



Fondul Social European
Investeste in oameni!
Programul Operational Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013
Proiect POSDRU –*Doctoranzi în sprijinul inovării și competitivității*

UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI

Școala doctorală de Inginerie Mecanică și Industrială



TEZA DE DOCTORAT

- REZUMAT -

FENOMENE DE DEGRADARE LA IMPACTUL MECANIC AL STRUCTURILOR COMPOZITE DE TIP SANDWICH

**Doctorand:
Florentina ROTARU (PARASCHIV)**

**Conducător științific,
Prof. univ.dr.ing. Ionel CHIRICĂ**

**Seria I6: Inginerie mecanică Nr. 42
Galati 2018**



MINISTERUL
EDUCAȚIEI ȘI
CERCETĂRII
ȘTIINȚIFICE

OPOSDRU



Universitatea POLITEHNICA
din Bucuresti

Fondul Social European
Investeste in oameni!
Programul Operational Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013
Proiect POSDRU –*Doctoranzi în sprijinul inovării și competitivității*

UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI

Școala doctorală de Inginerie Mecanică și Industrială



TEZA DE DOCTORAT

- REZUMAT -

FENOMENE DE DEGRADARE LA IMPACTUL MECANIC AL STRUCTURILOR COMPOZITE DE TIP SANDWICH

Doctorand:

Florentina ROTARU (PARASCHIV)

Conducător științific,

Prof.univ.dr.ing. Ionel CHIRICĂ

Referenți științifici:

Prof.univ.dr.ing. Anton HADĂR

Prof.univ.dr.ing. Dan-Mihai CONSTANTINESCU

Prof.univ.dr.ing. Leonard DOMNIȘORU

Seria I6: Inginerie mecanică Nr.42

GALAȚI 2018

Seriile tezelor de doctorat sustinute public în UDJG începând cu 1 octombrie 2013 sunt:

Domeniul ȘTIINȚE INGINEREȘTI

Seria I 1: **Biotehnologii**

Seria I 2: **Calculatoare și tehnologia informației**

Seria I 3: **Inginerie electrică**

Seria I 4: **Inginerie industrială**

Seria I 5: **Ingineria materialelor**

Seria I 6: **Inginerie mecanică**

Seria I 7: **Ingineria produselor alimentare**

Seria I 8: **Ingineria sistemelor**

Domeniul ȘTIINȚE ECONOMICE

Seria E 1: **Economie**

Seria E 2: **Management**

Domeniul ȘTIINȚE UMANISTE

Seria U 1: **Filologie- Engleză**

Seria U 2: **Filologie- Română**

Seria U 3: **Istorie**

Cuvinte Cheie:

Plăci sandwich compozit;

Celule tip fagure din poliester: circulare, hexagonale, pătrate;

Analiza statică;

Analiză dinamică;

Impact.

Cuprins

Cuvinte Cheie:.....	I
Introducere.....	V
CAPITOLUL 1 INTRODUCERE ÎN TEORIA IMPACTULUI STRUCTURILOR MECANICE ..	1
1.1 Teoria elementară a impactului	1
1.1.1 Impactul privit ca un fenomen mecanic de ciocnire.....	1
1.1.2 Impactul dinamic a două corpuri.....	2
1.1.3 Impactul privit ca problemă de contact al corpurilor elastice	4
1.2 Teoria impactului prin cădere liberă (drop shock theory)	4
1.3 Teste de impact.....	5
1.4 Mecanism de testare a impactului cu gaz comprimat	5
1.5 Mecanism de încercare la impact de tip Charpy.....	5
CAPITOLUL 2 STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR ÎN DOMENIUL PRODUCERII ȘI UTILIZĂRII MATERIALELOR COMPOZITE DE TIP SANDWICH.....	6
2.1 Aplicațiile compozitelor și ale sandwichurilor compozite.....	6
2.2 Materiale compozite	7
2.3 Structuri sandwich.....	7
CAPITOLUL 3 SIMULĂRI NUMERICE PRIVIND IMPACTUL STRUCTURILOR MECANICE	8
3.1 Prezentare generală	8
3.2 Modelare numerică pentru structuri celulare de tip sandwich.....	8
3.3 Determinarea formei optime a celulei dintr-un fagure	8
3.4. Proprietățile materialelor folosite pentru diferite tipuri de celule	9
3.5 Analiza statică a elementelor de bază ale fagurelui.....	10
3.6. Rezultate și concluzii pentru modelele celulelor cu elemente de tip SOLID186	10
3.7 Rezolvarea problemei de contact	11
3.8 Calculul analitic pentru structuri celulare de tip "sandwich"	13
3.9 Modelarea cu Elemente Finite a solicitării plăcilor confecționate din materiale compozite de tip sandwich	14
3.9.1 Placă de tip sandwich cu celule circulare	14
3.9.2 Placă sandwich cu celule hexagonale.....	15
3.9.3 Placă sandwich cu celule pătrate.....	16
3.9.4 Placă sandwich cu celule pătrate nestructurate.....	16
3.10 Calculul la impact pentru plăci de tip sandwich cu diferite miezuri.....	17
3.10.1 Prezentarea cazurilor analizate	17
3.10.2. Modelarea celor 4 cazuri analizate cu FEM în Ansys.....	18
3.11 Plăci de tip sandwich cu miez din spume (Foam).....	21
3.12 Concluzii	23

CAPITOLUL 4	ANALIZA STATICĂ ȘI DINAMICĂ A PLĂCILOR SANDWICH	25
4.1	Introducere	25
4.1.1	Calculul static. Modelarea cu elemente de tip Solid.....	25
4.1.2	Calculul static. Modelarea Mixtă Shell-Solid-Shell.....	26
4.2	Materialele și proprietățile geometrice ale structurilor de tip sandwich (fagure și spume)....	27
4.3.	Verificarea proprietăților de material pe baza calculului de rigiditate al plăcii.....	28
4.4	Modelarea la impact a plăcilor sandwich.....	31
4.5	Rezultatele modelării la impact pentru cele 10 plăci sandwich analizate	32
4.6	Concluzii.....	35
4.7	Calculul la impact al plăcii SP10/0,2x5.....	36
4.7.1	Rezultatele obținute	37
CAPITOLUL 5	SIMULĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND IMPACTUL	40
5.1.	Generalități	40
5.2	Caracteristicile încercărilor dinamice	40
5.3	Determinarea caracteristicilor mecanice ale polistirenelui extrudat	42
5.4	Determinarea caracteristicilor mecanice ale compozitului polimeric confectionat din fibră de sticlă și matrice epoxidică	43
5.5	Procesul de fabricație a structurilor de tip sandwich compozit testate	44
5.5.1	Fabricarea invelisurilor	45
5.5.2	Fabricarea miezurilor	46
5.5.3	Tipodimensiuni ale plăcilor compozite tip sandwich.....	48
5.5.4	Concluzii.....	49
5.6	Condiții de funcționare a standurilor experimentale	49
5.7	Simulări experimentale privind solicitarea statică	49
5.7.1	Procedura experimentală de lucru	50
5.8	Rezultatele și concluziile testelor statice	51
5.9	Teste experimentale de impact.....	51
5.9.1	Teste experimentale de impact gravitațional cu cădere liberă	52
5.9.2	Determinarea energiei absorbite de placă în momentul impactului	55
5.9.3	Procedura de măsurare a deplasărilor impactorului.....	56
5.9.4	Rezultate și concluzii.....	56
5.9.5	Observații și Concluzii	58
5.9.6	Rezultatele variațiilor deplasărilor pentru standul gravitațional cu cădere liberă	59
5.9.7	Concluzii.....	60
5.10	Teste de impact efectuate cu ajutorul sistemului pneumatic de încercări dinamice.....	60
5.10.1	Modelarea experimentală dinamică a comportării plăcilor compozite de tip sandwich ...	60
5.10.2	Teste de impact	63

5.10.3 Rezultatele testelor cu impactorul pneumatic	65
5.10.4 Concluzii	65
CAPITOLUL 6 ANALIZA COMPARATIVĂ A REZULTATELOR	66
6.1 Analiza comparativă a calculelor statice	66
6.2 Analiza comparativă a calculelor la impact dinamic.....	67
CAPITOLUL 7 CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI PERSPECTIVE .	70
7.1. Concluzii generale	70
7.2. Contribuții originale	71
7.3. Propuneri pentru studii viitoare	74
Bibliografie selectivă	75

Introducere

Din dorința de a realiza lucruri durabile, de-a lungul timpului oamenii au încercat să utilizeze la început lemnul, apoi fierul și treptat să le înlocuiască cu alte materiale care să satisfacă pe deplin necesitățile dar și să rezolve anumite inconveniente apărute din cauza utilizării fierului sau a lemnului.

În industria navală, de-a lungul timpului, cele mai utilizate materiale au fost și încă mai sunt oțelul și lemnul. Aceste două materiale, din care este realizată o navă au ajuns să fie cunoscute în detaliu: atât din punct de vedere al avantajelor cât și al dezavantajelor. În ultimul timp, ca urmare a studiilor întreprinse, a apărut o nouă propunere: aceea de a înlocui aceste materiale cu un nou tip de material, care are caracteristici apropiate, dar ale cărui proprietăți să poată fi modelate conform cerințelor: materialul compozit. Mai departe, a fost introdus un alt material cu adevărat revoluționar și de actualitate: materialul compozit de tip sandwich. Aceste structuri încă se mai studiază, încă se mai fac cercetări pentru a se găsi cea mai bună soluție posibilă de înlocuire a materialelor clasice, lucru care nu e deloc ușor având în vedere calitatea deosebită a acestora care totuși nu este de ignorat. Oțelul în industria navală are tradiție, este cunoscut în detaliu, tehnologia de lucru cu acesta este perfecționată, se cunosc standardele după care se aleg tipurile de oțel etc. Prin alegerea materialelor compozite stratificate sau compozite de tip sandwich se schimbă aproape toată concepția, începând de la tehnologia de fabricație mergând până la alegerea tipului de compozit și putem vorbi chiar despre o personalizare a rezultatului finit. Trecerea de la producția individuală la cea de serie mare este o mare provocare în viitor. Pentru utilizarea materialelor compozite din fibre și plastic în producția de masă pentru industria navală este încă nevoie de evoluții ulterioare în procesele de fabricație, de simulare pe baza metodelor de calcul cât și a proceselor de reparație și reciclare.

Plecând de la dezavantajele lemnului dar în special dezavantajele fierului, materialele compozite de tip sandwich încearcă să suplinească următoarele minusuri ale fierului:

- Coroziune la contactul cu apa;
- Greutate mare;
- Zgomot și vibrații puternice în mișcare dar și la impact.

Provocarea cu care se confruntă întreaga industrie navală la momentul de față, este de a produce nave din aceste materiale economice în cantități mari. Se pune însă și problema rezistenței locale și mai ales generale la construcția navelor mari. Întrucât în domeniul structurilor navale se utilizează tot mai mult materiale avansate de tip sandwich deoarece au caracteristici multiple, impuse de societățile de clasificare, în teza de față am studiat aceste tipuri speciale de compozite.

Societățile de clasificare navală impun ca materialele utilizate la construcția navelor să satisfacă următoarele cerințe:

- bună toleranță la deteriorare (după ce panoul este deteriorat, acesta ar trebui să nu își piardă imediat performanțele pentru care este destinat);
- bună comportare la șoc;
- performanțe bune de a se adapta tehnologiilor clasice (în special tehnologiile de sudură);
- caracteristici acustice și la vibrații, bune;
- rezistență la coroziune și rezistență la foc (în special anti-flacără)
- neabsorbirea apei.

Aproape toate aceste aspecte legate de utilizarea în structurile de nave conferă caracterul inovator al panourilor sandwich compozit.

În industrie, diverse tehnologii au fost dezvoltate pentru fabricarea structurilor de panouri sandwich combinând forme și diverse tipuri (materiale) pentru învelișuri. În domeniul construcțiilor navale, materialul trebuie să îndeplinească următoarele proprietăți: rezistență la: coroziune, impact, oboseală, compresiune și încovoiere, proprietăți adezive, toleranță la deteriorare, sudabilitate, tenacitate, formabilitate și costuri mici. O caracteristică foarte importantă este cea impusă de "ignifugare", care definește utilizarea obligatorie a materialelor care sunt conforme codului în ceea ce privește: caracteristicile de propagare scăzută a flăcării, limitarea fluxului termic (ținând cont de riscul de aprindere a mobilierului în compartimente), rata limitată de eliberare de căldură (referitor la riscul de răspândire a focului în compartimentele adiacente), gazul și fumul nu trebuie să depășească anumite cantități care ar putea fi periculoase pentru personalul de la bordul navei. Potențialele beneficii de exploatare a noului panou de tip sandwich compozit pot fi pentru început utilizate la structurile mici și mijlocii ale navelor (pereți etanși, punți și învelișuri) care nu suportă solicitări importante.

Scopul și obiectivele lucrării:

Scopul principal al acestei lucrări este de a analiza comportarea la impactul dinamic al anumitor tipuri de plăci. Se pleacă de la structuri simple de bază, analizându-se comportarea la compresiune statică a structurii compozite a trei tipuri de geometrii ale celulelor (de tip circular, hexagonal și pătrat) în cazul inimilor de tip celular, după care se analizează pe rând plăcile sandwich compozite cu diferite geometrii și configurații.

Obiective generale :

Elaborarea de metodologii teoretice și experimentale pentru evaluarea fenomenelor de degradare, care apar în urma fenomenelor de impact mecanic al structurilor compozite de tip sandwich.

Obiective specifice :

- Analiza aspectelor generale privind fenomenele de degradare la impactul mecanic al structurilor.
- Proceduri care să vină în ajutorul proiectării și construcției structurilor sandwich compozite, cu eficiență mare la solicitarea de impact.
- Elaborare metodologie de calcul la impact a structurilor compozite.
- Teste experimentale pentru simularea la impact a structurilor simple și complexe confecționate din materiale compozite: determinarea caracteristicilor de material și a parametrilor de răspuns la impact.
- Dezvoltarea conceptului de integritate a materialelor compozite utilizate în diferite structuri.
- Evaluarea performanțelor tehnice și economice ale materialelor utilizate pentru construirea structurii prin implementarea unei soluții avangardiste de îmbunătățire continuă.

Această lucrare cuprinde șapte capitole, structurate astfel:

Capitolul 1 - Introducere în teoria impactului structurilor mecanice (Impactul privit ca o acțiune dinamică tranzitorie, numit și șoc).

Capitolul 2 - Stadiul actual al cercetărilor în domeniul producerii și utilizării materialelor compozite de tip sandwich.

Capitolul 3 - Simulări numerice privind impactul structurilor mecanice.

În acest capitol, au fost investigate comportarea plăcilor sandwich la solicitările statică și dinamică pentru o serie de materiale de bază pentru miez, în scopul de a defini proprietățile de impact ale structurilor de tip sandwich. Inițial, proprietățile de comprimare ale miezului de tip fagure au fost evaluate pentru fiecare celulă separat, apoi pentru întreaga placă sandwich. S-a demonstrat că rezistența cea mai bună în analiza statică o au plăcile sandwich cu miez din polipropilenă și geometria celulelor în formă de hexagon. Următorul pas a fost efectuarea unei serii de teste de impact pentru structuri de tip sandwich cu miez din polipropilenă cu diferite geometrii: circulare, hexagonale, pătrate și pătrate nestructurate

(așezate asemenea unor cărămizi la un perete). În final s-au efectuat alte patru teste de impact pentru material de tip spumă, cu diferite densități, utilizat pentru miez.

Capitolul 4 - Analiza statică și dinamică a plăcilor sandwich, cuprinde:

- determinarea caracteristicilor mecanice ale materialelor compozite utilizând pachetul de software-ul specializat ANSYS,
- simularea numerică utilizând metoda elementelor finite pentru analiza statică și dinamică a plăcilor compozite de tip sandwich.

Capitolul 5 - Simulări experimentale privind impactul, cuprinde:

- Determinarea caracteristicilor mecanice ale materialelor compozite;
- Fabricarea plăcilor de tip sandwich compozit.

Încercările la șoc s-au realizat în Laboratorul de Rezistența Materialelor avansate din Departamentul de Inginerie Mecanică al Universității "Dunărea de Jos" din Galați, utilizând două standuri:

- Stand pentru încercarea la șoc, la care forța este dezvoltată de un sistem pneumatic;
- Stand pentru încercarea la șoc de tip gravitațional, la care forța este dezvoltată prin căderea unei bile rigide de la o anumită înălțime.

Standul de încercări dinamice cu sistemul pneumatic este compus din:

- Sistemul de dezvoltare a forței;
- Sistemul de susținere a plăcii compozite;
- Sistemul de măsurare a parametrilor încercării.

Standul de încercări dinamice cu sistemul gravitațional este compus din:

- Cadrul de susținere;
- Sistemul de dezvoltare a forței gravitaționale (bilă+traversă de susținere);
- Sistemul de măsurare a parametrilor încercării.

Acest sistem este conceput și construit în totalitate în cadrul tezei de doctorat, de către autor.

Capitolul 6 - Analiza comparativă a rezultatelor. Acest capitol prezintă compararea rezultatelor experimentale cu cele simulate în softul Ansys. Sunt prezentate aspecte generale dar și principale ale întregii lucrări, concluziile cu privire la rezultatele obținute atât experimental cât și în modelările cu elemente finite.

Capitolul 7 - Concluzii generale, contribuții originale și perspective. În acest capitol sunt prezentate aspecte generale, dar și toate concluziile principale ale lucrării cu privire la rezultatele obținute atât în modelarea cu elemente finite cât și în cadrul experimentelor. De asemenea, se fac propuneri pentru studii viitoare.

Tematica acestei teze este de mare actualitate, cercetările în acest domeniu putând fi vaste și de aceea se pot aborda și alte metode de rezolvare și încercări experimentale decât cele prezentate aici.

