



Universitatea
Transilvania
din Brașov

ȘCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea de inginerie mecanică

Ing. Mihaela-Andreea IFTIMICIUC

TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT/ ABSTRACT

Conducător științific

Prof. Dr. Ing. Simona LACHE

BRAȘOV, 2021

Ing. Mihaela - Andreea IFTIMICIUC

TEZĂ DE DOCTORAT

Structuri celulare piramidale expandate mecanic pentru panouri sandwich

Mechanically Expanded Pyramidal Cellular Structures for Sandwich Panels

Domeniul de doctorat: Inginerie Mecanică

REZUMAT/ ABSTRACT

Conducător științific

Prof.dr.ing. Simona LACHE

D-lui/ D-nei

Componența comisiei de doctorat

Numită prin ordinul Rectorului Universității Transilvania din Brașov

Nr. 11321 / 21.07.2021

PREȘEDINTE: Prof. Dr. Eng. Ioan-Călin ROȘCA,
Universitatea Transilvania din Brașov

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC: Prof.dr.ing. Simona LACHE
Universitatea Transilvania din Brașov

REFERENȚI: Prof. Dr. Eng. Dirk VANDEPITTE,
Katholieke Universiteit Leuven

Prof. Dr. Eng. Anton HADĂR,
Universitatea Politehnica din București

Prof.dr.ing. Sorin VLASE,
Universitatea Transilvania din Brașov

Data, ora și locul susținerii publice a tezei de doctorat:

24 Septembrie 2021, ora 9.00, sala UII3.

Eventualele aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării vă rugăm să le transmiteți în timp util, pe adresa mihaela.iftimiciuc@unitbv.ro .

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

Vă mulțumim.

CUPRINS

	Pg. Rezumat	Pg. Teză
Prefață	4	13
Mulțumiri.....	5	14
Introducere.....	6	15
1. Analiza critică a stadiului actual de dezvoltare privind construcția de panouri sandwich	8	17
1.1 Considerații generale.....	8	17
1.2 Tipuri de miezuri celulare utilizate în construcția de panouri sandwich	9	19
1.2.1 Structuri celulare periodice	9	19
■ Miezuri celulare periodice cu topologie închisă sau deschisă	9	19
■ Structuri celulare cu zăbrele	10	20
1.2.2 Structuri celulare stohastice.....	10	21
1.2.3 Structuri celulare ierarhice	10	21
1.3 Materiale și tehnologii utilizate în construcția panourilor sandwich.....	11	22
1.3.1 Materiale și tehnologii utilizate pentru fabricarea fețelor laterale	11	22
1.3.2 Materiale și tehnologii pentru fabricarea miezurilor celulare.....	12	25
■ Expandare mecanică.....	3	26
■ Deformare la rece	13	27
■ Deformare la cald.....	13	28
■ Prototipare rapidă	13	29
■ Împletirea de fire metalice	14	30
■ Tehnici de împăturire	14	31
1.4 Analliza critică a stadiului actual de dezvoltare a miezurilor celulare	14	32
1.5 Concluzii ale analizei stadiului actual	15	36
2. Scopul și obiectivele cercetării	17	38
3. Studiul structurii celulare piramidale pentru construcția de panouri sandwich.....	18	39
3.1 Structura celulară și principiul de fabricație al acesteia	18	39
3.2 Studiul parametric al topologiei celulare	20	41
3.3 Structura celulară trapezoidală	24	48
3.4 Studiu comparativ	28	55
3.5 Concluzii.....	30	59
4. Analiza teoretică și experimentală a structurii celulare piramidale	31	61
4.1 Solicitarea la compresiune	31	61
4.1.1 Elaborarea modelului analitic.....	31	61

4.1.2	Investigarea modurilor proprii de flambaj ale structurii celulare	34	66
4.1.3	Metoda experimentală	34	68
	■ Pregătirea eşantioanelor	34	68
	■ Configurații geometrice investigate	34	69
4.2	Validarea modelului teoretic.....	35	70
4.3	Structura celulară trapezoidală	38	78
4.4	Variația unghiului intern al structurii.....	39	82
4.5	Studiu comparativ	40	84
4.6	Concluzii.....	41	86
5.	Analiza teoretică și experimentală a panoului sandwich construit cu miezul celular	43	87
5.1	Investigarea comportamentului la încovoiere	43	87
5.1.1	Elaborarea modelului numeric.....	43	87
5.1.2	Analiza imperfecțiunilor geometrice	44	90
5.1.3	Metoda experimentală	45	92
	■ Realizarea eşantioanelor	45	92
	■ Investigarea configurațiilor geometrice	46	93
	■ Protocol experimental	47	94
5.2	Validarea modelului numeric - corelarea rezultatelor numerice și exerimentale	49	95
5.3	Studiu comparativ	51	105
5.4	Concluzii.....	53	108
6.	Concluzii generale și contribuții originale	54	109
	Bibliografie	58	113

Prefață

Prezenta teză de doctorat intitulată "Structuri celulare piramidale expandate mecanic pentru panouri sandwich" a reprezentat o experiență personală provocatoare și plină de satisfacții. Aș dori să-mi exprim cea mai mare recunoștință, apreciere și respect față de coordonatorul meu științific, Prof. Dr. ing. Simona Lache, în primul rând, pentru încrederea acordată. Răbdarea și rigoarea academică a dânzei m-au motivat constant să îmi depășesc limitele și au contribuit la formarea mea ca cercetător.

Structura celulară periodică investigată în cadrul acestei teze a fost concepută de conf. dr. ing. Marian N. Velea de la Universitatea Transilvania din Brașov, care mi-a prezentat conceptul de panou sandwich în timpul studiilor de masterat și căruia îi sunt recunoscătoare pentru că mi-a încredințat studiul acestei noi structuri. Aș dori să-i mulțumesc pentru răbdarea, încurajarea constantă și expertiza științifică care au adus o contribuție semnificativă la dezvoltarea mea profesională.

Aș dori să le mulțumesc membrilor comisiei de îndrumare științifică, Prof. dr. ing. Călin Ioan Roșca și Prof. dr. ing. Sorin Vlase pentru observațiile constructive privind lucrarea mea de cercetare și domnului Șef lucr. dr. ing. Alexandru Cătălin Alexandru Filip pentru ajutorul prețios acordat în fabricarea probelor. Implicarea domniei sale a reprezentat un sprijin semnificativ pentru activitatea experimentală.

Pe parcursul studiilor doctorale am avut șansa de a desfășura cercetări experimentale la două universități de prestigiu cu tradiție în a domeniul structurilor ușoare: Institutul Regal de Tehnologie din Stockholm (KTH), Suedia și Katholieke Universiteit Leuven, Belgia, în cadrul unor stagii de cercetare finanțate de Universitatea Transilvania din Brașov. Aceste oportunități au avut o mare influență asupra calității cercetării mele.

Pe această cale aș dori să-i mulțumesc domnului Prof. dr. ing. Per Wennhage din cadrul Laboratorului de structuri ușoare al KTH, pentru expertiza științifică și sprijinul acordat atât în activitatea mea experimentală, cât și în cea teoretică. Apreciez, de asemenea, sprijinul primit de la toți membri Departamentului de structuri ușoare de la KTH.

De asemenea, aș dori să-mi exprim recunoștința sinceră față de Prof. dr. ing. Dirk Vandepitte pentru că m-a primit la Departamentul de Inginerie Mecanică de la KU Leuven, pentru a realiza o parte din cercetările experimentale. Contribuțiile sale științifice și sprijinul său au fost extrem de valoroase pentru dezvoltarea mea profesională și au avut o contribuție semnificativă la consolidarea încrederii mele ca viitor cercetător.

Nu în ultimul rând, aș dori să le mulțumesc din suflet părinților mei pentru sprijinul acordat pe parcursul finalizării tezei de doctorat și logodnicului meu pentru ajutorul, încurajarea constantă și sprijinul emoțional pe parcursul întregului proces.

Mulțumiri

Stagiile internaționale de cercetare de care am beneficiat pe parcursul studiilor doctorale au fost susținute financiar de Universitatea Transilvania din Brașov, prin intermediul programului dedicat studenților doctoranzi pentru stagii de cercetare de scurtă durată.

Introducere

Proiectarea structurilor ușoare s-a dezvoltat odată cu construirea primelor aparate de zbor. Tehnologia de la acea vreme a dus la proiectarea primelor structuri ușoare bazate pe materiale naturale cu densitate redusă, cum ar fi: lemnul, pluta, spuma naturală etc.

Deoarece nevoia de a crește confortului vieții cotidiene a fost întotdeauna considerată o provocare, optimizarea structurilor ușoare a devenit o necesitate pentru a oferi multifuncționalitate și a asigura implementarea acestora în diverse industrii și domenii. Din acest motiv, cercetările extinse în domeniul structurilor ușoare avansate realizate până în prezent oferă o gamă largă de soluții.

Structurile celulare, stocastice (spume) și periodice (fagure de albine), s-au dovedit a fi eficiente în reducerea greutății ansamblelor mecanice, conferind în același timp proprietăți mecanice ridicate și stabilitate structurală.

În ciuda raportului ridicat dintre proprietățile mecanice și greutatea proprie, aceste structuri celulare sunt rareori utilizate independent, ele regăsindu-se, de obicei, în diferite ansamble. Un exemplu de structură ușoară complexă îl reprezintă panoul sandwich. Aceste ansamble au fost utilizate cu succes în industria aerospațială, navală și auto, de la descoperirea lor și până în prezent.

Industria constructoare de panouri sandwich se află în continuă dezvoltare pentru a ține pasul cu cerințele vieții moderne. În prezent, numeroasele soluții prezente pe piață oferă ansamble cu geometrii complexe și cu proprietăți mecanice remarcabile. Rapoarte ridicate între rezistență și greutatea proprie, capacități considerabile de absorbție a energiei de impact, izolare acustică și termică sunt doar câteva dintre avantajele oferite de aceste structuri mecanice.

Cu toate acestea, există, de asemenea, o serie de dezavantaje care merită menționate atunci când se face referire la construcția panourilor sandwich. Costurile ridicate ale tehnologiilor de fabricație existente, capacitatea limitată de a genera geometrii complexe și dificultatea asociată cu asamblarea componentelor sunt doar câteva dintre dezavantajele acestor tipuri de structuri.

Multitudinea dezavantajelor menționate mai sus au condus la întreprinderea preocupărilor științifice către proiectarea unor structuri celulare performante și versatile, cu diverse capacități multifuncționale. Obiectivul principal de interes rămâne proiectarea, dezvoltarea și optimizarea de noi structuri obținute prin intermediul unor tehnologii de fabricație simple și eficiente din punct de vedere al costurilor de producție, reducând în același timp amprenta de dioxid de carbon.

În acest sens, cercetarea efectuată în cadrul prezentei teze de doctorat își propune să investigheze o structură celulară nouă pentru construcția de panouri sandwich, care poate asigura o metodă de fabricație eficientă din punct de vedere al costurilor, precum și o reducere a pierderilor de material în timpul procesului.

În continuare este prezentată o scurtă sinteză a cercetării efectuate pe parcursul acestei teze de doctorat.

Primul capitol prezintă o analiză generală asupra dezvoltării structurilor mecanice ușoare, discutând despre diversitatea materialelor și tehnologiilor utilizate în construcția panourilor sandwich. Aceasta este urmată de o analiză critică a stadiului actual de dezvoltare a structurilor ușoare, care se încheie cu formularea obiectivelor de cercetare definite pentru prezenta teză.

Capitolul al doilea este dedicat prezentării scopului și obiectivelor de cercetare urmărite pe parcursul tezei.

În capitolul al treilea este propusă și investigată o structură celulară periodică nouă. Metoda de fabricație, bazată pe expandare mecanică, este descrisă în detaliu și sunt evidențiate avantajele oferite de aceasta. Se realizează un studiu topologic în vederea definirii relațiilor de calcul a dimensiunilor de gabarit ale miezului, după încheierea procedurii de expandare, cât și un studiu parametric, pentru a înțelege influența metodei de fabricație asupra parametrilor geometrici identificați pe celula unitară a miezului celular.

Capitolul al patrulea tratează elaborarea modelului analitic în vederea calculului rezistenței și rigidității în direcția perpendiculară pe planul mediu al celulei unitare piramidale. Modelul experimental utilizat pentru validarea formulării teoretice este, de asemenea, descris și analizat. Capitolul se încheie cu un studiu comparativ între noul miez piramidal și alte geometrii existente, realizat cu scopul evaluării potențialului structurii celulare studiate.

În capitolul al cincilea sunt investigate proprietățile de încovoiere și forfecare ale panoului sandwich bazat pe structura celulară piramidală, utilizând atât abordarea numerică, cât și cea experimentală. Ultima parte a capitolului prezintă un studiu comparativ între diferite soluții propuse în literatura de specialitate, fiind evidențiate avantajele noului miez celular periodic.

În capitolul al șaselea sunt formulate contribuțiile originale și concluziile generale ale prezentei teze de doctorat. În plus, sunt introduse și discutate sugestii pentru direcții viitoare de cercetare.

1. Analiza critică a stadiului actual de dezvoltare privind construcția de panouri sandwich

1.1 Considerații generale

Un panou sandwich este o structură mecanică complexă ce conține trei componente principale: două fețe exterioare subțiri și rigide plasate de o parte și de cealaltă a unui miez celular cu grosime mare. Miezul este asamblat între fețele laterale cu ajutorul unor metode de lipire specifice (lipire cu adezivi pe bază de rășini, sudare, brazare etc.), Figura 1.1. Rolul stratului de adeziv este de a determina fețele laterale și miezul celular să acționeze ca o structură unitară și trebuie să reziste acelorași sarcini de forfecare ca și miezul celular.

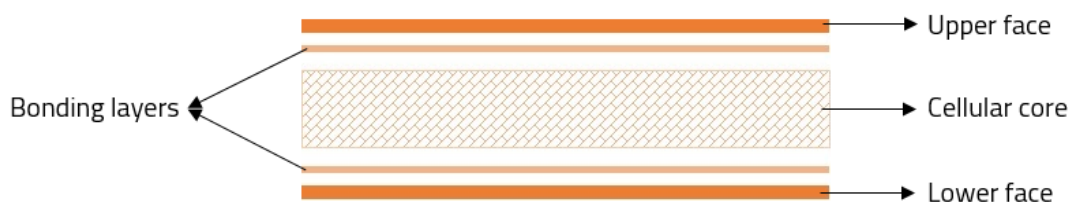


Figura 1.1 Secțiune transversală printr-un panou sandwich.

Miezul celular are rolul de a menține constantă distanța între fețele laterale și de a le stabiliza pentru a preveni efectele de flambaj local. De asemenea, trebuie să permită transferul de încărcări axiale și transversale între acesta și fețele laterale.

Fețele laterale au rolul de a conferi rezistențe la solicitări de compresiune și de tracțiune și asigură rigiditatea la încovoiere și la forfecare în plan a întregului ansamblu [1, 2, 2, 3, 4, 5, 6].

Conceptul de panou sandwich este utilizat pe scară largă în vederea reducerii greutății structurale și pentru a crește capacitatea de absorbție a energiei la impact, având ca principal avantaj faptul că oferă un raport ridicat între rezistența și greutatea proprie, izolare termică precum și un control eficient al transferului de căldură [7, 8, 9, 10].

Cu toate acestea, atunci când se discută despre proiectarea și construcția panourilor sandwich, odată cu dezvoltarea acestora apar noi provocări: *i*) costurile ridicate ale tehnologiilor de fabricație existente, *ii*) capacitatea limitată de a genera topologii complexe și *iii*) dificultatea asociată cu asamblarea componentelor.

Obiectivul principal al cercetărilor ample efectuate în acest domeniu este reprezentat de necesitatea dezvoltării unor noi topologii celulare cu performanțe structurale ridicate, împreună cu tehnologii de fabricație simple, pentru a reduce costurile de producție și pierderile de material din timpul fabricației [2].

Utilitatea reală a implementării utilizării structurilor ușoare într-o multitudine de industrii poate fi motivată de o examinare amănunțită a efectelor pe care poluarea le are asupra mediului înconjurător.

Un exemplu concret este reprezentat de industria constructoare de autovehicule, în care cantitatea de emisii toxice eliberate în atmosferă au fost reglementate din 1992, odată cu adoptarea standardului EU1 de către Consiliul European. Acest standard conține baza legală pentru întreaga flotă terestră în ceea ce privește emisiile de CO₂, indiferent de tipul de combustibil utilizat (benzină sau motorină) [11, 12].

Se poate concluziona că cercetarea în acest domeniu se află în plin proces de dezvoltare și ridică încă o serie de noi provocări. Complexitatea proceselor de fabricație și cantitățile mari de pierderi de material, precum și capacitatea limitată de obținere a unor geometrii complexe cu proprietăți multifuncționale reprezintă doar o parte din provocările actuale. Principalul obiectiv al continuării cercetărilor în domeniul structurilor celulare ușoare este de a dezvolta noi soluții cu performanțe structurale ridicate, împreună cu tehnologii de producție simple care ar putea asigura o reducere generală a costurilor de producție.

1.2 Tipuri de miezuri celulare utilizate pentru construcția de panouri sandwich

Topologia miezurilor celulare utilizate în construcția panourilor sandwich poate fi împărțită în două categorii principale: *i*) structuri celulare periodice și *ii*) structuri celulare stocastice.

1.2.1 Structuri celulare periodice

Principalul avantaj oferit de structurile celulare periodice este că performanța structurală a acestora este direct influențată de proprietățile materialului de bază. În acest sens, acestea pot fi exploatate la maximum prin intermediul topologiei celulei unitate. De obicei, acestea sunt proiectate folosind elemente de tip placă sau bară și pot fi clasificate după cum urmează.

■ *Miezuri celulare periodice cu topologie deschisă sau închisă*

Miezurile celulare periodice cu topologii deschise și canale continue sunt utilizate în aplicații care necesită capacități bune de absorbție a energiei de impact și un schimb de căldură eficient, menținând în același timp o înălțime redusă [13, 14, 15].

Miezurile periodice cu celule închise reprezintă o variație a miezului celular cu geometrie deschisă la care se adaugă o etapă suplimentară în cadrul procesului de fabricație. Aceasta constă în lipirea mai multor panouri ondulate folosind metode de asamblare cum ar fi lipirea cu diverși adezivi, sudarea în puncte etc. [16, 17].

■ *Structuri celulare cu zăbrele*

Miezurile celulare de tip zăbrele prezintă un interes considerabil pentru industria structurilor ușoare, datorită raportului ridicat dintre rezistență și greutate proprie, cât și a potențialului multifuncțional oferit de geometria deschisă. Acestea sunt utilizate cu succes în industria aerospațială și auto [18].

Performanțele mecanice ale panourilor sandwich bazate pe miezuri celulare periodice sunt definite de rigiditatea și rezistența în diferite condiții de încărcare și condiții limită. Atunci când se proiectează structuri celulare cu topologii complexe, este imperativ să se ia în considerare coeficientul lui Poisson al acesteia. Cunoscut și sub denumirea de coeficient de contracție transversală și definit ca raportul dintre deformarea rezultată pe direcția perpendiculară celei în care acționează forța și deformarea în direcția de încărcare, acesta are o influență semnificativă asupra proprietăților mecanice ale miezului celular.

Coeficientul lui Poisson al unei structuri celulare poate fi împărțit în trei categorii: a) pozitiv; b) zero; c) negativ [19, 20, 21, 22].

Structurile celulare care au coeficientul lui Poisson pozitiv, exercită o contracție transversală la tracțiune și o extensie în cazul solicitării la compresiune [23, 24].

Structurile care au coeficientul lui Poisson negativ, cunoscute și sub denumirea de structuri auxetice, se caracterizează prin contracție laterală atunci când sunt supuse unei încărcări de compresiune și expansiune în cazul solicitării la tracțiune [25].

O categorie specială de comportament este reprezentată de structurile al căror coeficient al lui Poisson este egal cu zero, ceea ce înseamnă că nu există nicio deformare transversală atunci când structura este supusă unei solicitări de tracțiune sau compresiune.

Ultimele două categorii sunt de obicei reprezentate de optimizări celulare ale miezului de tip figure de albine și sunt utilizate cu succes în industria aerospațială, biomedicală, navală și auto.

1.2.2 Structuri celulare stohastice

Structurile celulare din spumă sunt utilizate în construcția panourilor sandwich datorită densității relative scăzute, împreună cu un potențial ridicat de absorbție a energiei de impact. Având o rigiditate și o rezistență ridicată, rezistență la oboseală și izolare acustică, acestea au fost utilizate cu succes în construcție palelor turbinelor eoliene și în mai multe aplicații în domeniul transporturilor [26, 27, 28].

Spumele stocastice pot fi împărțite în două categorii principale: *i*) metalice și *ii*) nemetalice.

1.2.3 Structuri celulare ierarhice

Ierarhia structurală, bazată pe materiale inspirate din natură (os, lemn etc.), a devenit o soluție practică în ceea ce privește proiectarea structurilor celulare. Astfel, panoul sandwich ierarhic reprezintă acum o categorie specială pentru care miezul celular unui ansamblu sandwich este reprezentat de un panou sandwich propriu-zis.

Tehnica de ierarhizare structurală a miezurilor celulare este relativ accesibilă în ceea ce privește tehnologiile de producție și indică un potențial ridicat pentru proiectarea și construcția de miezuri celulare multifuncționale. Dintre numeroasele avantaje evidențiate de cercetările realizate până în prezent, capacitățile ridicate de absorbție a energiei la impact și izolarea termică și acustică sunt cele mai notabile [29, 30, 31]. Din punct de vedere al performanțelor structurale, miezurile celulare ierarhice au o rigiditate și o rezistență la flambaj mai mari atunci când sunt supuse unor încercări mecanice (compresie, forfecare, încovoiere), spre deosebire de structurile de ordinul întâi din care sunt derivate [32, 33].

1.3 Materiale și tehnologii utilizate în construcția panourilor sandwich

Materialele utilizate în construcția panourilor sandwich pot fi sintetizate în două mari categorii, din punct de vedere al elementului la care se referă: *i*) materiale utilizate pentru construcția fețelor laterale și *ii*) materiale utilizate pentru construcția miezului celular.

Din punct de vedere al proprietăților mecanice, acestea trebuie să îndeplinească mai multe cerințe: *i*) rezistență ridicată la flambaj și la încovoiere, *ii*) rigiditate ridicată la compresione, tracțiune și impact, *iii*) capacități ridicate de rezistență la uzură [18, 34, 35].

