont de cerințele specifice de rezolvare ale programului LS-Dyna.

În raport cu specificațiile tehnice ale realizării unui model numeric sunt necesare pe parcurs următorii pași:

- investigarea modelului geometric;
- analiza grosimilor secțiunilor modelului geometric;
- generarea suprafeței mijlocii a secțiunilor modelului geometric;
- identificarea suprafețelor cu grosimi egale; definirea setului de proprietăți (suprafețe cu grosimi egale);

- definirea setului de materiale;
- stabilirea dimensiunii minime a elementului finit;
- discretizarea modelului geometric;
- corectarea modelului geometric;
- definirea elementelor de legătură dintre componentele modelului;
- compensarea (masă și inerție) a elementelor care nu sunt reprezentate geometric dar care au influență asupra răspunsului modelului numeric;
- verificarea calității modelului numeric (a elementelor finite);
- validarea modelului numeric.

Modelul numeric a fost aliniat corepunzător modului de așazare pe echipamentul experimental, definindu-se în acest fel și modul de fixare a structurii .

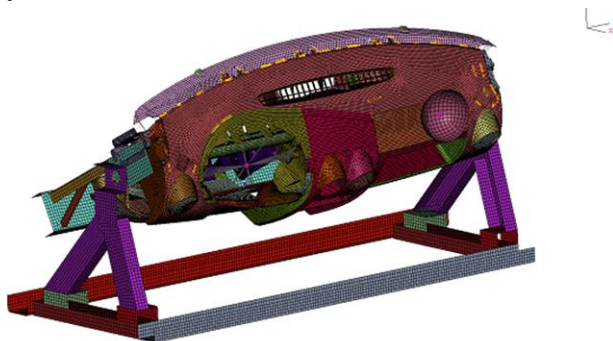


Figura 4.5. Model numeric complet [122]

Suplimentar pentru stabilirea completă a modului de funcționare a modelului numeric între elementele componente au fost definite interfețe de tip contact. Impactorul a fost definit ca rigid și datorită faptului că reprezentarea a fost realizată cu elemente de tip suprafață a fost necesară compensarea masei până la valoarea nominală cu elemente specifice.

Setul de mărimi asociate modelului numeric este:

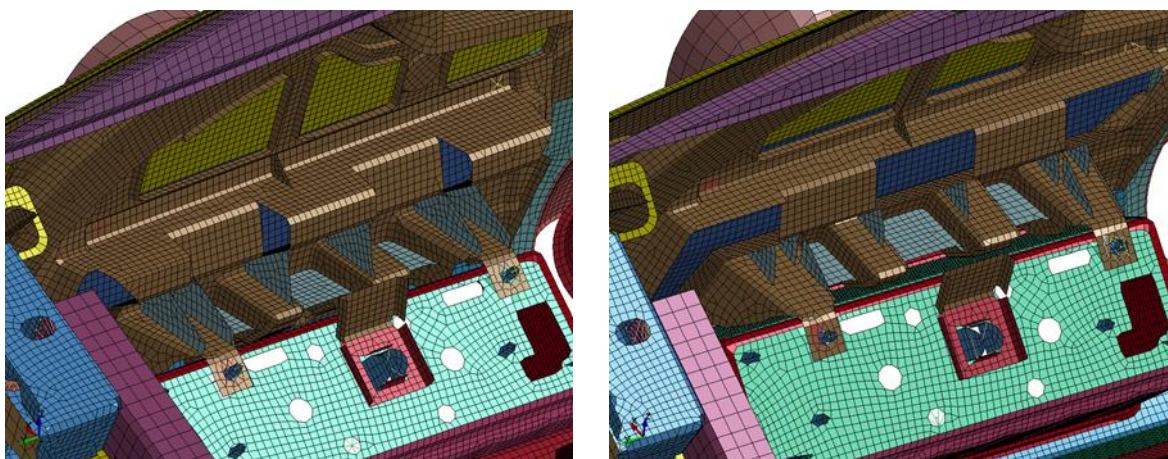
- lungime: mm;
- timp: ms;
- densitate: kg/mm^3 ;
- forță: kN;
- energie: J.

În vederea elaborării și îmbunătățirii performanțelor numerice ale modelului, elaborat cu aplicații CAD, au fost elaborate o serie de programe MATLAB.

4.2. EVALUAREA NUMERICĂ A PERFORMANȚELOR STRUCTURALE ALE PLANȘEI BORD

Pentru validări structurale generale este suficient un model de calcul care să aibă integrat în mod corect un mecanism de degradare (Model II), mecanism de degradare implementat prin definirea corectă a curbei caracteristice a materialului și stabilierea criteriului de eliminare (ștergere) a unui element finit (prin cedare).

Modelul numeric va fi adaptat ipotezei de lucru în care structura de rezistență este degradată.

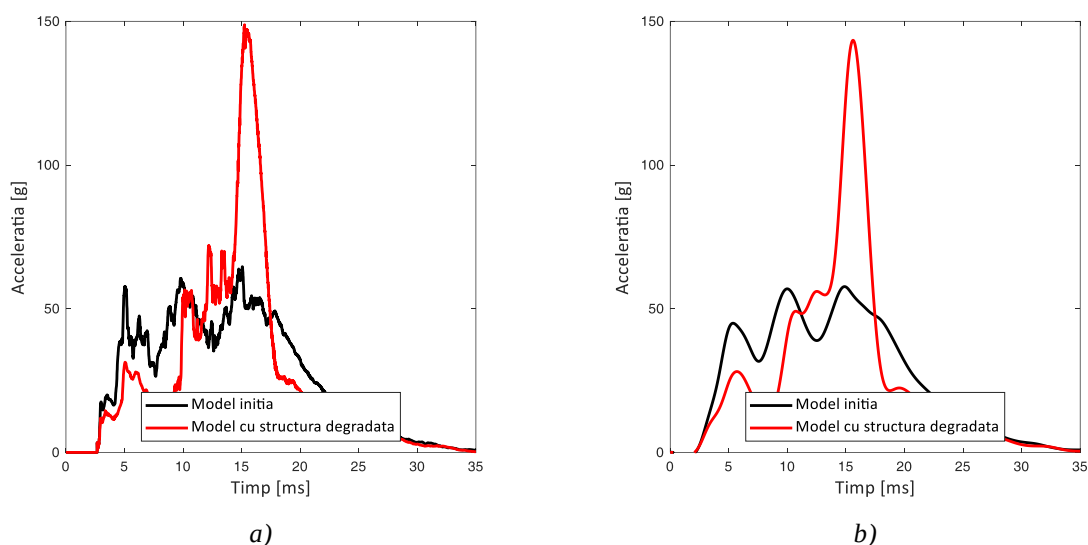


a) b)
Figura 4.7. Modele numerice ale planșei bord[121]

- a) modelul numeric al planșei bord – structura inițială;
b) modelul numeric al planșei bord – structura degradată.

Rezultatele numerice vor fi comparate cu rezultatele experimentale pentru identificarea nivelului de securitate obținut prin utilizarea unor structuri de rezistență adăugate.

În Figura 4.8 sunt prezentate rezultatele obținute prin rezolvarea numerică a celor două modele.



a) b)
Figura 4.8. Accelerația impactorului[121]
a) date primare; b) date prelucrate (Filtu SAE J211).

4.3. CARACTERIZAREA MECANICĂ ȘI MODELAREA NUMERICĂ A PIESELOR REALIZATE PRIN METODE DE FABRICARE ADITIVĂ

Tehnologiile de fabricare aditivă (AM - additive manufacturing), pot fi impartite in trei tipuri:

- sinterizarea prin care materialul este incalzit fara a fi lichefiat, pentru a crea obiecte complexe de inalta rezolutie; sinterizarea cu laser a metalelor foloseste pulbere de metal in timp ce sinterizarea cu laser selectivă utilizează un laser pe pulberi termoplastice, astfel

încât particulele să se lipească între ele;

- fabricație aditivă este stereolitografia, care utilizează un proces numit fotopolimerizare, prin care un laser ultraviolet este tras într-o cuvă de rasină fotopolimeră pentru a crea piese ceramice rezistente la cuplu, capabile să suporte temperaturi extreme;
- fabricație aditivă topește complet materialele; aceasta include sinterizarea directă a metalelor cu laser, care folosește un laser pentru a topi straturi de pulbere de metal și topirea fasciculului de electroni, implicând fascicule de electroni pentru a topi pulberile (Fused Filament Fabrication - FFF);

Structurile compozite multi-material (compozite laminate asemănătoare microstructurii sidefului) au fost proiectate, fabricate și testate atât experimental, cât și numeric pentru a explora capacitatea lor de absorbție a energiei. O structură hibridă ca o combinație a unui tub circular de aluminiu cu o inserție cu mai multe celule a fost investigată pentru a evalua creșterea performanței la zdrobire asupra componentelor individuale. De asemenea, a fost discutat un model pentru deteriorarea componentei de fabricație aditivă. Au fost investigate structuri complexe și a fost prezentat un mecanism de defecțiune bazat pe zdrobirea pereților în apropierea articulațiilor din plastic. Metoda elementelor finite extinse (XFEM) [138] utilizând un segment coeziv cu criterii de inițiere și evoluție a deteriorării anizotrope a fost dezvoltată pentru a surprinde dependența comportamentelor de fracturare orientărilor de structură / raster pentru polimerii fabricați prin metode aditive (AM). Modelul „generalized incremental stress-state dependent damage” (GISSMO) [139] este implementat în prezent pentru a prezice procesul de degradare [140][141], având în vedere dependența stării de stres prin triaxialitatea stresului. Deși este aplicat în principal pentru investigarea structurilor metalice, GISSMO poate fi adaptat pentru investigațiile structurale ale structurilor imprimate 3D și ale altor materiale, cum ar fi gheața [142].

Figura 4.11a) prezintă dimensiunile epruvetei (ASTM D638 — Tip I) și direcția de imprimare aliniată cu axa longitudinală. Direcția de imprimare a epruvetei a fost selectată, luând în considerare modelul de depunere a procesului de fabricație a pieselor cercetate în continuare în această lucrare, așa cum este prezentat în Figura 4.11b).

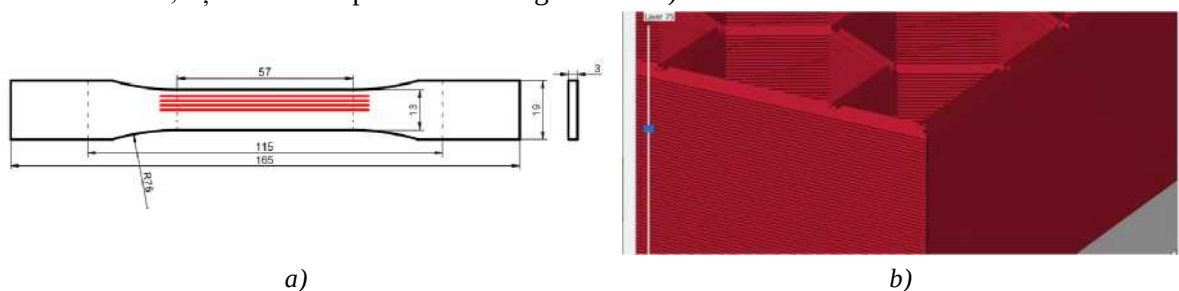


Figura 4.11. Modul de realizare a epruvetei [140]

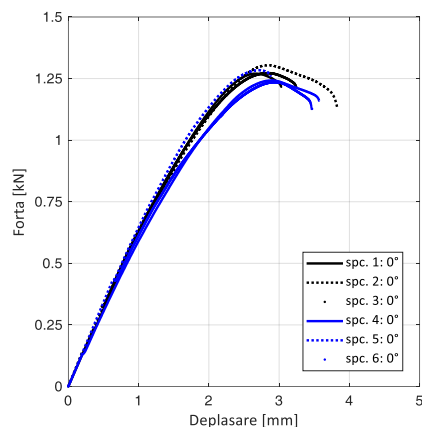
a) dimensiunile epruvetei; b) model de depunere a materialului

Epruvetele au fost testate la tracțiune cu o viteză de deplasare a bacului mobil de 2.0 mm/min.