CAPITOLUL 1 INTRODUCERE ÎN TEORIA IMPACTULUI STRUCTURILOR MECANICE

1.1 Teoria elementară a impactului

Primii cercetători ai impactului au fost Galilei și Newton. Galilei a fost cel care a studiat căderea corpurilor, descoperind faptul că fenomenul respectă legea mișcării uniform accelerate, iar Newton a fost cel care a sistematizat prima Mecanică corectă, cea pe care o numim clasică în ziua de azi.

Impactul este fenomenul de contact brusc a două sau mai multe corpuri, însoțit de variația instantanee a vitezelor acestora. Contactul se derulează într-un interval de timp $\Delta t \neq 0$, foarte scurt, când viteza își modifică brusc caracteristicile - mărimea, direcția și, uneori, sensul.

1.1.1 Impactul privit ca un fenomen mecanic de ciocnire

Studiul ciocnirilor poate fi efectuat în condițiile renunțării la ipoteza rigidității corpurilor. Această ipoteză este luată în considerare în Mecanică, admițându-se faptul că pe durata impactului corpurile se deformează atât elastic cât și plastic.

În timpul impactului corpurile sunt supuse la acțiunea unor forțe foarte mari, numite *forțe percutante*. Toate celelalte forțe (de greutate, de frecare etc.) sunt negliabile.

Forțele percutante au variații foarte rapide în intervalul $\Delta t = t' - t$, (t reprezintă momentul în care corpurile care se ciocnesc intră în contact iar t' este momentul când acestea se desprind). Intervalul Δt este foarte mic, astfel încât se poate considera faptul că nu are loc o variație a poziției corpurilor pe durata impactului. Percuția este o mărime vectorială, formată din acțiunea forțelor percutante care intervin într-o ciocnire, exprimându-se sub forma:

$$\bar{P} = \int_t^{t'} \bar{F} dt \quad (1.1)$$

\bar{F} este rezultanta tuturor forțelor percutante care acționează în intervalul de timp ($t' - t$) cât durează fenomenul de ciocnire.

Vectorul percuției este coliniar având același sens cu vectorul forței percutante. Modulul percuției $|\bar{P}|$ este numeric egal cu aria de sub diagrama de variație a forței percutante $|\bar{F}(t)|$.

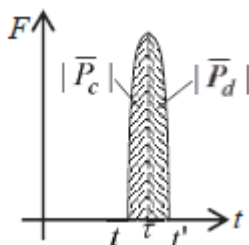


Figura 1.1 Forțele percutante [1]

Fenomenul de impact are două faze de derulare: faza de comprimare $t - \tau$ și faza de destindere $\tau - t'$ (τ reprezintă momentul când forța percutantă atinge valoarea maximă). Corespunzător, percuția poate fi divizată tot în două faze:

$$\bar{P} = \int_t^{\tau} \bar{F} dt + \int_{\tau}^{t'} \bar{F} dt = \bar{P}_c + \bar{P}_d \quad (1.2)$$

Raportul dintre impulsul corespunzător fazei de restituire (P_d) și impulsul corespunzător fazei de compresiune (P_c) este denumit coeficient (k):

$$k = \frac{\bar{P}_d}{\bar{P}_c} = \frac{v_2 - v_1}{v_{10} - v_{20}} \quad (1.3)$$

numit *coeficient de restituire* sau *coeficient de elasticitate la ciocnire*. Pentru o combinație dată de materiale acest coeficient este considerat constant.

Coeficientul de restituire este definit ca raportul dintre viteza relativă a centrelor de greutate ale corpurilor la finalul fazei de impact și viteza lor relativă la începutul acestei faze. Teoretic, valoarea coeficientului de restituire este cuprinsă între 0 și 1, valoarea 0 fiind corespunzătoare unui impact perfect plastic în care corpurile își mențin viteza comună atinsă în punctul de impuls până la finalul impactului, iar valoarea 1 corespunde impactului perfect elastic în care energia cinetică transformată în energie de comprimare în faza de compresiune se restituie integral în faza de restituire.

Astfel, fiind cunoscute vitezele la finalul impactului, se poate determina energia cinetică consumată în timpul coliziunii sub formă de energie de deformare:

$$E_D = \frac{m_1 \cdot m_2}{2 \cdot (m_1 + m_2)} \cdot (1 - k^2) \cdot (v_{10} - v_{20})^2 \quad (1.4)$$

Pentru $k=0$, valoarea ΔE este maximă, specifică ciocnirii neelastice, în timp ce pentru $k=1$, energia consumată în timpul coliziunii este nulă ($\Delta E=0$, ciocnire perfect elastică).

Coeficientul de restituire se determină experimental și are o valoare pozitivă subunitară. Se deosebesc următoarele situații:

– *ciocnirea perfect elastică* ($k=1$) în care percuțiile în cele două faze sunt egale; după ciocnire corpurile se desprind și nu intervine deformarea. Conservarea totală a energiei cinetice.

– *ciocnirea perfect plastică* ($k=0$) în care percuția în faza de destindere este nulă; după impact corpurile rămân în contact;

– *ciocnirea elasto-plastică sau naturală* ($0 < k < 1$) în care percuția din faza de destindere este mai mică decât cea din faza de comprimare datorită unei pierderi energetice la deformarea corpurilor. În acest caz corpurile rămân parțial deformate în urma impactului [2].

La baza calculului la impact stă principiul conservării energiei, în care lucrul mecanic consumat de cele două corpuri se transformă în energie de deformare. Deformația elastică se propagă cu o viteză comparabilă cu cea a sunetului, fiind corespunzătoare fiecărui tip de material. La impact viteza corpului care lovește scade până la zero într-un interval de timp extrem de scurt, iar deformația nu se propagă în întregul corp, ci se concentrează doar în zona în care a avut loc impactul.

După această fază deformația se propagă în întregul corp, obținându-se deformații cu caracter aleatoriu. Ca date inițiale ale procesului se admit următoarele ipoteze, introduse de numeroși autori, dintre care amintim pe Tong L. [3] și Jeronimidis G. [4]:

- corpul care lovește este considerat a fi rigid;

- legătura dintre forțele dinamice și deplasările dinamice este similară cu cea dintre forțele și deformațiile statice.

Diferența față de solicitarea statică este aceea că în cazul impactului tensiunile statice vor fi multiplicare cu un coeficient $\zeta > 1$, care este considerat identic în tot corpul.

Această teorie este aplicată materialelor izotrope.

1.1.2 Impactul dinamic a două corpuri

Există mai multe abordări ale fenomenului de impact, deoarece acesta se face în funcție de complexitatea și de parametrii care intervin în studierea fenomenului. Impactul se mai numește ciocnire sau coliziune. Ciocnirea dinamică este un fenomen fizic remarcabil nu

numai pentru schimbarea condițiilor pentru fiecare punct de contact al ambelor corpuri de la început până la sfârșit, dar și tensionarea progresivă a corpurilor. Principalii parametri care se modifică în urma acestui fenomen sunt: deformațiile și deplasările care descriu teoria impactului. Este firesc ca toate teoriile să fie organizate în funcție de nivelul de dificultate al studiului, adică progresele înregistrate de constantele matematice și fizice să fie punctul principal de observație.

Procesul de deformare în timpul impactului elastic a fost caracterizat de M. Szarvas, în [5], care a studiat modelul impactului elastic dintre o placă și un proiectil. După coliziune proiectilul creează o undă temporară de șoc care acționează pe placă producând tensiuni care se continuă până la capătul plăcii. Dacă o placă este formată din mai mult de un strat, atunci o mică parte a undei se va întoarce, iar o mare parte va continua spre placă. În partea în care unda de șoc se propagă și nu mai revine, în cazul încovoierii ea poate produce distrugerea materialului. Unda de șoc în secțiune transversală are o formă apropiată de un con și durează câteva milisecunde, după care aceasta se transformă în undă de încovoiere și va modifica punctele de suport la ambele capete (fig. 1.2). După câteva zeci de milisecunde se poate observa răspunsul plăcii la o încărcare de impact. Deformarea generală va fi o combinație dintre contactul Hertzian și deformarea totală care provoacă tensiuni mari, producând și încovoierea plastică a plăcii. În timpul procesului de deformare va exista întotdeauna o parte dominantă. Dacă este răspuns structural atunci distrugerea plăcii se va produce prin trei posibilități: unde de tensiuni, vibrații sau contacte hertziene.

A: Deformarea este caracterizată prin undele de tensiuni, în cazul în care intervalul de timp (de impact) este scurt și solicitarea nu reușește să ajungă la zonele de margine ale plăcii.

B: Contactul Hertzian este dominant, atunci când placa este suficient de rezistentă sau energia impactului este o deformare relativ scăzută și în general poate fi neglijată.

C: În cazul în care greutatea plăcii este mică în comparație cu proiectilul, se poate considera deformare statică în loc de vibrații de ordin superior.

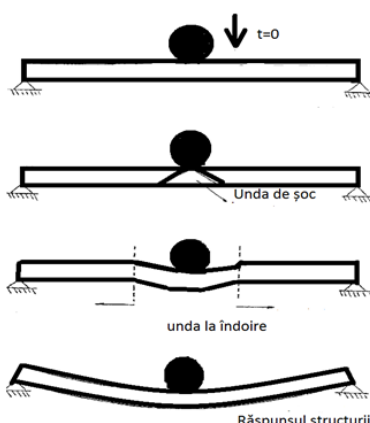


Figura 1.2 Propagarea undelor de șoc [5]

Cercetătorii au încercat să clasifice tipurile de impact în funcție de viteze, dar și de daunele obținute în urma acestora, [5, 6, 7, 8] astfel:

- 1) impact elastic (cvasi-static);
- 2) impactul plastic;
- 3) impactul hidrodinamic (duritatea de material este neglijată);
- 4) impactul supersonic (vaporizarea, explozie).

Kilchert a și delimitat vitezele de impact astfel:

- Impactul cu viteză redusă l-a încadrat între (0-50 m / s),
- impact de mare viteză (50-1000 m / s) și
- impactul cu hiper-viteză sau (> 1000 m / s).

În ultima decadă, impactul cu viteză redusă pentru structuri sandwich de tip fagure a fost investigat de către diverși cercetători ([9, 10, 11, 12]).

Serge Abrate [13] a abordat în detaliu Teoria impactului plăcilor combinând teoriile celor mai cunoscuți cercetători: Reissner Mindlin (teoria plăcilor), a lui Timoșenko (teoria barelor și plăcilor subțiri) și Bernoulli-Euler (teoria grinzilor).

Prima teorie (Teoria deformației la forfecare de ordinul întâi, prescurtat FSDT), mai este cunoscută sub numele de Mindlin sau Teoria plăcii Reissner Mindlin.

Teoria lui Timoșenko, pentru plăci subțiri, care ține seama de efectul deformației din forfecare și de inerția de rotație, se reduce la teoria plăcii clasice (CPT).

Teoria lui Bernoulli Euler este aplicabilă grinzilor.

1.1.3 Impactul privit ca problemă de contact al corpurilor elastice

Impactul poate fi privit și ca o problemă de contact de durată scurtă. În cazul vitezei reduse de aplicare a sarcinii, starea de tensiuni și deformații ce apare în corpul elastic se rezolvă cu teoriile elasticității, pe baza echilibrului mecanic static. În condiții de impact mecanic viteza de aplicare a sarcinii este foarte mare. În acest caz, fenomenul dinamic poate produce efecte importante.

1.2 Teoria impactului prin cădere liberă (drop shock theory)

Un șoc mecanic are loc atunci când poziția, viteza sau accelerația unui obiect se schimbă brusc. Un astfel de șoc poate fi caracterizat printr-o creștere rapidă a accelerației, urmată de o scădere rapidă într-o perioadă foarte scurtă de timp (fig.1.3). În figura 1.3, este reprezentată variația accelerației în timpul unei ciocniri. Aria A reprezintă modificarea vitezei în timpul ciocnirii.

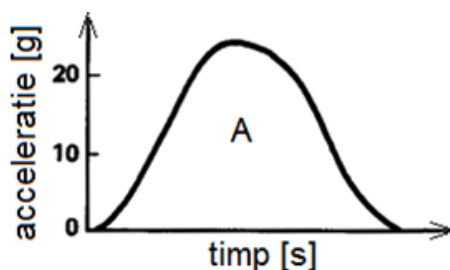


Figura 1.3 Curba de variație a accelerației la impact [15]

O forță aplicată unui sistem pentru un interval de timp scurt, produce un șoc sau impact. Dacă această forță este mare, se pot produce accelerații mari. A doua lege a lui Newton arată că accelerația unui corp este legată de forțele aplicate corpului.

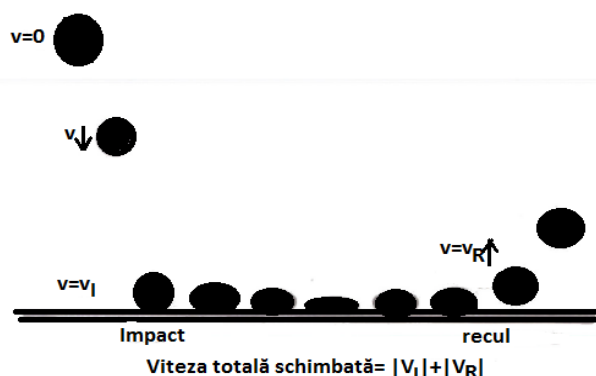


Figura 1.4 Căderea bilei pe o suprafață dreaptă [15]

În condiții obișnuite, durata unui șoc poate fi de 20 milisecunde (0,020s) accelerația având o magnitudine ("înălțime") de 150g. De aceea, pentru caracterizarea fenomenului de șoc

trebuie să se cunoască atât amplitudinea accelerației cât și durata șocului. Astfel durata de timp este data de:

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (1.20)$$

În figura 1.4 sunt prezentate fazele unei ciocniri. Viteza are un recul care depinde de masa bilei (dacă ar fi un alt obiect ar depinde și de forma acestuia) dar și de suprafața pe care cade. În cazul fenomenelor de șoc cu viteză mare, se utilizează unitatea de măsură pentru accelerație relativă la accelerația gravitațională g . Valoarea trebuie înmulțită cu accelerația gravitațională adică (9.81m/s^2) pentru a se obține unitatea de măsură a accelerației în sistemul internațional.

1.3 Teste de impact

Testele de impact se pot efectua pe echipamente care diferă între ele prin sistemul de dezvoltare a forței de impact, prin structura cadrului principal și prin metodele de măsurare a parametrilor fenomenului.

1.4 Mecanism de testare a impactului cu gaz comprimat

Testele de impact pentru structuri stratificate sau de tip sandwich se mai pot realiza și cu ajutorul mecanismelor ce au la bază sistemul cilindru-piston acționat pneumatic. În această teză se vor face teste pe un astfel de impactor în capitolul 4.

Aerul comprimat ajunge într-un acumulator la o presiune controlată de un regulator de presiune. Presiunea este eliberată prin intermediul unei valve, prin ruperea unei diafragme subțiri. Corpul parcurge apoi un tub și trece printr-un dispozitiv de înregistrare a vitezei. Un astfel de dispozitiv simplu este constituit dintr-un LED (light emitting diode) și un detector fotometric. Corpul, care are o lungime cunoscută, produce o întrerupere în radiația luminii, iar durata întreruperii în semnalul produs de senzor este folosită pentru a calcula viteza a acestuia [25].

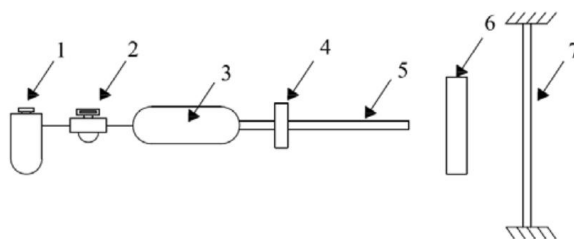


Figura 1.5 Mecanism de testare la impact cu aer comprimat [25]

Mecanism de testare la impact cu aer comprimat (Figura 1.5).

Elementele componente sunt:

1 - filtru de aer, 2 - regulator de presiune, 3 - acumulator de aer, 4 – valvă, 5 – tub, 6 - dispozitiv de înregistrare a vitezei, 7 - specimen.

1.5 Mecanism de încercare la impact de tip Charpy

Cu acest sistem se poate face teste la impact însă nu ar fi indicat pentru structuri de tip sandwich deoarece acest sistem folosește metoda creștăturilor pentru epruvete. În cazul în care tipul de sandwich are fețe cu grosimea de 1mm, făcându-se creșătura pentru inițierea fisurii atunci testul acela se poate considera invalid. Prin comparație, testul Izod este similar cu testul Pendulului Charpy cu excepția faptului că impactul cu ciocanul se execută la capătul liber (Ellis, 1996).

Cantwell și Morton a sugerat că Charpy și Izod [28] sunt mecanisme de testare adecvate pentru evaluarea performanței de impact a materialelor și un pas în determinarea durității dinamice a materialelor [27].

CAPITOLUL 2 STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR ÎN DOMENIUL PRODUCERII ȘI UTILIZĂRII MATERIALELOR COMPOZITE DE TIP SANDWICH

2.1 Aplicațiile compozitelor și ale sandwich-urilor compozite

Utilizarea materialelor compozite și a componentelor lor structurale în construirea navelor [29], aeronavelor, autovehiculelor, construcțiilor civile sau militare constituie o mare provocare, deoarece acestea reduc semnificativ greutatea structurilor, conducând (în cazul vehiculelor) la o bună economie de combustibil și în general la reducerea costurilor de exploatare. Aplicarea compozitelor polimerice de tip sandwich în industria navală este în continuă creștere, introducându-se în componența lor materiale noi de bază cum ar fi: fibre, rășini, adeziivi, acceleratori de întărire, aditivi [30]. Pentru a decide asupra alegerii materialelor cu bune performanțe la impact se indică a se studia tabelul 2.1, unde este realizată o scurtă evaluare a celor mai utilizate materiale compozite din industria navală.