Atunci când se discută despre producerea plăcilor frontale pentru panourile sandwich, cele mai utilizate materiale sunt aliajele metalice (de exemplu, aliajele de aluminiu și oțel) datorită raportului calitate-preț.

1.3.1 Materiale și tehnologii utilizate pentru fabricarea fețelor laterale

Fețele laterale realizate din materiale metalice sunt obținute printr-un proces simplu de deformare la rece. Blocul metalic este transformat în plăci subțiri prin trecerea printre doi cilindri rotativi, urmată de un proces de tăiere la dimensiunea dorită a panoului [35].

Cererea de materiale cu proprietăți mecanice ridicate a condus la implementarea în producția de serie a mai multor materiale ușoare, cum ar fi: materiale plastice armate cu de fibre de carbon și de sticlă (cu orientare aleatorie sau prestabilită), aliaje cu memoria formei și compozite ceramice, cu scopul de a reduce masa ansamblelor mecanice. Acestea sunt cele mai rentabile material care oferă un raport ridicat între rezistență și greutate proprie, precum și capacități considerabile de absorbție a energiei de impact [36,37].

Procesele de fabricare a materialelor compozite sunt mai complexe și implică costuri ridicate comparative cu cele obținute din material metalice; ele nu sunt în întregime automatizate și includ adesea o serie de operații manuale, ceea ce poate duce la erori de fabricație.

Acestea includ adesea utilizarea unei matrițe pozitiv-negativ, tratată în prealabil cu un strat de acoperire, pentru o eliberare ușoară a piesei. Ulterior, se adaugă un strat de acoperire, care va reprezenta suprafața finită a piesei. Această etapă este utilizată pentru a asigura o rugozitate specifică a suprafeței exterioare pentru diferite aplicații. Procesul de fabricație propriu-zis constă în aplicarea

unor straturi succesive de țesătură din fibră de carbon și de straturi de acoperire din rășină epoxidică. Odată ce stratificarea este finalizată, piesa este polimerizată într-un cuptor cu aer cald sau într-o presă vidată, la o temperatură specifică, pentru o perioadă de timp fixă, după cum se specifică în fișa tehnică a materialului [38].

O altă categorie de materiale cu perspective ridicate de utilizare pe scară largă în construcția de panouri sandwich este reprezentată de materialele inteligente [39, 40, 41].

Materialele inteligente își pot modifica comportamentul și proprietățile mecanice în funcție de acțiunea exercitată asupra lor de diferiți stimuli externi. Acestea se împart în două categorii principale: *i*) aliaje cu memoria formei - forma piesei este prestabilită în timpul procesului de fabricație, la care structura poate reveni atunci când este expusă la temperaturi ridicate; *ii*) materiale care își pot schimba forma în timpul funcționării, atunci când sunt expuse la stimuli externi [42, 43].

Deși utilizarea materialelor ranforsate cu fibre de carbon a crescut, în principal datorită densității reduse, rigidității și rezistenței ridicate, ciclului de viață prelungit etc., principalul lor dezavantaj care continuă să ridice probleme este capacitatea redusă de reciclare, astfel încât, atunci când se ajunge la sfârșitul ciclului de viață, acestea sunt, de obicei, păstrate în depozite speciale sau îngropate. Deoarece acest lucru nu este un beneficiu pentru mediul înconjurător, dezvoltarea de alternative pentru acestea este o direcție de cercetare de actualitate [42, 44, 45].

În acest sens, o altă categorie de materiale compozite a luat naștere - materialele plastice ranforsate cu fibre naturale. Acestea sunt matrici pe bază de rășini epoxidice ranforsate cu fibre naturale, cum ar fi: cânepă, nucă de cocos etc. și sunt de obicei luate în considerare la proiectarea materialelor compozite datorită capacității ridicate de reciclare [46].

Producția de masă a compozitelor din fibre naturale a ajuns la 400.000 de tone anual. Producătorii au adoptat utilizarea materialelor compozite naturale datorită a trei avantaje principale: *i*) raportul ridicat rezistență/greutate, comparativ cu emisii scăzute de CO₂, *ii*) biodegradabilitatea și *iii*) capacitatea ridicată de reînnoire [47, 48, 49, 50].

Deși cercetările efectuate până în prezent în industria materialelor ușoare, susținute de multitudinea de soluții existente cu performanțe mecanice ridicate, aliajele metalice rămân în continuare norma datorită costurilor de fabricație reduse în raport cu performanțele mecanice bune.

1.3.2 Materiale și tehnologii utilizate pentru fabricarea miezurilor celulare

Scopul principal al miezului celular din cadrul ansamblului sandwich este de a menține o distanță constantă între fețele laterale. Pe lângă aceasta, trebuie să îndeplinească și alte cerințe structurale, cum ar fi: densitate relativă scăzută, rigiditate ridicată în direcția perpendiculară pe planul median și rigiditate considerabilă la forfecare.

Materialele utilizate pentru construcția miezurilor celulare pot fi împărțite în două categorii principale:

- Materiale metalice - aliaje metalice pe bază de aluminiu, titan, nichel, cupru.

- Materiale nemetalice - lemn, hârtie, hârtie saturată cu rășină etc. [1, 2].

Deși există o gamă largă de materiale disponibile pentru construcția de miezuri celulare, aliajele metalice rămân în continuare cea mai bună soluție. Acestea sunt utilizate cu succes în aplicații industriale datorită raportului ridicat dintre rezistență și greutate proprie și a raportului calitate-preț.

Miezurile celulare metalice pot fi obținute prin diferite procese tehnologice, după cum urmează.

■ *Expandare mecanică*

Miezurile celulare fabricate printr-un proces de expansiune mecanică necesită utilizarea mai multor foi metalice subțiri tăiate la aceleași dimensiuni. Ulterior, acestea sunt lipite între ele pe direcție longitudinală și dispersate la o dimensiune prestabilită. Ansamblul de foi metalice rezultat este apoi tăiat la dimensiunea dorită, care va deveni înălțimea miezului celular. Ulterior, acestea sunt expandate mecanic prin aplicarea unei sarcini pe direcția perpendiculară aplicării adezivului. Acest lucru este menținut până când celulele unitate iau forma și dimensiunea dorită [35, 36].

■ *Deformare la rece*

Structurile celulare cu topologii deschise sau închise pot fi obținute, de asemenea, printr-un procedeu de deformare la rece, în care o placă metalică subțire este presată într-o matrită negativ-positiv cu forma profilului dorit (triunghiular, pătrat, sinusoidal, trapezoidal etc.). Profilul ondulat rezultat este apoi tăiat la dimensiunile dorite și poate fi utilizat ca miez în construcția panourilor sandwich [35].

■ *Deformare la cald*

Din categoria materialelor nemetalice utilizate în construcția de miezuri celulare, materialele termoplastice sunt cele mai utilizate. Acestea se obțin în prese negativ-positiv încălzite, din foi subțiri realizate din material plastic. Coala de plastic este plasată într-o presă răcită, care este apoi preîncălzită la temperatura dorită. Când aceasta este atinsă, presa superioară este deplasată vertical cu o viteză constantă pentru a crea forma dorită a miezului celular [38, 52].

■ *Prototipare rapidă*

Tehnologia de prototipare rapidă a apărut la începutul anilor 1990 și oferă posibilitatea de a obține structuri celulare prin eliminarea pierderilor de material. Această tehnologie utilizează diferite tipuri de materiale, cum ar fi: lichide, pulberi (de exemplu, pulberi ceramice) și solide (de exemplu, ABS).

Piesa este generată în forma sa tridimensională folosind modelul CAD (proiectat în prealabil într-un software specific) prin adăugarea de straturi succesive de material subțire pe o placă suport, proces cunoscut și sub numele de laminare 3D.

Miezurile celulare pentru construcția panourilor sandwich obținute prin prototipare rapidă pot fi obținute dintr-o gamă largă de materiale termoplastice, metalice sau ceramice. Acestea prezintă o bună calitate de absorbție a energiei de impact. Cu toate acestea, această metodă de fabricație nu este eficientă din punct de vedere al costurilor și, prin urmare, nu este potrivită pentru producția de masă [53, 54].

■ *Împletirea de fire metalice*

O altă metodă de obținere a miezurilor celulare periodice este reprezentată de împletirea de fire metalice continue cu secțiune transversală goală. Acest procedeu are ca rezultat obținerea unei structuri celulare deschise care poate fi utilizată în construcția de panouri sandwich și prezintă avantajul de a avea costuri scăzute de fabricație și de a oferi reducere considerabilă a greutății ansamblor în care sunt utilizate [55, 56, 57].

■ *Tehnici de împăturire*

O categorie relativ nouă, propusă de comunitatea științifică care urmărește dezvoltarea de miezuri celulare pentru construcția de panouri sandwich este reprezentată de structurile obținute prin diferite tehnici de împăturire, inspirate de tehnica japoneză de împăturire a hârtiei, origami, kirigami, miura-ori etc. Această metodă constă în împăturirea unei foi subțiri plane după un model prestabilit și oferă avantajul obținerii unor structuri celulare tridimensionale (3D) cu topologii diverse [58, 59, 60].

1.4 Analiza critică a stadiului actual de dezvoltare a miezurilor celulare

Structurile naturale rămân până în prezent o sursă nesfârșită de inspirație pentru dezvoltarea miezurilor sandwich și oferă o multitudine de soluții pentru a contracara problemele de proiectare cu care se confruntă cercetătorii. Această sursă de inspirație a condus la proiectarea miezului de tip fagure de albine, Figura 1.2, care este considerat cel mai avansat în domeniul miezurilor celulare ușoare și este utilizat pe scară largă de la proiectarea sa și până în prezent, în special în industria aerospațială [61, 62].

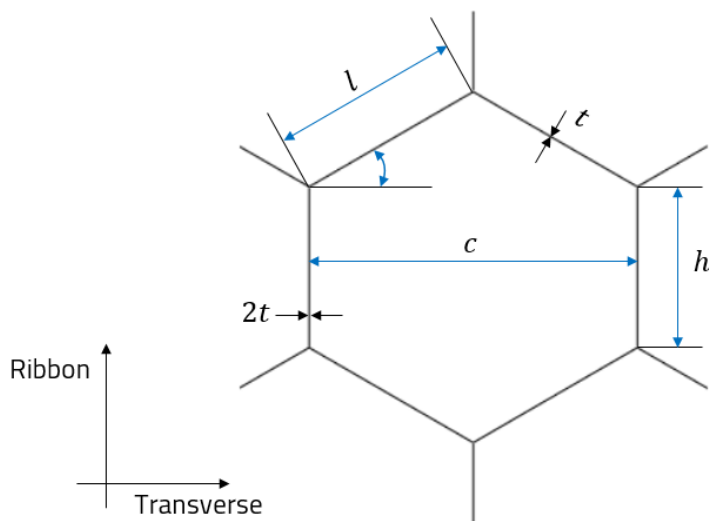


Figura 1.2 Celula unitate parametrizată a miezului tip fagure de albine [62]

Utilizarea pe scară largă a acestui miez celular se datorează proprietăților sale remarcabile de rezistență în raport cu greutatea proprie. Dintre multitudinea de avantaje pe care le oferă, putem aminti o bună izolare termică și transfer eficient de căldură, absorbția energiei de impact etc. [62, 63].

Deși structurile de tip sandwich pe bază de miez celular de tip fagure de albine sunt cea mai frecventă alegere, atunci când vine vorba de aplicații de înaltă performanță, acestea prezintă și o serie de dezavantaje. Merită menționate, strivirea miezului, forfecarea și flambajul. În plus, acestea rețin umezeala, datorită topologiei celulare închise, ceea ce poate conduce la coroziune internă și la dezlipirea fețelor laterale [64, 65].

Suprafața de aderență joacă, de asemenea, un rol important în procesul de asamblare a unui panou sandwich. În cazul panourilor pe bază de miez de tip fagure de albine, această suprafață este egală cu grosimea materialului de bază (dublă în unele regiuni), ceea ce aduce cerințe suplimentare asupra procesului de fabricație și, astfel, crește semnificativ costul de producție [66, 67, 68, 69].

Pentru a combate dezavantajele structurii clasice în formă de fagure de albine, cercetătorii au propus o gamă largă de topologii celulare pentru simplificarea proceselor tehnologice de fabricație, oferind în același timp proprietăți mecanice competitive. Astfel, au fost dezvoltate miezuri celulare de densitate redusă ca soluție alternativă la fagurele de albine, în funcție de aplicația vizată [70].

Structurile de tip zăbrele prezintă un interes considerabil pentru industria materialelor ușoare, datorită rigidității și a raportului rezistență/greutate ridicat, precum și a potențialului lor multifuncțional datorat geometriilor cu celule deschise. Un alt avantaj al structurilor celulare cu zăbrele este posibilitatea de a fi formate în numeroase topologii datorită versatilității ridicate. Fețele laterale ale sandwich-urilor sunt adăugate fie prin lipire cu diverși adezivi, sudare etc. [71, 72].

În ciuda proprietăților bune de compresiune, structurile cu zăbrele prezintă adesea moduri de distrugere ale metodei de asamblare atunci când sunt supuse la sarcini de forfecare. Metoda de lipire a fețelor laterale face ca panoul sandwich să fie susceptibil la distrugere prematură. Acesta reprezintă un aspect general al miezurilor celulare cu zăbrele pentru care metodele de fabricație sunt defectuoase și, de asemenea, nu sunt atractive pentru producția de masă. În acest context, se pot scrie următoarele concluzii.

1.5 Concluzii ale analizei stadiului actual

După efectuarea unei analize critice a stadiului actual al dezvoltării proiectării și cercetării construcției din panouri sandwich, se pot formula următoarele concluzii:

- Cererea de structuri cu performanțe ridicate a dus la dezvoltarea continuă a domeniului structurilor ușoare.
- Pentru proiectarea și construcția panourilor sandwich pot fi luate în considerare o multitudine de materiale existente (metalice sau nemetalice), dar cele mai utilizate sunt cele ale căror tehnologii de fabricație rămân simple și eficiente din punctul de vedere al costurilor.
- Miezurile celulare trebuie să îndeplinească o serie de cerințe stricte. Cele mai importante sunt reprezentate de: densitatea redusă, rezistența și rigiditatea ridicate, atât pentru încărcări în

plan cât și în direcție perpendicular pe planul mediu, absorbția ridicată a energiei de impact, izolarea termică și acustică.

- Intenția este de a dezvolta soluții care să permită obținerea unor structuri complexe și performante care să asigure reducerea costurilor și a cantităților de material utilizat, procese de fabricație simple, suprafețe de aderență suficiente și tehnici de asamblare ușoare.
- Există în continuare provocări care rămân de actualitate: *i)* incapacitatea de a obține geometrii complexe și *ii)* nevoia de simplificare a tehnologiilor de fabricație și de reducere a costurilor finale. Acest lucru determină interesul continuu de a dezvolta noi arhitecturi celulare care pot compensa dezavantajele evidențiate de prezentul studiu.

2. Scopul și obiectivele cercetării

Scopul cercetării realizate în cadrul prezentei teze de doctorat îl reprezintă studiul topologiei, proprietăților mecanice și al comportării la solicitări a unei noi structuri celulare piramidale obținute printr-un proces de expandare mecanică, care trebuie să îndeplinească următoarele cerințe:

- performanță structurală ridicată în diferite condiții de încărcare;
- reducerea greutateii ansamblului în cadrul căruia este utilizată.

Pentru atingerea scopului principal al acestei teze de doctorat, au fost stabilite următoarele obiective:

1. Analiza critică a stadiului actual de dezvoltare în domeniul structurilor ușoare;
2. Studiul structurii piramidale utilizată ca miez în construcția panourilor sandwich:
 - studiul topologic al structurii celulare periodice;
 - alegerea materialelor și studiul metodei de fabricație a miezului celular.
3. Analiza teoretică a structurii noi studiate:
 - elaborarea modelului analitic al celei unitate a structurii piramidale;
 - elaborarea modelului numeric al panoului sandwich bazat pe miezul celular studiat.
4. Încercarea experimentală a structurii atât pentru celula unitate, cât și pentru panoul sandwich asociat.
 - realizarea probelor pentru modelul experimental;
 - supunerea eșantioanelor la încercări experimentale, colectarea datelor și analiza rezultatelor.
5. Validarea modelelor teoretice pe baza corelării acestora cu rezultatele experimentale.

3. Studiul structurii celulare piramidale pentru construcția de panouri sandwich

3.1 Structura celulară și principiul de fabricație al acesteia

Inspirat de structurile naturale, miezul celular de tip fagure de albine a devenit cea mai utilizată structură celulară în acest domeniu. Deși panourile sandwich pe bază de miez fagure de albine prezintă performanțe mecanice remarcabile, procesul de fabricație rămâne complex, iar costurile ridicate.

În acest sens, se propune spre investigare un nou miez celular piramidal proiectat de Conf. dr. ing. Marian N. Velea pe parcursul activității sale de cercetare în cadrul Universității Transilvania din Brașov. Obținut printr-un proces de fabricație simplu, cu pierderi reduse de material, acesta reprezintă o potențială soluție pentru combaterea dezavantajului menționat mai sus.

Structura celulară piramidală este derivată dintr-o topologie trapezoidală obținută dintr-un profil perforat care se diferențiază de aceasta din urmă prin prezența unui unghi intern, A , Figura 3.1.

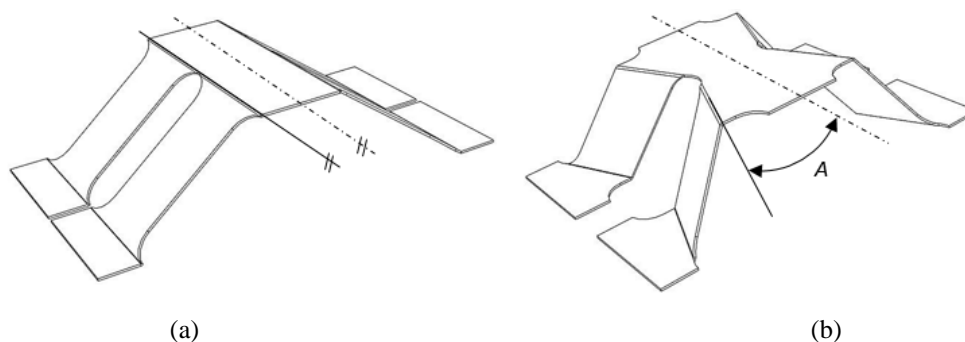


Figura 3.1 Reprezentarea schematică a miezului celular a) configurație trapezoidală b) structură piramidală [73].

Miezul celular poate fi obținut dintr-o coală subțire din orice tip de material metalic ductil (de exemplu, aliaje de aluminiu, oțeluri inoxidabile etc.), printr-un proces de fabricație continuă, Figura 3.2.

Tehnica de fabricare, descrisă ca expansiune mecanică, se realizează urmând câțiva pași simpli: **Perforare** → **generarea liniilor de ghidare (raze de îndoire)** → **expansiunea mecanică**.

Pe o coală metalică plană se realizează o serie de perforații după un tipar prestabilit. Astfel se obține un profil numerotat 1, 2 (zona I). Succesiv, pe profilul perforat se generează o serie de linii de ghidaj, numerotate cu cifra 3, pentru a controla mai bine procesul de expansiune (zona II). Aceste linii de ghidaj formează unghiul intern al structurii, A . În cele din urmă, profilul metalic perforat este fixat la un capăt (punctele $O1$ și $O2$), în timp ce la capătul opus se aplică o deplasare specifică U_x de-a lungul direcției de expandare. Procesul se oprește atunci când celulele ating dimensiunile de gabarit dorite [73].

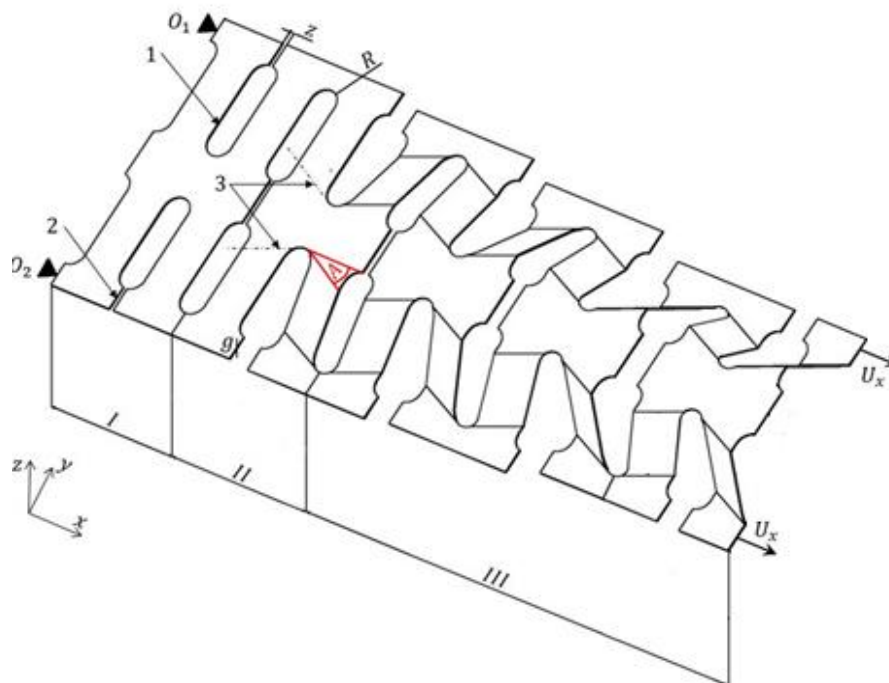
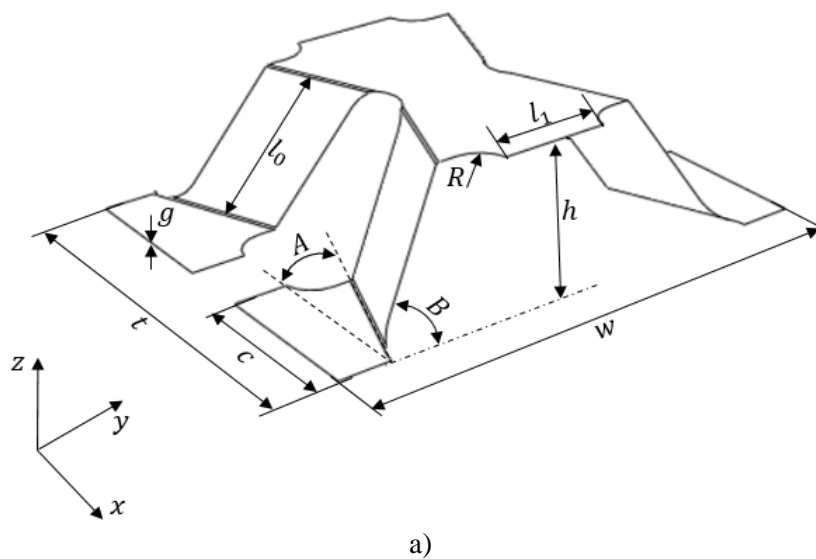


Figura 3.2 Procedul de obținere al structurii celulare piramidale [73].