O cameră digitală Nikon echipată cu obiectiv de tip macro a fost utilizată pentru a captura imaginile epruvetei în timpul testului pentru a furniza informația primară pentru analiza prin metoda corelației imaginilor digitale (DIC) [141]. Programul DigiCamControl (www.digicamcontrol.com) a fost utilizat pentru a controla aparatul fotografic, programat să înregistreze un cadru nou la un pas de timp definit (10 secunde).



a)



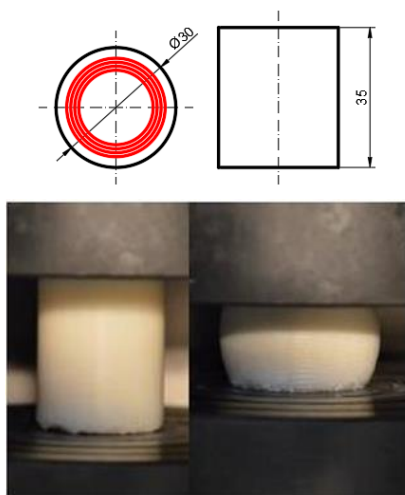
b)

Figura 4.12. Modul de testare a epruvetelor [140]

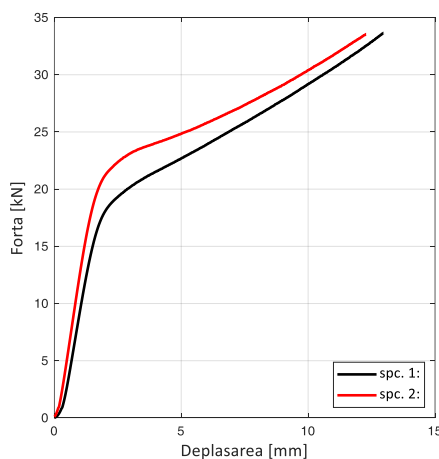
a) echipamentul experimental; b) curbele caracteristice măsurate

Valorile medii ale dimensiunilor în zona calibrată a epruvetei sunt de 13.2 mm pentru lățime și 3.4 – 3.5 mm pentru grosime.

Pentru completarea procesului de caracterizare a materialului, au fost fabricate eșantioane pentru testul de compresie, iar modelul de imprimare a fost definit ca trasee de depunere concentrice prin setarea unui număr mare de elemente de contur (Figura 4.14a).



a)



b)

Figura 4.14. Încercarea la compresie [140]

a) realizarea epruvetelor; b) curbele caracteristice măsurate

Modelul numeric al materialului care urmează să fie implementat pentru analiza numerică este *** MAT_124 (*MAT_PLASTICITY_COMPRESSION_TENSION)** cu mecanisme de degradare bazate pe stabilirea deformării relative în domeniul plastic sau o valoare minimă impusă a pasului de timp. Valorile limită (rupere sau degradare) ale deformării relative sunt diferite pentru tensiune și compresie, în timp ce setarea unei valori minime a pasului de timp este o soluție care necesită reglarea fină a parametrilor de intrare ai modelului numeric. O soluție pentru studiul degradării materialului, implementată în Ls-DYNA, se bazează pe utilizarea cardului *** MAT_ADD_EROSION** sau **(*MAT_ADD_DAMAGE_GISSMO)**. **GISSMO** (MOdel Generalized Incremental Stress-State-dependent MOdel) este un instrument util pentru determinarea stării limită într-o condiție specifică de încărcare [82] [147], bazată pe utilizarea triaxialității (ecuația 4.10), oferind raportul

dintre tensiunea hidrostatică (σ_h) (legată de modificarea volumului) și tensiunea echivalentă von Mises ($\bar{\sigma}$) (legată de schimbarea formei), care permite o distincție eficientă între stările de încărcare [148] [149].

$$\eta = \frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}} \quad (4.10)$$

4.4. STUDIUL NUMERIC AL STRUCTURILOR AUXETICE (TETRA-ANTI-CHIRALE) REALIZATE PRIN METODA FABRICĂRII ADITIVE

Analiza experimentală și numerică a structurilor auxetice de tip tetra-anti-chiral pune la dispoziție o serie de informații referitoare la comportamentul mecanic al structurii în cazul solicitării la compresie.

Existența unui platou – zona în care forța de deformare are o valoare cvasi-constantă – este un factor important pentru utilizarea acestor structuri ca elemente suplimentare pentru îmbunătățirea performanțelor structurale. Pentru exemplificare se consideră cazul în care structura auxetică este definită cu ajutorul parametrilor:

Tabelul 4.6. Parametrii structurii auxetice

Parametrul	Valoarea
Lungimea ligamentului (L)	10 mm
Grosimea ligamentului (t)	1.2 mm
Raza interioară a nodului (R_i)	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8, 3.0 mm
Numărul de celule (n_v)	3

Se definește forța normalizată ($\bar{F}_u$) ca raportul dintre forța curentă și valoare minimă a forței calculată pentru intervalul de variație a razei interioare (R_i) a nodului.

$$\bar{F}_u = \frac{F_u}{\min F_u} \quad (4.13)$$

Se aplică acest model de calcul pentru a elimina influența materialului – prin intermediul limitei de proporționalitate (σ_y) – din mecanismul de evaluare a performanțelor structurii auxetice.

În mod arbitrar (dar totuși valori situate echidistant în interiorul intervalului) au fost alese două structuri pentru care raza interioară a nodului (R_i) are valorile 1.7 mm, respectiv 2.5 mm.

Urmând specificațiile procesului indicate în Tabelul 4.5 au fost realizate prin fabricare cu filament fuzibil modele fizice ale pieselor.

Piese obținute au fost testate la compresie, pentru evaluarea comportamentului mecanic al structurii. Echipamentul de încercare permite viteze de deplasare ale bacului mobil cuprinse între 0.01 mm/min și 500 mm/min. Modelul fizic al piesei este suspus la compresie axială cu o viteză de deplasare a bacului mobil de 5 mm/min, respectiv 500 mm/min.

Dimensiunea piesei de încercat, măsurată pe direcția aplicării forței, este de 60 mm. Corespunzător acestei dimensiuni se determină viteza de deformare a piesei de $0,00138 \text{ s}^{-1}$, respectiv $0,138 \text{ s}^{-1}$. În Figura 4.22 este prezentat procesul de deformare a structurii în cazul în care viteza de deformare este $0,00138 \text{ s}^{-1}$. Procesul de deformare a fost înregistrat pentru analiză cu ajutorul camerei digitale Nikon pentru care numărul de cadre este 50 fps.

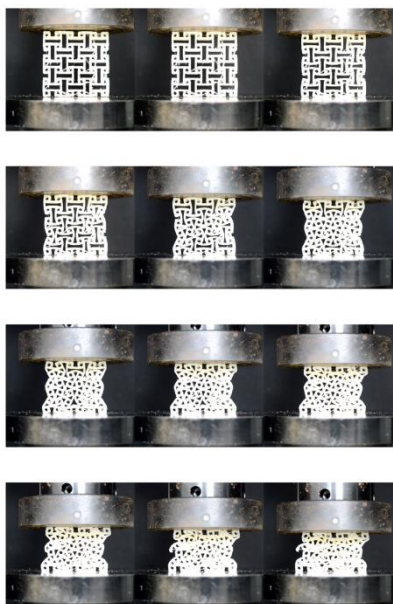


Figura 4.22. Deformarea structurii[123]

Viteza de deplasare 5 mm/min; viteza de deformare $0,00138 \text{ s}^{-1}$.

În Figura 4.23 este prezentat procesul de deformare a structurii în cazul în care viteza de deformare este $0,138 \text{ s}^{-1}$. Procesul de deformare a fost înregistrat pentru analiză cu ajutorul camerei digitale UX Mini pentru care numărul de cadre este 200 fps.

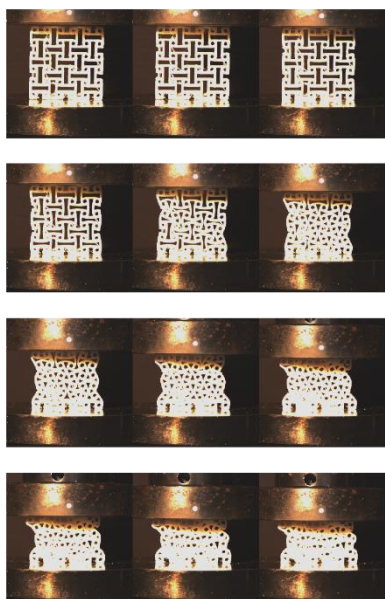


Figura 4.23. Deformarea structurii[123]

Viteza de deplasare 500 mm/min; viteza de deformare $0,138 \text{ s}^{-1}$.

În timpul procesului de deformare a structurii au fost observate desprinderi ale straturilor adiacente de material. Este o consecință a preciziei de fabricare a piesei dependentă de performanțele de utilizare ale imprimantei 3D.

Procedura MATLAB pentru realizarea modului numeric al structurii auxetice a fost modificată pentru a permite definirea unui element finit cu dimensiune redusă [120] [115] [150] care va reprezenta zona de sudură între straturile adiacente de material [151].

Pentru integrarea efectelor procesului de fabricare a piesei au fost utilizate mecanismele

integrate în Ls-Dyna de tip perturbare a coordonatelor nodurilor [140].

Structura este rezemată pe o suprafață plană definită ca rigidă (***RIGIDWALL_PLANAR**). Un set de noduri (coordonata $Z = 0.5 \text{ mm}$) este definit pentru a realiza o constrângere suplimentară.

Structura este comprimată cu ajutorul unui element rigid (***RIGIDWALL_GEOMETRIC_FLAT_MOTION**) a cărui viteză de deplasare este constantă și este definită în conformitate cu procesul de testare fizică a piesei.

În Figura 4.26 sunt prezentate rezultatele obținute în urma simulării numerice a structurilor.

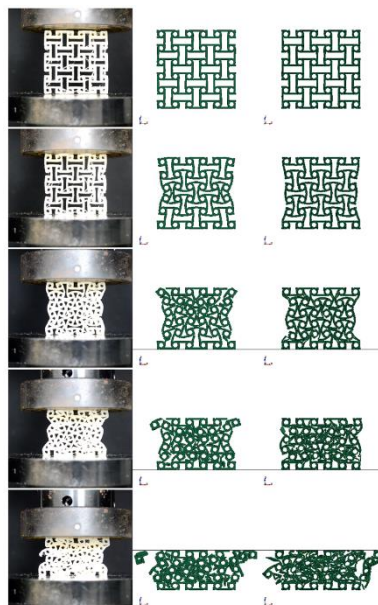


Figura 4.26. Deformarea structurii[123]

Viteza de deplasare 5 mm/min ; viteza de deformare $0,00138 \text{ s}^{-1}$.

Rezultat experimental; model solid, model cu element de legătură

În Figura 4.27 sunt prezentate grafic forțele de deformare determinate experimental și calculate cu ajutorul modelelor numerice.

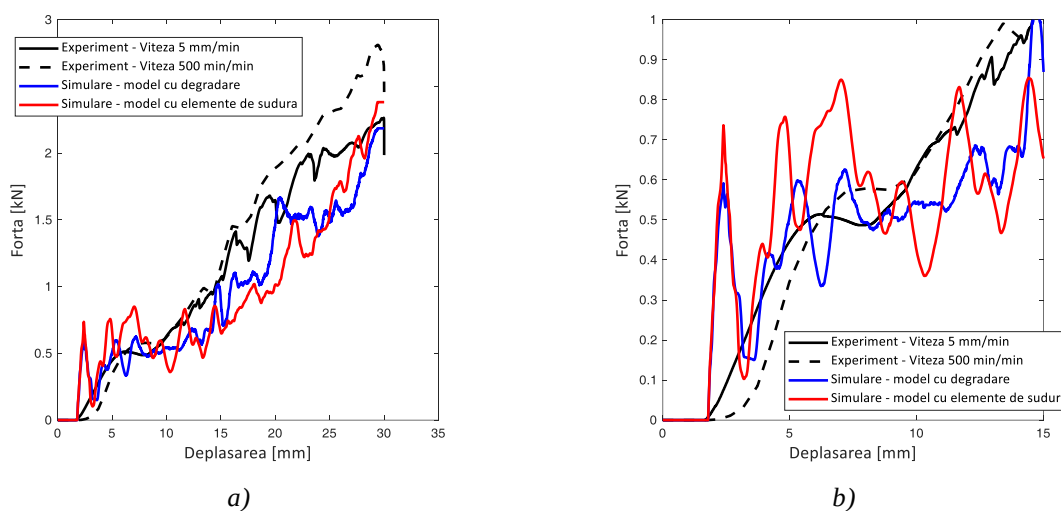


Figura 4.27. Modelul numeric al piesei

a) model solid; b) model cu element de legătură

Se constată o bună similitudine între cele două seturi de rezultate. În zona de platou se constată

existența unor neregularități – variații locale ale forței de deformare. Aceste variații sunt consecință a faptului că în momentul în care un element atinge starea limită este îndepărtat din model. În realitate nu se produce pierdere de material, acesta fiind unul dintre motivele pentru care în cuprinsul acestui capitol a fost analizată soluția utilizării unui element de legătură.