Tabelul 2.1 Evaluarea calitativă a proprietăților materialelor constitutive ale compozitelor

Proprietăți	Fibre			Rășini				Miezuri						
	E-Glass	Kevlar	Carbon	Poliester	Vinil Ester	Epoxy	Phenolic	Termoplastic	Balsa	Cross Link PVC	Linear PVC	Nomex/Alum Fagure	Termoplastic Fagure	Sintactic Foam
Rezistență la tracțiune statică	■	■	■	□	□	■	□	□	■	■	■	□	□	□
Rigiditate la întindere statică	□	■	■	□	□	□	□	□	■	□	□	■	□	□
Rezistență la compresiune statică	■	□	□	□	□	□	□	□	■	□	■	■	□	□
Rigiditate la compresiune statică	□	□	■	□	□	□	□	□	■	□	□	■	□	□
Performanțe la oboseală	□	■	■	□	■	■	□	■	■	□	■	□	■	□
Performanțe la impact	■	■	□	□	■	■	□	■	□	■	■	□	□	□
Rezistență la apă	■	□	□	□	■	■	□	■	□	■	■	□	□	□
Rezistență la foc	■	□	□	□	□	□	■	□	■	□	□	■	□	□
Lucrabilitate	■	□	□	■	□	□	□	□	■	□	□	□	□	■
Cost	■	□	□	■	□	□	□	■	■	□	□	□	■	■
	■ Bune Performanțe □ Slabe Performanțe													

Pentru fabricatia plăcilor sandwich trebuie să fie alese materiale adecvate atât pentru fețe cât și pentru miez. Acest lucru ar fi fost dificil fără o studiere riguroasă a literaturii de specialitate. Astfel Eric Green, în cartea Marine Composites [31] a reușit să facă o structurare a materialelor compozite și le-a delimitat în: fibre, rășini și miezuri. Materialele care au fost utilizate în studiile efectuate sunt următoarele: fibre de sticlă, rășina epoxidică, fagure din polipropilena, spume (polistirenice extrudate). Modelarea cu elemente finite s-a făcut pentru cele enumerate dar și pentru: PVC (policlorură de vinil) și SAN (styrene

acrylonitrile). Primele două materiale (fibra de sticlă și rășina epoxidică) au fost constituenți pentru fabricarea fețelor plăcilor de tip sandwich. Celelalte trei au constituit miezurile sandwich-urilor. Sandwich-ul nou format a fost astfel fabricat încât să fie rezistent la impact, să aibă rezistență bună la tracțiune și compresiune, să aibă rigiditate bună la tracțiune și compresiune, să aibă performanțe bune la apă și la foc, o lucrabilitate bună și un cost mic. Adică sandwichul nou creat trebuie să îndeplinească toate proprietățile din tabel.

2.2 Materiale compozite

Materialele compozite sunt amestecuri de două sau mai multe componente, ale căror proprietăți se completează reciproc, rezultând un material cu proprietăți superioare celor specifice fiecărei componentă în parte. Astfel, deficiențele unora sunt completate de calitățile altora, conferind întregului ansamblu proprietăți pe care nici un component luat separat nu le poate avea [33]. Proprietățile care pot fi îmbunătățite includ [34]: rezistența mecanică, rigiditatea, rezistența la coroziune, rezistența la uzură, atractivitatea, greutatea, rezistența la oboseală, izolație termică, conductivitate termică, izolație acustică. Materialul de bază se numește matrice. Celălalt constituenț poartă numele de armătură. Armătura poate fi sub formă de fibre sau particule și se adaugă matricei pentru a-i îmbunătăți calitățile. În compoziția materialului compozit găsim și adaosuri tehnologice. Atât matricea cât și armătura unui material compozit pot fi obținute din diferite tipuri de materiale. Clasificarea materialelor compozite se poate face în funcție de tipul materialului matricei, materialul de armare, modul de realizare a compozitului, utilizare, proprietățile mecanice, fizice sau chimice etc. [35]. Materialele compozite pot fi analizate la diferite niveluri și la scări diferite, în funcție de caracteristicile particulare și comportament (Fig.2.1).

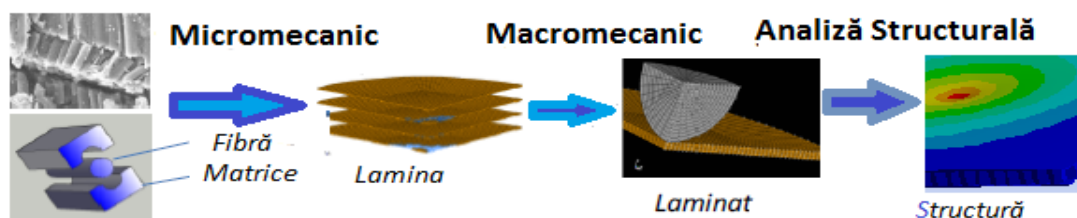


Figura 2.1 Nivel de observare și tipuri de analiză pentru materiale compozite [36]

2.3 Structuri sandwich

O structură de tip "sandwich" (figura 2.2) constă din trei elemente principale [47,48]:

- O pereche de fețe subțiri, rezistente, metalice sau din compozite polimerice, având rolul de a prelua eforturile axiale și pe cele de forfecare și de a transmite sarcinile normale pe planul lor către inimă.
- Un miez gros (numit și „core”- inima, în engleza), cu greutate redusă, care separă cele două fețe, asigurând transmiterea eforturilor de la o față la alta. Uzual, acest miez poate fi de tip fagure (din aluminiu, hârtie, materiale plastice), de tip spumă (poliuretanică, polistirenică) sau profile (metalice, plastice) (Figura 2.3).
- Un material cu proprietăți adezive care transmite eforturile axiale sau de forfecare dinspre învelișuri către miezul structurii sau invers. În cazul fețelor din materiale compozite polimerice, matricea polimerică poate avea și rolul de adeziv.

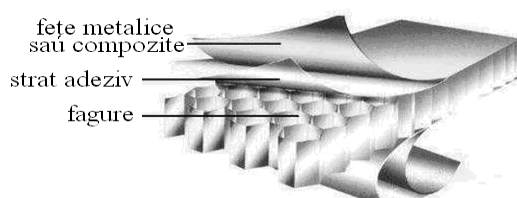


Figura 2.2 Structură "sandwich" cu miez tip fagure [47, 48]

CAPITOLUL 3 SIMULĂRI NUMERICE PRIVIND IMPACTUL STRUCTURILOR MECANICE

3.1 Prezentare generală

Datorită caracteristicilor sale speciale, structura unui material de tip honeycomb (fagure) este foarte utilizat în ultimul timp pentru confecționarea inimilor plăcilor de tip sandwich. Acest tip de material este fabricat cu structură geometrică de mai multe forme. Pentru alegerea structurii celei mai potrivite scopului propus, pe baza materialelor oferite în comerț, în prima parte a capitolului se prezintă calculul de rezistență al unui volum unitar de placă ce cuprinde: o celulă de fagure și învelișurile adiționale. Întrucât în timpul impactului celulele sunt solicitate la compresiune, calculul care este prezentat în continuare este aferent acestui tip de solicitare.

3.2 Modelare numerică a structurilor celulare de tip sandwich

Investigații numerice s-au efectuat pe câte o singură celulă ce aparține unei plăci de tip sandwich. Scopul analizei a fost de a se urmări comportamentul static sub acțiunea unei forțe $F=5N$. Analiza s-a efectuat pentru trei tipuri geometrice de celule: cilindric, hexagon și pătrat.

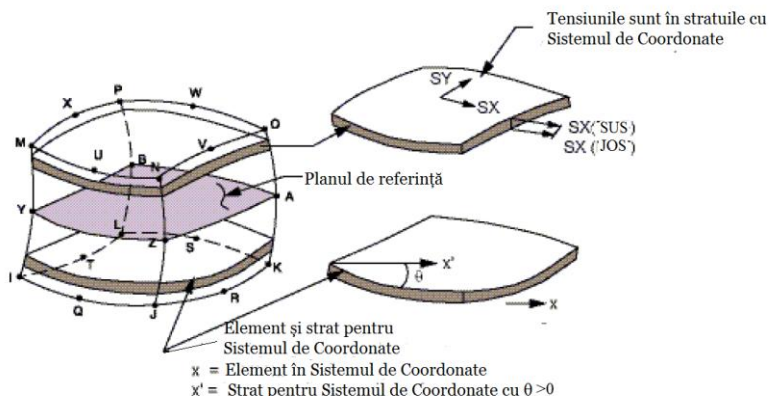


Figura 3.1 Geometria elementului SOLID 186 [Manualul ANSYS [58]]

Materialele utilizate în analize sunt: rășină epoxidică armată cu fibră de sticlă pentru cele două fețe și polipropilenă pentru miez. Calculul numeric s-a făcut cu pachetul FEM ANSYS. Tipul de element folosit este Solid186, descris în figura 3.1. Elementul nu trebuie să aibă un volum apropiat de zero. De asemenea, elementul nu poate fi răsucit, astfel încât elementul să aibă două volume separate (se poate întâmpla în mod frecvent în cazul în care elementul nu este numerotat corespunzător). Elementele pot fi numerotate, fie așa cum este prezentat în figura 3.1 sau pot avea planurile IJKL și MNOP interschimbate. Elementul este special ales pentru materiale compozite sau pentru soluție neliniară (în cazul în care elementul are un material neliniar) [58].

3.3 Determinarea formei optime a celulei dintr-un fagure

Pentru a analiza comportamentul plăcilor de tip sandwich compozit cu miez din fagure, trebuie mai întâi să se studieze comportarea celulelor din care este formată întreaga placă. O analiză detaliată au realizat-o Gibson and Ashby în [59] și Zhang [60], în care au stabilit metode predictive pentru a determina proprietățile în plan. Acest lucru reduce complexitatea celulelor de tip fagure la modelul echivalent cu un singur perete și determinarea forțelor și momentelor, astfel încât să se poată fi calculate proprietățile în plan.

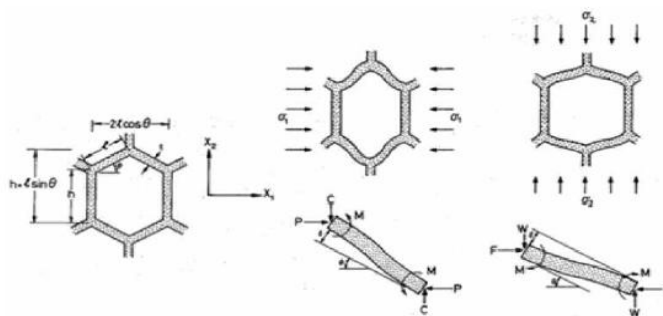


Figura 3.2 Deformare elastică pe direcțiile W și L [Gibson și L.J. Ashby M.F. [59]]

3.4. Proprietățile materialelor folosite pentru diferite tipuri de celule

Materialul pentru miezul din fagure este polipropilena cu caracteristicile conforme cu cele din Zeleniakiene [62], prezentate în tabelul 3.1.

Tabelul 3.1 Proprietățile mecanice ale polipropilenei

Proprietățile polipropilenei	Valoare	Unități de măsură
Densitatea	900	Kg/m ³
Material izotrop		
Modulul lui Young	1750	MPa
Coeficientul lui Poisson	0,42	
Tensiunea de curgere	24	MPa
Modulul tangent	4,4	MPa

Tabelul 3.2 Valori preluate din Biblioteca softului ANSYS pentru materiale compozite

Proprietățile Epoxy_E-Glass_UD	Valoare	Unități de măsură
Densitatea	2000	Kg/m ³
Elastic ortotrope:		
Modulul lui Young x	45000	MPa
Modulul lui Young y	10000	MPa
Modulul lui Young z	10000	MPa
Coeficientul lui Poisson xy	0,3	
Coeficientul lui Poisson yz	0,4	
Coeficientul lui Poisson xz	0,3	
Modulul de forfecare xy	5000	MPa
Modulul de forfecare yz	3846,2	MPa
Modulul de forfecare xz	5000	MPa
Limite pentru tensiuni ortotrope		
Întindere pe direcția x	1100	MPa
Întindere pe direcția y	35	MPa
Întindere pe direcția z	35	MPa
Compresiune pe direcția x	-675	MPa
Compresiune pe direcția y	-120	MPa
Compresiune pe direcția z	-120	MPa
Forfecare pe direcția xy	80	MPa
Forfecare pe direcția yz	46,154	MPa
Forfecare pe direcția xz	80	MPa

Proprietățile de material pentru învelișurile plăcilor sandwich sunt prezentate în tabelul 3.2 respectiv rășină epoxidică armată cu fibră de sticlă unidirecțională, care au fost preluate din Biblioteca ANSYS.

3.5 Analiza statică a elementelor de bază ale fagurelui

Analiza s-a efectuat pe elementele de volum unitare ale structurilor de tip fagure existente (celule de formă circulară, hexagonală și pătrat). Geometriile pentru fiecare celulă în parte sunt arătate în figurile 3.3, 3.4 și 3.5. Astfel, înălțimea miezului este $H=20\text{mm}$ pentru toate cele trei cazuri, grosimea fețelor $t=1\text{mm}$, grosimea peretelui miezului este $g=0,25$.

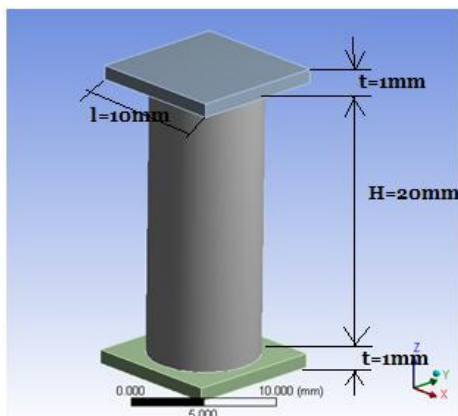


Figura 3.3 Geometria celulei circulare

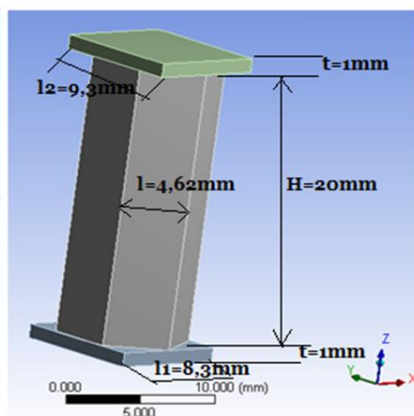


Figura 3.4 Geometria celulei hexagonale

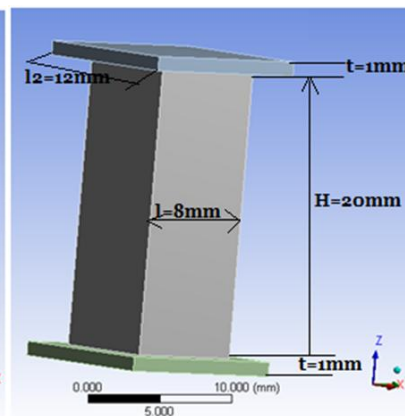


Figura 3.5 Geometria celulei pătrate

3.6. Rezultate și concluzii pentru modelele celulelor cu elemente de tip SOLID186

Analiza statică realizată cu ajutorul softului ANSYS, a luat în calcul următorii parametri de ieșire: deformația totală pentru fiecare celulă în parte, deformația pe direcția Z (care reprezintă exact direcția de aplicare a forței $F=5\text{N}$), deformația specifică (sau echivalentă liniară) notată cu ϵ (este o mărime adimensională), tensiunea echivalentă (von Mises), tensiunea de forfecare și energia de deformare. Fiecare celulă a fost încastrată la nivelul suprafeței de jos a feței, conform figurii 3.6. Forța concentrată F a fost aplicată în centrul feței de sus, exact ca în figura 3.7.

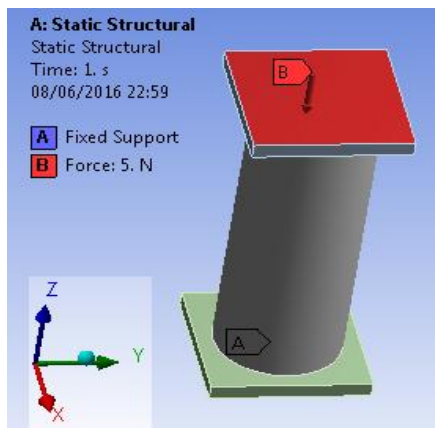


Figura 3.6 Aplicarea Forței $F=5\text{N}$



Figura 3.7 Aplicarea încastrării

Pentru a putea face o comparație viabilă, s-a considerat drept criteriu egalitatea volumelor (sau cel puțin aproximativ egale). Pentru cele 3 modele acest criteriu se bazează pe valorile:

- Celula circulară are volumul $V=321.74 \text{ mm}^3$, masa totală $M=3.7974e-004 \text{ kg}$
- Celula hexagonală are volumul $V=286.65 \text{ mm}^3$, masa totală $M=3.1558e-004 \text{ kg}$
- Celula pătrată are volumul $V=443 \text{ mm}^3$, masa totală $M=5.884e-004 \text{ kg}$.

3.7 Rezolvarea problemei de contact

Atunci când două suprafețe separate se ating reciproc, astfel încât acestea să devină tangente se consideră că sunt în contact. În sensul fizic, suprafețele care sunt în contact au caracteristicile:

- nu se întrepătrund;
- pot transmite forțe normale de compresiune și de frecare tangențiale;
- nu transmit forțe normale de întindere.

Rigiditatea sistemului depinde de starea de contact, indiferent dacă componentele se ating sau sunt separate (ANSYS [63]).