Rezultatul acestui proces de fabricație este reprezentat de o structură piramidală bi-direcțională, expandată pe ambele direcții O_x și O_y , figura 3.3. În funcție de amplasarea miezului celular între fețele laterale, se pot obține două configurații diferite prin oglindirea celulei unitare față de planurile XZ și YZ , Figura 3.3 a).



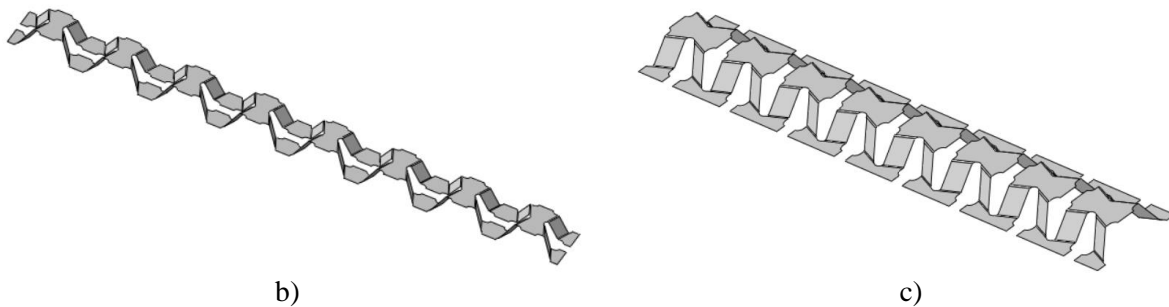


Figura 3.3 Reprezentarea schematică a miezului celular piramidal a) celula unitate și parametrii acesteia; b) miezul celular rezultat, expandat pe direcția O_x ; c) miezul celular rezultat, expandat pe direcția O_y [70].

3.2 Studiul parametric al topologiei celulare

Pentru studiul parametric al miezului celular pyramidal investigat a fost identificată celula unitate reprezentativă pe baza căreia au fost definiți următorii parametri geometrici, Figura 3.3 a):

c – baza brațului celulei, z – grosimea sculei de tăiere, R – raza perforației, g – grosimea materialului de bază, A – unghiul intern al structurii, t – lățimea celulei unitate, l_0 – lungimea brațului celulei, l_1 – distanța dintre 2 perforații, h – înălțimea celulei unitate, B – unghiul de înclinare al brațului celulei, w – lungimea celulei unitate.

Unghiul intern al structurii, A , reprezintă noutatea pe care o aduce această structură piramidală. Definit de o axă tangentă între două perforații circulare consecutive; poate fi calculat cu ajutorul ecuației (3.1).

$$A = \arctan\left(\frac{2 \cdot R}{c}\right), \quad (3.1)$$

Pe baza relației de calcul a unghiului intern și luând în considerare ceilalți parametri geometrici definiți pe celula unitate, se definesc lungimea (w), lățimea (t) și înălțimea (h) celulei unitate [73]:

$$w = 2 \cdot l_1 + 2 \cdot l_0 \cdot \cos(B) + c \cdot \tan(A) + 2 \cdot R, \quad (3.2)$$

$$t = 2 \cdot c + z + l_0 \cdot \sin(B) \cdot \tan(A), \quad (3.3)$$

$$h = 2 \cdot g + l_0 \cdot \sin(B), \quad (3.4)$$

unde: z reprezintă grosimea sculei de tăiere, Figura 3.2.

Calculul densității relative, ρ_r , a unui miez celular este cel mai eficient mod de a evalua capacitățile acestuia de a reduce greutatea ansamblului în care se utilizează. Densitatea relativă este definită ca raportul dintre volumul materialului de bază (V_m) din care este realizat miezul celular și volumul structurii rezultate (V_s) [73].

$$\rho_r = \frac{V_m}{V_s}, \quad (3.5)$$

Densitatea relativă a miezului celular piramidal studiat se determină cu ajutorul ecuației (3.6).

$$\rho_r = \frac{4 \cdot c \cdot g(l_0 + l_1 + 2 \cdot R) - z \cdot g \cdot l_1 - 8 \cdot g \cdot l_0 \cdot R - 4 \cdot \pi \cdot g \cdot R^2}{w \cdot t \cdot h}, \quad (3.6)$$

Prin definirea ecuațiilor pentru dimensiunile de gabarit ale celulei unitate, w , t și h , precum și relațiile pentru determinarea densității relative a structurii, ρ_r , permite efectuarea unui studiu parametric. Scopul acestuia este de a analiza variația parametrilor geometrici ai celulei unitate în raport cu procesul de fabricație.

Pentru studiul parametric, configurațiile au fost obținute cu ajutorul a două seturi de parametri: unul fix – care include distanța dintre două perforații consecutive, l_1 , baza brațului celulei, c , grosimea sculei de tăiere, z și grosimea materialului de bază, g și unul variabil – ce include lungimea brațului celulei, l_0 și raza perforației, R .

Algoritmul utilizat pentru stabilirea configurațiilor geometrice utilizate în cadrul studiului parametric este prezentat în Figura 3.4.

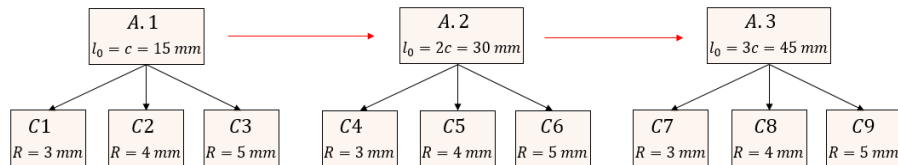


Figura 3.4 Algoritmul pentru definirea configurațiilor geometrice utilizate în cadrul studiului parametric.

În funcție de valorile parametrilor ce definesc celula unitate, variația lungimii și lățimii celulei unitate, determinată cu ajutorul ecuațiilor (3.2) și, respectiv, (3.3), este prezentată în Figura 3.5. Valoarea lungimii celulei unitate este indirect proporțională cu creșterea unghiului de înclinare a brațului celulei. Acest comportament este similar pentru toate configurațiile luate în considerare pe parcursul studiului.

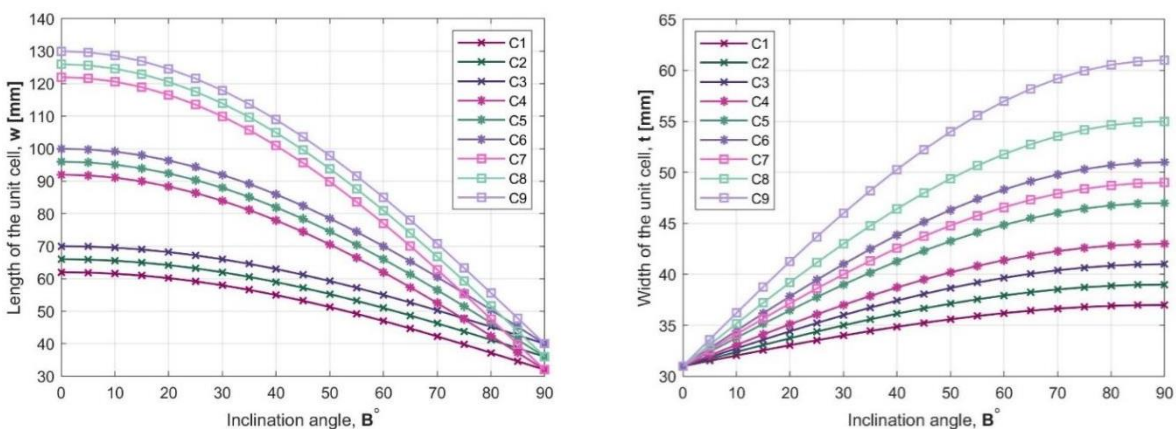


Figura 3.5 Variația dimensiunilor de gabarit ale celulei unitate în raport cu unghiul de înclinare al brațului acesteia: a) lungimea celulei unitate; b) lățimea celulei unitate.

Relația dintre variația unghiului de înclinare și modificarea valorii lățimii celulei unitate, definită cu ajutorul ecuației (3.3), are un comportament diferit. Aceasta crește direct proporțional odată cu creșterea valorii unghiului de înclinare al brațului celulei, Figura 3.5 a).

Atunci când se consideră evoluția înălțimii celulei unitate, definită prin ecuația (3.4), în funcție de unghiul de înclinare al brațului celulei, se pot afirma următoarele: *i*) se înregistrează o creștere direct proporțională a înălțimii odată cu creșterea unghiului de înclinare; *ii*) înălțimea este aceeași în cazul celor trei subconfigurații, deoarece aceasta din urmă este definită doar în raport cu unghiul respectiv, Figura 3.6.

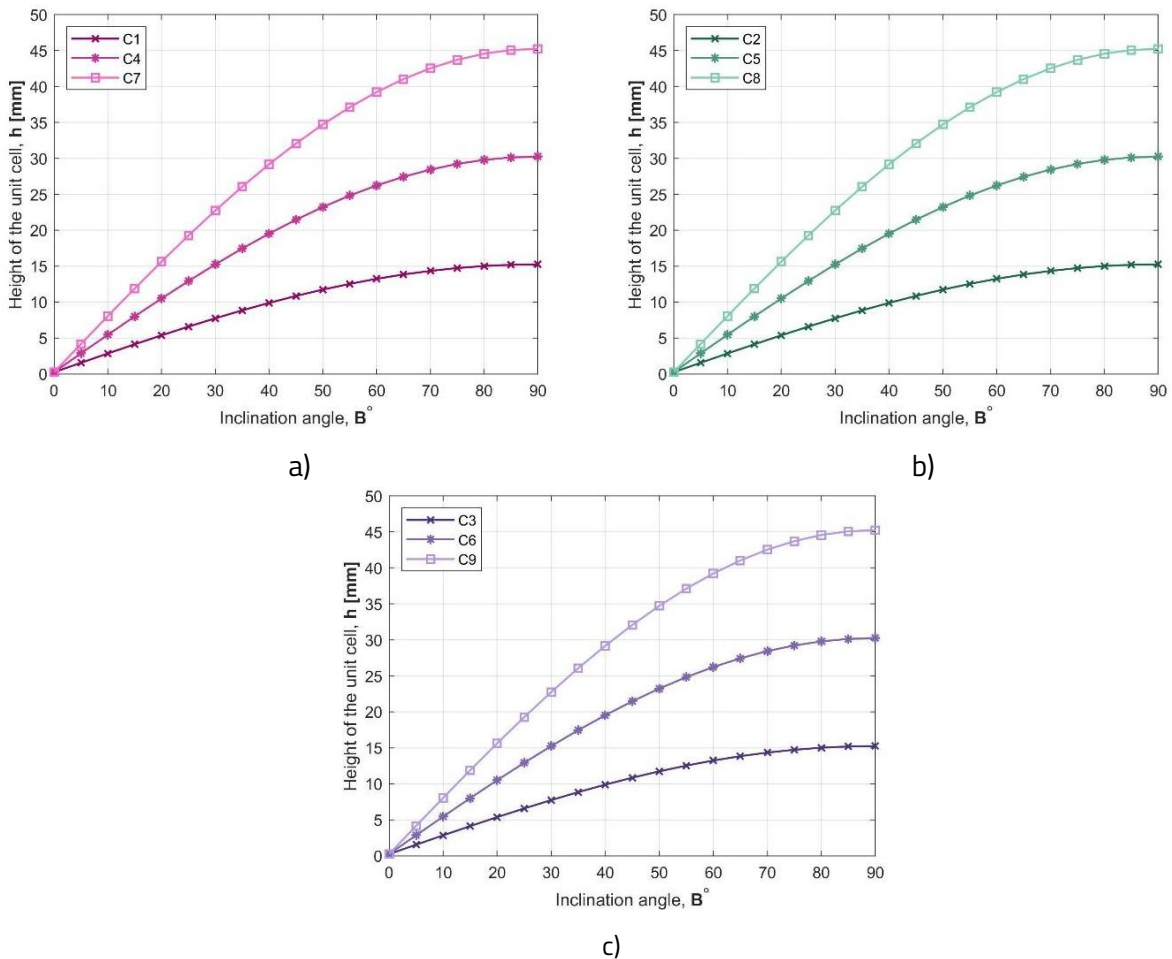


Figura 3.6 Variația înălțimii celulei unitate în raport cu unghiul de înclinare al brațului celulei pentru: a) $R = 3$ mm; b) $R = 4$ mm; c) $R = 5$ mm.

Graficele prezentate în Figura 3.7 definesc variația densității relative în raport cu unghiul de înclinare al brațului celulei. Densitatea relativă scade în valoare odată cu creșterea în valoare a unghiului de înclinare. O scădere semnificativă a valorii este înregistrată atunci când unghiul de înclinare atinge 5° . După acest punct, valoarea densității relative este menținută constant sub valoarea de 0,1. Minima este înregistrată atunci când $B = 50^\circ$, dar variația este aproximativ liniară în intervalul $[40^\circ - 70^\circ]$.

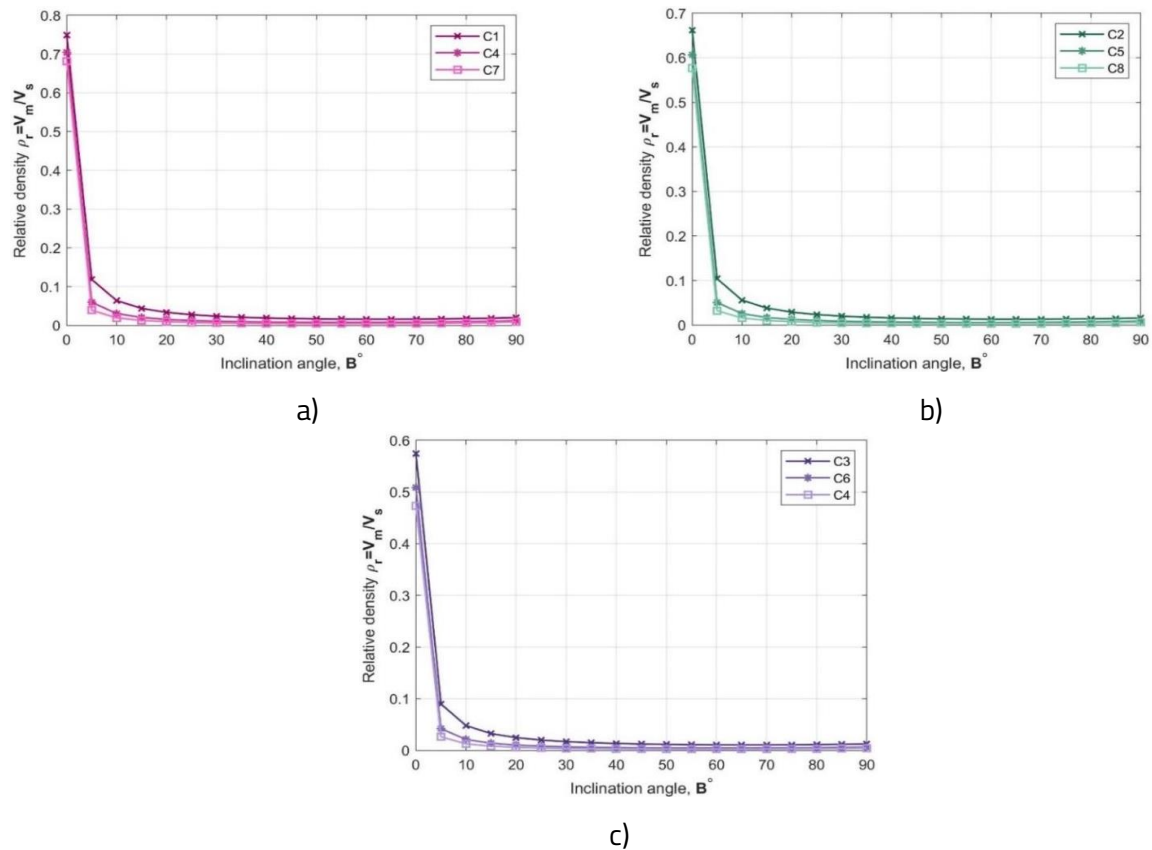


Figura 3.7 Variația densității relative în raport cu unghiul de înclinare al brațului celulei unitate pentru: a) $R = 3 \text{ mm}$; b) $R = 4 \text{ mm}$; c) $R = 5 \text{ mm}$.

3.3 Structura celulară trapezoidală

Datorită topologiei structurii, unghiul intern al acesteia, poate lua valori în intervalul $A = [0, \arctan(2R/c)]$. Limita superioară a acestui interval conduce la obținerea structurii piramidale definite în Figura 3.3 b), în timp ce limita inferioară definește o structură celulară trapezoidală, figura 3.3 a).

Pentru miezul celular trapezoidal, bazat pe profilul metalic perforat, valoarea unghiului intern al structurii, A , este egală cu zero, Figura 3.8.

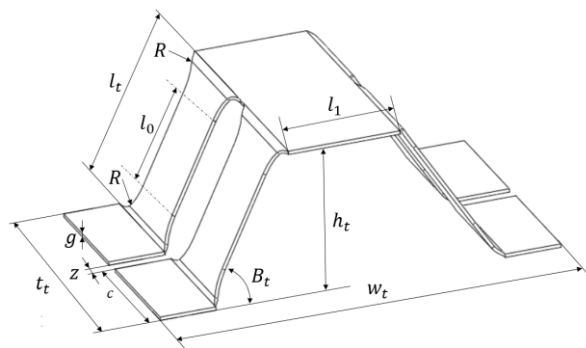


Figura 3.8 Celula unitate trapezoidală și parametri acesteia.

În ceea ce privește topologia trapezoidală, parametrii geometrici care definesc celula unitate sunt următorii:

c - baza brațului celulei, z - grosimea sculei de tăiere, R - raza perforației, g - grosimea materialului de bază, t_t - lățimea celulei unitate, l_t - lungimea brațului celulei, l_1 - distanța dintre perforații, h_t - înălțimea celulei unitate, B_t - unghiul de înclinare a brațului celulei, w - lungimea celulei unitate.

Pe baza relației de calcul a parametrilor volumetrici ai celulei unitate piramidale, utilizând ecuațiile (3.2), (3.3) și (3.4) și luând în considerare faptul că pentru miezul celular trapezoidal $A = 0$, se pot defini lungimea (w_t), lățimea (t_t) și înălțimea (h_t) celulei unitate:

$$w_t = 2 \cdot l_1 + 2 \cdot l_t \cdot \cos(B_t), \quad (3.7)$$

$$t_t = 2 \cdot c + z, \quad (3.8)$$

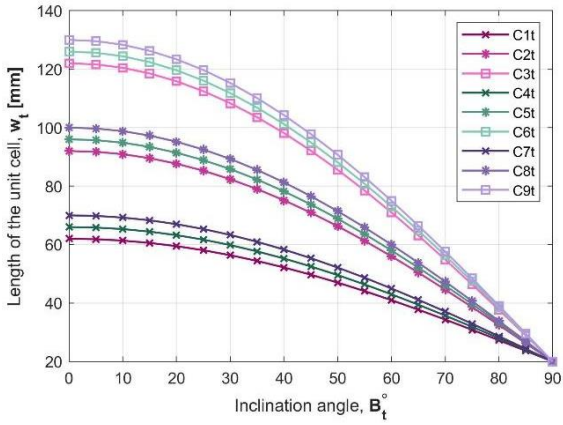
$$h_t = 2 \cdot g + l_t \cdot \sin(B_t), \quad (3.9)$$

unde: z este grosimea uneltei de tăiere;

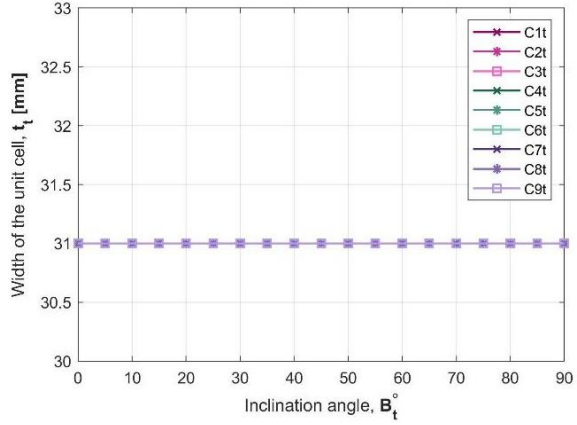
Relația dintre lungimea brațului celulei pentru cele două configurații studiate, l_0 și l_t , este definită cu ajutorul ecuației de mai jos:

$$l_t = l_0 + 2 \cdot R, \quad (3.10)$$

Valoarea lungimii celulei unitate este indirect proporțională cu creșterea unghiului de înclinare a brațelor, ceea ce înseamnă că lungimea celulei unitate scade odată cu creșterea unghiului de înclinare. Acest comportament este similar pentru toate configurațiile considerate) pe parcursul studiului, Figura 3.9 a).



a)

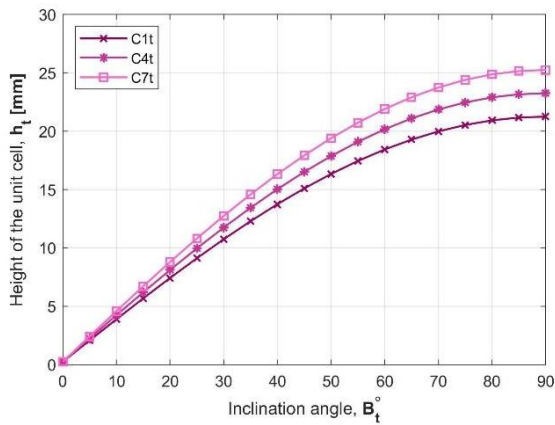


b)

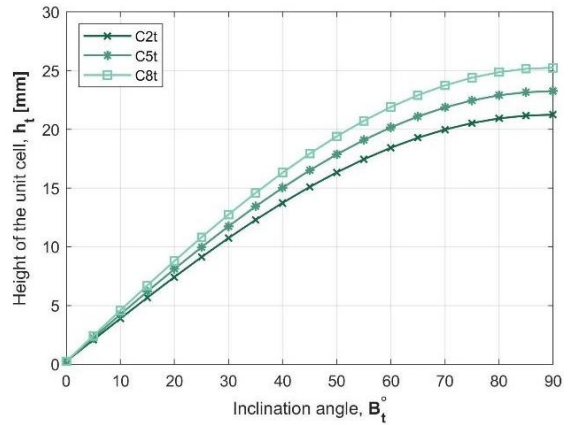
Figura 3.9 Variația dimensiunilor de gabarit ale celulei unitate în raport cu unghiul de înclinare al brațului acesteia: a) lungimea celulei unitate; b) lățimea celulei unitate.