Având în vedere faptul că modelul prezentat va fi integrat în modelul planșei bord este necesară compatibilizarea timpului de calcul. Pentru stabilirea unui pas de timp unitar se utilizează mecanismul de scalare (parametrul **MSIST** și valoarea precizată pentru **DT2MS**) a masei introdus în modelul numeric prin Cartele 4.5.

4.5. CONCLUZII

O etapă importantă în definirea constructivă a unui produs, și în mod deosebit a unui produs cu importanță cumulativă din punct de vedere estetic, cu funcționalitate complexă și cu funcții de protecție pasivă, așa cum este planșa bord, este reprezentată de activitățile de modelare numerică - simulare experimentală - validarea numerică. Scopul primar al acestor activități este de a dezvolta un model care să aibă capacitatea de a fi utilizat cu acuratețe și repetabilitate într-o largă varietate de condiții reale de testare, fără a fi nevoie de modificarea acestuia pentru fiecare aplicație specifică. Pentru a atinge acest obiectiv, modelele sunt dezvoltate și validate separat, la nivel de material, componentă, ansamblu și subansamblu.

Suplimentar pentru stabilirea completă a modului de funcționare a modelului numeric între elementele componente au fost definite interfețe de tip contact. Impactorul a fost definit ca rigid și datorită faptului că reprezentarea a fost realizată cu elemente de tip suprafață a fost necesară compensarea masei până la valoarea nominală cu elemente specifice.

Investigarea experimentală a pieselor a arătat faptul că există un mecanism suplimentar de degradare prin desprinderea filamentelor adiacente. Pentru validări structurale generale, prin integrarea unui mecanism de degradare (Model II), modelul numeric a fost adaptat situației în care structura de rezistență este degradată sau piesa se află la începutul procesului de proiectare și este necesară definirea unei soluții tehnice pentru îmbunătățirea performanțelor structurale.

Din rezultatele numerice obținute rezultă că în construcția actuală structura de rezistență a planșei bord este de natură să ofere un nivel de protecție corespunzător iar, pentru construcția cu structura degradată, se depășesc limitele admise.

Corespunzător tehnologiei de fabricare aditivă (tehnologia FFF), de realizare a planșei bord, este prezentat, în mod exhaustiv, procesul de validare a materialului, informațiile obținute fiind necesare pentru implementarea modelului de material care include mecanismul de degradare

În cazul fabricării aditive analizate, existența unui platou – zona în care forța de deformare are o valoare cvasi-constantă – este un factor important pentru utilizarea acestor structuri ca elemente suplimentare pentru îmbunătățirea performanțelor structurale. Se definește astfel o structură utilizabilă ca element suplimentar pentru asigurarea securității în cazul impactului cu planșa bord.

CAPITOLUL 5 – CERCETAREA EXPERIMENTALĂ ȘI SIMULAREA NUMERICĂ A IMPACTULUI CU PLANȘA BORD

Așa cum s-a arătat în cadrul capitolului 2, pentru țările din Uniunea Europeană, experimentele sunt efectuate în concordanță cu prevederile *Regulamentului ECE 21*¹. Conform acestui regulament, procedura de testare impune ca un cap fals, cu parametrii dimensionali și de masă predefiniți, să impacteze, în condiții cinematice determinate de existența -inexistența unor sisteme de reținere a corpului pasagerului din autovehicul, planșa de bord. Aprecierea structurii ca mijloc de protecție pasivă în habitacul automobilului este făcută, în funcție de parametrii probei experimentale, prin decelerația capului fals pe o perioadă de timp din perioada fenomenului de impact, precum și o valoare limită a criteriului de performanță HIC (*Head Injury Criterion*).

5.1. CERCETAREA EXPERIMENTALĂ A IMPACTULUI CU PLANȘA BORD

Cercetarea experimentală a impactului cu planșa bord este efectuată în laboratorul “Caroserii și Analiză Structurală” din cadrul Centrului de Cercetare “Ingineria Autovehiculelor”. Infrastructura acestui laborator, care cuprinde o serie de echipamente și instalații experimentale compatibile investigațiilor la impact ale structurilor montate în habitacul automobilului [36] [37] este completată cu mijloace performante care permit investigarea corectă și robustă a fenomenelor fizice produse la efectuarea probelor

Așa se concluzionează la Capitolul IV și anume din studiul numeric al structurilor auxiliare realizate prin metoda fabricării aditive, precum că în construcția actuală structura de rezistență a planșei bord este de natură să ofere un nivel de protecție corespunzător iar pentru construcția cu structura degradată, se depășesc limitele admise, studiul efectuat analizează performanța structurală a unei planșe bord a cărei structură de rezistență a fost degradată.

În Figura 5.1 este prezentată o imagine a ansamblului planșa bord. Structura de rezistență este solidară cu planșa bord prin sudare în puncte, astfel că nu este posibilă reabilitarea performanțelor structurale ale ansamblului prin înlocuirea parțială a unor componente.

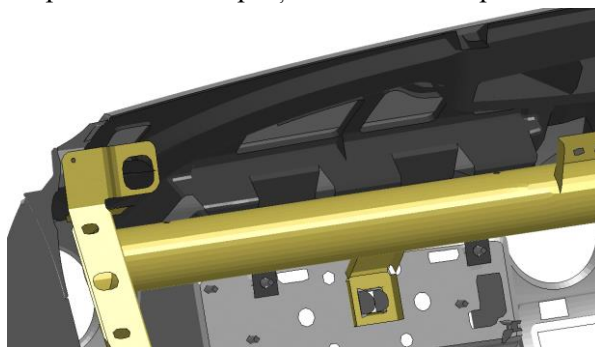


Figura 5.1. Ansamblul planșa bord[100]

Structura de rezistență este astfel proiectată încât să funcționeze ca un element de interfață, fuzibil, între planșa bord și structura de fixare a ansamblului pe caroseria automobilului.

În Figura 5.2. este prezentată o imagine foto a planșei bord pentru care, în urma efectuării

¹<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/588aa860-5042-4063-ad75-8ae5e18af385/language-en>

testelor experimentale pentru validarea modelului numeric [36] [37], a fost degradată structura de rezistență și anume, după cum se observă în Figura 5.3, s-a realizat contact între planșa bord și traversa de susținere, respectiv o piesă din structura de portantă a caroseriei.



Figura 5.2. Structura de rezistență a planșei bord[100]

Traversa de susținere a planșei bord este de asemenea parte a unui ansamblu solidar de componente metalice cu rol important în asigurarea protecției ocupanților automobilului, având în vedere faptul că reprezintă și baza de montare a coloanei de direcție.

Structura prezentată are un rol major în disiparea energiei cinetice a impactorului și, în prezent, este soluția tehnică utilizată pentru asigurarea parametrilor de performanță a structurii.

Se impune astfel necesitatea măsurării accelerației impacturului.

Impactorul este construit sub forma unei emisfere cu diamterul de 165 mm amplasat la capătul unei bare metalice astfel ca masa redusă să corespundă unei valori de 6.8 kg, și viteza în momentul impactului să fie de 24.1 km/h.

Viteza impactorului, accelerat în câmp gravitațional, este determinată în funcție de configurația geometrică a traiectoriei astfel că traiectoria impactorului constituie o constrângere suplimentară la realizare a vitezei de test.

În Figura 5.4 se prezintă o imagine de ansamblu a standului folosit la cercetarea experimentală a impactului planșei bord, cu ilustrarea pozițiilor relative dintre impactor și planșa bord de studiat.

Zona de impact și poziția relativă dintre impactor și planșa bord, ilustrate în Figura 5.5, au fost determinate conform cu studiul comportamentului dinamic al pasagerului în timpul unui impact [36] [37].



Figura 5.4. Echipamentul experimental

Din structura constructivă a instalației de cercetare experimentale se rețin următoarele aspecte:

- pentru măsurarea accelerației a fost utilizat un accelerometru² specializat, fabricat de PCB

² [HTTPS://WWW.PCB.COM/PRODUCTS?M=352C04](https://www.pcb.com/products?m=352C04)

Piezotronics, cu o sensibilitate de 9.77 mV/m/s^2 capabil să măsoare accelerația până la 500 g.

- poziția impactorului este monitorizată prin intermediul unui traductor Kubler T8.
- evenimentul asociat impactului este înregistrat video cu ajutorul unei camere de mare viteză Fastcam UX50 Mini; viteza de înregistrare a fost stabilită la 2000 fps.
- înregistrarea video este declanșată cu ajutorul unei bariere optice montate convenabil în față planșei bord (Figura 5.9). Se efectuează testul de impact în cazul în care structura planșei bord este degradată. În Figura 5.12 este prezentată evoluția accelerației impactorului, măsurată pentru întreg intervalul de achiziție date, și un extras care reprezintă momentul impactului.

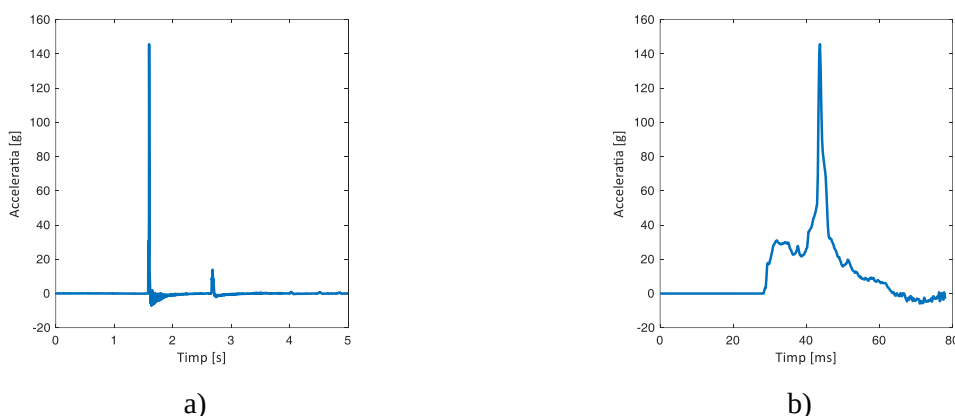


Figura 5.12. Accelerația impactorului

a) intervalul de achiziție date; b) impactul principal

Datele înregistrate de traductorul de poziție sunt prelucrate pentru determinarea vitezei de impact (Figura 5.13).

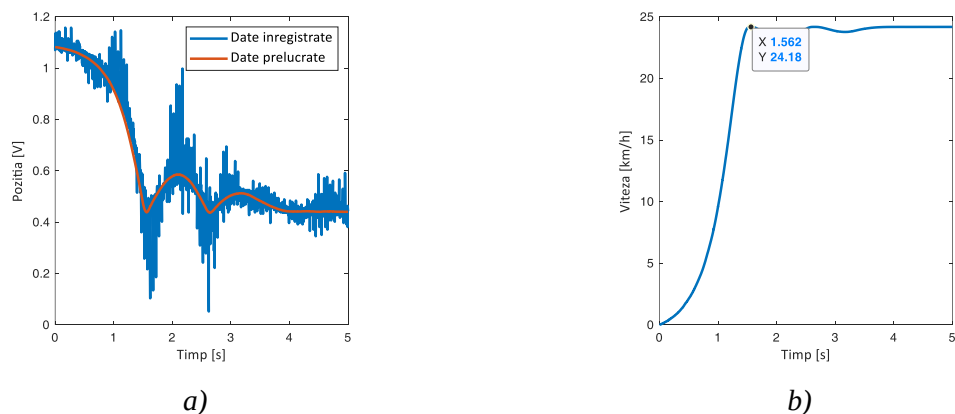


Figura 5.13. Poziția și viteza impactorului

a) poziția impactorului; b) viteza impactorului

Imaginile video sunt prelucrate în MATLAB cu ajutorul funcțiilor implementate în modulele Video Viewer și Image Acquisition.