Rezultatele obținute cu ajutorul softului ANSYS pot varia în funcție de modul în care se realizează contactul dintre cele 3 corpuri simple unite într-o structură mai complexă, existând patru tipuri de contact:

- 1) Augmented Lagrange
- 2) Pure Penalty
- 3) MPC (Multi Point Constraint)
- 4) Normal Lagrange.

În ANSYS, problema de contact este soluționată în mod diferit, în funcție de formularea utilizată.

- Formulările Penalty Pure și Augmented Lagrange folosesc integrarea punctului de detectare (Fig. 3.8 (a)). Acest lucru duce la mai multe puncte de detectare.
- Formulările Normal Lagrange și MPC utilizează detectarea nodurilor (se merge pe direcția normală a plăcii ("Target")) (Fig. 3.8 (b)). Acest lucru duce la mai puține puncte de detectare.
- În timpul detectării nodurilor se poate face o manipulare a contactului. Discretizarea mai fină va atenua această situație, alegându-se un punct de integrare la detectare.

MPC adaugă ecuații de constrângere pentru a "lega" deplasările între suprafețele de contact.

- Această abordare este bazată pe multiplicatorii Lagrange. Este un mod direct și eficient pentru suprafețele regiunilor de contact care sunt legate.
- Pentru deformații mari se utilizează MPC pe bază de legături lipite.
- O discretizare mai fină a modelelor poate rezolva aceste inconveniente [64].

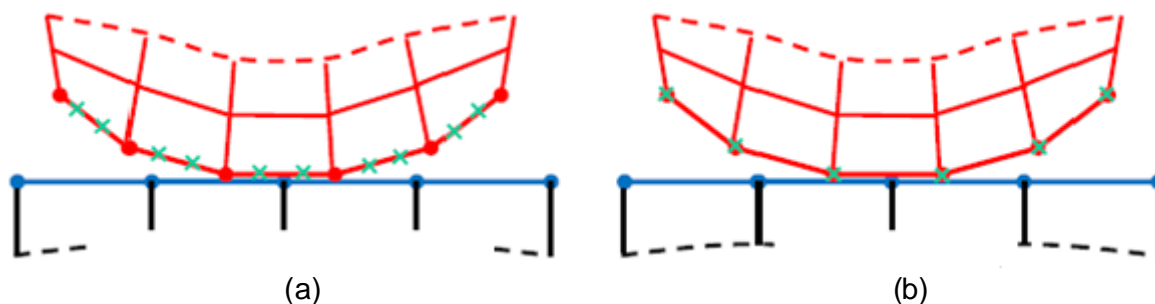


Figura 3.8 Identificarea contactului la nivel de punct Gauss (a) sau la nivel de nod (b) [63]

S-au efectuat analize numerice cu cele 4 tipuri de formulări ale contactului. În tabelele 3.3, 3.4 și 3.5 se prezintă rezultatele obținute cu cele 4 tipuri de formulări ale contactului, pentru cele 3 tipuri de geometrii de celule.

Tabelul 3.3 Metoda Augmented Lagrange

Nr. crt	Parametri de ieșire	Valori pentru modelul		
		Celula circulară	Celula hexagonală	Celula pătrată
1	Deformația totală [mm]	0,00966	0,00906	0,00766
2	Deformația pe direcția (z) [mm]	$8,1779 \cdot 10^{-7}$	$1,9064 \cdot 10^{-6}$	$9,1021 \cdot 10^{-7}$
3	Deformația specifică	0,000625	0,000669	0,000662
4	Tensiunea echivalentă von Mises [MPa]	1,0918	1,5236	1,1416
5	Tensiunea de forfecare [MPa]	0,6256	0,8734	0,6113
6	Energia de deformație totală U [mJ]	0,0234	0,0215	0,0187

Metodele Augmented Lagrange și Pure Penalty dau rezultate identice. De aceea nu se mai reproduce tabelul.

Tabelul 3.4 Metoda MPC (Multi Point Constraint)

Nr.	Parametri de ieșire	Valori pentru modelul		
		Celula circulară	Celula hexagonală	Celula pătrată
1	Deformația totală [mm]	0,00957	0,00907	0,00752
2	Deformația pe direcția (z) [mm]	$2,5569 \cdot 10^{-7}$	$7,9725 \cdot 10^{-7}$	$6,7689 \cdot 10^{-7}$
3	Deformația specifică	0,000903	0,000650	0,0007873
4	Tensiunea echivalentă von Mises [MPa]	1,5791	1,5373	1,3124
5	Tensiunea de forfecare [MPa]	0,9097	0,8826	0,7409
6	Energia de deformație U [mJ]	0,0244	0,0225	0,0217

Tabelul 3.5 Metoda Normal Lagrange

Nr.	Parametri de ieșire	Valori pentru modelul		
		Celula circulară	Celula hexagonală	Celula pătrată
1	Deformația totală [mm]	0,00965	0,00906	0,00765
2	Deformația pe direcția (z) [mm]	$1,1325 \cdot 10^{-6}$	$2,0162 \cdot 10^{-6}$	$9,1372 \cdot 10^{-7}$
3	Deformația specifică	0,000579	0,000692	0,000687
4	Tensiunea echivalentă Von Mises [MPa]	1,0055	1,5236	1,1658
5	Tensiunea de forfecare [MPa]	0,57555	0,8734	0,6106
6	Energia de deformație U [mJ]	0,0294	0,0213	0,0197

În urma acestei analize s-a constatat că pentru modelele cu celulele cilindrică și cea hexagonală s-au obținut valori ale deplasărilor totale apropiate, respectiv 0,00965 [mm] celula circulară, 0,00906 [mm] la metoda normal Lagrange, pentru celula pătrată, deplasarea totală fiind de 0,00765 [mm]. Pentru tensiunile apărute în urma aplicării forței, modelul cel mai bun este reprezentat de celula circulară deoarece aceasta a obținut cea mai mică tensiune și anume: 1,0055 [MPa], 1,5236 [MPa] celula hexagonală iar celula pătrată cu o tensiune Von Mises de 1,1658 [MPa].

Deoarece forma geometrică a celor 3 celule este diferită (și volumul este diferit), trebuie să se lucreze cu energia specifică (raportul între energie și volumul celulei) pentru a se realiza comparația între valorile obținute.

Valorile deformației specifice pe contur fiind diferite, s-a introdus o valoare mediată (pentru calculul static al celulelor).

Energia de deformație a unui element este:

$$U^{(e)} = \int_{V^{(e)}} \{T^{(e)T} y[\varepsilon^{(e)}] dv\}$$

Știind că $V_1 \neq V_2 \neq V_3$,

$$U = \sum_{(e)} U^{(e)}$$

$$KU = \frac{U}{V}$$

U - reprezintă energia internă de deformație totală

V- reprezintă volumul întregii celule de tip circulară, hexagonală, sau pătrată

$$KU = \frac{U_{circular}}{V_{circular}} = \frac{0.0234}{321.74} = 0.0000726(mJ/mm^3)$$

$$KU = \frac{U_{hexagon}}{V_{hexagon}} = \frac{0.0215}{286.65} = 0.000075(mJ/mm^3)$$

$$KU = \frac{U_{pătrat}}{V_{pătrat}} = \frac{0.0187}{443} = 0.0000423(mJ/mm^3)$$

Unde KU este energia internă specifică totală de deformație a structurii celulei,

V- este volumul întregii structuri a celulei (hexagon, circular, pătrat).

Concluzie

Structura cu celule tip hexagon și circular au caracteristici comparabile în baza criteriului densității energiei interne de deformații.

Structura pătrată are caracteristici mai slabe față de criteriul densității energiei de deformație, necesitând un volum semnificativ mai mare pentru a putea absorbi același lucru mecanic.

Între structura hexagon și structura circulară eficiența maximă la preluarea lucrului mecanic, respectiv volum de material necesar, se obține în cazul hexagon, variantă întâlnită în mod frecvent la structurile compozite naturale (lemn, fagure etc.).

3.8 Calculul analitic pentru structuri celulare de tip "sandwich"

Deplasarea totală este suma deplasărilor fețelor și miezului sandwichului:

$$\delta_{total} = \delta_{miez} + 2 \delta_{față} \quad (3.1)$$

Utilizând formulele de bază din Rezistența materialelor pentru solicitarea de compresiune, se obțin valorile deplasărilor miezului și fețelor celulei:

$$\delta_{miez} = \varepsilon_{miez} \times h_{miez} \quad (3.2)$$

$$\delta_{miez} = \frac{F \times h_{miez}}{A \times E_{miez}} \quad (3.3)$$

$$\delta_{față} = \varepsilon_{față} \times h_{față} \quad (3.4)$$

$$\delta_{față} = \frac{F \times h_{față}}{A \times E_{față}} \quad (3.5)$$

Înlocuind (3.3) și (3.5) în (3.1), se obține pentru forța aplicată expresia:

$$F = \frac{\delta_{total}}{\left(\frac{h_{miez}}{A \times E_{miez}} + 2 \frac{h_{față}}{A \times E_{față}} \right)} \quad (3.6)$$

Considerând că forța aplicată asupra celulei are valoarea $F=5N$, s-a efectuat calculul analitic și numeric.

Tabelul 3.6 Compararea rezultatelor forțelor calculate cu AEF și teorie

Geometria celulelor	Forța (Ansys) [N]	Forța (din teorie) [N]	Diferența [%]
Circular	5	5,2	4
Hexagon	5	5,5	10
Pătrat	5	5.3	6

Aceste studii au fost efectuate pentru a înțelege mai bine comportamentul celulelor ce formează o placă de tip sandwich. A fost realizată o comparație între rezultatele obținute cu pachetul software Ansys și rezultatele teoriei, utilizând ecuația (3.6), pentru cele trei geometrii de celule, prezentate în tabelul 3.6. Anumite diferențe între rezultate se observă în analiza comparativă. Discrepanța mare dintre rezultate poate fi explicată prin utilizarea abordării modelării cu solid-solid a fețelor și pereților miezului din fagure, care pot conduce la erori în timpul studiilor interlaminare [65].

3.9 Modelarea cu Elemente Finite a solicitării plăcilor confecționate din materiale compozite de tip sandwich

Analiza statică a plăcilor confecționate de tip sandwich cu miezul din fagure urmărește determinarea comportării plăcii sub acțiunea unei forțe concentrate aplicată în centrul feței superioare. Scopul analizei este de a se determina:

- Deformația totală [mm], deformația pe direcția (z) [mm], deplasarea echivalentă elastică [mm/mm], tensiunea Von Mises echivalentă [MPa], tensiunea de forfecare [MPa], energia de deformare [mJ].

Materialele utilizate sunt identice cu cele din modelările anterioare, respectiv:

- Pentru cele două fețe rășină epoxidică armată cu fibră de sticlă cu o grosime de 1[mm];
- Inima (sau miezul) din polipropilenă cu o grosime de $t=20$ [mm];

Forța aplicată pentru cele trei cazuri este $F=1000$ [N];

Plăcile sandwich sunt de forma pătrat, cu latura $L=340$ [mm].

Grosimea pereților celulelor este $t_c=0.25$ [mm].

3.9.1 Placă de tip sandwich cu celule circulare

Condițiile de mai sus sunt valabile în toate cele patru cazuri, deoarece acest lucru este deosebit de important când se realizează o comparație între plăci. Dimensiunile și condițiile la limită trebuie să fie la fel în toate cazurile pentru a putea compara rezultatele obținute.

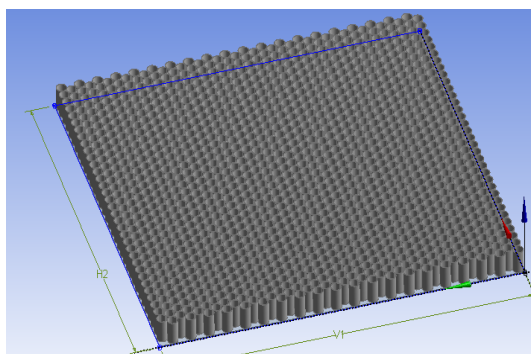


Figura 3.9 Detaliu pentru placa simplă cu celule circulare

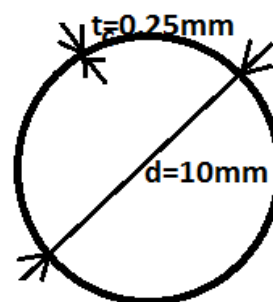


Figura 3.10 Dimensiunile cercului celulei

În figura 3.9 este prezentat miezul sandwichului din polipropilenă cu dimensiunea 340X340 mm iar în figura 3.10 este reprezentat un cerc cu diametrul $d=10$ mm și grosimea $t_c = 0,25$ mm (baza celei circulare). Placa sandwich a fost încastrată pe toate suprafețele laterale iar modul de analiză a fost realizat cu elemente finite în ANSYS Mechanical, utilizându-se conceptul elementelor de volum, respectiv Volum – Volum – Volum (se mai utilizează și conceptul de Solid respectiv Solid – Solid – Solid). S-a aplicat o forță $F=1000$ [N] pe suprafața superioară a panoului sandwich, (așa cum se poate observa în figura 3.11 a).

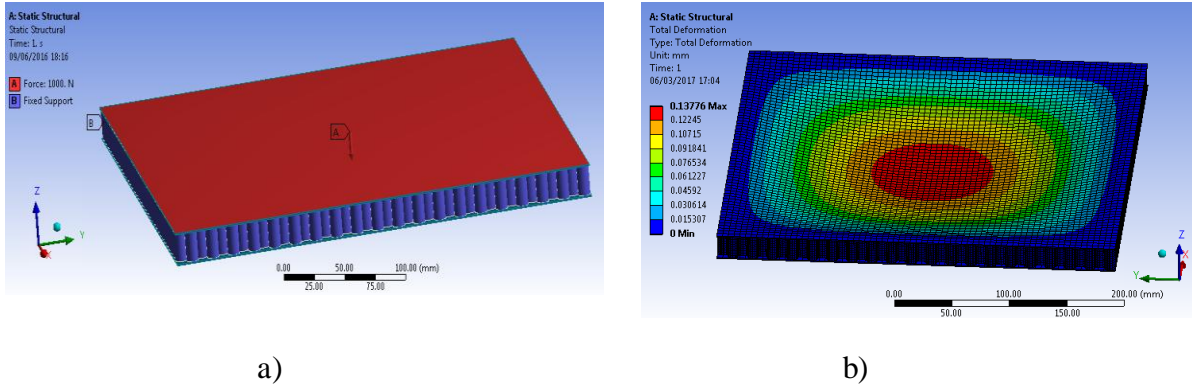


Figura 3.11 Aplicarea condițiilor de fixare și forța $F=1000$ N, pentru placa sandwich cu celule circulare a), Harta deformațiilor totale b)

Condițiile de mai sus sunt valabile în toate cele patru cazuri de geometrii de celule.

În figura 3.11 b) se prezintă harta de deplasări pe fața superioară a plăcii. Deplasarea totală maximă este egală cu $0,13776$ [mm]. Așa cum se observă, în zona din centrul panoului se obțin valorile cele mai mari (zona de culoare roșie). Spre marginile plăcii deplasările devin tot mai mici.

3.9.2 Placă sandwich cu celule hexagonale

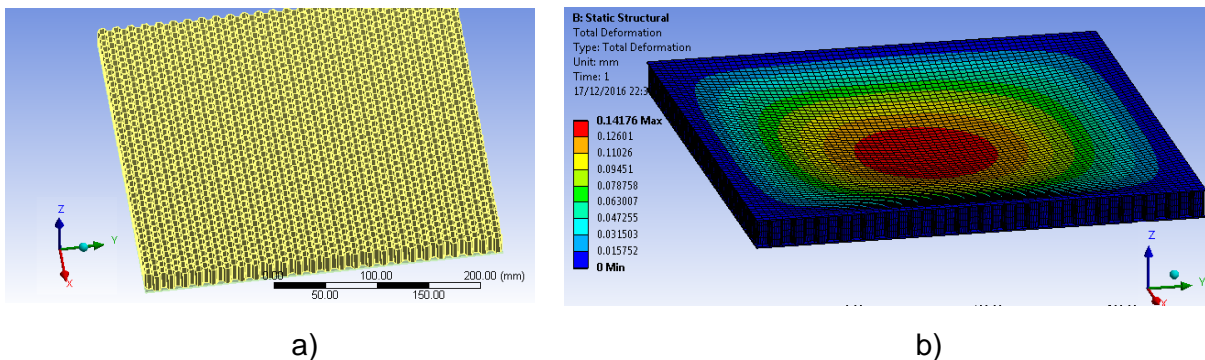
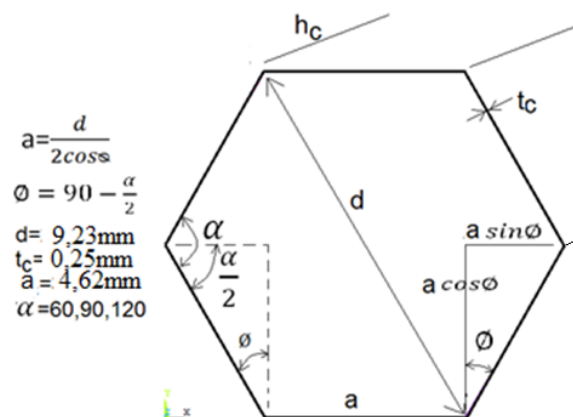


Figura 3.12 Detaliu pentru geometria plăcii simple cu celule hexagonale (a), Harta deformațiilor totale (b).

Figura 3.13 Dimensiunea celei hexagonale



Dimensiunile celulei, prezentate în figura 3.13, au următoarele semnificații: t_c este grosimea peretelui celulei, h_c este înălțimea celulei „a” este latura hexagonului, „d” este diagonala cercului circumscris hexagonului.

3.9.3 Placă sandwich cu celule pătrate

Plăcile sandwich cu celule pătrate se realizează astfel încât în interiorul celulei să existe un material de umplură care poate fi chiar spumă poliuretanică, diferite tipuri de PVC, etc.