Relația dintre variația unghiului de înclinare și valoarea lățimii celulei unitate, definită prin ecuația (3.8), este liniară. Deoarece structura trapezoidală nu prezintă unghiul intern, lățimea celulei unitate este aceeași pentru toate configurațiile investigate, t_t , Figura 3.9 b).

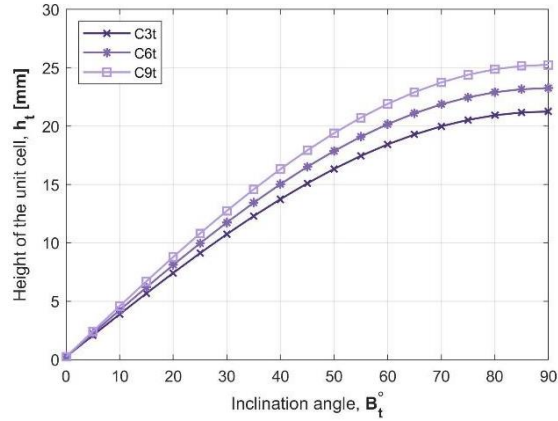
Evoluția înălțimii celulei unitare, definită prin ecuația (3.9), în raport cu unghiul de înclinare a brațului are o creștere direct proporțională. Înălțimea este aceeași în cazul tuturor configurațiilor investigate, deoarece este definită doar în raport cu unghiul respectiv, Figura 3.10.



a)



b)

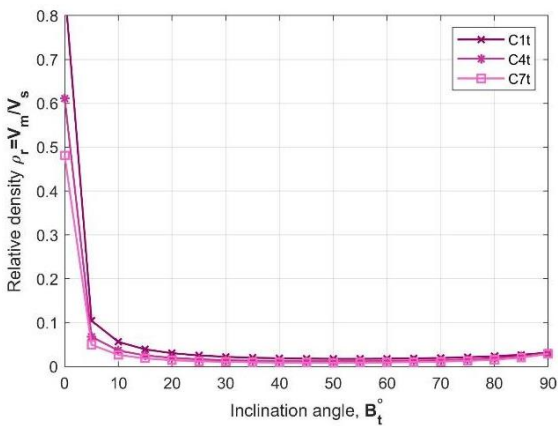


c)

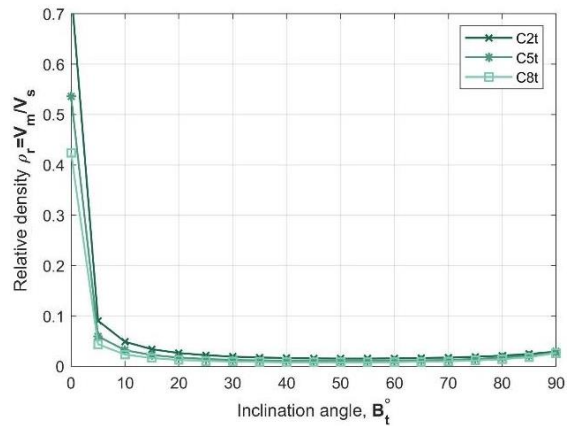
Figura 3.10 Variația înălțimii celulei unitate pentru: a) $R = 3 \text{ mm}$; b) $R = 4 \text{ mm}$; c) $R = 5 \text{ mm}$.

Atât lățimea, cât și înălțimea celulei unitate au același comportament în raport cu unghiul de înclinare. Ambele cresc odată cu creșterea unghiului menționat anterior. Efectul este diferit atunci când se ia în considerare lățimea celulei unitare, acest lucru fiind același pentru toate configurațiile investigate. Deoarece topologia structurii trapezoidale nu ține cont de unghiul intern, expansiunea celulei unitare se produce doar pe axele x și z .

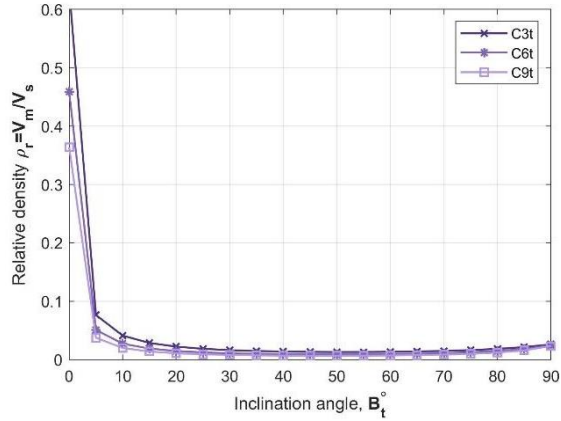
Graficele reprezentate în Figura 3.11, definesc variația densității relative în funcție de unghiul de înclinare al brațului. Densitatea relativă scade în valoare odată cu creșterea unghiului de înclinare. O scădere semnificativă a valorii este înregistrată atunci când unghiul de înclinare atinge 5° . După acest punct, valoarea densității relative se menține constant sub 0,1. Minimul este înregistrat pentru $B = 50^\circ$, dar, variația este aproximativ liniară în intervalul $[45^\circ - 65^\circ]$.



a)



b)



c)

Figura 3.11 Variația densității relative în raport cu unghiul de inclinare al brațului pentru: a) $R = 3 \text{ mm}$; b) $R = 4 \text{ mm}$; c) $R = 5 \text{ mm}$.

Variația densității relative este similară pentru toate configurațiile supuse studiului și se menține la un nivel redus.

Comparația dintre densitatea efectivă a structurii trapezoidale față de cea piramidală, pentru un unghi de înclinare a brațului, $B = 60^\circ$, sunt prezentate în tabelul 3.1.

Tabelul 3.1 Comparația dintre densitatea efectivă a structurii piramidale în raport cu cea trapezoidală

Densitate [kg/m^3] (configurație)		Diferență [%]
$\rho_{C_1} = 126.16$	$\rho_{C_{1t}} = 140.49$	10.2
$\rho_{C_2} = 104.48$	$\rho_{C_{2t}} = 123.35$	15.3
$\rho_{C_3} = 85.19$	$\rho_{C_{3t}} = 105.8$	19.5
$\rho_{C_4} = 58.93$	$\rho_{C_{4t}} = 98.31$	40
$\rho_{C_5} = 45.9$	$\rho_{C_{5t}} = 86.86$	47.1
$\rho_{C_6} = 35.07$	$\rho_{C_{6t}} = 74.85$	53.1
$\rho_{C_7} = 36.2$	$\rho_{C_{7t}} = 74.52$	51.4
$\rho_{C_8} = 27.07$	$\rho_{C_{8t}} = 65.94$	58.9
$\rho_{C_9} = 19.81$	$\rho_{C_{9t}} = 56.85$	65.1

Studiul comparativ între cele două structuri investigate a arătat că miezul piramidal are capacități de reducere a greutateții mult mai bune decât cea trapezoidală, dovedind astfel că prezența unghiului

intern reprezintă un avantaj al noii structuri piramidale. În acest sens, studiul proprietăților mecanice ale structurii reprezintă următorul aspect de investigat.

3.4 Studiu comparativ

Performanțele structurii celulare piramidale investigate au fost determinate prin realizarea unui studiu comparativ între unele dintre cele mai comune soluții propuse ca miezuri pentru proiectarea și construcția panourilor sandwich. Au fost luate în considerare patru topologii, care au fost deja definite în literatura de specialitate în ceea ce privește densitatea relativă [75, 76]: triunghiulară, trapezoidală, figurele albine și ExpaAsym, Figura 3.12.

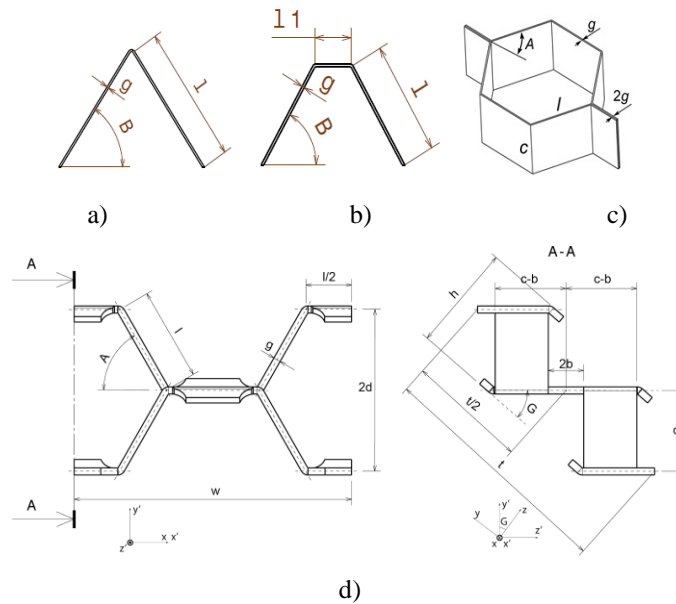


Figura 3.12 Topologii celulare utilizate la construcția de panouri sandwich: a) triunghiulară; b) trapezoidală; c) figure de albine; d) ExpaAsym [76].

Au fost menținute mai multe relații între parametrii definiți pentru a genera o comparație validă și pentru a evidenția avantajele structurii celulare studiate. Lungimea brațului celulei, (l) a fost menținută constantă pentru toate topologiile menționate mai sus, $l = [15, 30, 45 \text{ mm}]$. Unghiul de expandare a fost variat în intervalul $[0^\circ - 90^\circ]$ în funcție de permisivitatea topologiei celulare. Lățimea, (t) și înălțimea, (h) au fost determinate în raport cu lungimea celulei unitate, (w) cu ajutorul următoarelor relații: $t = w/2$ pentru miezul triunghiular și trapezoidal și $h = w/2$ pentru miezul figure de albine.

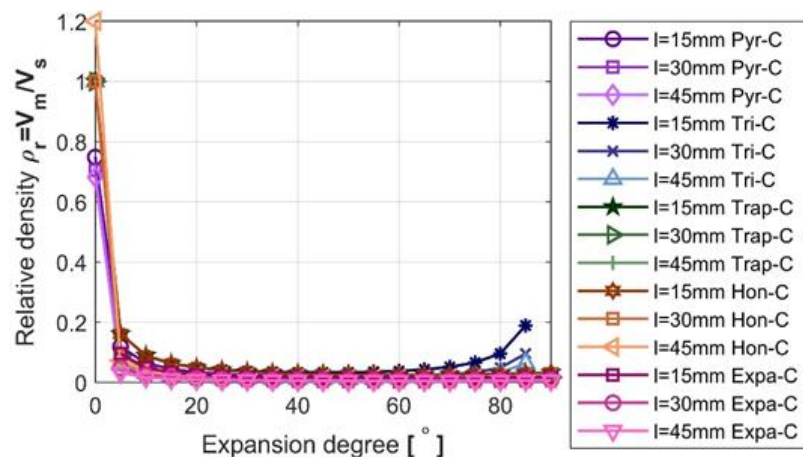


Figura 3.13 Evoluția densității relative în raport cu gradul de expandare pentru toate configurațiile studiate [76].

Evoluția densității relative în funcție de gradul de expansiune este reprezentată în Figura 3.13, unde: Pyr-C - miez celular piramidal, Tri-C - miez celular triunghiular, Trap-C - miez celular trapezoidal, Hon-C - miez celular figure de albine, Expa-C - miez celular ExpaAsym [76].

Graficul arată că densitatea relativă are o evoluție similară pentru toate miezurile celulare considerate în cadrul studiului comparativ pentru toate configurațiile specificate; aceasta scade odată cu creșterea gradului de expansiune. Valorile minime se înregistrează în intervalul $[30^\circ - 70^\circ]$, figura 3.13. Este imperativ de menționat faptul că densitatea relativă scade odată cu creșterea în valoare a bratului celulei unitate, deoarece acesta determină obținerea unei structuri celulare cu volum mai mare. Astfel, valorile maxime înregistrate au fost în cazul în care $l = 15 \text{ mm}$, în timp ce valorile minime au fost întâlnite pentru $l = 45 \text{ mm}$.

Densitatea relativă a topologiei triunghiulare înregistrează valori în intervalul $[0,01-0,04]$, în timp ce pentru structura trapezoidală, acestea sunt stabilite între $[0,015-0,035]$, cu avantajul că aceasta din urmă oferă o suprafață de adeziune semnificativă, ceea ce ar putea conduce la o reducere a costurilor de fabricație.

În comparație cu structura trapezoidală, densitatea relativă a miezului celular de tip fagure are aceeași evoluție, cu valori identice, în intervalul $[0,015-0,035]$. Acest lucru se datorează faptului că miezul de tip fagure reprezintă o topologie închisă, constând în două structuri trapezoidale lipite între ele, dar suprafața de adeziune a acestuia este redusă; ea este egală cu grosimea materialului de bază, iar, dublată în unele regiuni, ceea ce ar putea duce la dezlipirea fetelor laterale. Cu toate acestea, miezul celular de tip fagure de albine este utilizat cu succes în multe aplicații în care sunt necesare proprietăți mecanice ridicate (rezistență, rigiditate, capacități ridicate de absorbție a energiei de impact etc.).

Miezul celular ExpaAsym a fost conceput pentru a combate acest dezavantaj semnificativ al fagurelui iar densitatea sa relativă a fost redusă la aproximativ jumătate cu valori în intervalul $[0,06-0,018]$

prezentând în același timp o suprafață de adeziune considerabilă, spre deosebire de corespondentul său.

Pentru structura celulară piramidală studiată, densitatea relativă este comparabilă cu cea a miezului ExpaAsym și variază în intervalul [0,06-0,025]. Având un proces de fabricație similar, principalul avantaj pe care îl oferă topologia piramidală este suprafața de adeziune, care este semnificativ mai mare în comparație cu ExpaAsym.

Miezul celular piramidal a fost dezvoltat pentru a ține pasul cu cerințele de pe piața actuală. Principalele avantaje oferite de acest nou design sunt: *i*) o densitate relativă scăzută a miezului și *ii*) o suprafață de lipire semnificativă. Împreună cu un proces de fabricație simplu, acestea reprezintă un set important de atuuri în încercarea de a oferi o soluție competitivă pe piața actuală.

3.5 Concluzii

Studiul parametric efectuat asupra noului miez celular piramidal a arătat că, pentru toate configurațiile geometrice luate în considerare, dimensiunile volumetrică ale unității celulare în funcție de unghiul de înclinare a brațului celulei au același comportament. În acest sens, se pot afirma următoarele:

- Lungimea celulei unitate este indirect proporțională cu unghiul de înclinare al brațului său; valoarea sa scade odată cu creșterea valorii unghiului.
- Lățimea și înălțimea celulei unitate este direct proporțională cu gradul de expandare al acesteia.
- Valoarea minimă a densității relative a fost înregistrată în intervalul [30 – 70°] pentru toate cele nouă configurații considerate în cadrul studiului.
- Valorile pentru densitatea relativă scad odată cu creșterea razei perforației, R .

Pentru a valida influența razei perforației asupra proprietăților mecanice ale structurii celulare piramidale, este necesară definirea rezistenței și rigidității celulei unitate a miezului. Acestea au fost studiate în continuare prin mijloace analitice și experimentale și s-a realizat corelarea între cele două modele.

4. Analiza teoretică și experimentală a structuri celulare piramidale

4.1 Solicitarea la compresiune

Rigiditatea și rezistența în direcția perpendiculară pe planul median al structurii celulare piramidale studiate este determinată cu ajutorul unui model analitic. De asemenea, abordarea teoretică este validată cu ajutorul unui set de încercări experimentale efectuate în condiții similare de încărcare. Proprietățile mecanice ale structurii celulare investigate sunt evaluate prin intermediul unui studiu comparativ în cadrul căruia au fost considerate o serie de configurații existente pentru a evalua potențialul pe piață.

4.1.1 Elaborarea modelului analitic

Datorită simetriei structurii piramidale, o pătrime din celula unitate a fost identificată și considerată pentru dezvoltarea modelului analitic. Acesta este format din două segmente, care reprezintă membrele libere ale sistemului supus la încărcări externe, Figura 4.1 [73].

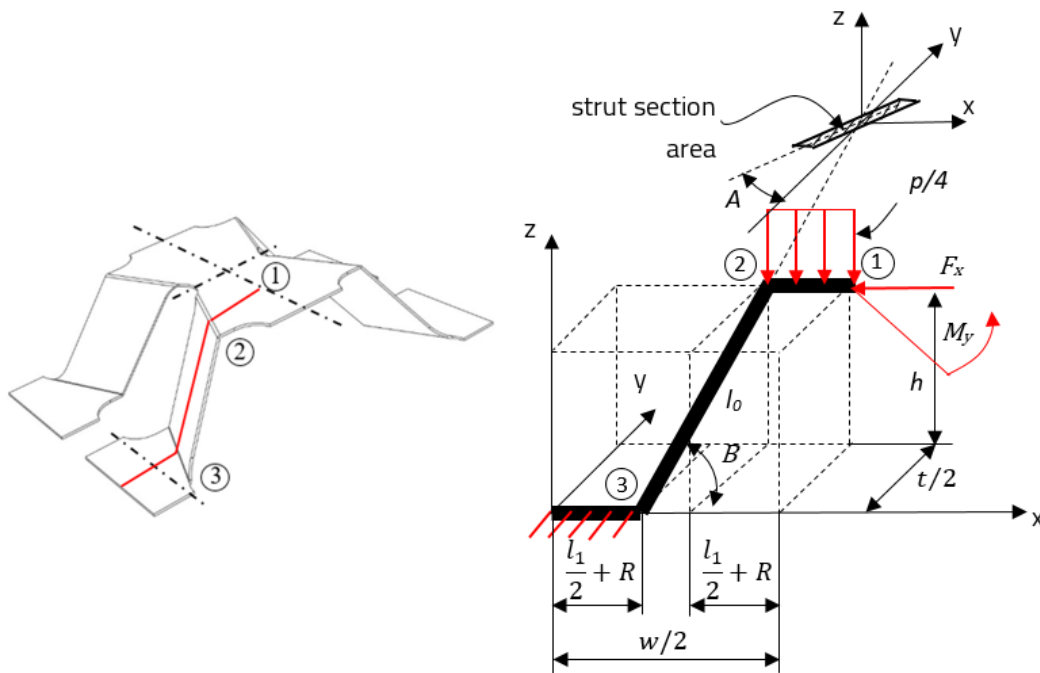


Figura 4.1 O pătrime din celula unitate investigată, supusă la solicitarea de compresiune [73].

Încărcarea la care este supus sistemul este reprezentată de o presiune uniform distribuită, p , care acționează pe segmentul 1-2. Această presiune este aplicată în sistemul de coordonate global, pe direcția z și generează o deplasare verticală, δ_z . Condițiile la limită impuse asupra sistemului constau în fixarea tuturor gradelor de libertate din punctul 3.

Ecuatiile care definesc momentele de încovoiere și forțele tangențiale care acționează asupra fiecărui element constitutiv, într-un punct arbitrar x al sistemului sunt:

$$M_{1-2} = \frac{-F_z}{4}x - \frac{p}{4}x\frac{x}{2} + M_y \quad (4.1)$$

$$M_{2-3} = \frac{-F_z}{4}\left(\frac{l_1}{2} + R + x\cos(B)\right) - \frac{p}{4}\left(\frac{l_1}{2} + R\right)\left(\frac{l_1}{2} + R + x\cos(B)\right) + F_x\cos(A)x\sin(B) + M_y \quad (4.2)$$

$$T_{1-2} = \frac{-F_z}{4} - \frac{p}{4} \quad (4.3)$$

$$T_{2-3} = \frac{-F_z}{4}\cos(B) - \frac{p}{4}\cos(B) - F_x\sin(B)\cos(A) \quad (4.4)$$

Aplicând a doua teoremă a lui Castigliano, care afirmă că, pentru deformații în regim linear elastic, deplasarea orizontală, δ_x , deplasarea verticală, δ_z și rotația în punctul 1, $\delta_{\theta_{M_0}}$, pot fi calculate astfel [74]:

$$\delta_z = p \left(\frac{2R + l_1}{32Gcg} - \frac{12l_0^2 \left(\frac{\cos \cos(B) \left(R + \frac{l_1}{2} \right) \left(\frac{R}{2} + \frac{l_1}{4} \right) + \cos \cos(B) \left(R + \frac{l_1}{2} \right) \left(\frac{R}{4} + \frac{l_1}{8} \right) \right)}{Eg^3(2R-c)} + \frac{l_0^3 \cos(B)^2 \left(R + \frac{l_1}{2} \right)}{4} + 3l_0 \left(R + \frac{l_1}{2} \right) \left(\frac{R}{2} + \frac{l_1}{4} \right) \left(\frac{R}{4} + \frac{l_1}{8} \right) \right) \quad (4.5)$$

$$+ \frac{12l_0^2 \left(\frac{M_y \cos(B)}{8} + \frac{F_x \cos \cos(A) \sin(B) \left(\frac{R}{4} + \frac{l_1}{8} \right)}{2} + 12l_0 M_y \left(\frac{R}{4} + \frac{l_1}{8} \right) + F_x l_0^3 \cos \cos(A) \cos \cos(B) \sin(B) \right)}{Eg^3(2R-c)} - \frac{3M_y \left(R + \frac{l_1}{2} \right)^2}{2Ecg^3}$$

$$- \frac{F_x l_0 \cos \cos(A) \cos \cos(B) \sin(B)}{4Gg(2R-c)}$$

unde:

$$M_y = \frac{p2E(6R^2g^2(c l_1 + 2c l_0 - l_1^2) + 4R^3g^2(c - 3l_1) + Rg^2(12 \cos \cos(B) l_0^2 c - 12c l_0 l_1 - l_1^3 + 6c l_1^2) - 8R^4g^2)}{96(ERg^2(2c - 4Rl_1 + 2c l_0 + c l_1) + Gl_0(2c l_0^2 16R^2 l_0 + 8Rc l_0 - 8Rl_0 l_1 + 4c l_0 l_1))}$$

$$+ \frac{pG(8Rl_0 l_1(3c l_0^2 - l_0 l_1^2 + 3c l_0 l_1) - 64R^2 l_0^2 + 24R^2 l_0(c l_0^2 + 2l_0 l_1^2 2c l_0 l_1) + c l_0 l_1(4l_0 l_1 + 6l_0^2 l_1))}{96(ERg^2(2c - 4Rl_1 + 2c l_0 + c l_1) + 2Gl_0^2(c l_0 16R^2 + 4Rc - 4Rl_1 + 2c l_1))}$$

$$F_x = \frac{p2Eg^2 \cos \cos(B) (2R(2R - c + l_1) - (2c l_0 - c l_1))}{8 \cos \cos(A) \sin \sin(B) ((Eg^2(2Rc - 4R^2 - 2Rl_1 + 2c l_0 + c l_1)) + 2G(c l_0^3 - 8R^2 l_0^2 + 4Rc l_0^2 - 4Rl_0^2 l_1 + 2c l_0^2 l_1))}$$

$$+ \frac{pG(-16R^4 l_0 - 8R^3 l_0(3l_1 + c + 4l_0 \cos \cos(B)) - 4R^2 l_0(8 \cos \cos(B) l_0 l_1 - 4 \cos \cos(B) l_0 c + 3l_1^2 - 3c l_1) - 2Rl_0(2 \cos \cos(B) c l_0^2 - 4 \cos \cos(B) l_0 l_1^2 + 8 \cos \cos(B) c l_0 l_1 - 3l_1^2 + 3c l_1^2))}{8 \cos \cos(A) \sin \sin(B) ((Eg^2(2Rc - 4R^2 - 2Rl_1 + 2c l_0 + c l_1)) + 2G(c l_0^3 - 8R^2 l_0^2 + 4Rc l_0^2 - 4Rl_0^2 l_1 + 2c l_0^2 l_1))}$$

Deformația sclipică a sistemului este definită utilizând următoarea formulă:

$$\varepsilon_z = \frac{\delta_z}{h} \quad (4.6)$$

unde: h este înălțimea celulei unitate, iar w și t sunt lungimea și respectiv lățimea celulei unitate (detaliată în capitolul 3).