Pentru o reprezentare consistentă informațiile sunt afișate în mod compact (Figura 5.14)

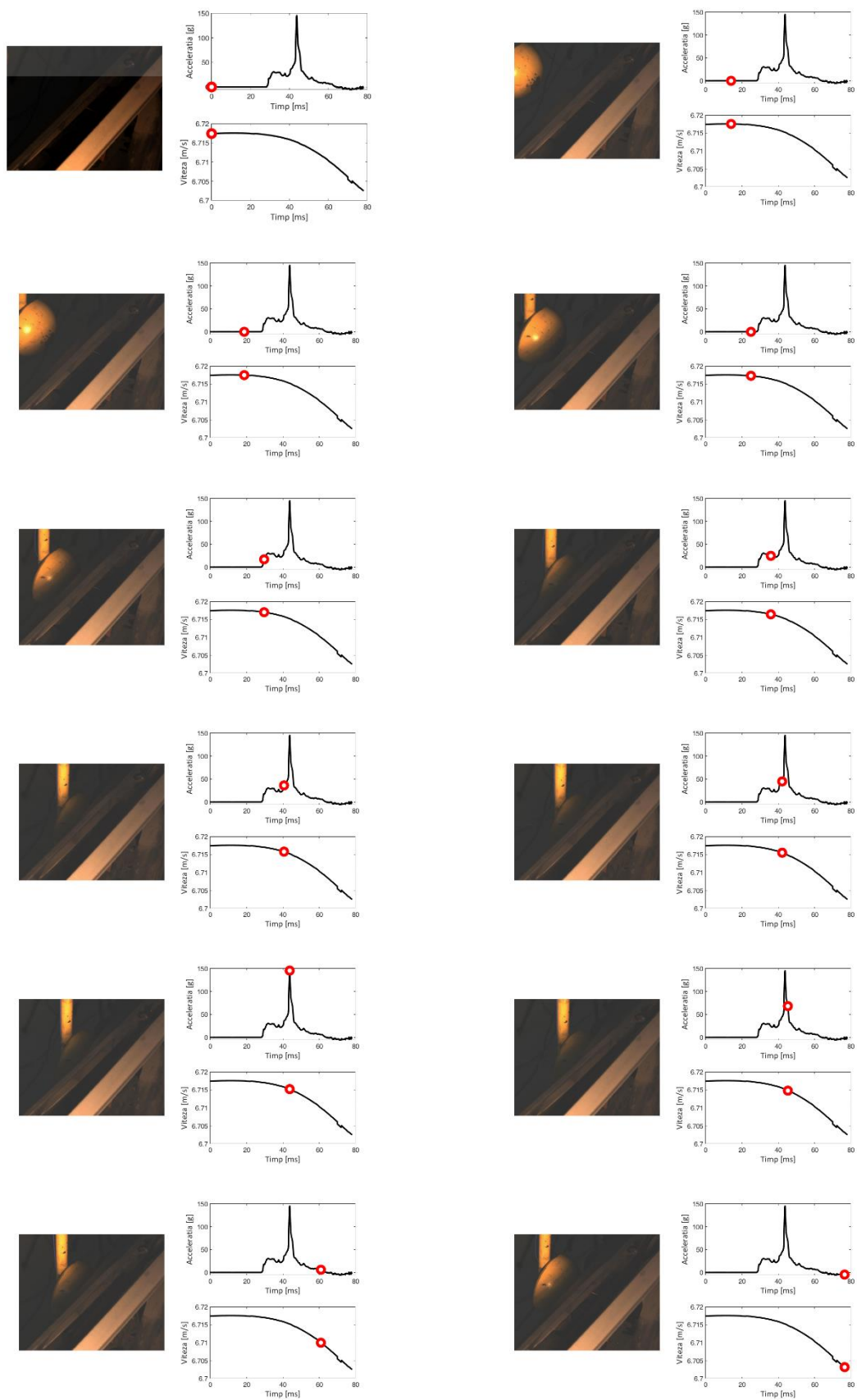


Figura 5.14. Evoluția impactului

5.2. EVALUAREA NUMERICĂ A PERFORMANȚELOR STRUCTURALE ALE PLANȘEI BORD

Modelul numeric utilizat pentru investigarea performanțelor structurale este prezentat în Figura 5.20.

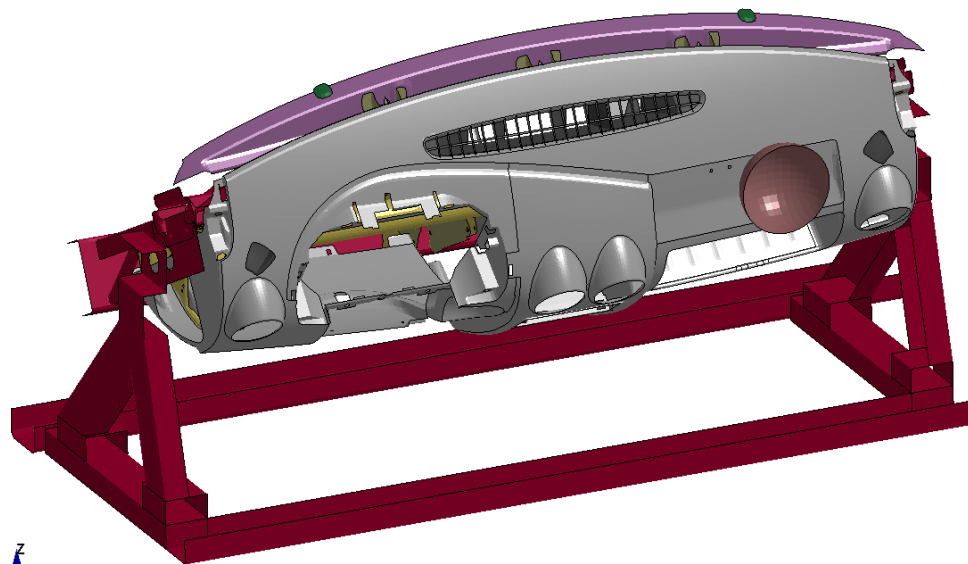


Figura 5.20. Modelul numeric al planșei bord[100]

În Figura 5.22 sunt prezentate rezultatele obținute prin rezolvarea numerică a modelelor inițial (date primare) și cu structura degradată.

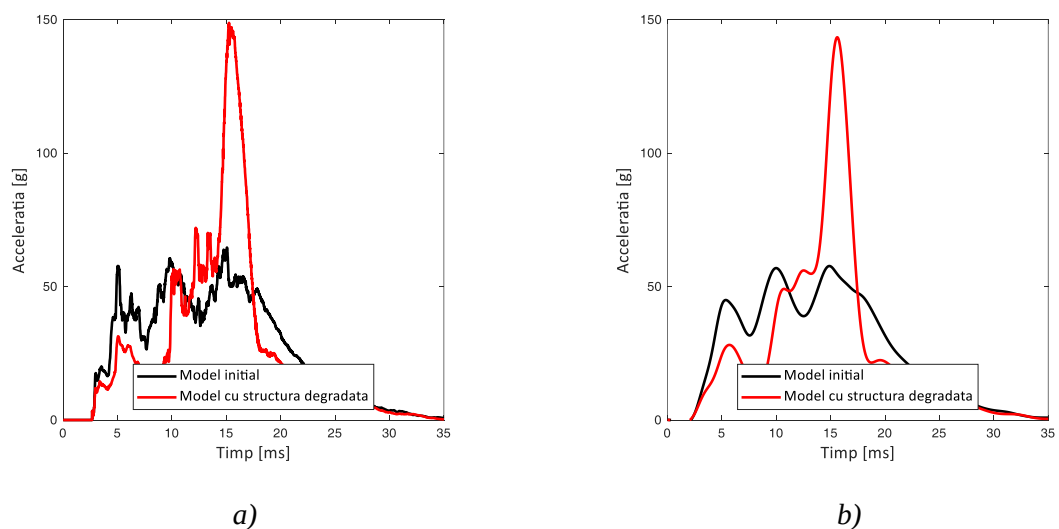


Figura 5.22. Accelerația impactorului

a) date primare; b) date prelucrate (Filtu SAE J211).

Rezultatele prezentate în Figura 4.6 indică faptul că în construcția actuală, structura de rezistență a planșei bord este de natură să ofere un nivel de protecție corespunzător.

În Figura 5.25 sunt prezentate comparativ rezultatele obținute pentru experiment și modelul numeric cu structura de rezistență degradată.

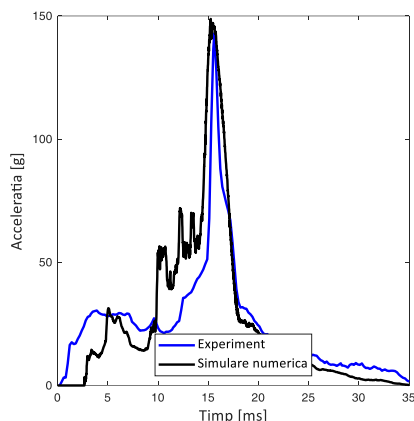


Figura 5.25. Accelerația impactorului

Analizând rezultatele se constată o bună similitudine între cele două seturi de rezultate, validându-se în acest mod modelul numeric al planșei bord cu structura de rezistență degradată.

Figura 5.26 prezintă graficul accelerației în cazul structurii cu insert.

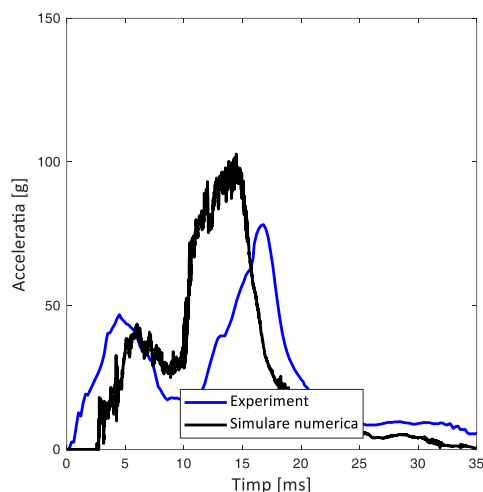


Figura 5.26. Accelerația impactorului

Se constată faptul că accelerația calculată depășește valoarea determinată experimental. Acest aspect este cauzat de mecanismul de eliminare a elementelor care conduce la modificarea rigidității structurii.

5.3. CONCLUZII

Cercetarea experimentală a planșei bord este făcută în condițiile Regulamentului ECE 21, aplicabil în Uniunea Europeană, conform căreia experimentele impun o procedură de testare în care impactorul este reprezentat printr-un cap fals cu diametrul de 165 mm și masa de 6,8 kg care impactează planșa de bord cu viteza inițială de 24,1 km/h (6,69 m/s). Acceptarea structurii ca mijloc de protecție pasivă în habitaculul automobilului este făcută, în funcție de parametrii probei experimentale, prin decelerația capului fals, pentru care se impune o valoare mai mică de 80 g a decelerației pe orice perioadă mai mică de 3 ms din perioada fenomenului de impact, precum și o

valoare mai mică de 700 a criteriului de performanță HIC ((*Head Injury Criterion*.)

Identificarea zonei de impact și poziția relativă dintre corpul impactor și planșa bord au fost determinate prin studiul bibliografic al comportamentului dinamic al pasageriului în timpul impactului.

Cercetarea experimentală este efectuată în laboratorul “Caroserii și Analiză Structurală” din Centrul de Cercetare “Ingineria Autovehiculelor”, laborator care dispune de echipamente și instalații experimentale compatibile investigațiilor la impact ale structurilor montate în habitacul automobilului.

După cum a rezultat din studiul numeric al structurilor auxiliare realizate prin metoda fabricării aditive, precum că în construcția actuală, structura de rezistență a planșei bord este de natură să ofere un nivel de protecție corespunzător iar pentru construcția cu structura degradată, se depășesc limitele admise, cercetarea experimentală efectuată analizează performanța structurală a unei planșe bord a cărei structură de rezistență a fost degradată. Ca ipoteză de lucru, această situație corespunde inclusiv cazului în care procesul de proiectare se află la început și este necesară definirea unei soluții tehnice pentru obținerea nivelului de securitate impus prin normele de omologare a automobilului.

În continuarea cercetărilor experimentale, este investigată o soluție tehnică care are integrată în zona structurii de rezistență o piesă realizată prin metoda fabricării aditive. Din rezultatele experimentale se constată o reducere a valorii accelerației maxime de la $\sim 145\text{ g}$ la o valoare $\sim 80\text{ g}$ iar duratele perioadelor în care accelerațiile sunt mai mici de 80 g , respectiv de 70 g , s-au redus la circa 1.5 ms .