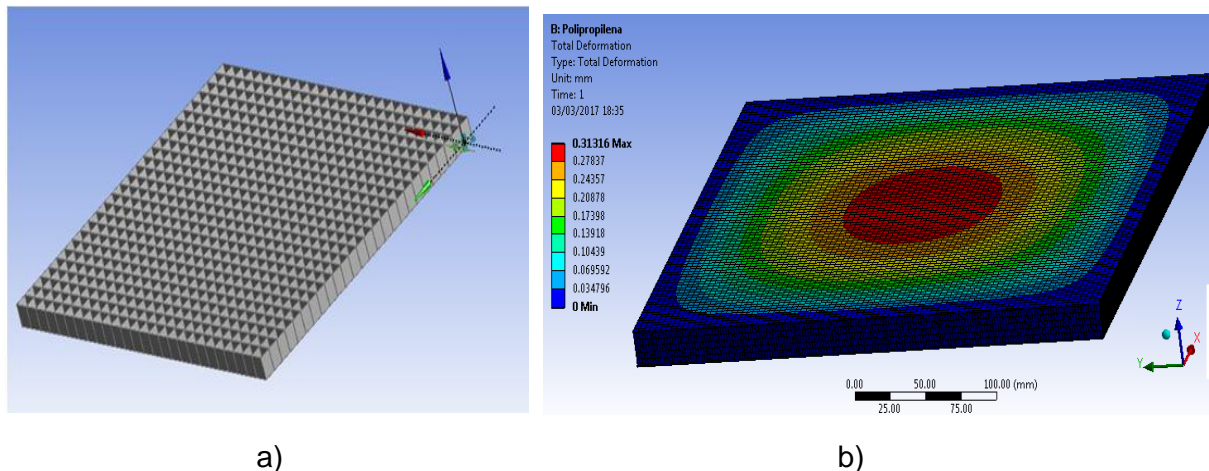


Figura 3.14 Detaliu pentru placa simplă cu celule pătrate (a), Harta deformațiilor totale pentru placa sandwich cu celule pătrate (b).

3.9.4 Placă sandwich cu celule pătrate nestructurate

În continuare se prezintă testele numerice efectuate la încovoierea plăcii tip sandwich cu celule pătrate nestructurate, încastrată pe contur.

În figura 3.15 (a) se prezintă un detaliu al plăcii cu celule pătrate nestructurate, iar în figura 3.15 (b) este redată harta deformațiilor totale.

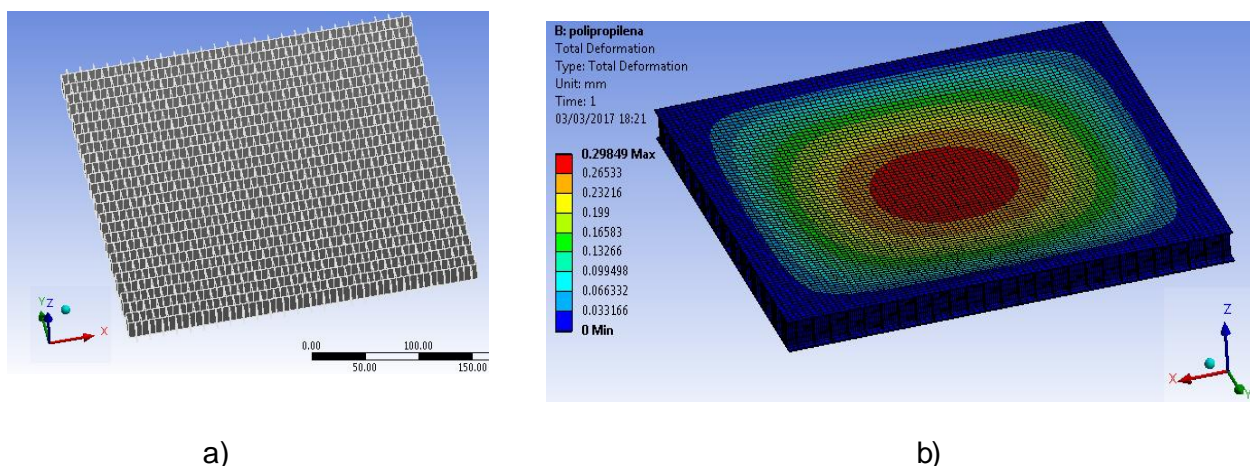


Figura 3.15 Detaliu pentru placa simplă cu celule pătrate nestructurate (a), Harta deformațiilor totale pentru placa sandwich cu celule pătrate nestructurate (b)

Rezultatele analizelor numerice pentru solicitarea la încovoiere a plăcii încastrată pe contur sunt prezentate în tabelul 3.7.

Așa cum se observă, plăcile cu miezul de tip fagure cu celule circulare și hexagonale sunt mai rigide, dar au o rezistență mai mare. Energia de deformație a acestor plăci este mai mică decât la celelalte două tipuri.

Complexitatea structurilor de tip sandwich cu configurațiile geometrice pe mai multe straturi, face ca modurile de cedare să se realizeze mai dificil pentru o analiză exactă a proprietăților mecanice ale panourilor cu miezul de tip fagure.

Tabelul 3.7 Rezultatele analizei la încovoiere

Nr. crt	Parametri (pentru valori maxime)	Valori pentru placa sandwich cu:			
		Celule circulare	Celule hexagonale	Celule pătrate	Celule pătrate nestructurate
1	Deformația totală [mm]	0,13776	0,14176	0,31316	0,29849
2	Deformația pe direcția (z) [mm]	0,0003165	0,000246	0,000432	0,0010322
3	Deformația echivalentă elastică [mm/mm]	0,001466	0,00162	0,002237	0,0055681
4	Tensiunea echivalentă von Mises [MPa]	5,5254	9,0081	18,32	15,476
5	Tensiunea de forfecare [MPa]	0,35019	0,59313	0,59552	1,11006
6	Energia de deformație[mJ]	0,0036708	0,0035717	0,010024	0,0065539

Comportamentul general al acestor structuri depinde de proprietățile materialelor, constituenți (fețe, miezuri, și adeziv dacă este necesar), geometrie, dimensiunile și tipul de încărcare. Mai mult decât atât, metodele experimentale pentru materiale compozite sunt mai complexe decât pentru materiale izotrope și necesită modificări semnificative [72, 73].

3.10 Calculul la impact pentru plăci de tip sandwich cu diferite miezuri

3.10.1 Prezentarea cazurilor analizate

Pentru analiza cu elemente finite se pot utiliza diverse pachete licentiate de tip FEM. Cele mai utilizate sunt: LS-Dyna, Abaqus, Ansys. În acest studiu se va utiliza softul Ansys Workbench pentru geometrie și Dynamic 3D pentru modelarea impactului. Se vor modela 4 plăci sandwich cu geometria miezului diferite astfel: miez cu celule circulare, hexagonale, pătrate și pătrate nestructurate. Pentru calculul parametric al sistemului impactor – placă sandwich, s-au stabilit valori, ipoteze și particularități de calcul astfel:

Bila din oțel cu o rază $R=30$ [mm] și masa $m= 5$ [Kg];

Placa sandwich este patrată, cu latura de $L=340$ [mm];

Materialul folosit pentru fețele plăcii este din rășină epoxidică armată cu fibră de sticlă;

Grosimea miezului: 20 [mm]. Materialul folosit: fagure din polipropilenă;

Timpul parcurs de bilă până lovește placa, "End Time", $=0,0025$ [s]. Viteza bilei: $V=4.81$ [m/s].

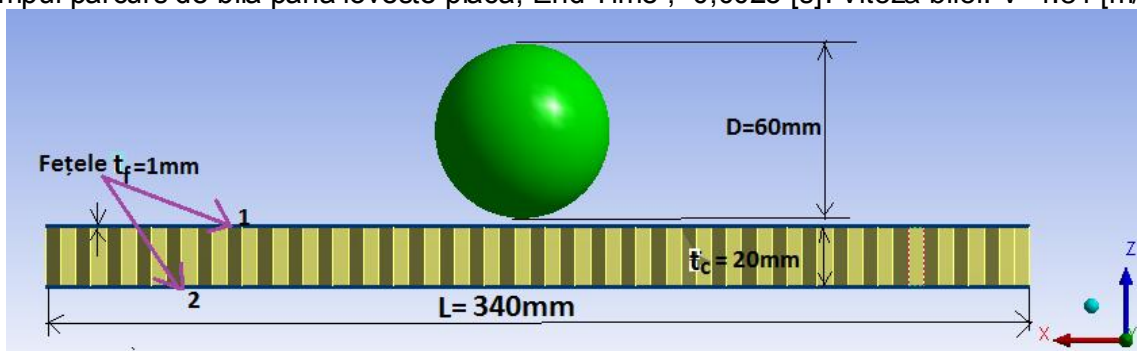


Figura 3.16 Geometria sistemului impactor- placă sandwich

Pentru geometrie s-au ales valorile de mai sus (arătate în detaliu în figura 3.16).

Ipoteze și particularități:

- s-a neglijat accelerația gravitațională (se schimbă valoarea de la a opta zecimală ex.: Dacă deplasarea fără accelerație gravitațională este egală cu $0.00074842m$, (cu accelerație gravitațională este $0,00074845m$);

- s-au ales caracteristicile de material pentru placa sandwich alese din biblioteca Ansys [77,58], cu respectarea condițiilor particulare din Explicit Dynamics din Ansys Autodyn 3D;
- s-a stabilit viteza inițială a penetratorului la impact și s-a impus ca placa să fie încastrată pe toate suprafețele laterale; în urma precizărilor din literatură de specialitate [77, 58] s-a stabilit că elementul care respectă cel mai bine modul de comportare al plăcii sandwich în cazurile studiate este elementul de tip SOLID 185, special ales pentru compozite de tip sandwich (figura 5.17).
- pentru discretizarea sistemului fizic, s-a apreciat că tipul de element finit cel mai potrivit este hexaedrul.

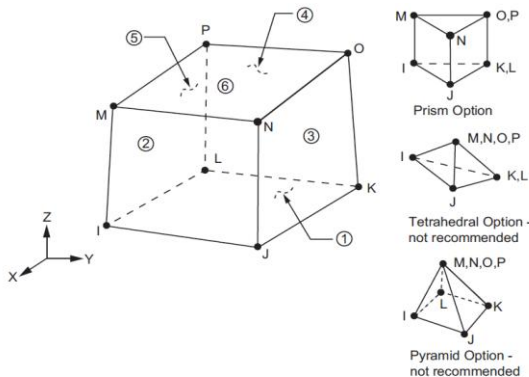


Figura 3.17 Elementul SOLID185 [58]

Cu acest tip de element s-au obținut rezultate bune pentru placă. Formele sale particulare (cub, paralelipiped dreptunghic, prismă triunghiulară sau piramidă), permit utilizarea lui și la discretizarea impactorului, folosind elementul Solid 185 [58].

3.10.2. Modelarea celor 4 cazuri analizate cu FEM în Ansys

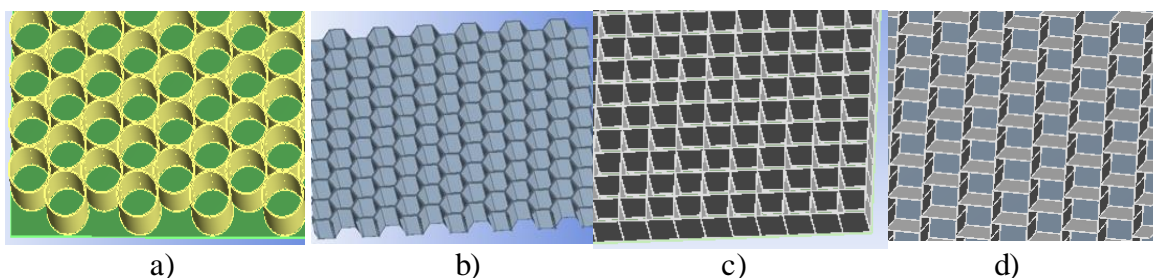


Figura 3.18 Cazul 1: Celule: a) circulare, b) hexagonale, c) pătrate, d) pătrate nestructurate

În timpul testelor de impact este necesar să se afle energia cinetică - o componentă esențială pentru validarea criteriilor de proiectare. Trebuie să se obțină valorile energiei prin efectuarea testului fizic pentru ca folosind aceste date să se poată efectua calculul. În urma încercării simple se trasează curba forță de impact în raport cu deplasarea și apoi se efectuează integrarea ariei de sub curbă, care reprezintă energia consumată. Problema este o aplicație specifică, legată de legea de conservare a energiei, care afirmă că energia potențială (EP), trebuie să fie egală cu energia cinetică (EC) (rel.3.8). Rezolvarea problemei conservării din ecuația energiei de mai sus neglijând rezistența aerului, viteza se calculează din ecuația lui Galileo:

$$v = \sqrt{2gh} \tag{3.7}$$

Conform energiei potențiale și energiei cinetice:

$$mgh = mv^2/2 \tag{3.8}$$

$$mgh = 5 \cdot 4.81^2 / 2$$

$$5 \cdot 10 \cdot h = 59J \tag{3.9}$$

$$50 \cdot h = 59 \implies h = 1,18m$$

Relația între forță și distanță

Folosind principiul energiei, următorul pas este de a estima, prin testare, forța așteptată.

$$W_{net} = mv^2_{final} / 2 - mv^2_{initial} / 2 \tag{3.10}$$

Într-o aplicație de testare la cădere, $W_{net} = mv^2_{final} / 2$ deoarece viteza inițială ($v_{inițial}$) este egală cu zero. Presupunând că s-ar putea măsura cu ușurință distanța de impact, media forței de impact F se calculează cu expresia:

$$F = \frac{W_{net}}{d} \tag{3.11}$$

Unde d este distanța parcursă după impact.

Tabelul 3.8 Rezultatele la impactul dinamic pentru cele patru cazuri de plăci sandwich

Nr. crt	Parametri (pentru valori maxime)	Valori pentru placa sandwich cu inima cu celule:			
		Celule circulare	Celule hexagonale	Celule pătrate	Celule pătrate nestructurate
1	Deformația totală [mm]	4,7748	4,8838	6,821	7,6085
2	Deformația pe direcția (z) [mm]	0,0016	0,9831	0,0069 4	0,01175
3	Deformația echivalentă elastică	0,5998	0,7915	1,9902	0,7565
4	Tensiunea echivalentă von Mises [MPa]	200,72	292,65	184,44	239,94
5	Tensiunea de forfecare [MPa] pe planul (xy)	28,941	34,501	27,963	30,683
6	Viteza totală a bilei [m/s]	4,6334	4,4607	4,662	4,582

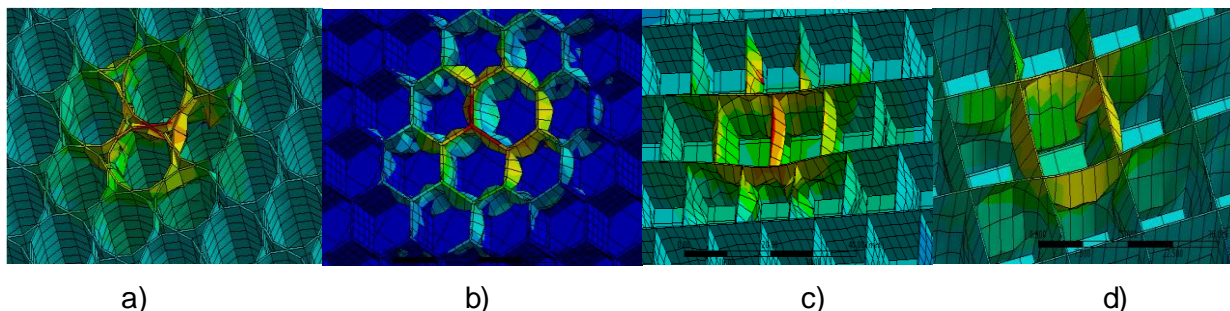


Figura 3.19 Deteriorări ale celulelor circulare (a), hexagonale (b), nestructurate (c), pătrate (d)

În figurile 3.19. a), b), c) și d), se prezintă imagini ale deteriorărilor ce apar în celulele celor 4 tipuri de plăci, obținute în calculul de impact gravitațional.

Deformația totală pentru cele patru cazuri analizate este aproximativ egală pentru primele două cazuri și diferită pentru plăcile pătrate și pătrate nestructurate. După cum se observă și în graficul din figura 3.20 deformația în raport cu timpul este mai mare pentru cazul plăcii sandwich cu celule pătrate nestructurate. Plăcile sandwich au o comportare aproximativ egală (pentru sandwichurile cu celule circulare și hexagonale).

Funcția de variație a deformației pe direcția axei z în raport cu timpul, reprezintă o curbă cu valori semnificativ crescute în cazul plăcii sandwich cu celule intercalate. Comportare bună la deformare (o bună rigiditate) o au plăcile sandwich cu celule pătrate și hexagonale.