Tensiunea care acționează asupra structurii se calculează cu ajutorul ecuației (4.7)

$$\sigma_z = \frac{pl_1}{A_s} \quad (4.7)$$

unde $A_s = wt/4$ este aria proiectată a structurii.

Rigiditatea efectivă a structurii se calculează ulterior cu ajutorul ecuației (4.8):

$$E_z = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} \quad (4.8)$$

Prin înlocuirea ecuației (4.6) și a ecuației (4.7) în ecuația (4.8), se obține expresia pentru rigiditatea la compresiune în direcția perpendiculară pe planul median al structurii piramidale.

Evaluarea rezistenței la compresiune se realizează presupunând că modul de deformare al brațelor celulei este identic cu flambajul de tip Euler.

Sarcina critică în acest caz poate fi calculată cu ajutorul următoarei ecuații [75]:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{2-3}}{4(0.6l_0)^2} \quad (4.9)$$

unde I_{2-3} este momentul de inerție al secțiunii transversale a brațului celulei unitate.

Aplicând teoria grinzilor pe sistemul dat, s-a utilizat un factor de lungime efectivă de 0,6.

Rezistența la compresiune poate fi evaluată cu ajutorul următoarei ecuații:

$$\sigma_z = \frac{F_z}{A_s} \quad (4.10)$$

unde: $F_z = \frac{F_{cr} 2 \cos(A)}{\sin(B)}$; $A_s = \frac{wt}{4}$.

În cele din urmă, ecuația (4.10) care definește rezistența la compresiune în direcția perpendiculară pe planul median al structurii piramidale devine [73]:

$$\sigma_z = \frac{2 \frac{\pi^2 EI_{2-3} \cos \cos(A)}{(0.6l_0)^2}}{wt \sin \sin(B)} \quad (4.11)$$

4.1.2 Investigarea modurilor proprii de flambaj ale structurii celulare

Modelul numeric pentru analiza la compresiune în direcția perpendiculară pe planul median al celulei unitate este prezentat în figura 4.2. Structura piramidală (marcată 1), care este fixată în prealabil pe o placă suport din oțel (marcată 2), este supusă unei solicitări la compresiune între blocul fix (marcat 3) și blocul de încărcare (marcat 4), Figura 4.2.

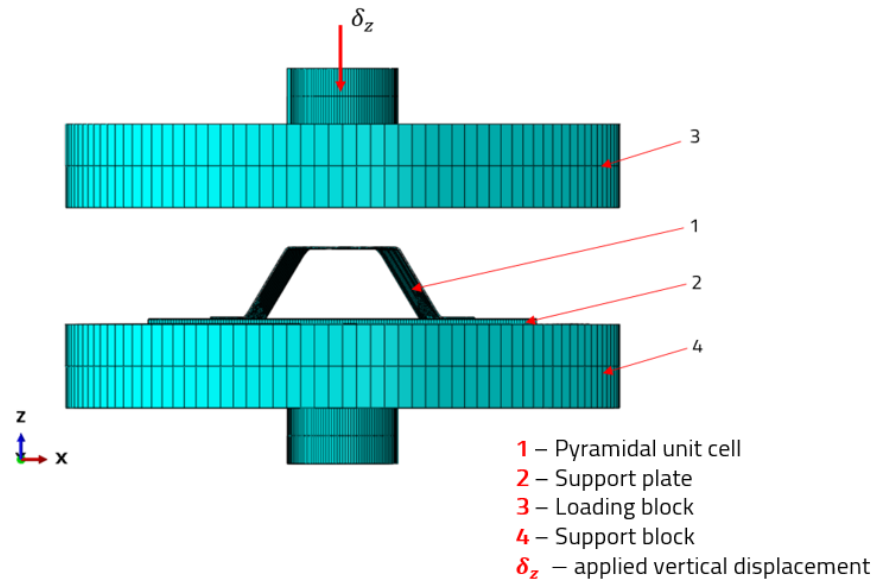


Figura 4.2 Modelul cu elemente finite pentru solicitarea la compresiune.

4.1.3 Metoda experimentală

Investigația experimentală are ca scop validarea modelului analitic definit pentru calcularea rezistenței și rigidității structurii celulare piramidale, precum și a modurilor proprii de flambaj a structurii celulare unitare calculate cu ajutorul modelului numeric.

■ Pregătirea eșantioanelor

Eșantioanele pentru structura piramidală au fost realizate din tablă de oțel inoxidabil de tip 304 ($E=187000$ MPa) cu o grosime de 0,25 mm.

Perforațiile au fost realizate pe o mașină de tăiere cu jet abraziv Maxiem 1530, echipată cu o pompă hidraulică de 20 CP, care poate susține o presiune constantă a jetului de apă de 3500 bari.

■ Configurații geometrice investigate

Configurațiile geometrice ale structurii celulare piramidale au fost obținute prin utilizarea unui set de parametri fix unde, $B = 60^\circ$, $l_1 = 10$ mm, $l_0 = 15$ mm, și $c = 15$ mm și un parametru variabil, $R = [3, 4, 5]$ mm. Astfel, au rezultat trei configurații denumite C1 ÷ C3 ale căror dimensiuni de gabarit sunt prezentate în tabelul 4.1.

Table 4.1 Configurațiile și dimensiunile de gabarit ale celulei unitate utilizate pentru investigațiile experimentale [73].

Configurație	w [mm]	t [mm]	h [mm]	B [°]	A [°]
C1	47	37	13.3	60	21.8
C2	51	38	13.3	60	28.1
C3	54	39	13.3	60	33.7

Celulele unitate expandate au fost fixate individual pe câte o placă de oțel cu grosime de 1 mm pentru împiedicarea deplasării în plan a acestora în timpul încercării la compresiune.

Pentru a asigura repetiția comportamentului la compresiune al structurilor, au fost luate în considerare trei eșantioane pentru fiecare configurație. Testele de compresiune au fost efectuate pe o unitate de testare Intron 3360. Acestea au fost controlate prin aplicarea unei deplasări verticale viteză constantă a blocului de încercare de 3 mm/min, iar farța de reacțiune a fost măsurată cu ajutorul unei celule de încărcare de 5kN. Tensiunea la compresiune a fost calculată prin împărțirea forței măsurate la suprafața celulei unitate $w \times t$ mm². Deformația specifică a fost calculată prin împărțirea deplasării înregistrate la înălțimea inițială a miezului.

Modulul de elasticitate a fost determinat pe panta curbei tensiune-deformație specific obținute experimental, $E_z = \sigma_z / \varepsilon_z$.

4.2 Validarea modului teoretic

Testele de compresiune au furnizat valori pentru rezistența (σ_z) și modulul de elasticitate longitudinal (E_z) pentru o singură celulă unitate cu un unghi de înclinare a brațelor egal cu 60°. Comparația dintre valorile obținute experimental și cele rezultate utilizând modelul analitic este prezentată în tabelul 4.2.

Tabelul 4.2 Rezultate analitice și experimentale pentru încercarea de compresiune în direcție perpendicular pe planul median [73].

Configurație	Model analitic		Model experimental	
	E_z [MPa]	σ_z [MPa]	E_z [MPa]	σ_z [MPa]
C1	15.4	0.33	15.15	0.286
C2	9.08	0.22	9.04	0.196
C3	5.43	0.13	5.05	0.12

Valorile experimentale măsurate pentru rezistența și rigiditatea maximă sunt mai mici decât cele obținute prin metoda teoretică. Acest lucru se datorează faptului că modelul analitic nu include imperfecțiunile geometrice ale brațelor celulei unitate obținute în timpul procesului de expansiune.

În plus, valoarea razei de ghidaj este aproximată la zero în modelul analitic, în timp ce pentru eşantioanele utilizate la testarea experimentală, valoarea razei liniilor de ghidaj este de aproximativ 1 mm.

Studiul comparativ între cele două modele arată că ambele, atât cel analitic cât și cel experimental, au traiectorii similare. Acest lucru evidențiază faptul că modelul analitic a fost validat cu succes prin metode experimentale.

Modurile proprii de flambaj ale brațelor celulei unitate au fost identificate cu ajutorul modelului numeric supus unor condiții la limită și unor încărcări similare cu cele din configurația experimentală. S-a realizat o comparație între deformațiile observate și predicțiile numerice ale modurilor de flambaj cvasistatice pentru toate configurațiile supuse la încercări experimentale.

Predicțiile analizei cu elemente finite arată aceeași formă de flambaj pentru toate brațele celulei unitate, situată în regiunea mediană a structurii, Figura 4.3.

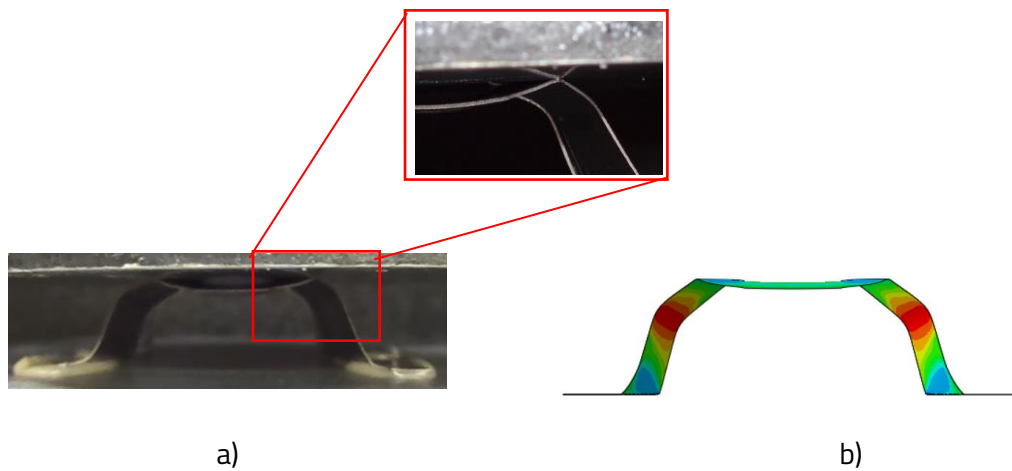


Figura 4.3 Comparație între modurile proprii de flambaj ale brațelor celulei obținute prin metode numerice și experimentale: a) deformația observată b) predicție numerică.

Rezultatele pentru configurația C2 arată același comportament ca și în cazul configurației C1; brațele celulei unitate au înregistrat un flambaj spre exterior pe axa transversală mediană. Comparația dintre cele două modele pentru configurația C3 demonstrează că cele două modele se află în bună corelație.

Comparația dintre modelele numerice și cele experimentale sugerează că predicțiile modelului numeric sunt eficiente în determinarea modurilor proprii de flambaj ale brațelor celulei, așa cum apar în realitate, confirmând astfel posibila utilizare a modelului numeric validat pentru investigații viitoare asupra celulei unitate. În ciuda acestui fapt, investigațiile ulterioare ar trebui să analizeze modul în care valoarea razei de ghidaj influențează modul de deformare a brațelor celulei unitate în timpul solicitării la compresiune și care este influența acesteia asupra proprietăților mecanice.

Pe baza modelului analitic validat, proprietățile mecanice ale structurii piramidale, în direcția perpendiculară pe planul median, pot fi evaluate prin variația parametrilor geometrici ce definesc celula unitate.

Figura 4.4 arată evoluția rigidității și rezistenței specifice, $\frac{E_z}{\rho}$ și $\frac{\sigma_z}{\rho}$ ale structurii investigate.

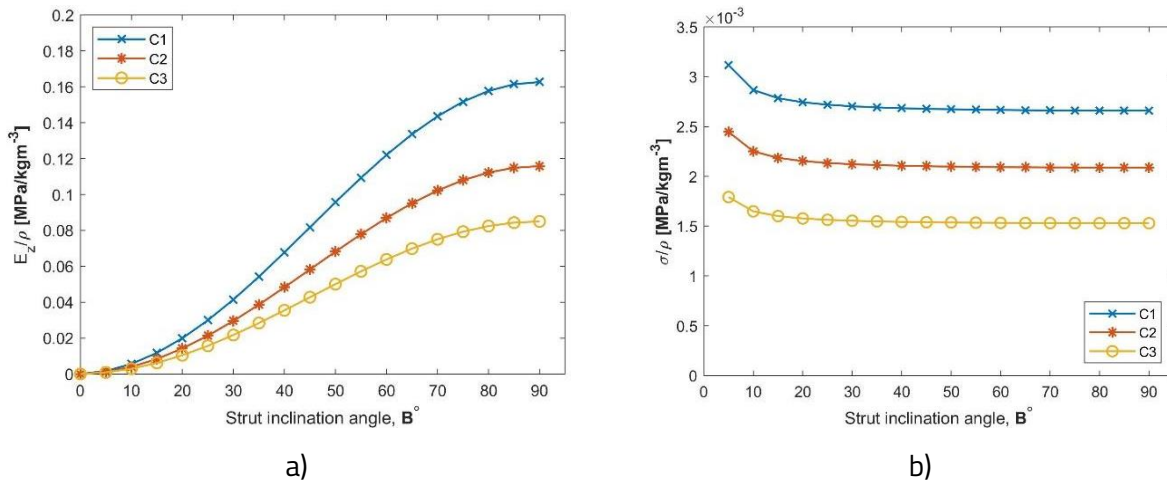


Figura 4.4 Proprietățile la compresie ale structurii piramidale investigate: a) rigiditate la compresie; b) rezistență la compresie [73].

Parametrul variabil pentru acest studiu este unghiul de înclinare brațului celulei, $B = [0^\circ - 90^\circ]$, deoarece acesta este una dintre cele mai importante caracteristici care definesc topologia celulară. Parametrii constanți ai structurii sunt $l_0 = 15 \text{ mm}$, $c = 15 \text{ mm}$, $l_1 = 10 \text{ mm}$, $g = 0,25 \text{ mm}$ și $z = 1 \text{ mm}$. Raza perforației este, de asemenea, variabilă și diferită pentru fiecare configurație considerată; $R = 3 \text{ mm}$ pentru C1, $R = 4 \text{ mm}$ pentru C2 și $R = 5 \text{ mm}$ pentru C3.

Valoarea rigidității structurii piramidale este direct proporțională cu creșterea unghiului de înclinare, B al brațului celulei unitate, figura 4.10 a), în timp ce rigiditatea specifică scade odată cu creșterea razei de perforației, R .

Acest lucru se datorează faptului că brațul celulei unitate este principalul element care conferă stabilitate structural la solicitarea de compresie. Valorile cele mai ridicate sunt înregistrate de configurația C1, pentru care raza perforației are cea mai mică valoare, $R=3 \text{ mm}$ [73].

4.3 Structura celulară trapezoidală

Configurațiile geometrice pentru structura celulară trapezoidală au fost obținute prin utilizarea unui set de parametri ficși $l_1 = 10 \text{ mm}$, $c = 15 \text{ mm}$ și $A = 0^\circ$ și un set de parametri variabili, $R = [3, 4, 5] \text{ mm}$ și $l_1 = [21, 22, 23] \text{ mm}$.

Valorile unghiului de expandare B_t au fost calculate în conformitate cu următoarea relație, $h = h_t$. Această condiție a fost impusă pentru a se asigura că ambele structuri supuse investigației,

trapezoidală și piramidală, vor avea aceeași înălțime. Compararea suprafeței proiectate a celor două celule unitare, $A_{C_1} = 1739 \text{ mm}$ și $A_{C_{1t}} = 1642 \text{ mm}$, reprezintă o metodă eficientă pentru a evidenția avantajele prezenței unghiului intern al structurii piramidale, A . Valoarea unghiului de expansiune a fost definită ca fiind, $B = [38,24^\circ, 35,32^\circ, 32,14^\circ]$. Astfel, au rezultat trei configurații denumite C1t ÷ C3t, ale căror dimensiuni de gabarit sunt prezentate în tabelul 4.3.

Table 4.3 Configurațiile și dimensiunile de gabarit pentru celula unitate trapezoidală.

Configurație	w_t [mm]	t_t [mm]	h_t [mm]	B_t [°]	A_t [°]
C1t	52.98	31	13.3	38.24	0
C2t	57.53	31	13.3	35.32	0
C3t	60.79	31	13.3	38.24	0

Eșantioanele structurii trapezoidale au fost pregătite și testate în aceleași condiții ca și cele ale structurii piramidale. Pentru a asigura repetiția comportamentului structural, au fost luate în considerare trei eșantioane pentru fiecare configurație. Testele de compresiune au fost efectuate pe o unitate de testare Intron 3360 și au fost controlate prin deplasarea blocului de compresiune cu o viteză constantă de 3 mm/min. Forțele de reacțiune au fost măsurate cu ajutorul unei celule de încărcare de 5kN. Tensiunea la compresiune a fost calculată ca raportul dintre forța de reacțiune măsurată și suprafața celulei unitate, $A_s = w \cdot t \text{ mm}^2$. Deformația specifică la compresiune a fost calculată prin împărțirea deplasării la înălțimea inițială a miezului.

Modulul de elasticitate a fost determinat pe baza pantei curbei tensiune deformație specifică obținută experimental., $E_z = \sigma_z / \varepsilon_z$.

Comparația dintre rezultatele experimentale și cele obținute prin metode analitice este prezentată în tabelul 4.4.

Table 4.4 Rezultate analitice și experimentale pentru solicitarea la compresiune.

Configurație	Model analitic		Model experimental	
	E_z [MPa]	σ_z [MPa]	E_z [MPa]	σ_z [MPa]
C1t	14.09	0.26	13.94	0.233
C2t	8.57	0.17	7.41	0.141
C3t	5.2	0.1	4.25	0.082

Similar comportamentului structurii piramidale, valorile rezistenței și rigidității maxime măsurate prin mijloace experimentale sunt ușor mai mici decât cele teoretice. Acest lucru se datorează faptului că modelul analitic nu include imperfecțiunile geometrice ale brațelor celulei unitate.

În ceea ce privește structura celulară trapezoidală, studiul comparativ arată că atât modelul analitic, cât și cel experimental, urmează aceeași traiectorie. Acest lucru conturează faptul că modelul analitic dezvoltat pentru structura piramidală este valabil și pentru miezul trapezoidal.

Comparația dintre performanțele structurilor trapezoidale și piramidale este prezentată în tabelul 4.5.

Table 4.5 Proprietățile mecanice ale structurii celulare piramidale în comparație cu cele ale celulei trapezoidale.

Configurație	C1	C1t	C2	C2t	C3	C3t
E_z [MPa]	15.4	14.09	9.08	8.57	5.43	5.2
Diferență	9.29 %		5.95 %		4.42 %	
σ_z [MPa]	0.33	0.26	0.22	0.17	0.13	0.1
Diferență	26.92 %		29.41 %		30 %	

Studiul comparativ între cele două topologii, piramidală și trapezoidală, arată că unghiul intern, A , crește semnificativ proprietățile mecanice ale structurii cu o medie de 6,5% în rigiditate și 28,7% în rezistență.

Un alt aspect care merită investigat este evoluția proprietăților mecanice ale structurii atunci când valoarea unghiului intern este independentă de raza perforației.

4.4 Variația unghiului intern al structurii

În ceea ce privește valorile parametrilor care definesc celula unitate, variația rigidității și rezistenței acesteia, în funcție de unghiul intern al structurii, A , sunt reprezentate în Figura 4.5.