În ultima parte a capitoului sunt prezentate, ca modalitate de validare a rezultatelor experimentale, evaluarea numerică a performanțelor structurale ale planșei bord iar din analiza comparativă a rezultatelor numerice cu rezultatele experimentale se constată o bună similitudine între cele două seturi de rezultate, validându-se în acest mod modelul numeric al planșei bord cu structura de rezistență degradată.

CAPITOLUL 6 – CONCLUZII GENERALE

Teza a avut drept obiectiv general însușirea și înțelegerea studiilor teoretice și experimentale, în vederea creșterii performanțelor materialelor utilizate la autoturisme ca elemente de siguranță.

Pentru a îndeplini multe dintre noile reglementări și standarde de siguranță concepute pentru a reduce probabilitatea ca vătămarea ocupantului să fie emisă atât pe plan intern, cât și în străinătate, trebuie utilizat un mijloc eficient de disipare a energiei impactului asupra ocupantului. În ultimele două decenii, industria automobilelor în ansamblu a pus un accent mai mare pe cercetarea și dezvoltarea în materie de siguranță și, mai precis, s-a concentrat pe protecția ocupantului în cazul unei coliziuni.

Valoarea științifică și practică a tezei constă într-o nouă abordare teoretică, practică și metodologică privind definirea unei soluții tehnice pentru îmbunătățirea performanțelor structurale.

Concluziile cercetărilor prezentate în această teză sugerează faptul că, se poate dezvolta un model eficient, complex și particularizat de caracterizare a structurilor celulare datorită proprietăților lor mecanice favorabile, deoarece prezintă o densitate scăzută, un comportament bun la încărcare dinamică și capacități ridicate de absorbție a energiei (ca dispozitive de rezistență la impact).

Așa cum se menționa în prima parte a capitolului, dincolo de măsurile de siguranță pasivă importanța siguranței ocupanților autovehiculului în conceperea automobilului este evidențiată prin soluțiile promovate de constructorii de automobile, din care se amintesc: comportamentul caroseriei la deformare, sistemele de reținere a pasagerilor, comportamentul la impact al elementelor interioare ale habitaculului, protecția habitaculului la intruziunea elementelor de caroserie sau amenajărilor interioare în zona rezervată pasagerilor

Legat de obiectivele tezei și în contextul preocupărilor din ultimele două decenii, când industria automobilelor în ansamblu a pus un accent mai mare pe cercetarea și dezvoltarea în materie de siguranță și, mai precis, s-a concentrat pe protecția ocupantului în cazul unei coliziuni, atenția este îndreptată spre identificarea unor materiale cu proprietăți ridicate de absorbție a energiei impactului și care pot fi înglobate în soluțiile tehnologice de garnisire interioară a habitaculului, precum planșa bord sau panourile de uși.

În urma prezentării schematice a categoriilor de materiale disponibile fabricării în diverse domenii industriale sunt reținute, ca prezentând interes în studiul abordat, următoarele categorii de materiale:

- *spumele solide*, categorie de materiale care prezintă o proporție considerabilă de fază gazoasă dispersată într-un solid caracterizate de densitate scăzută și absorbție rapidă de energie.

Sunt prezentate: *polistirenul expandat EPS*, *polipropilena expandată EPP*, spuma hibridă *policelan ECO*, obținută prin combinația de polistiren (EPS) și polietilenă (PE) sau EPS și polipropilenă (PP);

Din analiza celor trei categorii de spume solide se reține că spuma hibridă piocelană, care asigură o rezistență la impact mai bună în comparație cu spumele EPP și EPS, oferă o producție rentabilă de piese, deoarece poate fi modelată la densități mai mici decât EPP și are cele mai bune proprietăți privind absorbția de energie.

- *materialele compozite*, categorie de materiale formate din mai multe componente și în mai

multe moduri de organizare în funcție de utilizari. Avantajul major, esențial al compozitelor, constă în posibilitatea modularii proprietăților și obținerea în acest fel a unei game foarte variate de materiale, a căror utilizare se poate extinde în aproape toate domeniile de activitate tehnică

În ultimii ani s-a trecut la realizarea așa numitelor materiale compozite de generația a II-a, care prezintă o serie de avantaje certe pentru o mare gamă de produse, avantaje dintre care se menționează densitate redusă, rezistență mecanică sporită, rezistență la șoc ridicată, capacitate mare de amortizare a oscilațiilor, rezistență la coroziune.

- *metamaterialele mecanice auxetice*, sisteme din categoria materialelor compozite care prezintă proprietatea macroscopică neobișnuită a coeficientului Poisson și anume negativ datorită structurii subunitare.

Compozitele auxetice prezintă numeroase avantaje, cum ar fi rigiditatea și rezistența specifică ridicată, greutatea redusă au un raport putere/greutate ridicat iar consumul de energie este îmbunătățit, atunci când se reduce greutatea. Un alt avantaj al materialelor compozite auxetice este că proprietățile mecanice pot fi modificate prin schimbarea proporțiilor componentelor.

- *structuri chirale*, sisteme din categoria metamateriale auxetice tip fagure formate prin conectarea ligamentelor drepte la noduri centrale, fie sub forma unui cerc, a unui dreptunghi sau a oricărei alte forme geometrice.

În prezent, structurile chirale de fagure disponibile, includ structuri chirale cu 3 ligamente, numite faguri tri-chirale și anti-tri-chirale, structuri chirale cu 4 ligamente, cunoscută și sub denumirea de fagure tetra-chirale și anti-tetra-chirale, structuri chirale cu 6 ligamente, cunoscută și sub denumirea de fagure chiral hexagonal

În ultima parte a capitolului, într-o prezentare exhaustivă bazată pe studiu bibliografic, sunt prezentate principalele rezultate științifice legate de cercetările teoretice, simulările cu element finit și experimentale efectuate pentru evidențierea caracteristicilor fizice și de utilizare ale materialelor mai sus amintite.

În conceptul de „siguranța pasivă a automobilului” măsurilor constructive destinate protecției ocupantului sunt concretizate, în principal, din sistemele de reținere a acestuia și din implementarea componentelor din habitacul cu proprietăți de a minimiza efectele impactului secundar, sens în aplicațiile maselor plastice demonstrează că acestea pot contribui nu numai la estetica interiorului automobilului dar și la asigurarea funcționalității impuse de cerințele regulamentare de protejare la impact, iar un exemplu în acest caz este reprezentat de planșa de bord.

În categoriilor de materiale disponibile amenajărilor din interiorul autoturismelor în scopul optimizării siguranței pasive, sunt reținut ca materiale de interes pentru capacitatea lor mare de a absorbi energia:

- *polipropilena expandată (EPP)*, caracterizată de densitate redusă, elasticitate ridicată, rezistență la acțiunea acizilor, a substanțelor chimice alcaline, a uleiurilor și a solvenților. În plus, acest material nu absoarbe ușor apa, nu este toxic și poate fi ușor reciclat.

- *polistirenul expandat (EPS)*, care prezintă avantajul obținerii de produse cu densități diferite, poate fi ușor turnat în foi cu grosimi variate sau, după caz, design flexibil; proprietățile EPS-ului asociate sunt relativ insensibile la schimbările de temperatură în comparație cu majoritatea celorlalte spume cu celule închise.

- *piocelan-ul*, un tip de spumă de polistiren obținut prin adăugarea de poliolefină la polistirenul convențional; spuma hibridă Piocelan oferă o rezistență mai mare la impact și rezistență mecanică comparativă cu spumele EPP și EPS.

Testele efectuate au relevat importanța efectului densității asupra comportamentului spumei. Astfel, testul a arătat o creștere a rezistenței proporțională cu densitatea spumei, grosimea

mărgelui și pereții celulari, ca o consecință a creșterii materialului în vrac din spumă. Cele mai bune proprietăți în ceea ce privește absorbția de energie sunt cele ale polipropilenei expandate (EPP).

Structurile auxetice, fie simple molecule, cristale sau o anumită structură a materiei macroscopice, au fost propuse și dezvoltate în diverse modele nu numai pentru a explica coeficientul Poisson negativ, observat la materialele auxetice naturale, ci și pentru a acționa ca un model pentru proiectarea și fabricarea de noi materiale auxetice, reținându-se că majoritatea materialelor cu coeficient Poisson negativ sunt solidele celulare de tipul spumelor.

În sensul celor de mai sus, un prim demers al cercetării științifice efectuate asupra structurilor tetra-anti-chirale, este reprezentat de corelarea metodelor de studiu experimental, analitic și virtual, prin modelare numerică.

Investigațiile experimentale s-au făcut pentru trei configurații ale unei structuri tetra-anti-chirale constituite cu lungimile ligamentelor în direcții ortogonale x și y aflate în raportul 1:1 pentru prima structură, pentru a doua structură a fost utilizat un raport de 1,5: 1 iar pentru a treia structură, lungimile ligamentelor definesc un raport de 1: 1,5.

Corespunzător celor trei eșantioane supuse probelor, din seturile de date forță-deplasare obținute în timpul experimentelor, când sarcina aplicată a deformat structura numai în domeniul elastic, analiza experimentală a relevat faptul că deplasarea relativă de-a lungul axei orizontale nu este constantă, ci crește de la capete eșantionului spre mijloc, astfel că pentru calculul coeficientului Poisson se pot folosi valorile medii ale deplasării relative de-a lungul axelor orizontală și verticală.

Având ca bază de referință pentru comportamentul real al materialelor considerate rezultatele cercetărilor experimentale, au fost dezvoltate și rezolvate folosind, Ls-Dyna, modele numerice 3D al structurilor cercetate, utilizate ca repere pentru studiul analitic și numeric pentru modele de element finit cu ligament simplificat.

Pe măsură ce au fost obținute rezultatele numerice pentru modelul analitic al elementului cu ligament, a fost elaborată o procedură pentru exportarea modelului în format LsDyna.

În ultima parte a capitolului se propune un model teoretic pentru estimarea zonei de platou a forței pentru procesul de deformare a structurilor auxetice 3D anti-tetra-chirale. Modelul prezentat în lucrare este versatil în sensul că este dezvoltat pentru a se putea adapta la diverși parametri utili pentru procesele de validare și investigație, iar parametrii care influențează coeficientul Poisson au fost utilizați pentru a defini configurațiile specifice modelului numeric.

Suplimentar pentru stabilirea completă a modului de funcționare a modelului numeric între elementele componente au fost definite interfețe de tip contact. Impactorul a fost definit ca rigid și datorită faptului că reprezentarea a fost realizată cu elemente de tip suprafață a fost necesară compensarea masei până la valoarea nominală cu elemente specifice.

Investigarea experimentală a pieselor a arătat faptul că există un mecanism suplimentar de degradare prin desprinderea filamentelor adiacente. Pentru validări structurale generale, prin integrarea unui mecanism de degradare (Model II), modelul numeric a fost adaptat situației în care structura de rezistență este degradată sau piesa se află la începutul procesului de proiectare și este necesară definirea unei soluții tehnice pentru îmbunătățirea performanțelor structurale.

Din rezultatele numerice obținute rezultă că în construcția actuală structura de rezistență a planșei bord este de natură să ofere un nivel de protecție corespunzător iar, pentru construcția cu structura degradată, se depășesc limitele admise.

Corespunzător tehnologiei de fabricare aditivă (tehnologia FFF), de realizare a planșei bord,

este prezentat, în mod exhaustiv, procesul de validare a materialului, informațiile obținute fiind necesare pentru implementarea modelului de material care include mecanismul de degradare

În cazul fabricării aditive analizate, existența unui platou – zona în care forța de deformare are o valoare cvasi-constantă – este un factor important pentru utilizarea acestor structuri ca elemente suplimentare pentru îmbunătățirea performanțelor structurale. Se definește astfel o structură utilizabilă ca element suplimentar pentru asigurarea securității în cazul impactului cu planșa bord.

Cercetarea experimentală a planșei bord este făcută în condițiile Regulamentului ECE 21, aplicabil în Uniunea Europeană, conform căreia experimentele impun o procedură de testare în care impactorul este reprezentat printr-un cap fals cu diametrul de 165 mm și masa de 6,8 kg care impactează planșa de bord cu viteza inițială de 24,1 km/h (6,69 m/s). Acceptarea structurii ca mijloc de protecție pasivă în habitacul automobilului este făcută, în funcție de parametrii probei experimentale, prin decelerația capului fals, pentru care se impune o valoare mai mică de 80 g a decelerației pe orice perioadă mai mică de 3 ms din perioada fenomenului de impact, precum și o valoare mai mică de 700 a criteriului de performanță HIC ((*Head Injury Criterion*.)