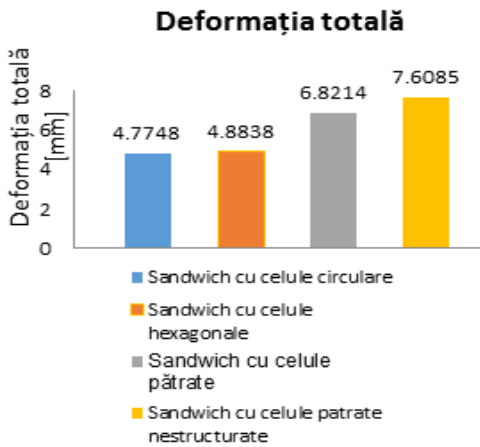


Figura 3.20 Deformațiile totale pentru plăcile sandwich cu geometrii diferite

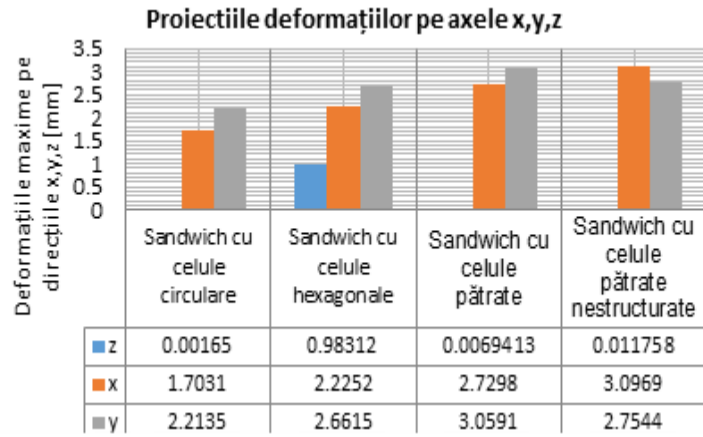


Figura 3.21 Deformația pe direcția axei (z)

La deformația echivalentă elastică în raport cu timpul se observă o creștere semnificativă pentru sandwichul cu celule circulare. Se poate observa că are o valoare mult mai mare în comparație cu celelalte trei. O comportare bună se observă la plăcile de tip sandwich cu celule hexagonale și pătrate.

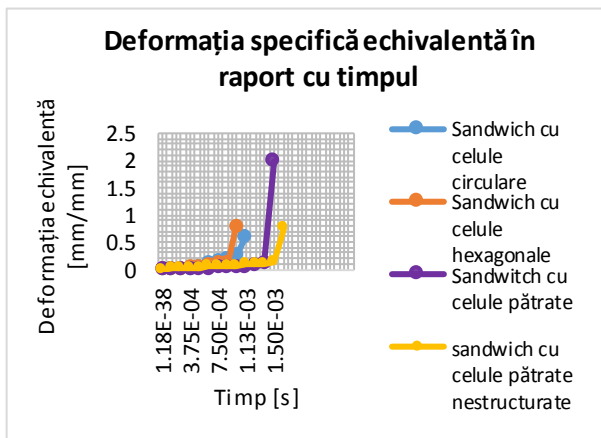


Figura 3.22 Deformația echivalentă elastică în raport cu timpul

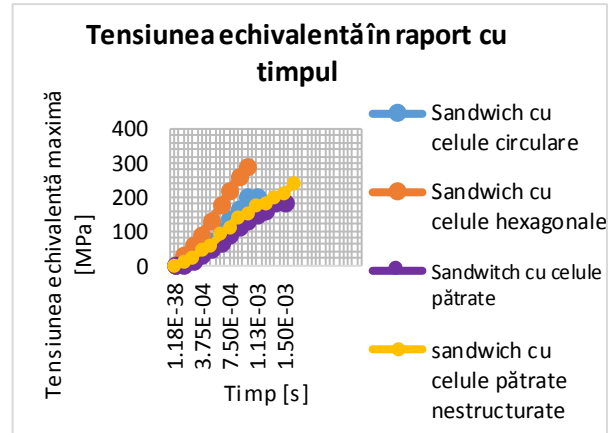


Figura 3.23 Tensiunea von Mises în raport cu timpul

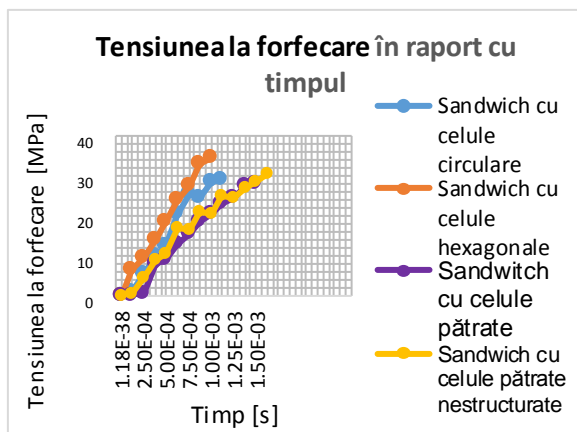


Figura 3.24 Tensiunea de forfecare în raport cu timpul

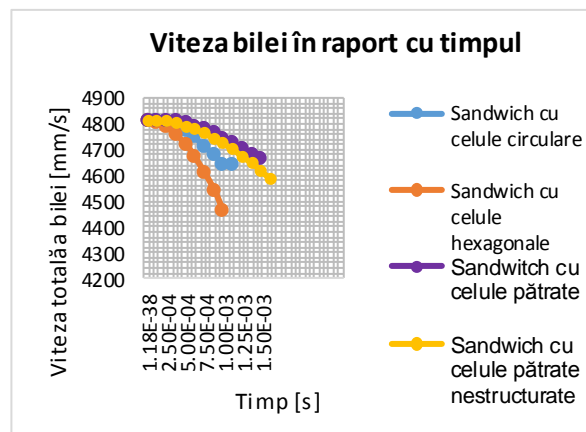


Figura 3.25 Viteza în raport cu timpul

3.11 Plăci de tip sandwich cu miez din spume (Foam)

Respectându-se condițiile din calculul plăcilor sandwich cu diferite geometrii se vor efectua 4 analize de impact dinamic pentru plăci sandwich cu miezuri din diferite tipuri de spume.

Proprietățile de material pentru miezuri din spume sunt arătate în tabelele: 3.9, 3.10, 3.11, 3.12. Acestea sunt: SAN Foam (SAN-styrene acrylonitrile) cu densitatea de 81 și 103 kg/m³ și PVC cu densități de 60 și 80kg/m³.

În tabelul 3.8 sunt date rezultatele obținute la impactul dinamic pentru cele patru cazuri de tipuri de celule ale plăcilor sandwich. Parametrii de intrare pentru calcul sunt:

Viteza bilei $v=4.81$ [m/s];

Timpul parcurs de bilă până lovește placa, "End Time" $=0,0025$ [s];

Impactorul sub formă de bilă din oțel cu diametrul de 30mm;

Placa sandwich cu dimensiunile de 340x340 mm;

Masa bilei $m=5$ kg.

Tabelul 3.9 Proprietățile SANFoam 81kg/m³ (SAN-styrene acrylonitrile)

Proprietățile SANFoam 81kg/m ³	Valoare	Unități de măsură
Densitate	81	kg/m ³
Elastic Izotrop		
Modulul lui Young	60	MPa
Coeficientul lui Poisson	0,3	
Modulul global (bulk)	50	MPa
Modulul de forfecare	23,077	MPa

Tabelul 3.10 Proprietățile materialului SAN Foam 103kg/m³ (SAN-styrene acrylonitrile)

Proprietățile SAN Foam 103kg/m ³	Valoare	Unități de măsură
Densitate	103	kg/m ³
Elastic Izotrop		
Modulul lui Young	85	MPa
Coeficientul lui Poisson	0,3	
Modulul global (bulk)	70,833	MPa
Modulul de forfecare	32,692	MPa

Tabelul 3.11 Proprietățile materialului PVC Foam 60 kg/m³

Proprietățile PVC Foam 60kg/m ³	Valoare	Unități de măsură
Densitate	60	kg/m ³
Elastic Izotrop		
Modulul lui Young	70	MPa
Coeficientul lui Poisson	0,3	
Modulul global (bulk)	58,333	MPa
Modulul de forfecare	26,923	MPa

Tabelul 3.12 Proprietățile materialului PVC Foam 80 kg/m³

Proprietățile PVC Foam 80kg/m ³	Valoare	Unități de măsură
Densitate	80	kg/m ³
Elastic Izotrop		
Modulul lui Young	102	MPa
Coeficientul lui Poisson	0,3	
Modulul global (bulk)	85	MPa
Modulul de forfecare	39,231	MPa

Tabelul 3.13 Rezultatele obtinute pentru placile sandwich cu inima din materiale de tip Foam

Nr. crt	Parametrul (pentru valori maxime)	Valori pentru placa sandwich cu inima din:			
		San Foam 81kg/m ³	San Foam 103kg/m ³	PVCFoam 60kg/m ³	PVCFoam 80kg/m ³
1	Deformația totală [mm]	12,376	12,394	13,765	16,598
2	Deformația pe direcția (y) [mm]	12,176	12,179	13,49	16,591
3	Deformația specifică [mm/mm]	0,219	0,226	0,362	0,365
4	Tensiunea echivalentă von Mises [MPa]	116,74	116,91	268,95	274,18
5	Tensiunea de forfecare [MPa] pe planul (xy)	7,6067	7,136	42,05	50,6
6	Viteza totală [m/s]	4,725	4,721	4,132	3,896

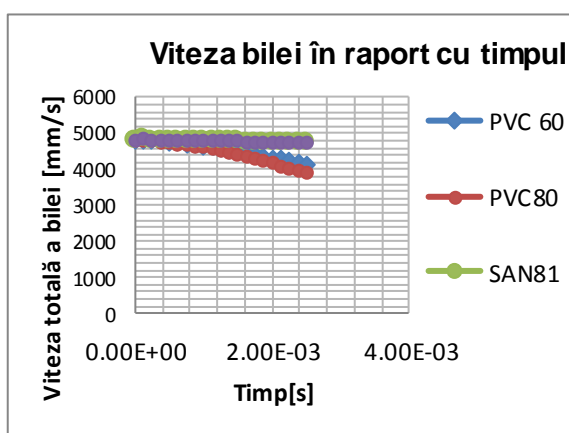


Figura 3.26 Viteza totală în raport cu Timpul

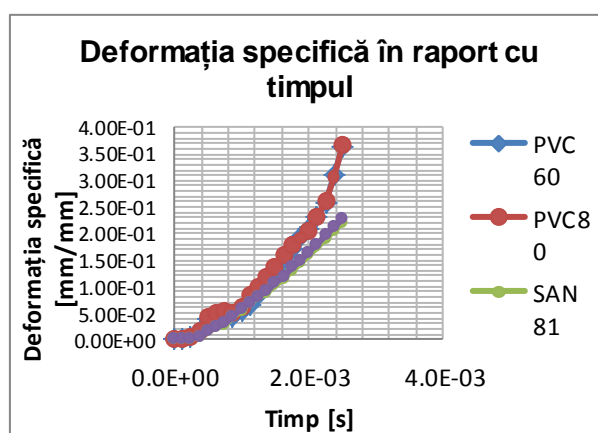


Figura 3.27 Deformația specifică în raport cu Timpul

Viteza totală a bilei este obținută pe durata efectivă a impactului bilă-placă, pentru fiecare caz în parte. Durata impactului se referă la calculul numeric și nu la durata din timpul experimentului. În figura 3.27 se observă că deformațiile specifice își păstrează variațiile aproximativ la același nivel în grafic, însă valorile mai ridicate se înregistrează pentru cazurile PVC 60kg/m³ și 80kg/m³.

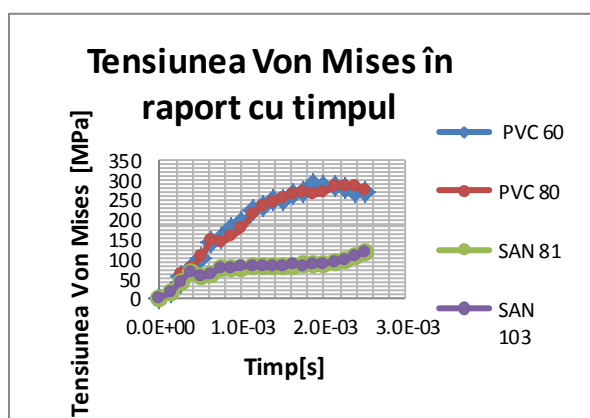


Figura 3.28 Tensiunea echivalentă în raport cu timpul

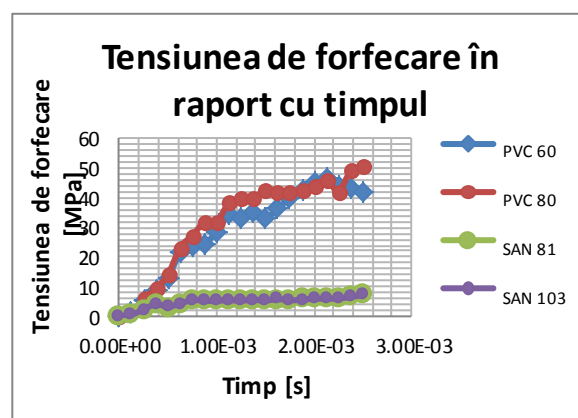


Figura 3.29 Tensiunea de forfecare în raport cu timpul

Tensiunile în acest caz sunt aproximativ egale pentru PVCFoam 60kg/m^3 și PVC Foam 80kg/m^3 . Tensiunile în cazurile SAN Foam 81kg/m^3 și SANFoam cu densitatea de 103kg/m^3 se situează mult mai jos în grafic, având valori mult mai mici.

În figura 3.29 sunt prezentate variațiile tensiunilor de forfecare, care au un comportament diferit pentru PVC cu densitățile de 60 kg/m^3 și 80 kg/m^3 . Variațiile înregistrează un salt în grafic, ceea ce înseamnă o tensiune de forfecare ridicată pentru fața superioară a plăcii. Acest lucru arată o rezistență mai slabă pentru aceste cazuri. Tensiuni mai mici se înregistrează pentru SAN Foam cu densitățile de 81 kg/m^3 respectiv 103 kg/m^3 .

3.12 Concluzii

1. S-a plecat de la analiza celulelor cu geometrii de tip: hexagon, circular și pătrat pentru a se stabili cum se comportă acestea la aplicarea unei forțe. Din calcule a rezultat că pentru miezul cu celule hexagonale s-au obținut cele mai bune rezultate, observându-se că volumul acesteia este mai mic decât celelalte celule analizate.
2. S-a efectuat analiza statică pentru următoarele tipuri de plăci sandwich: placă sandwich cu miez circular, hexagonal, pătrat și pătrat nestructurat. Din rezultate a reieșit că placa sandwich cu miez hexagonal a avut un comportament mai bun față de celelalte.
3. Pentru analiza dinamică a plăcilor sandwich cu diferite geometrii, deplasări mai mici au fost obținute pentru plăcile sandwich cu miez hexagonal și circular iar deplasări mai mari pentru plăcile sandwich cu miez pătrat și pătrat nestructurat.
4. Pentru toți parametrii studiați pentru plăcile sandwich cu miezuri din PVC cu densitățile de 60 și 80 kg/m^3 s-au obținut valori semnificativ crescute față de plăcile sandwich cu miezuri din SAN Foam 81 și 103 kg/m^3 , analizate la impact dinamic.
5. Plăcile sandwich de tip compozit structural au o comportare specifică, diferită de plăcile de tip sandwich obișnuit.
6. Rigiditatea plăcilor de tip sandwich compozit structural este mult mai mare decât rigiditatea fiecărei componente luată separat.
7. Rezistența de ansamblu a plăcilor de tip sandwich compozit structural este mult mai mare decât rezistența fiecărei componente luată separat.
8. Proiectarea unor structuri sau componente compozite avansate supuse la încercările dinamice necesită o înțelegere profundă a deteriorarilor și mecanismelor de degradare care apar în materialul compozit. În teza de față s-a efectuat o simulare numerică cu pachetul de analiza cu elemente finite Ansys a impactului cu viteză redusă pentru plăci sandwich cu fețe din țesătură din fibră de sticlă /lamine din rășină epoxidică cu miezuri din faguri din polipropilenă și SAN Foam (SAN-styrene acrylonitrile) cu densități de 81 kg/m^3 și 103 kg/m^3 și PVC cu densități de 60 kg/m^3 și 80kg/m^3 .
9. La caracteristicile mecanice prezentate mai sus se pot adăuga și caracteristici bune din punct de vedere al izolării termice și fonice.
10. În modelările numerice erorile de calcul pot apărea din cauza: geometriei modelului (nerespectarea dimensiunilor), problemelor de contact (dacă contactul dintre suprafețe nu se face corect, pot apărea diferențe mari la rezultatele finale), problemelor de discretizare (rafinarea prea fină a modelului poate dăuna, modelul rezultând de dimensiuni mari. În unele cazuri se face o rafinare prea fină a modelului, care poate afecta rezultatele finale. Așa-numitul "mesh refinement" (discretizare fină) dacă nu este făcut adecvat se poate ajunge la rezultate finale care pot diferi față de așteptări).
11. Rezolvarea problemei de contact s-a făcut ținând seama de următoarele caracteristici:
 - cele două suprafețe în contact nu se întrepătrund.
 - cele două suprafețe pot transmite forțe normale de compresiune și tangențiale;

- cele două suprafețe nu transmit forțe normale de întindere.
- 12. Probleme de discretizare. În unele cazuri se face o rafinare prea fină a modelului, care poate afecta rezultatele finale. Asa-numitul "mesh refinement" (discretizare fină) dacă nu este făcut adecvat se poate ajunge la rezultate finale care pot diferi față de așteptări.
- 13. Pentru rezultate optime trebuie respectate remarcile enumerate mai sus. Pe de altă parte și parametrii aleși contează în obținerea unor rezultate corecte.
- 14. Alegerea materialelor pentru plăcile de tip sandwich necesită o atenție deosebită deoarece rezultatul final trebuie să facă diferența dintre un material simplu (izotrop și omogen) și cele stratificate sau sandwich, luate împreună.
- 15. Condiții de fixare. Trebuie să se respecte modalitățile adecvate de legătură cu restul structurii.
- 16. Analiza la impact se poate realiza și pentru alte viteze (mai mari sau mai mici) obținându-se alte energii cinetice corespunzătoare. Acest lucru ajută la observarea stărilor de deplasări și tensiuni ce apar în placa sandwich, și de asemenea pentru a observa comportamentul fețelor și miezurilor.
- 17. Parametrii calculați în ANSYS, sunt obținuți pentru durata de impact de 2.5ms (o parte a duratei de impact), pentru toate specițiile de placă. Valorile deplasărilor nu sunt semnificative pentru fenomenele dinamice de impact. Cel mai important parametru este energia absorbită de fiecare placă, care constituie scopul pentru care se fac analizele în această teză.
- 18. Se poate varia timpul de lovire care, de asemenea, poate influența valorile deplasărilor deformațiilor și tensiunilor din placă. De asemenea, tipului de impact influențează modul de deformare a fețelor și miezului. Având viteză mică și timp scurt, atunci și deplasările, deformațiile și tensiunile vor fi mici.
- 19. Rezistența la impact a unei plăci de tip sandwich este cu atât mai mare cu cât aceasta are mai multe celule în volumul său.