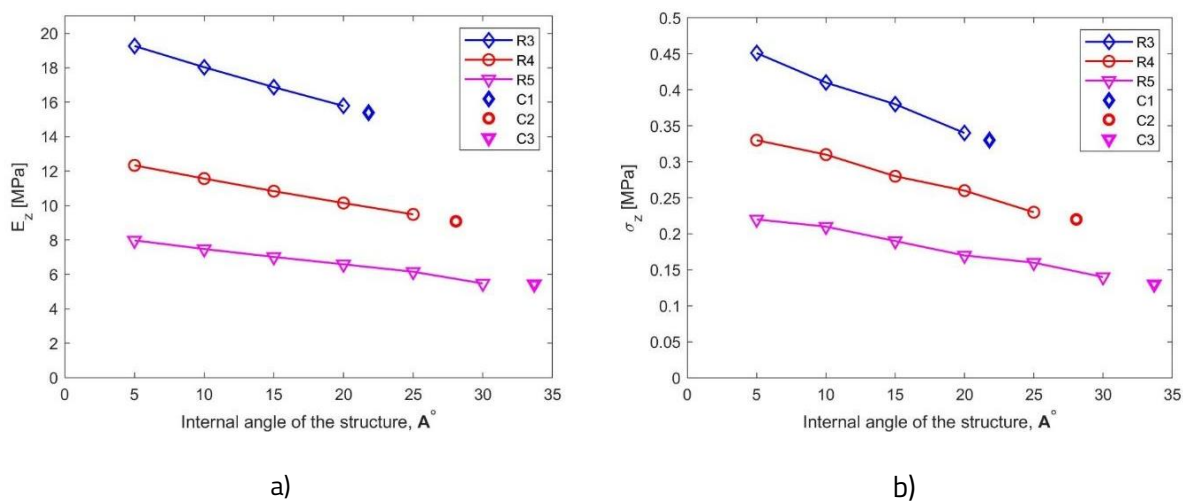


Figura 4.5 Variația proprietăților mecanice ale celulei unitate în raport cu unghiul intern al structurii: a) rigiditate la compresiune; b) rezistență la compresiune.

Valoarea rigidității la compresiune în plan perpendicular pe planul median, pentru structura piramidală, este direct proporțională cu scăderea unghiului intern al structurii A ; proprietățile de compresiune ale structurii trapezoidale scad odată cu creșterea valorii unghiului acestuia.

4.5 Studiu comparativ

Odată cu definirea și validarea proprietăților mecanice la compresiune, performanța structurală a miezului celular piramidal a fost comparată cu o selecție de diferite tipuri de miezuri utilizate în construcția panourilor sandwich, după cum se arată în Figura 4.6.

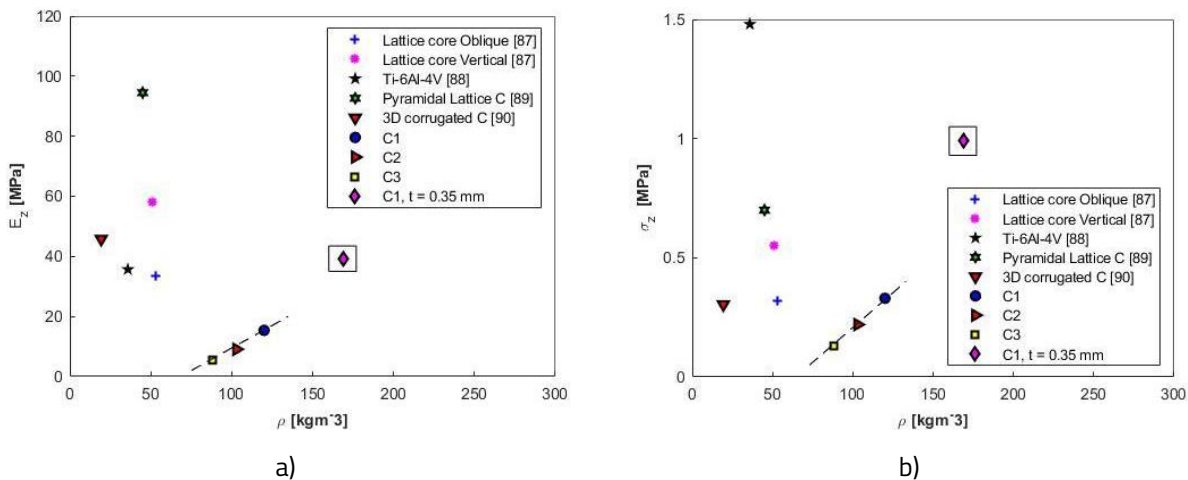


Figura 4.6 Proprietățile mecanice la compresiune pentru diferite topologii de miez celular: a) rigiditate la compresiune; b) rezistență la compresiune [73].

Structura piramidală prezintă performanțe mai scăzute în ceea ce privește rigiditatea la compresiune în comparație cu celelalte structuri luate în considerare în cadrul studiului comparativ. În ciuda acestui fapt, este imperios necesar să se menționeze că grosimea materialului de bază de 0,25 mm este semnificativ redusă în comparație cu cea a celorlalte structuri studiate (de exemplu, 0,9 mm pentru structura cu miez de rețea din fibră de carbon/epoxi oblică și verticală cu miez de rețea dezvoltată de J. Xiong et al. [87] și 0,635 pentru structura din aliaj de titan prezentată de Queheillalt și Wadley [88]). O grosime redusă a materialului de bază face ca brațele structurii celulare piramidale supusă investigației să fie susceptibile la flambaj. Cu toate acestea, prin creșterea grosimii materialului și considerând $g=0,35$, rigiditatea structurii, calculată cu ajutorul ecuației (4.16), devine 42,36 MPa pentru o densitate de 175 kgm^{-3} și este marcată în conturul dreptunghiular de pe grafic. Prin această modificare, structura piramidală depășește performanțele miezului cu zăblele oblice și ale configurației piramidale obținute dintr-un aliaj de titan ultraușor, Ti-6Al-4V. Comparativ cu miezul piramidal realizat din material compozit ranforsat cu fibre de carbon, dezvoltată de Ming Li et. al [89], structura studiată atinge jumătate din valoarea rigidității cu o creștere semnificativă a densității.

Rezistența, în direcția perpendiculară pe planul median, ca funcție de densitatea specifică a miezului, este ilustrată în figura 4.16. Cele mai mari valori au fost înregistrate pentru configurația C1, cu o

tensiune maximă de 0,33 MPa. Cu această valoare, structura nou dezvoltată se situează deasupra miezului celular cu zăbrele oblice, cu o valoare măsurată de 0,32 MPa și a miezului celular prezentat de Jian Xiong et. al [87], dar la o densitate mai mare. Creșterea grosimii materialului de bază pentru configurația C1 de la 0,25 mm la 0,35 mm aduce structura investigată la o rezistență la compresiune de 0,92 MPa, ceea ce corespunde unei densități de 175 kgm^{-3} .

Unghiul intern structurii, A , a fost considerat ca fiind funcție de raza perforației, R . Această ipoteză inițială s-a dovedit a fi o limitare în ceea ce privește performanța structurii (atât din punct de vedere al rigidității, cât și al rezistenței), datorită faptului că, odată cu creșterea în valoare a unghiului A , crește și valoarea lui R , ceea ce duce la îngustarea brațului celulei. În cazul unor investigații amănunțite, ar trebui luată în considerare o formulare diferită pentru unghiul A , independentă de raza perforației, R .

4.6 Concluzii

Principalul scop al acestui capitol este de a evalua performanța structurală a noului miez celular piramidal pentru a evalua potențialul său de utilizare pentru construcția de panouri sandwich. A fost dezvoltat un model analitic pentru a defini proprietățile mecanice la încercarea de compresiune în direcția perpendiculară pe planul median. Expresiile definite pentru calcularea rezistenței și rigidității maxime au fost validate prin încercări experimentale.

A fost elaborat un model cu elemente finite pentru a prezice modurile proprii de flambaj ale brațelor celulei unitate. Rezultatele au fost comparate cu deformațiile observate în timpul efectuării încercărilor experimentale și s-au dovedit a fi în bună corelație.

Se pot formula următoarele concluzii cu privire la performanța la compresiune în direcția perpendiculară pe planul median, a structurii celulare piramidale studiate:

- Modulul de elasticitate, E_z , scade odată cu creșterea unghiului intern al structurii, A . Deoarece acesta din urmă este definit în funcție de raza perforației, R , acest lucru se traduce printr-o creștere a dispunerii tridimensionale a brațului celulei unitate ceea ce face ca acestea să fie mai susceptibile la flambaj. Rigiditatea la compresiune crește odată cu creșterea unghiului de înclinare al brațului, B .
- Rezistența scade odată cu creșterea unghiului intern A . În plus, rezistența efectivă la compresiune a structurii scade, de asemenea, odată cu creșterea unghiului de înclinare al brațului celulei, B .
- Procesul de fabricație propus oferă posibilitatea de reducere a pierderilor de material și a costurilor de producție, oferind o metodă de fabricație simplă, dar eficientă. Acesta oferă un grad considerabil de versatilitate, având avantajul de a fi fabricat din orice metal ductil care poate fi format în coli subțiri.
- Se obține o performanță structurală globală îmbunătățită (atât rigiditate, cât și rezistență) prin considerarea unghiului A independent de raza perforației, R .

- Rigiditatea și rezistența structurală ar putea fi îmbunătățite prin creșterea momentului de inerție al brațului celulei unitate, de exemplu, prin operații de ștanțare sau prin utilizarea unor materiale cu densitate redusă.

5. Analiza teoretică și experimentală a panoului sandwich construit cu miezul celular

Performanța panoului sandwich construit pe baza noului miez celular piramidal este investigată, în continuare, în acest capitol. Rigiditatea la încovoiere și la forfecare, precum și deformația la mijlocul grinzii sandwich au fost determinate prin abordări numerice și experimentale. S-a constatat că cele două modele sunt în bună corelație. În acest sens, modelul numeric validat poate fi utilizat pentru dezvoltarea ulterioară a produsului. Acest lucru poate duce la obținerea unor proprietăți mecanice mai bune și la reducerea greutății proprii a ansamblului.

5.1 Investigarea comportamentului la încovoiere

5.1.1 Elaborarea modelului numeric

Pentru a evalua rigiditatea la încovoiere și la forfecare a grinzii sandwich, s-a luat în considerare solicitarea la încovoiere în patru puncte, Figura 5.1. Atunci când o grindă este supusă unei încercări de încovoiere în patru puncte, forța care acționează în întreaga regiune dintre suporturile exterioare și interioare, P și momentul de încovoiere în zona mediană sunt constante. Acest lucru diminuează posibilitatea deformării locale datorate flambajului a fețelor laterale și oferă o înțelegere mai largă a comportamentului și a proprietăților mecanice ale miezului [3, 4].

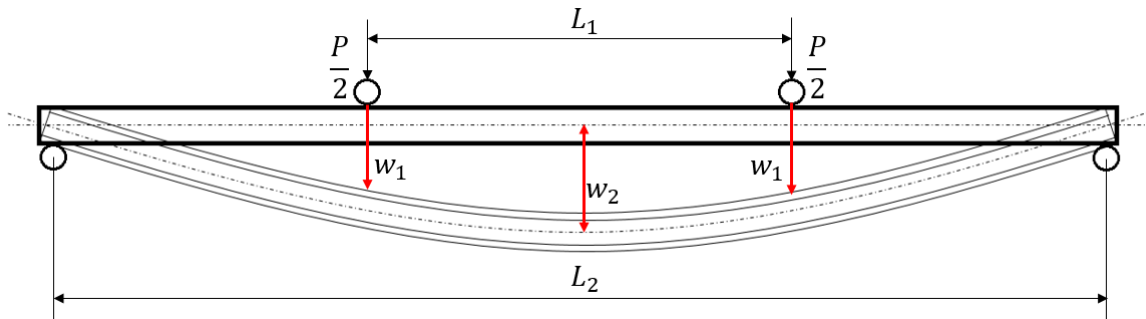


Figura 5.1 Reprezentarea schematică a solicitării la încovoiere [74].

Configurația de încovoiere în patru puncte ajută la determinarea relației dintre deplasarea impusă w_1 , deformația din mijlocul grinzii, w_2 , și oferă valori pentru sarcina forța, P . În ceea ce privește acești parametri, rigiditatea specifică la încovoiere și la forfecare poate fi calculată în raport cu masa totală a grinzii, utilizând ecuațiile (5.6) și (5.7) [5, 1]:

$$D = \frac{PL_1^2(L_2 - L_1)}{m16w_2} \quad (5.1)$$

$$S = \frac{12DP(L_2 - L_1)}{m(12w_1DL_2 - P(L_1^3 - 3L_1^2L_2 + 2L_2^3))} \quad (5.2)$$

unde: $m = (2\rho_{s_{sk}}t_f + \rho_r\rho_{s_c}t_c)L_2b$ – masa specifică a grinzii sandwich.

Iar, t_c – grosimea miezului celular, $\rho_{s_{sk,c}}$ – densitatea materialului de bază din care este realizat miezul celular și densitatea materialului din care sunt realizate fețele laterale, t_f – grosimea fețelor laterale, ρ_r – densitatea relativă a miezului celular, L_2 – lungimea activă a grinzii, b – lățimea grinzii sandwich.

Pentru a evalua performanțele la încovoiere în patru puncte a grinzii sandwich, a fost realizat un model cu elemente finite, prezentat în Figura 5.2. Grinda sandwich, care constă în două fețe laterale (marcate 3 și 5) aplicate de o parte și de cealaltă a miezului celular (marcat 4), este supusă unei solicitări la încovoiere în patru puncte între rolele suport (marcate 6 și 7) și rolele de încărcare (marcate 1 și 2).

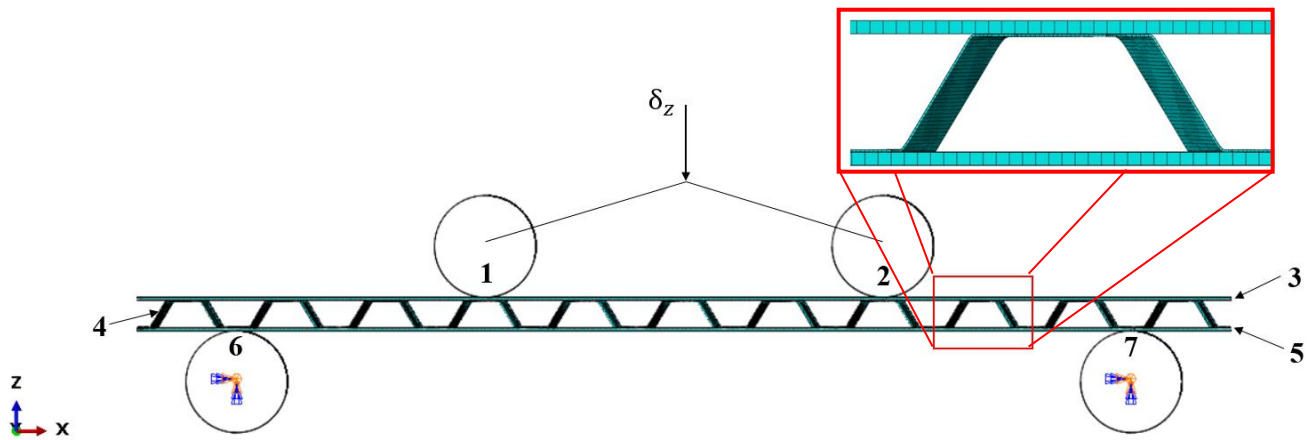


Figura 5.2 Modelul cu elemente finite pentru solicitarea la încovoiere în patru puncte [74].

Componentele sistemului sunt modelate folosind elemente structurale de tip shell cu 4 noduri, S4R, un element de integrare redusă cu 6 grade de libertate pentru fiecare nod, 3 translații și 3 rotații.

Componentele care reprezintă rolele, marcate 1, 2, 6 și 7, sunt modelate ca rigide analitice. Condițiile la limită pentru model sunt definite prin restricționarea tuturor gradelor de libertate pentru rolele suport, în timp ce pentru rolele de încărcare s-a aplicat o deplasare impusă, perpendiculară pe fețele laterale ale ansamblului. Deformația la mijlocul grinzii este măsurată într-un nod de pe fața laterală superioară a sandwich-ului în planul de simetrie al acesteia, iar forța de reacțiune corespunzătoare este înregistrată în rolele inferioare. Zonele de contact dintre componentele sandwich-ului (miez și fețele laterale) sunt modelate ca și contact de tip nod-suprafață. Contactele dintre rolele suport și cele de încărcare și fețele laterale ale sandwich-ului sunt modelate ca un contact de tip suprafață-suprafață cu un coeficient de frecare de 0,17, ceea ce corespunde interacțiunii dintre oțel și oțel.

5.1.2 Analiza imperfecțiunilor geometrice

Atunci când se definește rigiditatea la încovoiere și la forfecare a panourilor sandwich cu miezuri celulare periodice prin utilizarea modelelor numerice, rezultatele simulării sunt de obicei mai mari decât cele obținute prin metode experimentale. Acest lucru se datorează imperfecțiunilor ale structurii celulare generate de variațiile nedorite ale parametrilor geometrici în timpul procesului de fabricație [2].

Cuantificarea imperfecțiunilor geometrice implică suprascrierea modurilor proprii de flambaj pe geometria inițială înainte de aplicarea încărcării. Primul pas constă în efectuarea unei analize liniare la flambaj pentru a calcula cele mai probabile moduri de deformare. Evaluarea acestora permite alegerea modurilor care ar putea genera cele mai critice imperfecțiuni. Modurile proprii de flambaj sunt utilizate ulterior pentru perturbarea rețelei inițiale de noduri.

Dintre modurile proprii de flambaj determinate de analiza liniară a miezului celular, s-a considerat că modul 1 are cea mai mare probabilitate de a genera deformări inițiale critice. Coordonatele nodale distorsionate sunt aplicate cu un factor de scalare de 0,1. Această perturbație generată asupra geometriei inițiale a miezului permite ca nodurile să se deplaseze în direcția stabilită de modul propriu cu 10% din valoarea deplasării inițiale U_i .

5.1.3 Metoda experimentală

Investigația experimentală a avut ca scop validarea modelului numeric pentru calcularea rigidității la încovoiere și la forfecare a grinzilor sandwich bazate pe miezul celular piramidal. Pentru a asigura reproductibilitatea comportamentului la încovoiere, în timpul testelor experimentale au fost luate în considerare trei eșantioane pentru fiecare configurație.

■ *Realizarea eșantioanelor*

Miezul celular a fost fabricat din oțel inoxidabil de tip 304 cu o grosime de 0,25 mm.

Fețele laterale au avut o grosime de 1,5 mm și au fost obținute din oțel carbon moale. Miezul celular a fost asamblat de fețele laterale cu ajutorul unui adeziv pe bază de rășini epoxidice, bi-component, Araldite 2015®. Adezivul este aplicat cu ajutorul unui pistol manual cu o duză de mixare pentru a menține proporțiile conform recomandărilor producătorului, figura 5.3 a). Ansamblul sandwich este reprezentat în figura 5.3 b).

Poziția grinzilor sandwich în timpul procedurii experimentale, pentru toate configurațiile luate în considerare în cadrul studiului, este prezentată în Figura 5.3 c).

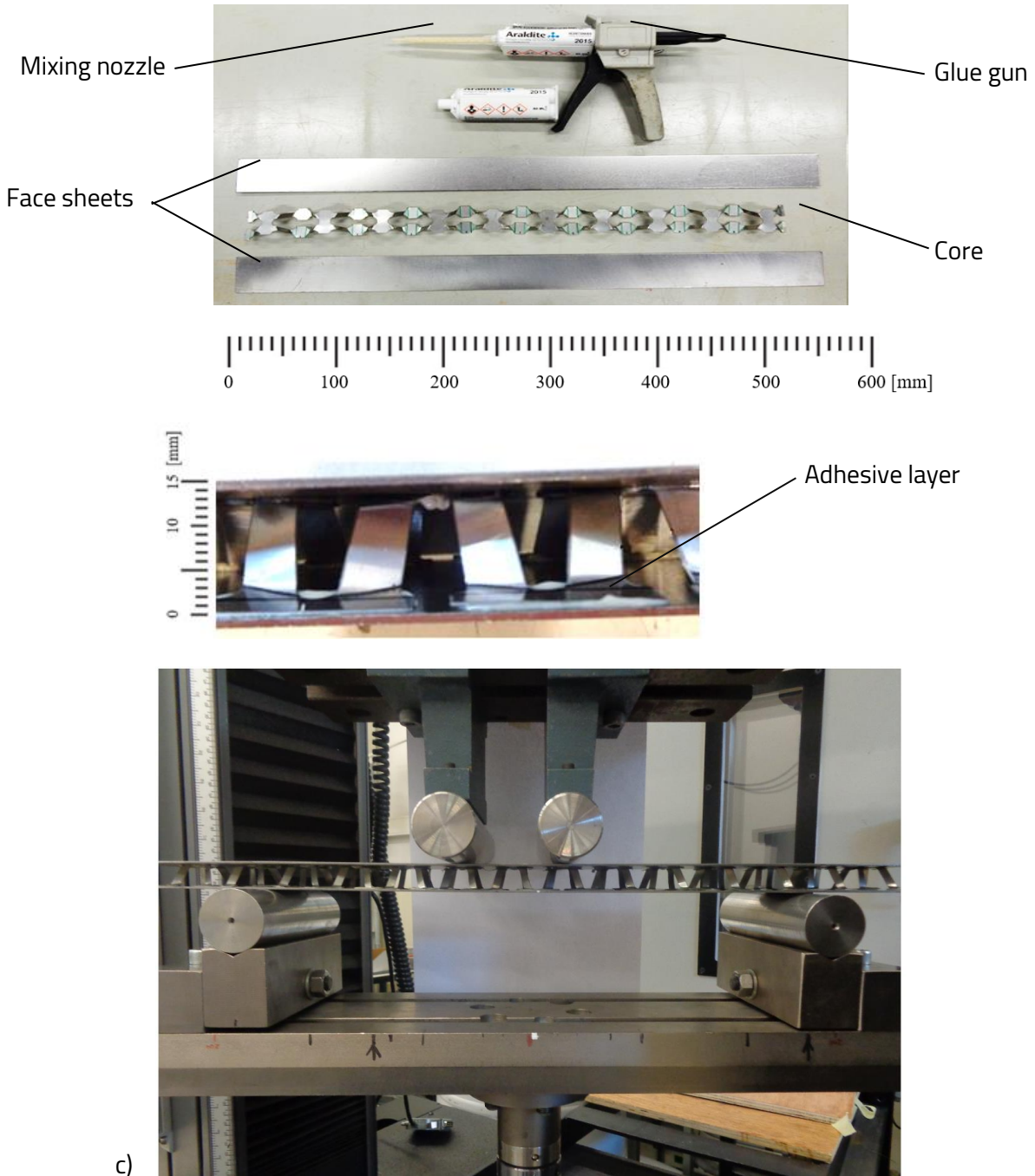


Figura 5.3 a) Elementele componente ale panoului sandwich; b) grinda sandwich asamblată c) poziția grinzii în timpul procedurii experimentale [74].