Identificarea zonei de impact și poziția relativă dintre corpul impactor și planșa bord au fost determinate prin studiul bibliografic al comportamentului dinamic al pasageriului în timpul impactului.

Cercetarea experimentală este efectuată în laboratorul “Caroserii și Analiză Structurală” din Centrul de Cercetare “Ingineria Autovehiculelor”, laborator care dispune de echipamente și instalații experimentale compatibile investigațiilor la impact ale structurilor montate în habitacul automobilului.

După cum a rezultat din studiul numeric al structurilor auxetice realizate prin metoda fabricării aditive, precum că în construcția actuală, structura de rezistență a planșei bord este de natură să ofere un nivel de protecție corespunzător iar pentru construcția cu structura degradată, se depășesc limitele admise, cercetarea experimentală efectuată analizează performanța structurală a unei planșe bord a cărei structură de rezistență a fost degradată. Ca ipoteză de lucru, această situație corespunde inclusiv cazului în care procesul de proiectare se află la început și este necesară definirea unei soluții tehnice pentru obținerea nivelului de securitate impus prin normele de omologare a automobilului.

În ultima parte a capitolului sunt prezentate, ca modalitate de validare a rezultatelor experimentale, evaluarea numerică a performanțelor structurale ale planșei bord iar din analiza comparativă a rezultatelor numerice cu rezultatele experimentale se constată o bună similitudine între cele două seturi de rezultate, validându-se în acest mod modelul numeric al planșei bord cu structura de rezistență degradată.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Definirea și clasificarea materialelor, (f.a.) 1-8.
- [2] D.I. Georgiana, L. Enăchescu -București, *Procedee Și Tehnologii De Prelucrare a Materialelor Compozite*, (f.a.). <http://www.sinuc.utilajutcb.ro/SINUC-2010/SECTIA--IV/10.IV.11.pdf>.
- [3] I. Albon, *Material Database Release Notes Autodesk Moldflow*, (2018).
- [4] N.S. Ha, G. Lu, A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications, Elsevier Ltd, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107496>.
- [5] Y. Ding, S. Wang, Z. Zheng, L. Yang, J. Yu, Dynamic crushing of cellular materials: A unique dynamic stress-strain state curve, *Mech. Mater.* 100 (2016) 219-231. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2016.07.001>.
- [6] M.M. Davoodi, S.M. Sapuan, D. Ahmad, A. Aidy, A. Khalina, M. Jonoobi, Concept selection of car bumper beam with developed hybrid bio-composite material, *Mater. Des.* 32 (2011) 4857-4865. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.011>.
- [7] I. Zgura, M. Enculescu, C. Istrate, R. Negrea, M. Bacalum, L. Nedelcu, M.E. Barbinta-Patrascu, Performant composite materials based on oxide semiconductors and metallic nanoparticles generated from cloves and mandarin peel extracts, *Nanomaterials.* 10 (2020). <https://doi.org/10.3390/nano10112146>.
- [8] A. Reyes, O.S. Hopperstad, O.G. Lademo, M. Langseth, Modeling of textured aluminum alloys used in a bumper system: Material tests and characterization, *Comput. Mater. Sci.* 37 (2006) 246-268. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2005.07.001>.
- [9] M. Bocciarelli, G. Bolzon, G. Maier, A constitutive model of metal-ceramic functionally graded material behavior: Formulation and parameter identification, *Comput. Mater. Sci.* 43 (2008) 16-26. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2007.07.047>.
- [10] D.L. Tomasko, A. Burley, L. Feng, S.K. Yeh, K. Miyazono, S. Nirmal-Kumar, I. Kusaka, K. Koelling, Development of CO2 for polymer foam applications, *J. Supercrit. Fluids.* 47 (2009) 493-499. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2008.10.018>.
- [11] L. Andena, F. Caimmi, L. Leonardi, M. Nacucchi, F. De Pascalis, Compression of polystyrene and polypropylene foams for energy absorption applications: A combined mechanical and microstructural study, *J. Cell. Plast.* 55 (2019) 49-72. <https://doi.org/10.1177/0021955X18806794>.
- [12] M.M. Davoodi, S.M. Sapuan, R. Yunus, Conceptual design of a polymer composite automotive bumper energy absorber, *Mater. Des.* 29 (2008) 1447-1452. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.07.011>.
- [13] W. Zhang, A.S. Wu, J. Sun, Z. Quan, B. Gu, B. Sun, C. Cotton, D. Heider, T.W. Chou, Characterization of residual stress and deformation in additively manufactured ABS polymer and composite specimens, *Compos. Sci. Technol.* 150 (2017) 102-110. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.07.017>.
- [14] D. Chen, J. Li, J. Ren, Study on sound absorption property of ramie fiber reinforced poly(l-lactic acid) composites: Morphology and properties, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 41 (2010) 1012-1018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.04.007>.
- [15] M.I. Misnon, M.M. Islam, J.A. Epaarachchi, K.T. Lau, Analyses of woven hemp fabric characteristics for composite reinforcement, *Mater. Des.* 66 (2015) 82-92. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.037>.
- [16] S. Boria, S. Pettinari, Mathematical design of electric vehicle impact attenuators: Metallic vs composite material, *Compos. Struct.* 115 (2014) 51-59. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.04.010>.
- [17] X. Yuan, M. Chen, Y. Yao, X. Guo, Y. Huang, Z. Peng, B. Xu, B. Lv, R. Tao, S. Duan, H. Liao, K. Yao, Y. Li, H. Lei, X. Chen, G. Hong, D. Fang, Recent progress in the design and fabrication of multifunctional structures based on metamaterials, *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* 25 (2021) 100883. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2020.100883>.
- [18] A. Ș M. Membru, A. Sidorenko, I. De Inginerie, *NANOTEHNOLOGIILE*, 2 (2014) 33-38.
- [19] M. Kadic, G.W. Milton, M. van Hecke, M. Wegener, 3D metamaterials, *Nat. Rev. Phys.* 1 (2019) 198-210. <https://doi.org/10.1038/s42254-018-0018-y>.
- [20] X. Ren, R. Das, P. Tran, T.D. Ngo, Y.M. Xie, Auxetic metamaterials and structures: A review, *Smart Mater. Struct.* 27 (2018). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaa61c>.
- [21] V. Fedotov, *Metamateria*, (2017) 1351-1377. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-48933-9>.

- [22] J.U. Surjadi, L. Gao, H. Du, X. Li, X. Xiong, N.X. Fang, Y. Lu, Mechanical Metamaterials and Their Engineering Applications, *Adv. Eng. Mater.* 21 (2019) 1-37. <https://doi.org/10.1002/adem.201800864>.
- [23] H.P. Heim, M. Tromm, General aspects of foam injection molding using local precision mold opening technology, *Polymer (Guilfd)*. 56 (2015) 111-118. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2014.10.070>.
- [24] E. Zaretsky, Z. Asaf, E. Ran, F. Aizik, Impact response of high density flexible polyurethane foam, *Int. J. Impact Eng.* 39 (2012) 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.09.004>.
- [25] A. Krundaeva, G. De Bruyne, F. Gagliardi, W. Van Paepegem, Dynamic compressive strength and crushing properties of expanded polystyrene foam for different strain rates and different temperatures, *Polym. Test.* 55 (2016) 61-68. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.08.005>.
- [26] S.C. Sinha, J. Mitchell, SA E TECHNICAL Constitutive Modeling of Energy Absorbing Foams, (2018).
- [27] R. Pathare, A. Lokhande, G. Vogel, P. Shembekar, G. Slik, M. Mirdamadi, Material Model Development of an Energy Absorbing Foam for Occupant Safety, *SAE Tech. Pap.* 2009-Janua (2009). <https://doi.org/10.4271/2009-26-0088>.
- [28] A. Niknejad, M.M. Abedi, G.H. Liaghat, M.Z. Nejad, Absorbed energy by foam-filled quadrangle tubes during the crushing process by considering the interaction effects, *Arch. Civ. Mech. Eng.* 15 (2015) 376-391. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.09.005>.
- [29] M. Avalle, G. Belingardi, A. Ibba, Mechanical models of cellular solids: Parameters identification from experimental tests, *Int. J. Impact Eng.* 34 (2007) 3-27. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2006.06.012>.
- [30] J. Banhart, Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams, *Prog. Mater. Sci.* 46 (2001) 559-632. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(00\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00002-5).
- [31] X. Pang, H. Du, Dynamic characteristics of aluminium foams under impact crushing, *Compos. Part B Eng.* 112 (2017) 265-277. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.12.044>.
- [32] S.R. Reid, Plastic deformation mechanisms in axially compressed metal tubes used as impact energy absorbers, *Int. J. Mech. Sci.* 35 (1993) 1035-1052. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(93\)90054-X](https://doi.org/10.1016/0020-7403(93)90054-X).
- [33] L. Peponi, D. Puglia, L. Torre, L. Valentini, J.M. Kenny, Processing of nanostructured polymers and advanced polymeric based nanocomposites, *Mater. Sci. Eng. R Reports.* 85 (2014) 1-46. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2014.08.002>.
- [34] technical information EPP general technical information EPP general Special types : High density :, 49 (2010) 1-3.
- [35] L. Peroni, M. Avalle, M. Peroni, The mechanical behaviour of aluminium foam structures in different loading conditions, *Int. J. Impact Eng.* 35 (2008) 644-658. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.02.007>.
- [36] R. Bouix, P. Viot, J.L. Lataillade, Polypropylene foam behaviour under dynamic loadings: Strain rate, density and microstructure effects, *Int. J. Impact Eng.* 36 (2009) 329-342. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.11.007>.
- [37] M. Moffat, Expanded Polystyrene (EPS), is the generic industry name for a white, open-celled, porous, rigid material made by expanding polystyrene beads with steam and bonding the beads together under pressure., (f.a.).
- [38] Y.J. Zhou, G. Lu, J.L. Yang, Finite element study of energy absorption foams for headgear in football (soccer) games, *Mater. Des.* 88 (2015) 162-169. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.120>.
- [39] N.M.B.T. Days, Hybrid solutions by Sekisui Plastics, (2018).
- [40] D.Ț. Ii, CAPITOLUL 1 Caracterizarea materialelor compozite, (f.a.).
- [41] D.H. Kim, H.G. Kim, H.S. Kim, Design optimization and manufacture of hybrid glass/carbon fiber reinforced composite bumper beam for automobile vehicle, *Compos. Struct.* 131 (2015) 742-752. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.06.028>.
- [42] H. Zarei, M. Kröger, H. Albertsen, An experimental and numerical crashworthiness investigation of thermoplastic composite crash boxes, *Compos. Struct.* 85 (2008) 245-257. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.10.028>.
- [43] C. McGregor, R. Vaziri, X. Xiao, Finite element modelling of the progressive crushing of braided composite tubes under axial impact, *Int. J. Impact Eng.* 37 (2010) 662-672. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.09.005>.
- [44] H. Lu, X. Wang, T. Chen, In-plane dynamics crushing of a combined auxetic honeycomb with negative Poisson's ratio and enhanced energy absorption, *Thin-Walled Struct.* 160 (2021) 107366. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107366>.