CAPITOLUL 4 ANALIZA STATICĂ ȘI DINAMICĂ A PLĂCILOR SANDWICH

4.1 Introducere

Modelarea geometrică a structurilor de tip fagure necesită o atenție deosebită pentru a alege o bună procedură pentru calculul cu elemente finite, care să conducă la o optimă interacțiune între modelarea geometrică și modelarea FEM. Geometria impune modelul FEM pretabil iar cerințele de modelare FEM afectează modelul geometric. Există trei căi de a modela o structură de tip sandwich cu inima de tip fagure:

1. Modelare 3D Full, care utilizează elemente de volum (Solid)
2. Modelarea cu elemente Shell (elemente de placă)
3. Modelarea mixtă (Shell și Solid)

4.1.1 Calculul static. Modelarea cu elemente de tip Solid

S-au modelat cu elemente de solid 10 plăci sandwich cu grosimi de miezuri diferite și solicitate cu diferite forțe, respectiv: 8.3, 14.95, 38.95, 53.55 [N]. Aceste cazuri vor fi analizate și experimental în capitolul 5.

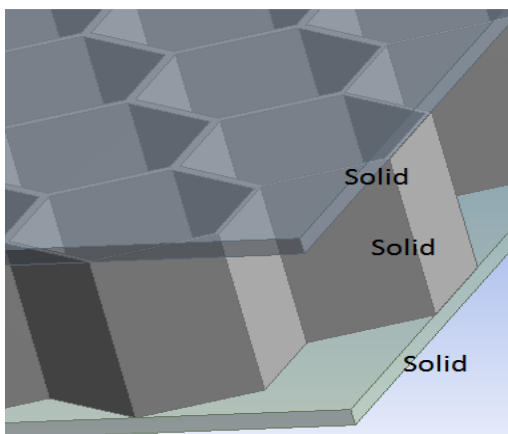


Figura 4.1 Modelarea cu elemente de solid a plăcii tip sandwich cu miez de tip fagure

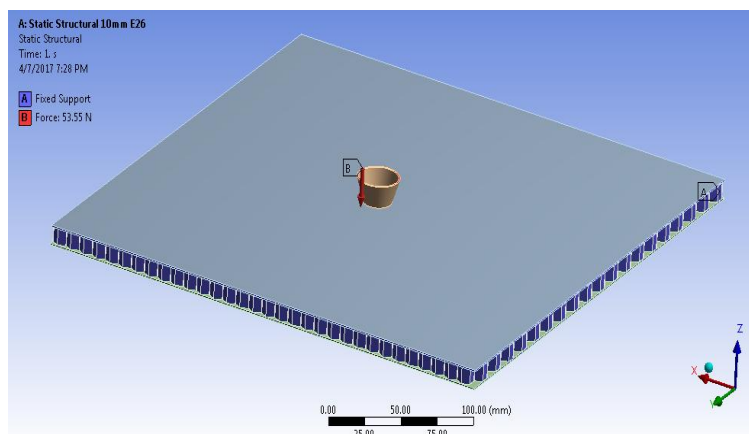


Figura 4.2 Aplicarea forței concentrate și legaturile de tip încastrare pe contur a plăcii sandwich compozit

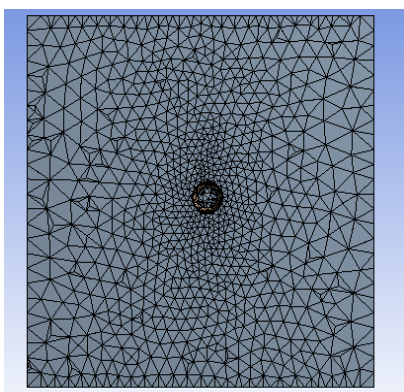


Figura 4.3 Discretizarea cu elemente triunghiulare a învelisului

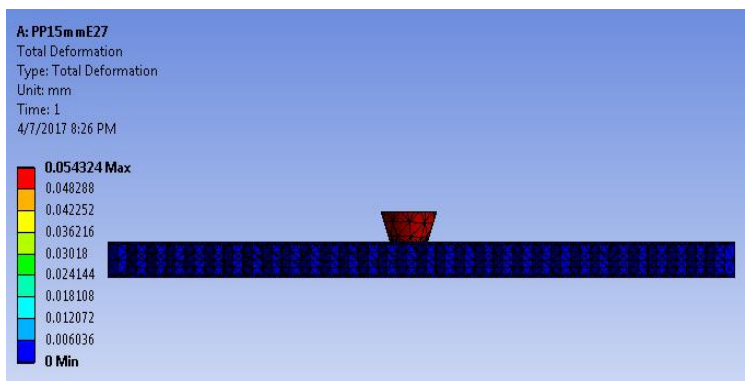


Figura 4.4 Harta deformațiilor totale pentru grosimea miezului de 15mm.

Analiza cu elemente finite s-a efectuat utilizând elemente de solid de formă prisma triunghiulară cât și pătrată.

Tabelul 4.1 Rezultatele analizei statice a plăcilor sandwich cu elemente de Solid

Nr. crt	Cazuri cu Solid	U.M. pentru deplasare	Forțe			
			8.3N	14.95N	38.95N	53.55N
1	SP10/0.2x5	[mm]	0.01203	0.02168	0.05648	0.07765
2	SP10/0.33x3	[mm]	0.01215	0.02189	0.05703	0.07841
3	SP15/0.2x5	[mm]	0.00842	0.01516	0.03951	0.05432
4	SP15/0.33x3	[mm]	0.00848	0.01528	0.03982	0.05475
5	SP20/0.2x5	[mm]	0.00127	0.01152	0.03003	0.04128
6	SP20/0.33x3	[mm]	0.00643	0.01159	0.03021	0.04153
7	SP28/0.2x5	[mm]	0.00486	0.00876	0.02282	0.03137
8	SP28/0.33x3	[mm]	0.00488	0.00880	0.02292	0.03152
9	SF20/0.2x5	[mm]	0.00766	0.01380	0.03595	0.04942
10	SF20/0.33x3	[mm]	0.00770	0.01387	0.03615	0.04971

4.1.2 Calculul static. Modelarea Mixtă Shell-Solid-Shell

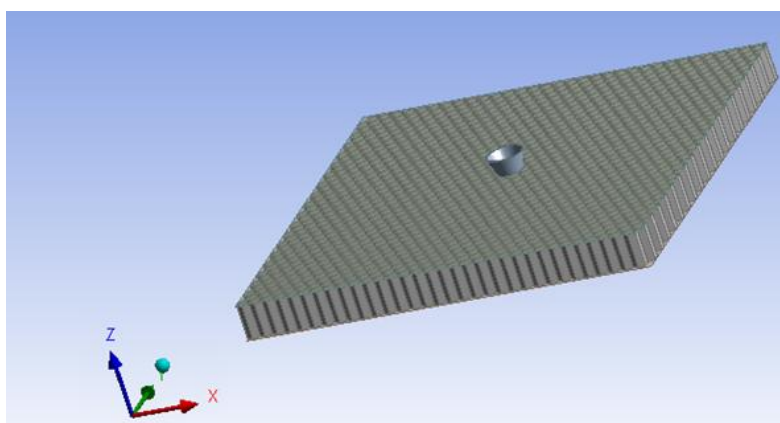
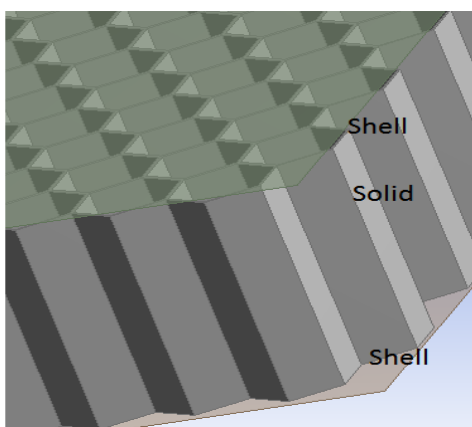


Figura 4.5 Modelarea plăcii sandwich compozit cu elemente mixte de tip Shell-Solid-Shell

Figura 4.6 Geometria plăcii sandwich compozit

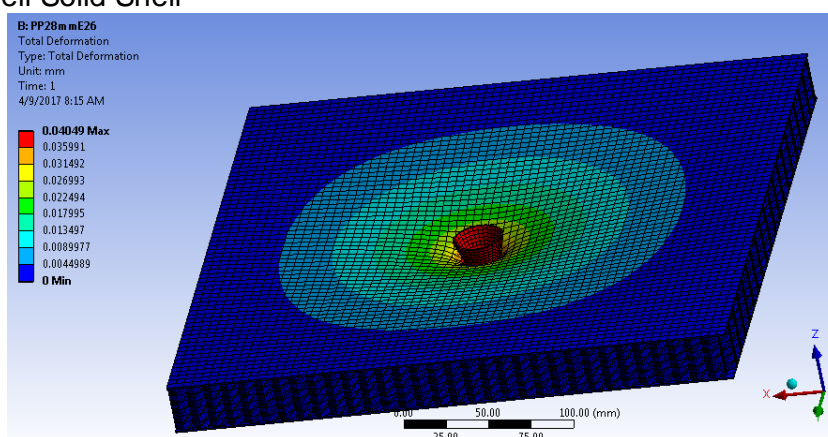


Figura 4.7 Harta deformațiilor pentru placa sandwich cu grosimea miezului de 28 mm

Tabelul 4.2 Rezultatele analizei plăcilor sandwich cu elemente Shell Solid Shell

Nr. crt	Cazuri cu Solid	U.M. pentru deplasare	Forțe			
			8.3N	14.95N	38.95N	53.55N
1	SP10/0.2x5	[mm]	0.014	0.02932	0.079	0.1206
2	SP10/0.33x3	[mm]	0.015	0.035	0.062	0.1217
3	SP15/0.2x5	[mm]	0.017	0.02106	0.0544	0.0750
4	SP15/0.33x3	[mm]	0.018	0.02108	0.0549	0.0755
5	SP20/0.2x5	[mm]	0.007	0.015	0.0339	0.0553
6	SP20/0.33x3	[mm]	0.008	0.013	0.0335	0.0556
7	SP28/0.2x5	[mm]	0.0069	0.019	0.0293	0.0403
8	SP28/0.33x3	[mm]	0.0068	0.013	0.0295	0.0405
9	SF20/0.2x5	[mm]	0.00915	0.01648	0.042934	0.0593
10	SF20/0.33x3	[mm]	0.00916	0.01649	0.04298	0.0591

4.2 Materialele și proprietățile geometrice ale structurilor de tip sandwich (fagure și spume)

Rășinile epoxidice fac parte dintr-o familie largă de materiale care conțin o grupă funcțională reactivă a acestora - structura moleculară. Rășinile epoxidice prezintă cele mai bune caracteristici dintre toate rășinile utilizate în industria marină. Aplicațiile aerospațiale folosesc rășinile epoxidice aproape exclusiv, cu excepția cazurilor când performanța la temperatură ridicată este critică. Costul ridicat al rășinilor epoxidice și solicitările mari au limitat utilizarea lor pentru structuri marine de mari dimensiuni. În acest capitol se vor analiza la impact zece plăci de tip sandwich compozit. Pentru stabilirea caracteristicilor de material pentru fețe cât și pentru miezuri s-au efectuat o serie de încercări și calcule dar s-a apelat și la cercetări bibliografice de specialitate pentru anumiți parametri care nu au putut fi determinați cu dotările din laboratorul de încercări deoarece necesită încercări mult mai complexe. Proprietățile de material din tabelul 4.3 au fost determinate experimental în capitolul 5 dar și calculate cu ajutorul softului Ansys ACP. Astfel s-au determinat modulele de elasticitate E_1, E_2 experimental și au fost comparate cu calculul din modelarea cu elemente finite și rezultatele sunt foarte bune. Celelalte caracteristici au fost luate din literatura de specialitate respectiv biblioteca ANSYS și din Gama [78].

Tabelul 4.3 Parametrii de material pentru fețele compozitului

Proprietăți, Unități de măsură	E-Glass/Epoxy (5 straturi)	E-Glass/Epoxy (3 straturi)
Modulul de elasticitate E_1 , MPa	27800	26800
Modul de elasticitate E_2 , MPa	27800	26800
Modul de elasticitate E_3 , MPa	11800	11800
Coeficientul lui Poisson, ν_{21}	0.11	0.11
Coeficientul lui Poisson, ν_{31}	0.18	0.18
Coeficientul lui Poisson, ν_{32}	0.18	0.18
Modulul de elasticitate transversal G_{12} , MPa	5000	5000
Modulul de elasticitate transversal G_{23} , MPa	3557	3451
Modulul de elasticitate transversal G_{31} , MPa	3557	3451
Limitele tensiunilor		
Rezistența de rupere la întindere pe direcția x, MPa	1100	1100
Rezistența de rupere la întindere pe direcția y, MPa	1100	1100
Rezistența de rupere la întindere pe direcția z, MPa	35	35
Rezistența de rupere la compresiune pe direcția x, MPa	-675	-675

Rezistența de rupere la compresiune pe direcția y, MPa	-675	-675
Rezistența de rupere la compresiune pe direcția z, MPa	-120	-120
Rezistența la forfecare pe direcția xy, MPa	46.154	46.154
Rezistența la forfecare pe direcția yz, MPa	80	80
Rezistența la forfecare pe direcția xz, MPa	80	80
Limitele deformației specifice		
Deformația specifică la rupere pe direcția x, MPa	0.0244	0.0244
Deformația specifică la rupere pe direcția y, MPa	0.0244	0.0244
Deformația specifică la rupere pe direcția z, MPa	0.0035	0.0035
Deformația specifică la compresiune x, MPa	-0.015	-0.015
Deformația specifică la compresiune y, MPa	-0.015	-0.015
Deformația specifică la compresiune z, MPa	-0.012	-0.012
Deformația specifică la forfecare pe direcția xy, MPa	-0.016	-0.016
Deformația specifică la forfecare pe direcția yz, MPa	-0.016	-0.016
Deformația specifică la forfecare pe direcția xz, MPa	-0.012	-0.012
Constante Tsai -Wu		
Cuplu xy	-1	-1
Cuplu yz	-1	-1
Cuplu xz	-1	-1

4.3. Verificarea proprietăților de material pe baza calculului de rigiditate al plăcii

S-au verificat rezultatele pentru E1 și E2 calculate cu software-ul Ansys ACP și apoi s-au comparat cu rezultatele experimentale.

Pentru epruveta 1 cu 0,33mm x3 straturi, unde E=26,9 [GPa]

S-au obținut proprietățile:

Modulul de elasticitate transversal = 5 [GPa]

Modulul de elasticitate longitudinal E1 = 26.780 [GPa]

Modulul de elasticitate longitudinal E2 = 26.780 [GPa]

Rigiditatea laminatului la forfecare G12 = 5.000 [GPa]

Rigiditatea laminatului E1 = 26.780 [GPa]

Rigiditatea laminatului E2 = 26.780 [GPa]

Forfecare în afara planului G23 = 3.451 [GPa]

Forfecare în afara planului G31 = 3.451 [GPa]

Factor de corecție de forfecare k44 (G23) = 0.78

Factor de corecție de forfecare k55 (G31) = 0.78

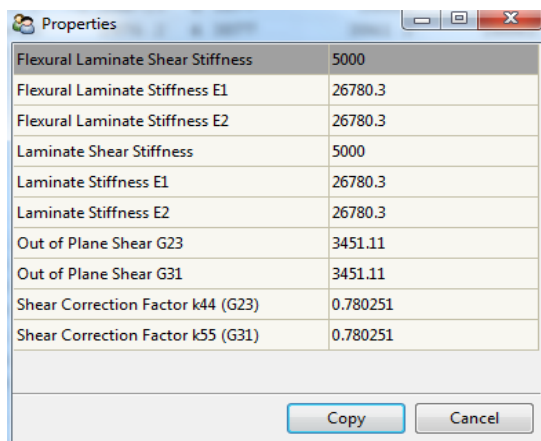


Figura 4.8 Proprietățile de material extrase din soft-ul Ansys ACP

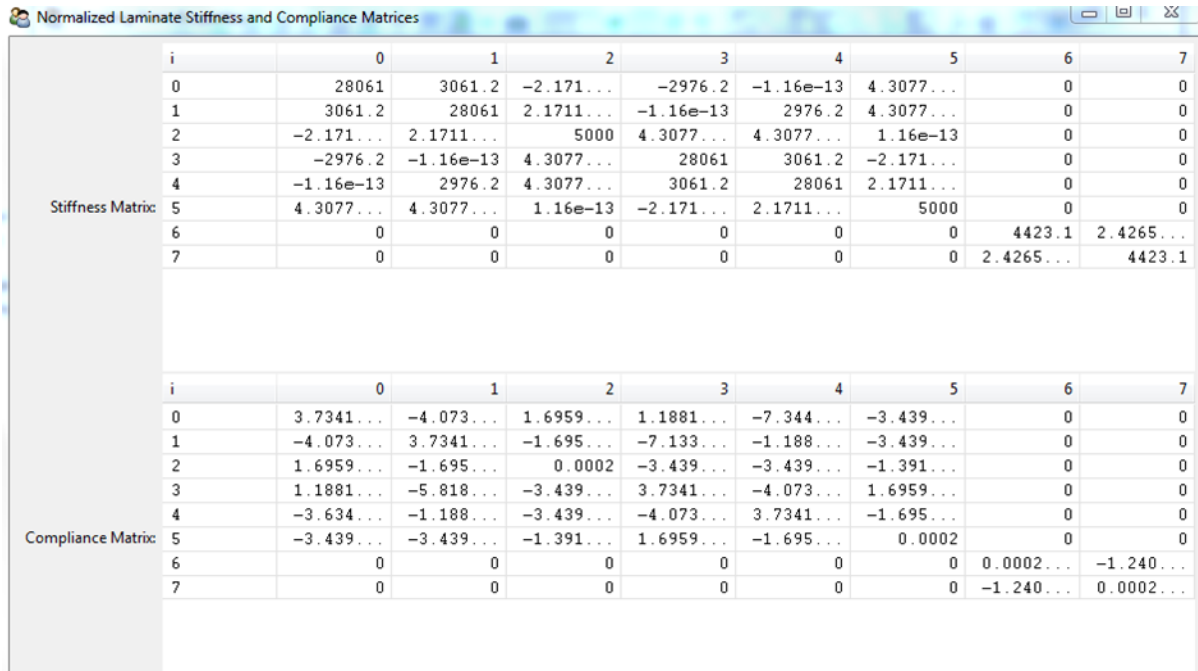


Figura 4.9 Matricea de rigiditate și matricea complianțelor pentru compozitul cu trei straturi

În figura 4.9 sunt reprezentate matricile de rigiditate și matricea complianțelor pentru compozitul cu trei straturi cu grosimea unui strat de 0,33 [mm] și orientările laminelor la [0-90] de grade. Materialul ortotrop este caracterizat de 9 constante, respectiv $E_1, E_2, E_3, u_1, u_2, u_3, G_{12}, G_{23}, G_{31}$. Legătura dintre deformații specifice și tensiuni este realizată de matricea complianțelor.