■ *Investigarea configurațiilor geometrice*

Configurațiile geometrice pentru miezul celular au fost obținute considerând un set de parametri constanți, $B = 60^\circ$, $l_1 = 10 \text{ mm}$, $l_0 = 15 \text{ mm}$ și $c = 15 \text{ mm}$, iar raza perforațiilor variabilă $R = [3, 4, 5] \text{ mm}$, ceea ce duce la o variație a unghiului intern al structurii, A . Ambele direcții de expansiune a

miezului celular, O_x și O_y , au fost luate în considerare la realizarea mostrelor. Astfel, s-au obținut șase configurații denumite C1X ÷ C3X și, respectiv, C1Y ÷ C3Y, definite în tabelul 5.1.

Table 5.1 Configurațiile experimentale și dimensiunile acestora pentru probele solicitate la încovoiere în patru puncte [74].

Configurație	Lungimea grinzii [mm]	Lățimea grinzii [mm]	Înălțimea grinzii [mm]	Unghiul intern al structurii, A [°]	Loading span, L_1 [mm]	Lungimea activă a grinzii, L_2 [mm]
C1X	533	37.9	18.09	21.8	183	419
C1Y	525	45.09	18.15	21.8	180	416
C2X	550	37.77	18.56	28.1	95	343
C2Y	535	50.94	18.82	28.1	104	364
C3X	568	38.28	19.12	33.7	61	366
C3Y	550	54.86	19.49	33.7	73	381

Dimensiunile pentru cele două reazeme, L_1 și L_2 au fost alese luând în considerare topologia miezului celular, astfel încât rolele de încărcare și cele support sa corespundă mijlocului zonei de contact între miezul celular și cele două fețe laterale.

■ *Protocol experimental*

Încercările la încovoiere în patru puncte au fost efectuate pe o unitate de testare Instron 2985, acestea au fost realizate prin deplasarea controlată a rolor de încărcare, iar viteza acestora a fost menținută constant la 1 mm/min. S-a aplicat o deplasare impusă de 3 mm, iar forțele de reacțiune au fost măsurată cu ajutorul unei celule de încărcare de 30kN.

Deformația din mijlocul grinzii, w_2 , a fost înregistrată cu ajutorul unui extensometru digital pe toată durata procedurii experimentale. Utilizarea sistemului asigură corelația dintre datele analogice (de exemplu, deplasarea, forța de reacțiune) pentru fiecare imagine înregistrată.

Deformația maximă în mijlocul grinzii, w_2 , a fost determinată pe zona linear-elastică a graficului forță - deplasare și poate fi definită astfel: $w_2 = h_1 - h_0$, figura 5.4.

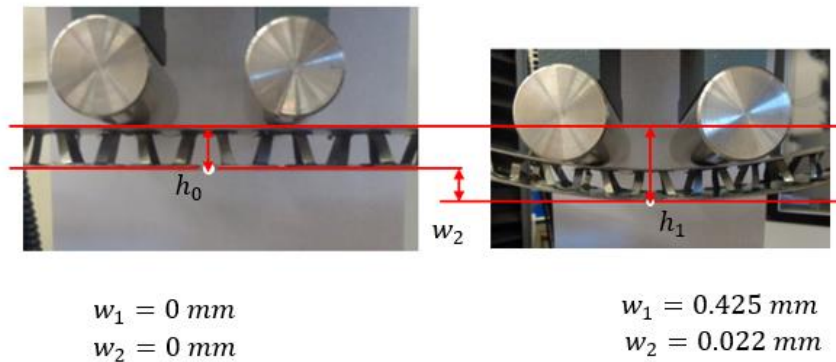


Figura 5.4 Metoda utilizată pentru calculul deplasării în mijlocul grinzii, w_2 : h_0 – poziția inițială a grinzii; h_1 – poziția grinzii în funcție de deplasarea impusă [74].

5.2 Validarea modelului numeric - corelarea rezultatele numerice și experimentale

Încercările la încovoiere în patru puncte au înregistrat valori pentru forța de reacțiune, (P) deplasarea (w_1) și deplasarea la mijlocul grinzii, (w_2) pentru fiecare dintre speciemenle supuse procedurii experimentale. Rezultatele sunt prezentate comparative în tabelul 5.2. Valoarea pentru deplasare (w_1) este aceeași atât pentru modelul numeric, cât și pentru cel experimental, pentru a asigura o corelație precisă pentru determinarea proprietățile la încovoiere.

Tabelul 5.2 Rezultatele numerice și experimentale pentru solicitarea la încovoiere în patru puncte [74].

Configurație	Rezultate experimentale			Rezultate teoretice	
	Forță [N]	w_2 [mm]	w_1 [mm]	Load [N]	w_2 [mm]
C1X	70.31	0.022	0.425	81.45	0.021
C1Y	44.04	0.021	0.246	77.19	0.023
C2X	33.59	0.003	0.3	51.91	0.004
C2Y	42.12	0.0034	0.25	73.32	0.005
C3X	27.18	0.004	0.27	32.07	0.005
C3Y	24.12	0.0052	0.25	30.77	0.006

Valorile experimentale înregistrate pentru forța de reacțiune maximă sunt mai mici decât cele obținute prin mijloace numerice. Acest lucru se datorează faptului ca modelul numeric nu ia în considerare grosimea stratului de adeziv utilizat pentru asamblarea grinzii sandwich. Valorile pentru înălțimea acesteia sunt reduce în cazul modelului numeric, spre deosebire de probele supuse încercărilor experimentale. Cu toate acestea, pentru configurațiile considerate, acest lucru nu influențează în mod semnificativ proprietățile mecanice ale miezului.

În plus, imperfecțiunile geometrice ale fețelor laterale ale grinzii sandwich nu sunt luate în considerare pentru modelul numeric. Acest lucru influențează valorile obținute pentru deformarea în mijlocul grinzii, care sunt mai mici pentru eșantioanele supuse încercărilor experimentale, spre deosebire de cele investigate prin metode numerice.

Tabelul 5.3 prezintă comparația dintre valorile numerice rezultate în urma analizei cu elemente finite și valorile măsurate în timpul experimentelor, pentru rigiditatea la încovoiere și la forfecare.

Tabelul 5.3 Comparație dintre rezultatele obținute prin metode numerice și experimentale pentru configurațiile investigate

	D_m [kNm ² /kg]	S_m [kN/kg]
C1X	3.0	0.221
	4.63	0.227
	4.51	0.224
D_m – average	4.05	0.224
D_m – FEA	4.68	0.287
C1Y	1.49	0.151
	3.23	0.313
	1.28	0.129
D_m – average	2.01	0.198
D_m – FEA	3.47	0.341
C2X	4.25	0.258
	3.41	0.237
	6.04	0.301
D_m – average	4.57	0.266
D_m – FEA	6.29	0.326
C2Y	3.22	0.197
	4.03	0.271
	5.56	0.392
D_m – average	4.27	0.286
D_m – FEA	6.5	0.412
C3X	1.27	0.236
	1.38	0.245

	1.33	0.241
D_m – average	1.32	0.241
D_m – FEA	1.55	0.291
	0.83	0.141
C3Y	0.96	0.165
	0.81	0.126
	0.87	0.144
D_m – average	0.87	0.144
D_m – FEA	1.13	0.189

Analizând aceste rezultate se poate concluziona că cele două modele prezintă aceeași trend. Deși se observă diferențe între seturile de valori experimentale și teoretice pentru anumite configurații, se consideră că fenomenele care sunt prezentate de ambele modele sunt în bună corelație.

Performanța structurală a grinzii sandwich poate fi evidențiată în funcție de cele două direcții de expandare definite de miezul celular: O_x și O_y .

Proprietățile mecanice ale grinzii sandwich depind de direcția de expandare a miezului celular. Lățimea brațului celulei (determinată de valoarea razei perforației, R), precum și distanța dintre suprafețele de adeziune superioară și inferioară (definite de lungimea și lățimea celulei unitare a miezului) au, de asemenea, o influență semnificativă asupra performanței structurale a ansamblului.

Analizând valorile din tabelul 5.3 se evidențiază o diferență între curbele experimentale și cele obținute prin metode numerice. Aceasta poate fi justificată prin faptul că, pentru unele dintre probele supuse încercărilor experimentale, a avut loc o rupere prematură a stratului de adeziv înainte de deformarea miezului celular.

Datorită faptului că procesul de expandare mecanică nu implică formarea miezului într-o matriță pozitiv-negativ este probabil ca miezul celular să prezinte imperfecțiuni geometrice. Dacă interdependența dintre parametrii geometrici nu este respectată, pot apărea abateri de planeitate între două sau mai multe suprafețe de adeziune adiacente. Dacă se înregistrează o abatere de înălțime între cele două brațe ale unei celule unitate, atunci contactul dintre fețele laterale și miezul celular nu este respectat și astfel transferul încărcărilor axiale între componentele ansamblului sandwich este ineficient. Acest lucru, împreună cu o aplicare neuniformă a stratului de adeziv ar putea duce la o rupere prematură a adezivului. Acest lucru a fost înregistrat pentru epruveta 1 a configurației C2X, pentru o deplasare $w_1 = 0,23 \text{ mm}$.

În ceea ce privește rigiditatea specifică la încovoiere, s-a observat o diferență între direcția corespunzătoare axei y , spre deosebire de axa x a grinzii sandwich, pentru configurațiile C1 și C3.

Diferența înregistrată este semnificativ mai mare pentru configurația C1, cu o valoare de 4,68 kNm²/kg pentru cazul C1X, față de 3,47 kNm²/kg pentru cazul C1Y.

Configurația C3Y a înregistrat o scădere de aceeași magnitudine, aproximativ 25% în comparație cu C3X.

Cu toate acestea, un comportament complet diferit a fost prezentat în cazul configurației C2. În ceea ce privește rigiditatea la încovoiere, cele două configurații (C2X și C2Y) înregistrează aceeași valoare de 6,5 kNm²/kg. Acest lucru arată că topologia a celulei unitare, definită de parametrii geometrici, este mai omogenă și prezintă un comportament similar la încovoiere pe ambele direcții de expandare.

În ceea ce privește rigiditatea la forfecare, tendința arată un comportament opus. Configurația C1Y a înregistrat o îmbunătățire de aproximativ 16% în ceea ce privește rigiditatea la forfecare în comparație cu C1X. Acest lucru se datorează faptului că expansiunea pe direcția y are ca rezultat o structură mai compactă, iar poziția spațială a brațelor celulei asigură o mai bună stabilitate la forfecare a structurii. Un efect similar este observat pentru configurația C2X, cu o valoare de 0,287 kN/kg în comparație cu 0,341 kN/kg pentru C2Y.

Cu toate acestea, configurația C3 nu a prezentat același comportament. Rigiditatea la forfecare pentru C3X este redusă cu aproximativ 35 % față de C3Y.

Acest lucru dovedește că, împreună cu scăderea razei de perforare, care influențează lățimea brațelor celulei, capacitățile grinzii de a prelua solicitări la încovoiere este scăzută.

În plus, pentru configurația C3, se înregistrează o diferență semnificativă între valorile experimentale și cele numerice. Acest lucru sugerează că, împreună cu o creștere a razei de perforare ($R=5$ mm), miezul celular este mai predispus la imperfecțiuni geometrice în timpul procesului de expandare mecanică. Proprietățile mecanice ale structurii scad, de asemenea, împreună cu o creștere lungimii celulei unitate.

5.3 Studiu comparativ

Ținând cont de corelația dintre cele două modele dezvoltate, numeric și experimental, s-a realizat un studiu comparativ între performanța structurală a grinzilor sandwich construite cu miezul celular piramidal și alte soluții propuse în literatură de specialitate. Rezultatele comparative, în ceea ce privește rigiditatea la încovoiere și la forfecare, sunt prezentate în Figura 5.5. Configurația C2 este considerată cea mai bună soluție datorită similitudinii rigidității la încovoiere pentru C2X și C2Y. Acest lucru ar putea duce la îmbunătățirea în continuare a proprietăților mecanice. Se ia în considerare, de asemenea, posibilitatea unei reduceri a densității prin înlocuirea materialului de bază din care este obținut miezul celular [74].

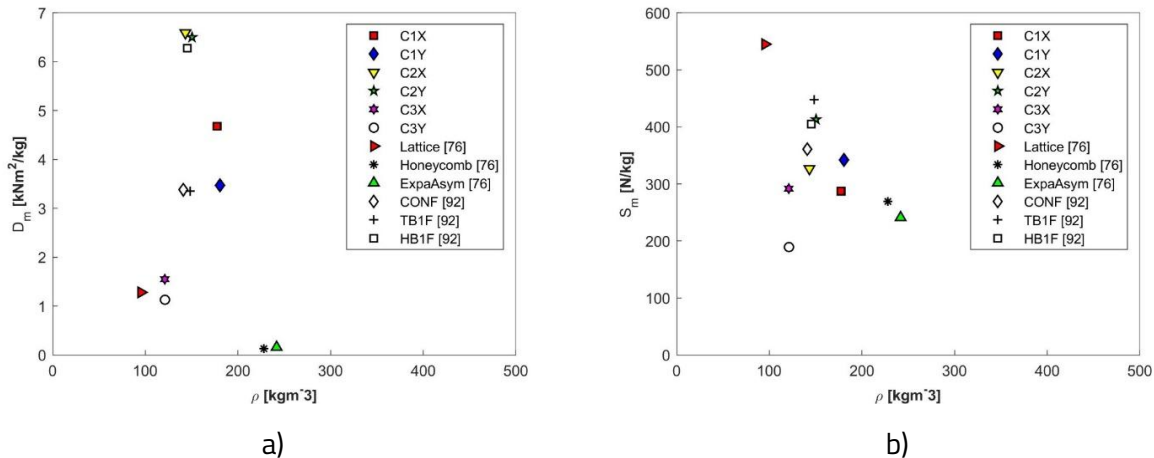


Figura 5.5 Proprietățile la încovoiere ale grinzilor sandwich investigate: a) rigiditate la încovoiere; b) rigiditate la forfecare [74].

Miezul celular piramidal studiat prezintă un potențial ridicat pentru construcția de panouri sandwich cu o îmbunătățire considerabilă a rigidității la încovoiere și o reducere semnificativă a densității în comparație cu miezul de tip figure de albine. Acest lucru a fost observat pentru toate configurațiile luate în considerare pe parcursul studiului comparativ [74].

Configurațiile C2X și C2Y au înregistrat cea mai mare rigiditate la încovoiere, cu o valoare de 6,5 kNm^2/kg .

Cea mai mică performanță la încovoiere, cu o rigiditate efectivă de 1,15 kNm^2/kg , este înregistrată pentru cazul C3Y. Deși se situează deasupra unora dintre configurațiile propuse pentru studiul comparativ, aceasta este totuși depășită de ansamblul pe bază miez celular cu zăbrele cu proprietăți mecanice mai bune și o densitate de 95,3 kg/m^3 . Configurația C3X prezintă o rigiditate la încovoiere mai mare, dar corespunde unei densități specifice crescute.

Unghiul intern al structurii, A , s-a dovedit a avea o influență pozitivă asupra performanțelor mecanice ale structurii piramidale, deoarece miezul piramidal este mai bine clasat decât structura cu zăbrele care are o topologie similară, dar cu un unghi intern egal cu zero ($A = 0^\circ$).

O optimizare ulterioară a miezului piramidal poate duce la reducerea densității specifice, menținând în același timp proprietățile mecanice ale acestuia.

În ceea ce privește rigiditatea la forfecare, cea mai mare valoare a fost înregistrată pentru configurația C2Y, cu o valoare de 341,07 N/kg . Acest lucru clasează miezul celular piramidal deasupra majorității structurilor luate în considerare în cadrul studiului comparativ. Cu toate acestea, performanța sa la forfecare este depășită de structura celulară cu zăbrele [76], cu o valoare de 0,545 kN/kg pentru o densitate de 95,36 kg/m^3 .

În ceea ce privește performanțele la forfecare, configurația C3Y se situează mai jos decât structura ExpaAsym și miezul de tip figure de albine, însă densitatea specifică este redusă semnificativ..

Cercetările ulterioare ar putea consta în îmbunătățirea performanțelor la încovoiere și la forfecare prin înlocuirea materialului de bază din oțel inoxidabil cu un material cu o densitate mai mică (de exemplu, aluminiu, titan etc.) și a fețelor laterale din oțel cu materiale compozite ranforsate cu fibre de carbon. Este de așteptat ca acest lucru să determine o reducere considerabilă a densității, ceea ce reprezintă un subiect de interes pentru investigații viitoare.

5.4 Concluzii

Obiectivul principal al acestui capitol a fost evaluarea performanțelor la încovoiere ale unei grinzi sandwich construite cu miezul celular piramidal, obținut printr-un proces de expandare mecanică. Rigiditatea la încovoiere și la forfecare au fost determinate prin metode numerice și validate experimental

Se pot formula următoarele concluzii în legătură cu configurațiile sandwich propuse:

- Unghiul intern A este o metodă eficientă de creștere a performanței mecanice a structurii piramidale.
- Pentru a atinge un potențial maxim al panoului sandwich, configurația geometrică C2 s-a dovedit a fi cel mai bun candidat pentru investigații și optimizări ulterioare, datorită valorilor ridicate înregistrate pentru rigiditatea și rezistența la încovoiere și a similitudinii acestora.
- Miezul celular piramidal investigat prezintă un potențial ridicat în comparație cu alte concepte bazate pe diferite topologii celulare.
- Performanțele la încovoiere pot fi îmbunătățite prin înlocuirea materialului din care sunt confecționate fețele laterale cu un material cu densitate redusă (de exemplu, aluminiu, materiale compozite ranforsate cu fibre de carbon etc.).

6. Concluzii generale și contribuții originale

Această teză de doctorat abordează una dintre principalele probleme de cercetare legate de proiectarea miezurilor celulare ușoare și de construcția panourilor sandwich, cu scopul de a dezvolta noi soluții pentru reducerea pierderilor de material și a costurilor de producție.

În acest sens, a fost propus spre investigare un nou miez celular piramidal. Obținut printr-un proces de fabricație simplu, și anume prin expandare mecanică, aceasta oferă avantajele reducerii pierderilor de material și oferă o suprafață de adeziune corespunzătoare pentru un contact mai bun între miez și fețele laterale.

Studiul proprietăților mecanice a urmărit să contribuie la o mai bună înțelegere a comportării mecanice a miezului celular periodic, identificând în același timp noi posibilități de optimizare și de creștere a performanțelor.

Obiectivele științifice formulate inițial au fost atinse cu succes prin respectarea etapelor de cercetare propuse.

Analiza critică a stadiului actual de dezvoltare în domeniul structurilor ușoare utilizate în construcția panourilor sandwich a demonstrat că cererea de structuri performante reprezintă un subiect de actualitate. Creșterea gradului de conștientizare a efectelor evoluției tehnologice asupra mediului înconjurător conduce la necesitatea implementării structurilor ușoare în toate domeniile industriale - construcții aerospațiale, navale, auto, civile și industrial.

Cercetările efectuate până în prezent în acest domeniu au evidențiat următoarele aspecte:

- Structurile celulare periodice pot fi realizate dintr-o multitudine de material disponibile (metalice sau nemetalice).
- Miezurile celulare nou dezvoltate trebuie să prezinte topologii performante și să ofere un număr semnificativ de avantaje: densitate redusă, rezistență și rigiditate ridicate atât pentru încărcări în plan, cât și în direcție perpendiculară pe plan, absorbție ridicată a energiei de impact, izolare termică și acustică.

Studiul parametric efectuat asupra miezului celular piramidal a arătat că procesul de fabricație propus oferă o structură complexă, dar versatilă, cu potențial multifuncțional.

Caracteristica de noutate a acestui miez celular, unghiul intern A , este eficientă în proiectarea unei structuri cu o densitate relativă scăzută.

Proprietățile mecanice ale noului miez celular piramidal au fost evaluate atât prin abordare analitică, cât și experimentală, pentru a evalua potențialul său de utilizare în construcția de panouri sandwich. În acest sens, proprietățile de compresiune în afara planului au fost definite prin metode analitice și validate prin încercări experimentale. Astfel, modelul analitic poate fi utilizat în continuare în desfășurarea proceselor de optimizare pentru a exploata la maxim performanțele structurii propuse.

Se pot trage următoarele concluzii cu privire la performanța la compresiune în afara planului a structurii celulare piramidale studiate:

- Modulul de elasticitate în afara planului, E_z , scade odată cu creșterea unghiului intern A . Rigiditatea la compresiune crește odată cu creșterea unghiului de înclinare a brațului celulei, B .
- O creștere a unghiului intern și a unghiului de înclinare a brațului celulei conduce la o scădere a rezistenței la compresiune.

Performanța la încovoiere a grinzii sandwich construită pe baza miezului celular piramidal a fost investigată prin metode numerice și experimentale. Modelul cu elemente finite dezvoltat a fost validat prin încercări experimentale.

Se pot formula următoarele concluzii referitoare la configurațiile sandwich propuse:

- Unghiul intern, A , este o metodă eficientă de creștere a performanței mecanice a structurii piramidale.
- Dintre configurațiile studiate, C2 s-a dovedit a oferi cele mai bune proprietăți mecanice și reprezintă cel mai bun candidat pentru investigații și optimizări viitoare.
- Structura celulară piramidală studiată prezintă un potențial ridicat comparativ cu alte soluții bazate pe diferite topologii celulare.

După finalizarea studiului parametric și evaluarea performanțelor mecanice ale celulei unitate a miezului celular și ale panoului sandwich asociat, pot fi formulate următoarele direcții de cercetare viitoare:

- Optimizarea structurală, în vederea îmbunătățirii proprietăților mecanice ale miezului celular; studiul inițial ar putea lua în considerare unghiul intern al structurii, independent de raza perforației.
- Perfecționarea modelului cu elemente finite dezvoltat, pentru a evalua și calcula proprietățile de compresiune în direcția perpendiculară pe planul median.
- Performanțele generale la încovoiere pot fi îmbunătățite prin înlocuirea materialului din care sunt confecționate fețele laterale cu un material cu densitate redusă (de exemplu, aluminiu, materiale compozite ranforsate cu fibre de carbon etc.). Acest lucru va conduce la reducerea semnificativă a densității ansamblului sandwich asociat.