- [45] M. Ashjari, Auxetic Materials Materials with Negative Poisson's Ratio, *Mater. Sci. Eng. Int. J.* 1 (2017) 62-64. <https://doi.org/10.15406/mseij.2017.01.00011>.
- [46] Y. Prawoto, Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: A structural review on the negative Poisson's ratio, *Comput. Mater. Sci.* 58 (2012) 140-153. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.02.012>.
- [47] S. Hou, T. Liu, Z. Zhang, X. Han, Q. Li, How does negative Poisson's ratio of foam filler affect crashworthiness?, *Mater. Des.* 82 (2015) 247-259. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.05.050>.
- [48] J.N. Grima, L. Mizzi, K.M. Azzopardi, R. Gatt, Auxetic Perforated Mechanical Metamaterials with Randomly Oriented Cuts, *Adv. Mater.* 28 (2016) 385-389. <https://doi.org/10.1002/adma.201503653>.
- [49] A. Rafsanjani, D. Pasini, Bistable auxetic mechanical metamaterials inspired by ancient geometric motifs, *Extrem. Mech. Lett.* 9 (2016) 291-296. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2016.09.001>.
- [50] P.U. Kelkar, H.S. Kim, K.H. Cho, J.Y. Kwak, C.Y. Kang, H.C. Song, Cellular auxetic structures for mechanical metamaterials: A review, *Sensors (Switzerland)*. 20 (2020). <https://doi.org/10.3390/s20113132>.
- [51] C. Anurag, C.K. Anvesh, S. Katam, Auxetic materials (IJRASET), *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.* 221 (2007) 565-575.
- [52] K.K. Saxena, R. Das, E.P. Calius, Three Decades of Auxetics Research – Materials with Negative Poisson's Ratio: A Review, *Adv. Eng. Mater.* 18 (2016) 1847-1870. <https://doi.org/10.1002/adem.201600053>.
- [53] Z. Wang, A. Zulifqar, H. Hu, Auxetic composites in aerospace engineering, *Adv. Compos. Mater. Aerosp. Eng.* (2016) 213-240. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100037-3.00007-9>.
- [54] D. Mousanezhad, B. Haghpahan, R. Ghosh, A.M. Hamouda, H. Nayeb-Hashemi, A. Vaziri, Elastic properties of chiral, anti-chiral, and hierarchical honeycombs: A simple energy-based approach, *Theor. Appl. Mech. Lett.* 6 (2016) 81-96. <https://doi.org/10.1016/j.taml.2016.02.004>.
- [55] W. Wu, W. Hu, G. Qian, H. Liao, X. Xu, F. Berto, Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: A review, *Mater. Des.* 180 (2019) 107950. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107950>.
- [56] E. Science, G. Britain, chiral honeycombe. Poisson's ratio. 1. INTRODUCTION Cellular solids are used widely in a variety of engineering applications. In particular, *Science* (80-.). 39 (1997).
- [57] N. Novak, M. Vesenjaj, S. Tanaka, K. Hokamoto, Z. Ren, Compressive behaviour of chiral auxetic cellular structures at different strain rates, *Int. J. Impact Eng.* 141 (2020) 103566. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103566>.
- [58] D. Prall, R.S. Lakes, Properties of chiral honeycombe with Poisson's ratio of -1, *Int. J. Mech. Sci.* 39 (1997).
- [59] H.M.A. Kolken, A.A. Zadpoor, Auxetic mechanical metamaterials, *RSC Adv.* 7 (2017) 5111-5129. <https://doi.org/10.1039/c6ra27333e>.
- [60] A. Alderson, K.L. Alderson, Auxetic materials, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part G J. Aerosp. Eng.* 221 (2007) 565-575. <https://doi.org/10.1243/09544100JAERO185>.
- [61] N.D. Tabacu S, Negrea R, Experimental, numerical and analytical investigation of 2D tetra-anti-chiral structure under compressive loads, *Thin-Walled Struct.* 155 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106929>.
- [62] Q. Wang, Z. Yang, Z. Lu, X. Li, Mechanical responses of 3D cross-chiral auxetic materials under uniaxial compression, *Mater. Des.* 186 (2020) 108226. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108226>.
- [63] P. Baranowski, P. Płatek, A. Antolak-Dudka, M. Sarzyński, M. Kuciewicz, T. Durejko, J. Małachowski, J. Janiszewski, T. Czujko, Deformation of honeycomb cellular structures manufactured with Laser Engineered Net Shaping (LENS) technology under quasi-static loading: Experimental testing and simulation, *Addit. Manuf.* 25 (2019) 307-316. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.018>.
- [64] C. Qi, F. Jiang, C. Yu, S. Yang, In-plane crushing response of tetra-chiral honeycombs, *Int. J. Impact Eng.* 130 (2019) 247-265. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.04.019>.
- [65] A. Partovi Meran, T. Toprak, A. Muğan, Numerical and experimental study of crashworthiness parameters of honeycomb structures, *Thin-Walled Struct.* 78 (2014) 87-94. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.12.012>.
- [66] K.E. Evans, A. Alderson, Auxetic materials: Functional materials and structures from lateral thinking!, *Adv. Mater.* 12 (2000) 617-628. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4095\(200005\)12:9<617::AID-ADMA617>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4095(200005)12:9<617::AID-ADMA617>3.0.CO;2-3).
- [67] L.N.S. Chiu, B.G. Falzon, R. Boman, B. Chen, W. Yan, Finite element modelling of composite structures under crushing load, *Compos. Struct.* 131 (2015) 215-228.

- <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.05.008>.
- [68] L.L. Hu, Z.R. Luo, Q.Y. Yin, Negative Poisson's ratio effect of re-entrant anti-trichiral honeycombs under large deformation, *Thin-Walled Struct.* 141 (2019) 283-292. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.04.032>.
 - [69] Y. Guo, J. Zhang, L. Chen, B. Du, H. Liu, L. Chen, W. Li, Y. Liu, Deformation behaviors and energy absorption of auxetic lattice cylindrical structures under axial crushing load, *Aerosp. Sci. Technol.* 98 (2020) 105662. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105662>.
 - [70] L. Wei, X. Zhao, Q. Yu, G. Zhu, A novel star auxetic honeycomb with enhanced in-plane crushing strength, *Thin-Walled Struct.* 149 (2020) 106623. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106623>.
 - [71] L. Maheo, P. Viot, Impact on multi-layered polypropylene foams, *Int. J. Impact Eng.* 53 (2013) 84-93. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.03.011>.
 - [72] R. Bouix, P. Viot, J. Lataillade, R. Bouix, P. Viot, J.L. Polypropylene, Polypropylene foam behaviour under dynamic loadings : Strain rate , density and microstructure effects To cite this version : HAL Id : hal-00871572 Science Arts & Métiers (SAM), *Int. J. Impact Eng.* (2013).
 - [73] X. An, Y. Gao, J. Fang, G. Sun, Q. Li, Crashworthiness design for foam-filled thin-walled structures with functionally lateral graded thickness sheets, *Thin-Walled Struct.* 91 (2015) 63-71. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.01.011>.
 - [74] A. Taherkhani, M. Sadighi, A.S. Vanini, M.Z. Mahmoudabadi, An experimental study of high-velocity impact on elastic-plastic crushable polyurethane foams, *Aerosp. Sci. Technol.* 50 (2016) 245-255. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.11.013>.
 - [75] B.F. Xing, D.Y. Hu, Y.X. Sun, J.L. Yang, T.X. Yu, Effects of hinges and deployment angle on the energy absorption characteristics of a single cell in a deployable energy absorber, *Thin-Walled Struct.* 94 (2015) 107-119. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.04.015>.
 - [76] M. Antunes, J.I. Velasco, Polymeric foams, *Polymers (Basel)*. 11 (2019) 4-8. <https://doi.org/10.3390/polym11071179>.
 - [77] I.A. Buriak, V.O. Zhurba, G.S. Vorobjov, V.R. Kulizhko, O.K. Kononov, O. Rybalko, Metamaterials: Theory, classification and application strategies (review), *J. Nano- Electron. Phys.* 8 (2016) 1-11. [https://doi.org/10.21272/jnep.8\(4\(2\)\).04088](https://doi.org/10.21272/jnep.8(4(2)).04088).
 - [78] X. Yu, J. Zhou, H. Liang, Z. Jiang, L. Wu, Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review, *Prog. Mater. Sci.* 94 (2018) 114-173. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.12.003>.
 - [79] X. Luo, Metamaterials and Metasurfaces, *Adv. Opt. Mater.* 7 (2019) 7-8. <https://doi.org/10.1002/adom.201900885>.
 - [80] D.R. Smith, J.B. Pendry, M.C.K. Wiltshire, Metamaterials and negative refractive index, *Science (80-.)*. 305 (2004) 788-792. <https://doi.org/10.1126/science.1096796>.
 - [81] N. Novak, M. Vesenjak, L. Krstulović-Opara, Z. Ren, Mechanical characterisation of auxetic cellular structures built from inverted tetrapods, *Compos. Struct.* 196 (2018) 96-107. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.024>.
 - [82] N. Novak, L. Starčević, M. Vesenjak, Z. Ren, Blast response study of the sandwich composite panels with 3D chiral auxetic core, *Compos. Struct.* 210 (2019) 167-178. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.11.050>.
 - [83] N. Novak, L. Krstulović-Opara, Z. Ren, M. Vesenjak, Compression and shear behaviour of graded chiral auxetic structures, *Mech. Mater.* 148 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103524>.
 - [84] N. Novak, M. Borovinšek, M. Vesenjak, M. Wormser, C. Körner, S. Tanaka, K. Hokamoto, Z. Ren, Crushing Behavior of Graded Auxetic Structures Built from Inverted Tetrapods under Impact, *Phys. Status Solidi Basic Res.* 256 (2019) 1-7. <https://doi.org/10.1002/pssb.201800040>.
 - [85] S. Hou, C. Shu, S. Zhao, T. Liu, X. Han, Q. Li, Experimental and numerical studies on multi-layered corrugated sandwich panels under crushing loading, *Compos. Struct.* 126 (2015) 371-385. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.02.039>.
 - [86] J. Ou, Z. Ma, J. Peters, S. Dai, N. Vlavianos, H. Ishii, KinetiX - designing auxetic-inspired deformable material structures, *Comput. Graph.* 75 (2018) 72-81. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2018.06.003>.
 - [87] S.S. Rao, *The Finite Element Method in Engineering*, Elsevier Butterworth-Heinmann, 2005.
 - [88] A. Esnaola, B. Elguezabal, J. Aurrekoetxea, I. Gallego, I. Ulacia, Optimization of the semi-hexagonal geometry of a composite crush structure by finite element analysis, *Compos. Part B Eng.* 93 (2016) 56-66. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.03.002>.
 - [89] N. Li, S. Huang, G. Zhang, R. Qin, W. Liu, H. Xiong, G. Shi, J. Blackburn, Progress in additive manufacturing on new materials: A review, *J. Mater. Sci. Technol.* 35 (2019) 242-269. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.002>.