Contribuții originale

Investigarea topologiei miezului celular piramidal propus spre studiu s-a realizat printr-un studiu parametric. A fost definită și discutată interdependența dintre parametrii celulei unitate și au fost prezentate formulările pentru calculul dimensiunilor de gabarit ale acesteia.

Proprietățile de compresiune în direcția perpendiculară pe planul mediu au fost determinate cu ajutorul modelului analitic dezvoltat. Formularea pentru determinarea rigidității, E_z , și a rezistenței, σ_z au fost definite și validate prin proceduri experimentale.

Proprietățile de încovoiere și forfecare ale grinzii sandwich construite cu noul miez celular piramidal au fost evaluate prin utilizarea de metode numerice și experimentale. A fost elaborat un set de experimente virtuale și fizice, iar corelația dintre cele două a fost evaluată și discutată.

Probele pentru încercările experimentale au fost realizate și testate în conformitate cu condițiile definite de formulările teoretice.

Au fost efectuate două studii comparative pentru a evalua potențialul miezului celular piramidal în comparație cu alte soluții existente în literatura de specialitate. Structura obținută printr-un proces de expandare mecanică s-a dovedit a fi o alternativă promițătoare pentru a fi utilizată ca miez în construcția panourilor sandwich.

Rezultatele cercetărilor efectuate au fost diseminate în cinci lucrări și articole științifice: două articole publicate în reviste BDI (dintre care unul în jurnal Clarivate web of science – FI 3,623), și trei lucrări științifice prezentate la conferințe internaționale relevante pentru domeniul de cercetare abordat (dintre care două sunt indexate Clarivate web of science și Scopus). În plus, un ultim articol științific a fost trimis pentru publicare la o revistă recunoscută internațional (Materials&Design – Elsevier) și se află în proces de recenzie.

Lista publicațiilor

1. **Ciolan (Iftimiciuc), M.A.**, Lache, S., Velea, M.N., *Cellular cores with negative Poisson's ratio for sandwich panels*, Bulletin of the Transilvania University of Brașov, Series I: Engineering Sciences, Vol. 10 (59) No. 2 – 2017. ISSN, Paper presented at the "3rd International Conference for Doctoral Students - IPC 2017", 22-23 June, Brașov, Romania.
2. **Iftimiciuc, M.A.**, Lache, S., Velea, M.N., *The auxetic behavior of an expanded periodic cellular structure*, AIP conference proceedings, vol. 1932, 030021 (2018), DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5024171>, Online ISBN: 978-0-7354-1624-6 (indexed Web of Science). Paper presented at "The 7th International Conference on Structural Analysis of Advanced Materials", 19-22 September, Bucharest, Romania.
3. **Iftimiciuc, M.A.**, Lache, S., Velea, M.N., *Topologic Study of a Novel Periodic Cellular Core for Sandwich Panels*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 416, 7th International Conference on Advanced Materials and Structures - AMS 2018, DOI: [doi:10.1088/1757-899X/416/1/012087](https://doi.org/10.1088/1757-899X/416/1/012087), (indexed Web of Science). Paper presented at "7th International Conference on Advanced Materials and Structures - AMS 2018", 28-31 March, Timisoara, Romania.

4. **Iftimiciuc, M.A.**, Velea, M.N., Lache, S., *In-plane transversal stiffness of expanded trapezoidal cellular structure*, The 8th International Conference on COMPUTATIONAL MECHANICS AND VIRTUAL ENGINEERING, 21-22 November, Brasov, Romania.
5. **Iftimiciuc, M.A.**, Lache, S., Wennhage, P., Velea, M.N., *Structural Performance Analysis of a Novel Pyramidal Cellular Core Obtained through a Mechanical Expansion Process*, *Materials* 2020, 13(19), 4264; <https://doi.org/10.3390/ma13194264>.
6. **Iftimiciuc, M.A.**, Lache, S., Vandepitte, D., Velea, M.N., *Bending performance of a sandwich beam with sheet metal pyramidal core* (under review).

Bibliografie

1. Zenkert, D., *The handbook of sandwich construction*, Worcestershire: EMAS; 1997.
2. Velea, M.N., *Lightweight cellular Structures – Design, Modelling and Analysis*, Brasov: Editura Universitatii Transilvania din Brasov; 2011.
3. Clough, E.C., Ensberg, J., Eckel, Z.C., Ro, C.J., Schaedler, T.A., *Mechanical performance of hollow tetrahedral truss cores*, International Journal of Solids and Structures, 2016. 91: p. 115–126.
4. Vinson, J.R., Sandwich Structures: Past, Present, and Future. In: Thomsen O., Bozhevolnaya E., Lyckegaard A. (eds) *Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials*, 2005. Springer, Dordrecht: p. 3-12.
5. Besse, C.C. and Mohr D., *Plasticity of formable all-metal sandwich sheets: Virtual experiments and constitutive modelling*, International Journal of Solids and Structures, 2012. 49: p. 2863-2880.
6. Garrido, M. and Correia, J.R., *Elastic and viscoelastic behaviour of sandwich panels with glass-fibre reinforced polymer faces and polyethylene terephthalate foam core*, Journal of Sandwich Structures and Materials, 2018. 20(4): p. 399–424.
7. Li, F.H., Han, B., Zhang, Q.C., Jin, F., Lu, T.J., *Buckling of a standing corrugated sandwich plate subjected to body force and terminal load*, Thin-Walled Structures, 2018. 127: p. 688–699.
8. Beharic, A., Rodriguez Egui, R., Yang, L., *Drop-weight impact characteristics of additively manufactured sandwich structures with different cellular designs*, Materials and Design, 2018. 145: p. 122-134.
9. Liu, T., Deng, Z.C., Lu, T.J., *Structural modelling of sandwich structures with lightweight cellular cores*, Acta Mechanica Sinica, 2007. 23: p. 545–559.
10. Bai, X., Zheng, Z., Nakayama, A., *Heat transfer performance analysis on lattice core sandwich panel structures*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019. 143: p. 118525.
11. Regulation (EU) 2019/631 of the European Parliament and of the Council of 17th of April 2019 setting CO2 emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles and repealing Regulations (EC) No 443/2009 and (EU) No 510/2011.
12. Walsh, M. P., *Mobile Source Mitigation Opportunities. Chapter 6, Global Climate Change - The Technology Challenge*, New York, Springer, 2011.

13. Hou, S., Shu, C., Zhao, S., Liu, T., Xu Han, X., Li, Q., *Experimental and numerical studies on multi-layered corrugated sandwich panels under crushing loading*, Composite Structures, 2015. 126: p. 371–385.
14. Rejab, M.R.M., Ushijima, K., and Cantwell, W.J., *The shear response of lightweight corrugated core structures*, Journal of Composite Materials, 2014. 48(30): p. 3785–3798.
15. Ghabezi, P., *Rectangular and Triangular Corrugated Composite Skins*, Fibers and Polymers, 2018. 19(2): p. 435-445.
16. Keshavanarayana, S.R., Shahverdi, H., Kothare, A., Yang, C., Bingenheimer, J., *The effect of node bond adhesive fillet on uniaxial in-plane responses of hexagonal honeycomb core*, Composite Structures, 2017. 175: p. 111-122.
17. Ahmad, S., Zhang, J., Feng, P., Yu, D., Wu, Z., Ke, M., *Processing technologies for Nomex honeycomb composites (NHCs): A critical review*, Composite Structures, 2020. 250: p. 112545.
18. Wadley, H.N.G., Fleck, N.A, Evans, A.G., *Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures*, Composites Science and Technology, 2003. 63: p. 2331–2343.
19. Lia, D., Ma, J., Dong, L., Lakes, R.S., *Stiff square structure with a negative Poisson's ratio*, Materials Letters, 2017. 188: p. 149–151.
20. Huang, J., Zhang, Q., Scarpa, F., Liu, Y., Leng, J., *Bending and benchmark of zero Poisson's ratio cellular structures*, Composite Structures, 2016. 152: p. 729–736.
21. Lu, Z.X., Li, X., Yang, Z.Y., Xie, F., *Novel structure with negative Poisson's ratio and enhanced Young's modulus*, Composite Structures, 2016. 138: p. 243–252.
22. Xiong, J., Gu, D., Chen, H., Dai, D., Shi, Q., *Structural optimization of re-entrant negative Poisson's ratio structure, fabricated by selective laser melting*, Materials and Design, 2017. 120: p. 307–316.
23. Wang, Z.P., Poh, L.H., Zhu, Y., Dirrenberger, J., Forest, S., *Systematic design of tetra-petals auxetic structures with stiffness constraint*, Materials & Design, 2019. 170: p. 107669.
24. Wang H., Lu Z., Yang Z., Li X., *In-plane dynamic crushing behaviors of a novel auxetic honeycomb with two plateau stress*, International Journal of Mechanical Sciences, 2019. 151: p. 746-759.
25. Zhang, J., Lu, G., Ruan, D., Wang, Z., *Tensile behavior of an auxetic structure: Analytical modeling and finite element analysis*, International Journal of Mechanical Sciences, 2018. 136: p. 143-154.

26. Liu, C., Zhang, Y.X., and Heslehurst, R., *Impact resistance and bonding capability of sandwich panels with fibre–metal laminate skins and aluminium foam core*, Journal of Adhesion Science and Technology, 2014. 28:24: p. 2378-2392.
27. Hangai, Y., Kamada, H., Utsunomiya, T., Kitara, S., Kuwazuru, O., Yoshikawa, N., *Aluminum alloy foam core sandwich panels fabricated from die casting aluminum alloy by friction stir welding route*, Journal of Materials Processing Technology, 2014. 214: p.1928-1934.
28. Gonzalez Nava, M., Cruz-Ramírez, A., Suarez Rosales, M.A., Gutierrez-Perez, V.H., Sanchez-Martínez, A., *Fabrication of aluminum alloy foams by using alternative thickening agents via melt route*, Journal of Alloys and Compounds, 2017. 698: p. 1009-1017.
29. Wu, Q., Gao, Y., Wei, X., Mousanezha, D., Ma, L., Vaziri, A., Xiong, J., *Mechanical properties and failure mechanisms of sandwich panels with ultra-lightweight three-dimensional hierarchical lattice cores*, International Journal of Solids and Structures, 2018. 132–133: p. 171–187.
30. Sun, F., Lai, C., Fan, H., Fang, D., *Crushing mechanism of hierarchical lattice structure*, Mechanics of Materials, 2016. 97: p. 164–183.
31. Yin, S., Wu, L., Nutt, S., *Stretch–bend–hybrid hierarchical composite pyramidal lattice cores*, Composite Structures, 2013. 98: p. 153–159.
32. Wu Q., Vaziri, A., Eydani Asl, M., Ghosh, R., Ying, G., Wei X., Ma L., Jian, X., Wu L., *Lattice materials with pyramidal hierarchy: Systematic analysis and three dimensional failure mechanism maps*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2019. 125: p. 112-144.
33. Sorohan, S., Constantinescu, D.M., Sandu, M., Sandu, A.G., *In-plane homogenization of commercial hexagonal honeycombs considering the cell wall curvature and adhesive layer influence*, International Journal of Solids and Structures, 2019. 156–157: p. 87-106.
34. Nhi H.V., Thong M. P., Bi, K., Chen, W., Hao, H., *Stress Wave Mitigation Properties of Dual-meta Panels against Blast Loads*, International Journal of Impact Engineering, 2021. 154: p. 103877.
35. Wadley, H.N.G., *Multifunctional Periodic Cellular Metals*, Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Engineered Foams and Porous Materials, 2006. 364(1838): p. 31-68.
36. Liu, Z., Lu, J., Zhu, P., *Lightweight design of automotive composite bumper system using modified particle swarm optimizer*, Composite Structures, 2016. 140: p. 630–643.

37. Eckstein, E., Pirrera, A., Weaver, P.M., *Multi-mode morphing using initially curved composite plates*, Composite Structures, 2014. 109: p. 240–245.
38. <http://www.nuplex.com/composites/processes/hand-lay-up>, 20.07.2017, 1.55 PM.
39. Ashori, A., *Wood-plastic composites as promising green composites for automotive industries*, Bioresource Technology, 2008. 99: p. 4664-4667.
40. Partanaen, A., Carus, M., *Wood and natural fiber composites current trend in consumer goods and automotive parts*, Reinforced plastics, 2016. 60(3).
41. Liu, Z., Lu, J., Zhu, P., *Lightweight design of automotive composite bumper system using modified particle swarm optimizer*, Composite Structures, 2016. 140: p. 630-643.
42. Li, H., Dai, F., Du, S., *Numerical and experimental study on morphing bi-stable composite laminates actuated by a heating method*, Composite science and technology, 2012. 72: p. 1767-1773.
43. Gibson, R.F., *A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures*, Composite Structures, 2010. 92: p. 2793-2810.
44. Snudden, J.P., Ward, C., Potter, K., *Reusing automotive composites production waste*, Reinforced Plastics, 2014. November/December: p. 20-27.
45. Sayahlatifi, S., Rahimi, G. and Bokaei, A., *Experimental and numerical investigation of sandwich structures with balsa core and hybrid corrugated composite/balsa core under three-point bending using digital image correlation*, Journal of Sandwich Structures & Materials, 2021. 23(1): p. 94-131.
46. Faris M.A., Sapuan, S.M., *Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry*, Journal of Cleaner Production, 2014. 66: p.347-354.
47. Sobczak, L., Lang, R.W., Haider, A., *Polypropylene composites with natural fibers and wood – General mechanical property profiles*, Composites Science and Technology, 2012. 72(5):p. 550-557.
48. Sailesh, A., Arunkumar, R., Saravanan, S., *Mechanical Properties and Wear Properties of Kenaf – Aloe Vera – Jute Fiber Reinforced Natural Fiber Composites*, Materials Today: Proceedings, 2018. 5(2): p. 7184-7190.

49. Monteiro, S.N., Calado, V., Rodriguez, R.J.S., Margem, F.M., *Thermogravimetric behavior of natural fibers reinforced polymer composites - An overview*, Materials Science and Engineering: A, 2012. 557: p. 17-28.
50. Alves, C., Ferraõ, P.M.C., A.J., Silva, A.J., L.G. Reis, L.G., Freitas, M., Rodrigues, L.B., Alves, D.E., *Ecodesign of automotive components making use of natural jute fiber composites*, Journal of Cleaner Production, 2010. 18: p. 313-327.
51. Velea, M.N., Lache, S., *In-plane effective elastic properties of a novel cellular core for sandwich structures*, Mechanics of Materials, 2011. 43(7): p.377-388.
52. Czarnecki, T., Sewell, J., Pflug, J., *EconCore developing high performance thermoplastic honeycomb core materials*, Reinforced Plastics, 2019. 63(3).
53. Li, T., Wang, L., *Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials*, Composite Structures, 2017. 175: p. 46-57.
54. Tubío, C.R., Guitián, F., Alvaro G., *Fabrication of ZnO periodic structures by 3D printing*, Journal of the European Ceramic Society, 2016. 36: p. 3409-3415.
55. Vogiatzis, P., Chen, S., Wang, S., Li, T., Wang, L., *Topology optimization of multi-material negative Poisson's ratio metamaterials using a reconciled level set method*, Computer-Aided Design, 2017. 83: p. 15-32.
56. Kang, K.J., *Wire-woven cellular metals: The present and future*, Progress in Materials Science, 2015. 69: p. 213-307.
57. Lee, M.G., Yoon, J.W., Han, S.M., Suh, Y.S., Kang, K.J., *Bending response of sandwich panels with discontinuous wire-woven metal cores*, Materials and Design, 2014. 55: p. 707-717.
58. Zhou, X., Wang, H., You, Z., *Mechanical properties of Miura-based folded cores under quasi-static loads*, Thin-Walled Structures, 2014. 82: p. 296-310.
59. Pydah, A., Batra, R.C., *Crush dynamics and transient deformations of elastic-plastic Miura-ori core sandwich plates*, Thin-Walled Structures, 2017. 115: p. 311-322.
60. Velea, M.N., Schneider, C., Lache, S., *Second order hierarchical sandwich structure made of self-reinforced polymers by means of a continuous folding process*, Materials and Design, 2016. 102: p. 313-320.

61. Khan, M.S., S.S.R., and Tamin, M.N., *Effects of cell aspect ratio and relative density on deformation response and failure of honeycomb core structure*, Materials Research Express, 220. 7: p. 015332
62. Crupi, V., Epasto, G., Guglielmino, E., *Comparison of aluminium sandwiches for lightweight ship structures: Honeycomb vs. foam*, Marine Structures, 2013. 30: p. 74-96.
63. Tao, Y., Chen, M., Chen, H., Pei, Y., Fang, D., *Strain rate effect on the out-of-plane dynamic compressive behavior of metallic honeycombs: Experiment and theory*, Composite Structures, 2015. 132: p. 644–651.
64. Wu, Y., Liu, Q., Fu, J., Li, Q., Hui, D., *Dynamic crash responses of bio-inspired aluminum honeycomb sandwich structures with CFRP panels*, Composites Part B, 2017. 121: p. 122-133.
65. Thomas, T. and Tiwari, G., *Crushing behavior of honeycomb structure: a review*, International Journal of Crashworthiness, 2019 (24): p. 555-579.
66. Bitzer, T.N., *Honeycomb Technology*, Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing. 1997: Springer Science + Business Media, B.V.
67. Wadley, H.N.G., Fleck, N.A. and Evans, A.G., *Fabrication and Structural Performance of Periodic Cellular Metal Sandwich Structure*. Composites Science and Technology, 2003. 63: p. 2331-2343.
68. Shafizadeh, J.E., *Evaluation of the in-service performance behavior of honeycomb composite sandwich structures*. Journal of Materials Engineering and Performance, 1999. 8(6): p. 661-668.
69. Wang, Y.J., Zhang, Z.J., Xue, X.M., Zhang, L., *Free vibration analysis of composite sandwich panels with hierarchical honeycomb sandwich core*, Thin-Walled Structures, 2019. 145: p. 106425.
70. Hou, X., Deng, Z., Zhang, K., *Dynamic Crushing Strength Analysis of Auxetic Honeycombs*, Acta Mechanica Solida Sinica, 2016. 29(5).
71. Queheillalt, D.T., Wadley, H.N.G., *Titanium alloy lattice truss structures*, Materials and Design, 2009. 30: p. 1966-1975.
72. Sypek, D.J., *Cellular Truss Core Sandwich Structures*, Applied Composite Materials, 2005. 12: p. 229-246.
73. **Iftimiciuc, M.A.**, Lache, S., Wenhage, P., Velea, M.N., *Structural Performance Analysis of a Novel Pyramidal Cellular Core Obtained through a Mechanical Expansion Process*, Materials, 2020. 13 (19): p. 42-64.

74. **Iftimiciuc, M.A.**, Lache, S., Vandepitte, D., Velea, M.N., *Bending performance of a sandwich beam with sheet metal pyramidal core*, (under review).
75. Biagi, R., Bart-Smith, H., *In-plane column response of metallic corrugated core sandwich panels*, International Journal of Solids and Structures, 2012. 49(26): p. 3901–3914.
76. Velea, M.N., Lache, S., *Numerical simulations of the mechanical behavior of various periodic cellular cores for sandwich panels*, Procedia Engineering, 2011. 10: p. 287–292.
77. He, W., Liu, J., Tao, B., Xie, D., Liu, J., Zhang, M., *Experimental and numerical research on the low velocity impact behavior of hybrid corrugated core sandwich structures*, Composite Structures, 2016. 158(15): p. 30–43.
78. Velea, M.N., Wennhage, P., Lache, S., *Out-of-plane effective shear elastic properties of a novel cellular core for sandwich structures*, Materials & Design, 2012. 36(1980–2015): p. 679–686.
79. **Iftimiciuc, M.A.**, Lache, S., Velea, M.N., *Topologic Study of a Novel Periodic Cellular Core for Sandwich Panels*, IOP conference series. Materials Science and Engineering, 2018. 416(1): p. 12087.
80. Castigliano, C.A., *Intorno ai sistemi elastici*. 1873, Politecnico di Torino: Torino.
81. Bartolozzi, G., Pierini, M., Ulf, O., Baldanzini, N., *An equivalent material formulation for sinusoidal corrugated cores of structural sandwich panels*. Composite Structures, 2013. 100(0): p. 173–185.
82. Bartolozzi, G., Baldanzini, N. and Pierini, M., *Equivalent properties for corrugated cores of sandwich structures: A general analytical method*. Composite Structures, 2014. 108: p. 736–746.
83. Shaban, M., Alibeigloo, A., *Three-dimensional elasticity solution for sandwich panels with corrugated cores by using energy method*, Thin-Walled Structures, 2017. 119: p. 404–411.
84. Shu, C., Hou, S., *Theoretical prediction on corrugated sandwich panels under bending loads*, Acta Mechanica Sinica, 2018. 34(5): p. 925–935.
85. Qiao, P., Davalos, J.F., *Developments in Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Civil Engineering*, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, 2013. *Chapter 17 - Design of all composite structures using fiber-reinforced polymer (FRP) composites*, p. 469–508.
86. Ju C., Young, B., *Stress–strain curves for stainless steel at elevated temperatures*, Engineering Structures, 2006. 28: p. 229–239.

87. Xiong, J., Ma, L., Vaziri, A., Yang, J., Wu, L., *Mechanical behavior of carbon fiber composite lattice core sandwich panels fabricated by laser cutting*. Acta Materialia, 2012. **60**(13–14): p. 5322-5334.
88. Queheillalt, D.T. and Wadley, H.N.G., *Cellular metal lattices with hollow trusses*, Acta Materialia, 2005. 53(2): p. 303-313.
89. Li, M., Wu, L., Ma, L., Wang, B., Guan, Z., *Mechanical Response of All-composite Pyramidal Lattice Truss Core Sandwich Structures*, Journal of Materials Science & Technology, 2011. 27(6): p. 570-576.
90. Xiong, J., Ma, L., Wu, L., Wang, B., Vaziri, A., *Fabrication and crushing behavior of low density carbon fiber composite pyramidal truss structures*. Composite Structures, 2010. 92(11): p. 2695-2702.
91. ABAQUS, 2017. *Geometric imperfections, Abaqus analysis user's manual*. Dassault Systèmes.
92. Zhang, F., Liu, W., Fang, H., Jia, Z., *Flexural behavior of composite sandwich beams with different kinds of GFRP ribs in flatwise and edgewise positions*, Composites Part B 2019. 156: p. 229–239.