- [90] Y. Jiang, Z. Liu, N. Matsuhisa, D. Qi, W.R. Leow, H. Yang, J. Yu, G. Chen, Y. Liu, C. Wan, Z. Liu, X. Chen, Auxetic Mechanical Metamaterials to Enhance Sensitivity of Stretchable Strain Sensors, *Adv. Mater.* 30 (2018) 1-8. <https://doi.org/10.1002/adma.201706589>.
- [91] M. Gude, R. Koschichow, A. Liebsch, M. Müller, M. Stegelmann, Morphological Analysis and Numerical Modelling of the Mechanical Behaviour of Polypropylene Bead Foams, 7th Int. Conf. Mech. Mater. Des. (2017) 569-574.
- [92] G. Sun, D. Chen, X. Huo, G. Zheng, Q. Li, Experimental and numerical studies on indentation and perforation characteristics of honeycomb sandwich panels, *Compos. Struct.* 184 (2018) 110-124. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.09.025>.
- [93] S. Tabacu, C. Ducu, Experimental testing and numerical analysis of FDM multi-cell inserts and hybrid structures, *Thin-Walled Struct.* 129 (2018) 197-212. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.04.009>.
- [94] H. Ebrahimi, D. Mousanezhad, H. Nayeib-Hashemi, J. Norato, A. Vaziri, 3D cellular metamaterials with planar anti-chiral topology, *Mater. Des.* 145 (2018) 226-231. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.02.052>.
- [95] W. Zhang, R. Neville, D. Zhang, F. Scarpa, L. Wang, R. Lakes, The two-dimensional elasticity of a chiral hinge lattice metamaterial, *Int. J. Solids Struct.* 141-142 (2018) 254-263. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.02.027>.
- [96] H. Yang, B. Wang, L. Ma, Designing hierarchical metamaterials by topology analysis with tailored Poisson's ratio and Young's modulus, *Compos. Struct.* 214 (2019) 359-378. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.076>.
- [97] A. Ion, P. Baudisch, Metamaterial devices, *ACM SIGGRAPH 2018 Stud. SIGGRAPH 2018*. (2018). <https://doi.org/10.1145/3214822.3214827>.
- [98] B.G. Vijayasimha Reddy, K. V. Sharma, T. Yella Reddy, Deformation and impact energy absorption of cellular sandwich panels, *Mater. Des.* 61 (2014) 217-227. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.047>.
- [99] A.A.A. Alghamdi, Collapsible impact energy absorbers: An overview, *Thin-Walled Struct.* 39 (2001) 189-213. [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(00\)00048-3](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(00)00048-3).
- [100] S. Tabacu, S. Parlac, C. Tomus, V. Baba, Computational modelling of vehicle interior components for impact applications: Moulding residual stress, *Int. J. Crashworthiness.* 17 (2012) 591-605. <https://doi.org/10.1080/13588265.2012.703473>.
- [101] S. Tabacu, N. Pandrea, Numerical (analytical-based) model for the study of vehicle frontal collision, *Int. J. Crashworthiness.* 13 (2008) 387-410. <https://doi.org/10.1080/13588260802030588>.
- [102] X. Yang, Y. Xia, Q. Zhou, Influence of stress softening on energy-absorption capability of polymeric foams, *Mater. Des.* 32 (2011) 1167-1176. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.10.024>.
- [103] S. Kleiven, A Parametric Study of Energy Absorbing Foams for Head Injury Prevention, 20th ESV Conf. Proc. (2007) 1-12. <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/nrd-01/esv/esv20/07-0385-O.pdf>.
- [104] N.D. Negrea Raluca1, Predoiu Paul 1, Tabacu Stefan 1, Ducu Catalin2, Performance analysis of foam materials used as add on safety structures, (f.a.).
- [105] W. Yang, Z.-M. Li, W. Shi, B.-H. Xie, M.-B. Yang, On auxetic materials: Review, *J. Mater. Sci.* 39 (2004) 3269-3280.
- [106] N. Novak, K. Hokamoto, M. Vesenjak, Z. Ren, Mechanical behaviour of auxetic cellular structures built from inverted tetrapods at high strain rates, *Int. J. Impact Eng.* 122 (2018) 83-90. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.08.001>.
- [107] T. Wang, L. Wang, Z. Ma, G.M. Hulbert, Elastic analysis of auxetic cellular structure consisting of re-entrant hexagonal cells using a strain-based expansion homogenization method, *Mater. Des.* 160 (2018) 284-293. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.013>.
- [108] Z. Lu, Q. Wang, X. Li, Z. Yang, Elastic properties of two novel auxetic 3D cellular structures, *Int. J. Solids Struct.* 124 (2017) 46-56. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.05.031>.
- [109] R. Hamzehei, S. Rezaei, J. Kadkhodapour, A.P. Anaraki, A. Mahmoudi, 2D triangular anti-trichiral structures and auxetic stents with symmetric shrinkage behavior and high energy absorption, *Mech. Mater.* 142 (2020) 103291. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.103291>.
- [110] E. Harkati, N. Daoudi, A. Bezazi, A. Haddad, F. Scarpa, In-plane elasticity of a multi re-entrant auxetic honeycomb, *Compos. Struct.* 180 (2017) 130-139. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.014>.
- [111] K. Meena, S. Singamneni, A new auxetic structure with significantly reduced stress concentration effects, *Mater. Des.* 173 (2019) 107779. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107779>.
- [112] V.H. Carneiro, H. Puga, Axisymmetric auxetics, *Compos. Struct.* 204 (2018) 438-444. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.116>.

- [113] X. Ren, R. Das, P. Tran, T.D. Ngo, Y.M. Xie, Auxetic metamaterials and structures: A review, *Smart Mater. Struct.* 27 (2018). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaa61c>.
- [114] Y. Jiang, B. Rudra, J. Shim, Y. Li, Limiting strain for auxeticity under large compressive Deformation: Chiral vs. re-entrant cellular solids, *Int. J. Solids Struct.* 162 (2019) 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.11.035>.
- [115] S. Tabacu, P. Predoiu, R. Negrea, A theoretical model for the estimate of plateau force for the crushing process of 3D auxetic anti-tetra chiral structures, *Int. J. Mech. Sci.* 199 (2021) 106405. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106405>.
- [116] W. Wu, Y. Tao, Y. Xia, J. Chen, H. Lei, L. Sun, D. Fang, Mechanical properties of hierarchical anti-tetrachiral metastructures, *Extrem. Mech. Lett.* 16 (2017) 18-32. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2017.08.004>.
- [117] E. Idczak, T. Streck, Minimization of Poisson's ratio in anti-tetra-chiral two-phase structure, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 248 (2017). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/248/1/012006>.
- [118] R. Lakes, Cellular solid structures with unbounded thermal expansion, *J. Mater. Sci. Lett.* 15 (1996) 475-477. <https://doi.org/10.1007/bf00275406>.
- [119] R. Zhong, M. Fu, Q. Yin, O. Xu, L. Hu, Special characteristics of tetrachiral honeycombs under large deformation, *Int. J. Solids Struct.* 169 (2019) 166-176. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2019.04.020>.
- [120] S. Tabacu, R.F. Negrea, D. Negrea, Experimental, numerical and analytical investigation of 2D tetra-anti-chiral structure under compressive loads, *Thin-Walled Struct.* 155 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106929>.
- [121] S. Tabacu, I. Tabacu, A. Hadar, Computational modelling of vehicle interior components for impact applications: Thickness analysis, *Int. J. Crashworthiness.* 16 (2011) 421-438. <https://doi.org/10.1080/13588265.2011.606994>.
- [122] S. Tabacu, S. Parlac, C. Tomus, V. Baba, Computational modelling of vehicle interior components for impact applications: moulding residual stress, *Int. J. Crashworthiness.* 17 (2012) 591-605. <https://doi.org/10.1080/13588265.2012.703473>.
- [123] S. Tabacu, C. Ducu, Numerical investigations of 3D printed structures under compressive loads using damage and fracture criterion: Experiments, parameter identification, and validation, *Extrem. Mech. Lett.* 39 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.eml.2020.100775>.
- [124] K.I. Byberg, A.W. Gebisa, H.G. Lemu, Mechanical properties of ULTEM 9085 material processed by fused deposition modeling, *Polym. Test.* 72 (2018) 335-347. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.10.040>.
- [125] K. Schnittker, E. Arrieta, X. Jimenez, D. Espalin, R.B. Wicker, D.A. Roberson, Integrating digital image correlation in mechanical testing for the materials characterization of big area additive manufacturing feedstock, *Addit. Manuf.* 26 (2019) 129-137. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.12.016>.
- [126] M.A. Caminero, I. García-Moreno, G.P. Rodríguez, J.M. Chacón, Internal damage evaluation of composite structures using phased array ultrasonic technique: Impact damage assessment in CFRP and 3D printed reinforced composites, *Compos. Part B Eng.* 165 (2019) 131-142. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.091>.
- [127] G. Dong, G. Wijaya, Y. Tang, Y.F. Zhao, Optimizing process parameters of fused deposition modeling by Taguchi method for the fabrication of lattice structures, *Addit. Manuf.* 19 (2018) 62-72. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.11.004>.
- [128] A. Alafaghani, A. Qattawi, B. Alrawi, A. Guzman, Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach, *Procedia Manuf.* 10 (2017) 791-803. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.079>.
- [129] R.V. Rao, D.P. Rai, Optimization of fused deposition modeling process using teaching-learning-based optimization algorithm, *Eng. Sci. Technol. an Int. J.* 19 (2016) 587-603. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.09.008>.
- [130] Z. Weng, J. Wang, T. Senthil, L. Wu, Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing, *Mater. Des.* 102 (2016) 276-283. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.045>.
- [131] A. Garg, A. Bhattacharya, An insight to the failure of FDM parts under tensile loading: finite element analysis and experimental study, *Int. J. Mech. Sci.* 120 (2017) 225-236. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.11.032>.
- [132] M. Dawoud, I. Taha, S.J. Ebeid, Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques, *J. Manuf. Process.* 21 (2016) 39-45. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.11.002>.
- [133] M. Kaveh, M. Badrossamay, E. Foroozmehr, A. Hemasian Etefagh, Optimization of the printing

- parameters affecting dimensional accuracy and internal cavity for HIPS material used in fused deposition modeling processes, *J. Mater. Process. Technol.* 226 (2015) 280-286. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.07.012>.
- [134] O.A. Mohamed, S.H. Masood, J.L. Bhowmik, Optimization of fused deposition modeling process parameters for dimensional accuracy using I-optimality criterion, *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 81 (2016) 174-196. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.12.011>.
- [135] Q. Wang, S. Bruschi, A. Ghiotti, Y. Mu, Modelling of fracture occurrence in Ti6Al4V sheets at elevated temperature accounting for anisotropic behaviour, *Int. J. Mech. Sci.* 150 (2019) 471-483. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.10.045>.
- [136] Y. Xiao, Y. Hu, An extended iterative identification method for the GISSMO model, *Metals (Basel)*. 9 (2019). <https://doi.org/10.3390/met9050568>.
- [137] T. Webbe Kerekes, H. Lim, W.Y. Joe, G.J. Yun, Characterization of process–deformation/damage property relationship of fused deposition modeling (FDM) 3D-printed specimens, *Addit. Manuf.* 25 (2019) 532-544. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.008>.
- [138] M. Kuciewicz, P. Baranowski, J. Małachowski, A method of failure modeling for 3D printed cellular structures, *Mater. Des.* 174 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107802>.
- [139] J. Hallquist, *LS-DYNA Keyword User's Manual*, Livermore Software and Technology Corporation, Livermore CA., 2003.
- [140] S. Tabacu, C. Ducu, Numerical investigations of 3D printed structures under compressive loads using damage and fracture criterion: Experiments, parameter identification, and validation, *Extrem. Mech. Lett.* 39 (2020) 100775. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2020.100775>.
- [141] I.A. Sandu, C. Onescu, S. Tabacu, C. Ducu, Complex characterization of the material, in: 30th SIAR Int. Congr. Automot. Transp. Eng., Springer, 2019. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-32564-0_79.
- [142] L. Kellner, M. Stender, R.U.F. von Bock und Polach, H. Herrnring, S. Ehlers, N. Hoffmann, K. V. Høyland, Establishing a common database of ice experiments and using machine learning to understand and predict ice behavior, *Cold Reg. Sci. Technol.* 162 (2019) 56-73. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.02.007>.
- [143] A.R. Torrado, C.M. Shemelya, J.D. English, Y. Lin, R.B. Wicker, D.A. Roberson, Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing, *Addit. Manuf.* 6 (2015) 16-29. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.02.001>.
- [144] A. Neimitz, J. Galkiewicz, I. Dzioba, Calibration of constitutive equations under conditions of large strains and stress triaxiality, *Arch. Civ. Mech. Eng.* 18 (2018) 1123-1135. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.02.013>.
- [145] R.H.J. Peerlings, L.H. Poh, M.G.D. Geers, An implicit gradient plasticity-damage theory for predicting size effects in hardening and softening, *Eng. Fract. Mech.* 95 (2012) 2-12. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2011.12.016>.
- [146] D. Pulungan, G. Lubineau, A. Yudhanto, R. Yaldiz, W. Schijve, Identifying design parameters controlling damage behaviors of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites using micromechanics as a virtual testing tool, *Int. J. Solids Struct.* 117 (2017) 177-190. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.03.026>.
- [147] G. Gu, Y. Xia, Q. Zhou, On the fracture possibility of thin-walled tubes under axial crushing, *Thin-Walled Struct.* 55 (2012) 85-95. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.03.005>.
- [148] M. Körgesaar, The effect of low stress triaxialities and deformation paths on ductile fracture simulations of large shell structures, *Mar. Struct.* 63 (2019) 45-64. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2018.08.004>.
- [149] M. Dunand, D. Mohr, Effect of Lode parameter on plastic flow localization after proportional loading at low stress triaxialities, *J. Mech. Phys. Solids.* 66 (2014) 133-153. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2014.01.008>.
- [150] V.P. Nguyen, An open source program to generate zero-thickness cohesive interface elements, *Adv. Eng. Softw.* 74 (2014) 27-39. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2014.04.002>.
- [151] O. Shor, R. Vaziri, Application of the local cohesive zone method to numerical simulation of composite structures under impact loading, *Int. J. Impact Eng.* 104 (2017) 127-149. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.01.022>.
- [152] J. Li, S. Yang, D. Li, V. Chalivendra, Numerical and experimental studies of additively manufactured polymers for enhanced fracture properties, *Eng. Fract. Mech.* 204 (2018) 557-569. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.11.001>.
- [153] N.J. Mills, A. Gilchrist, Finite-element analysis of bicycle helmet oblique impacts, *Int. J. Impact Eng.* 35 (2008) 1087-1101. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.05.006>.