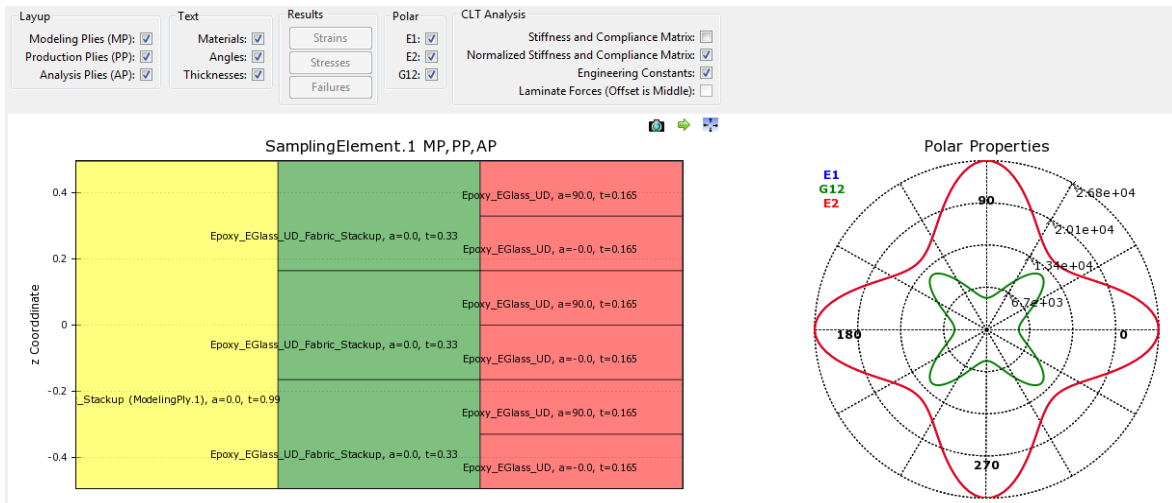


Figura 4.10 Reprezentarea proprietăților celor 3 straturi ale materialului compozit

Figura 4.10 ilustrează proprietățile elastice ale diferitelor straturi, dar într-o diagramă polară. Diagramele polare ne permit să vizualizăm modul în care se schimbă proprietățile la variațiile unghiului de testare. Comparând valorile caracteristicilor de material obținute din experimente, din literatura de specialitate și verificarea calculului cu Ansys) rezulta o concordanță deplină a lor. Proprietățile țesăturii, cu orientările longitudinale și transversale (E_1 și E_2) sunt aceleași două proprietăți numai că sunt suprapuse în diagrama polară din figură. E_1 poate fi înțeleasă ca E (modulul de elasticitate) pe direcția fibrei (sau în direcția de zero grade) și E_2 ca transversal față de direcția fibrei (orientare la 90 de grade). G_{12} este

modulul de forfecare in plan. Raza reprezintă valorile modului, în MPa [79]. În [80] și [81] au fost publicate rezultatele comparative pentru calculul numeric și experimental pentru plăci sandwich cu miez din polistiren și polipropilenă. În lucrarea din [82] s-au găsit proprietăți pentru fețele compozitului. Acestea sunt redată mai jos:

Tabelul 4.4 Proprietățile mecanice ale fețelor compozitului din [82]

Modulul de elasticitate	[MPa]	Modul de elasticitate transversal	[MPa]	Coeficientul lui Poisson	(-)
E_1	26000	G_{12}	3800	ν_{12}	0.1
E_2	26000	G_{23}	2800	ν_{13}	0.25
E_3	8000	G_{13}	2800	ν_{23}	0.25
Rezistența de rupere la întindere	[MPa]	Rezistența de rupere la compresiune	[MPa]	Rezistența la forfecare	[MPa]
X_T	850 (414)	X_C	720 (458)	S_{12}	105
Y_T	850 (414)	Y_C	720 (458)	S_{13}	65
Z_T	120	Z_C	500	S_{23}	65
Tensiunea normală interlaminară la rupere		[MPa]	Tensiunea de forfecare interlaminară la rupere		[MPa]
$NFLS$		35	$SFLS$		65

Astfel pentru epruveta 2 (5 straturi cu grosimea de 0,2 [mm] fiecare) unde $E=27,8$ [GPa], s-au obținut proprietățile:

Modulul de elasticitate transversal = 5000.0 [MPa]

Modulul de elasticitate longitudinal $E_1 = 27.386$ [GPa]

Modulul de elasticitate longitudinal $E_2 = 27.386$ [GPa]

Modulul de elasticitate la forfecare $G_{12} = 5$ [GPa]

Forfecare în afara planului $G_{23} = 3.557$ [GPa]

Forfecare în afara planului $G_{31} = 3.557$ [GPa]

Factor de corecție de forfecare $k_{44} (G_{23}) = 0.8041$

Factor de corecție de forfecare $k_{55} (G_{31}) = 0.8041$

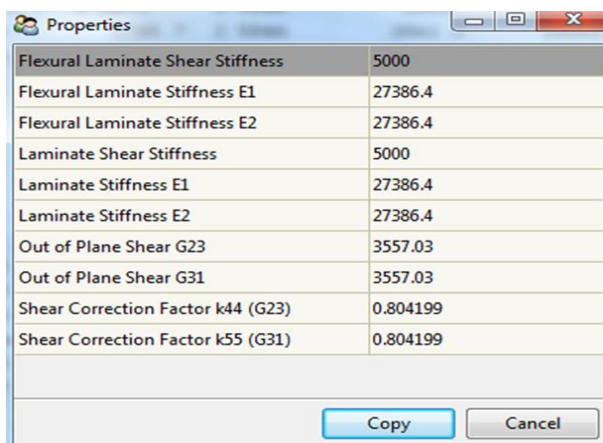


Figura 4.11 Proprietățile de material extrase din soft-ul Ansys ACP pentru materialul compozit cu 5 straturi

	i	0	1	2	3	4	5	6	7
Stiffness Matrix:	0	28061	3061.2	-2.171...	-1785.7	4.5475...	2.5846...	0	0
	1	3061.2	28061	2.1711...	4.5475...	1785.7	2.5846...	0	0
	2	-2.171...	2.1711...	5000	2.5846...	2.5846...	3.4106...	0	0
	3	-1785.7	4.5475...	2.5846...	28061	3061.2	-2.171...	0	0
	4	4.5475...	1785.7	2.5846...	3061.2	28061	2.1711...	0	0
	5	2.5846...	2.5846...	3.4106...	-2.171...	2.1711...	5000	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	4423.1	2.4265...
	7	0	0	0	0	0	0	2.4265...	4423.1
Compliance Matrix:	i	0	1	2	3	4	5	6	7
	0	3.6515...	-3.983...	1.7225...	6.971e-06	3.5855...	-2.017...	0	0
	1	-3.983...	3.6515...	-1.722...	3.5211...	-6.971...	-2.017...	0	0
	2	1.7225...	-1.722...	0.0002	-2.017...	-2.017...	-4.092...	0	0
	3	6.971e-06	3.5676...	-2.017...	3.6515...	-3.983...	1.7225...	0	0
	4	3.5329...	-6.971...	-2.017...	-3.983...	3.6515...	-1.722...	0	0
	5	-2.017...	-2.017...	-4.092...	1.7225...	-1.722...	0.0002	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0.0002...	-1.240...
7	0	0	0	0	0	0	-1.240...	0.0002...	

Figura 4.12 Matricea de rigiditate și matricea complianțelor pentru materialul compozit cu 5 straturi

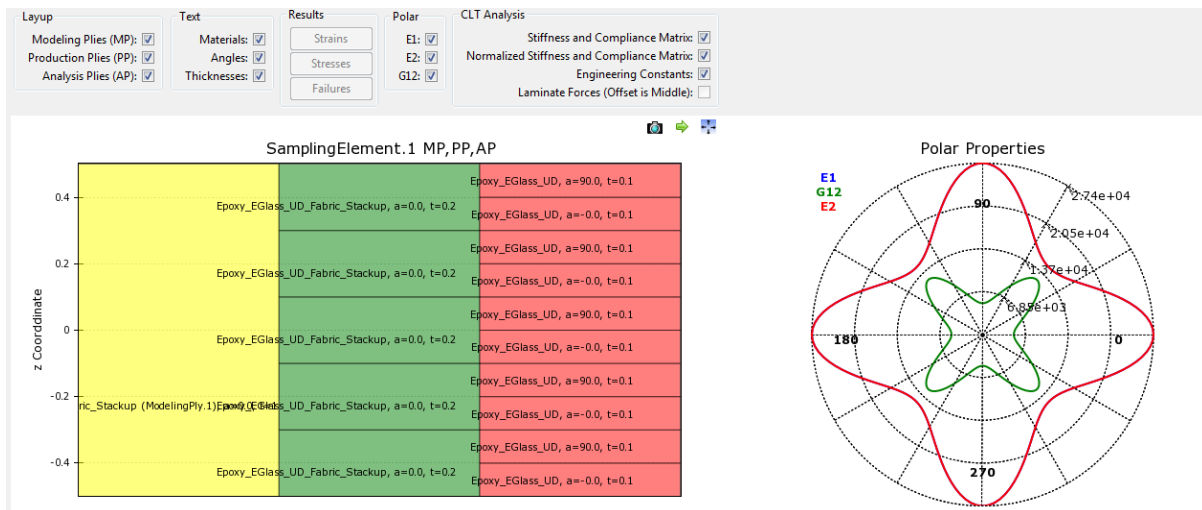


Figura 4.13 Reprezentarea proprietăților celor 5 straturi ale materialului compozit

Tabelul 4.5 Proprietățile mecanice ale bilei din oțel

Proprietăți	Bila din Oțel
Densitatea [kg/m ³]	1750
Proprietăți izotrop-elastice	
Modulul lui Young [MPa]	2x10 ⁵
Coefficientul lui Poisson	0,3

4.4 Modelarea la impact a plăcilor sandwich

S-au modelat numeric 10 plăci sandwich cu geometrii diferite ale miezului. Miezurile sunt de tip fagure cu celule hexagonale din polipropilenă și grosimi de 10, 15, 20 și 28 mm. Alte două plăci au miezul confecționat din polistiren extrudat cu grosime de 20 mm. Fețele sunt confecționate din rășină epoxidică armată cu fibre de sticlă, cu grosimea totală de 1mm.

Acestea sunt de două tipuri: cu 3 straturi (grosimea stratului fibrei de 0.33mm) și cu 5 straturi (grosimea de 0.2mm). Parametrii de intrare pentru calculul la impact sunt:

- Distanța de cădere a bilei este de 1180 [mm]
- Viteza bilei din oțel în toate cazurile este $v=4.85$ [m/s]
- Masa bilei este $m=5$ [kg]
- Diametrul bilei este de 106 [mm].
- Latura plăcii sandwich pătrate este de 340 [mm].
- Caracteristicile polipropilenei utilizate la aceste simulări sunt prezentate în tabelul 3.1.

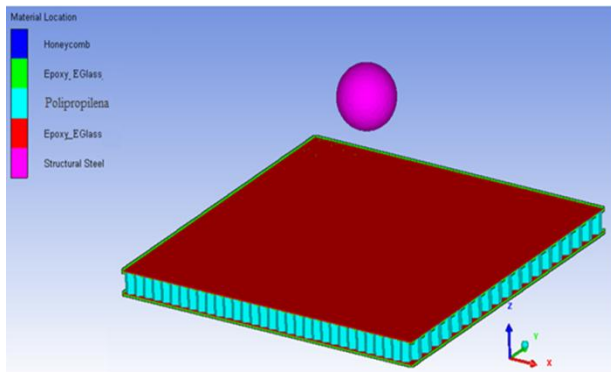


Figura 4.14 Geometria plăcii sandwich compozit pentru modelarea la impact

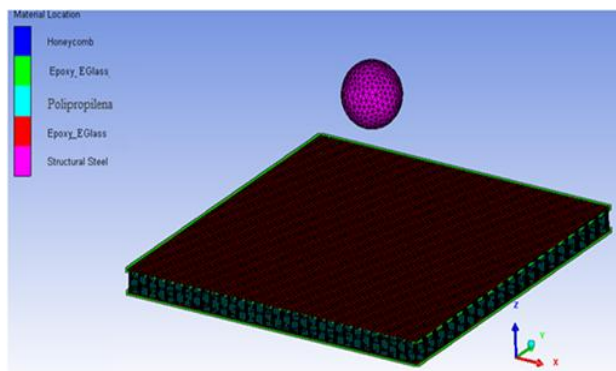


Figura 4.15 Reteaua de discretizarea modelului: placă - bilă

4.5 Rezultatele modelării la impact pentru cele 10 plăci sandwich analizate

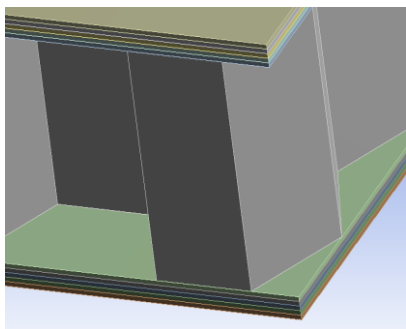


Figura 4.4 Placa cu fețe cu 5 straturi

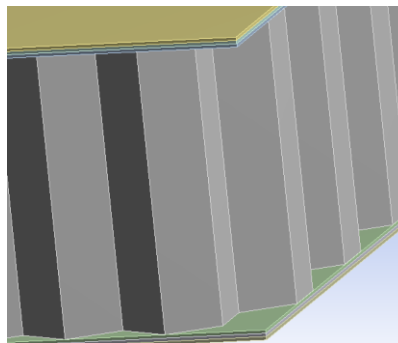


Figura 4.17 Placa cu fețe cu trei straturi

În Tabelul 4.6 sunt prezentați parametrii calculați în ANSYS, obținuți pentru durata de impact de 2.5ms (o parte a duratei de impact), pentru cele 10 specimene de placă. În figurile 4.18 și 4.19 sunt prezentate variațiile deplasării maxime obținute pentru cele 10 cazuri analizate. Aceleași valori se regăsesc și în coloanele 3 (pentru fața superioară) și 4 (pentru fața inferioară) din Tabelul 4.6. Valorile deplasărilor nu sunt semnificative pentru fenomenele dinamice. Cel mai important parametru este energia absorbită de fiecare placă, care constituie scopul pentru care se fac analizele în această teză. Din motive tehnice, calculul nu a putut fi finalizat până la consumarea totală a impactului, iar energia absorbită la impact nu a putut fi calculată pentru toată durata fenomenului, valoarea totală determinându-se în cadrul experimentelor.

Tabelul 4.6 Parametri calculați în ANSYS

Nr. crt	Specimene	Deplasarea totală măsurată pe fața superioară [mm]	Deplasarea totală măsurată pe fața inferioară [mm]	Deformația specifică [mm/mm]	Tensiunea von Mises [MPa]	Tensiunea de forfecare [MPa]	Viteza bilei [mm/s]
1	SP10/0.2x5	11.243	8.9857	0.034	395.97	88.296	3681.4
2	SP10/0.33x3	11.253	9.0028	0.034	388.15	87.447	3694
3	SP15/0.2x5	10.984	8.0926	0.065	430.62	93.687	3417.5
4	SP15/0.33x3	10.995	8.0868	0.065	421.95	92.744	3430
5	SP20/0.2x5	7.4766	4.4298	0.669	363.5	83.126	4225.3
6	SP20/0.33x3	7.5688	4.4983	0.651	359.69	82.922	4211.5
7	SP28/0.2x5	6.3542	2.5234	0.274	343.66	84.015	4403.4
8	SP28/0.33x3	6.2925	2.5150	0.282	337.62	83.265	4407.5
9	SF20/0.2x5	12.667	7.5634	0.014	410.03	69.448	3545.2
10	SF20/0.33x3	11.758	8.304	0.009	257.15	34.554	

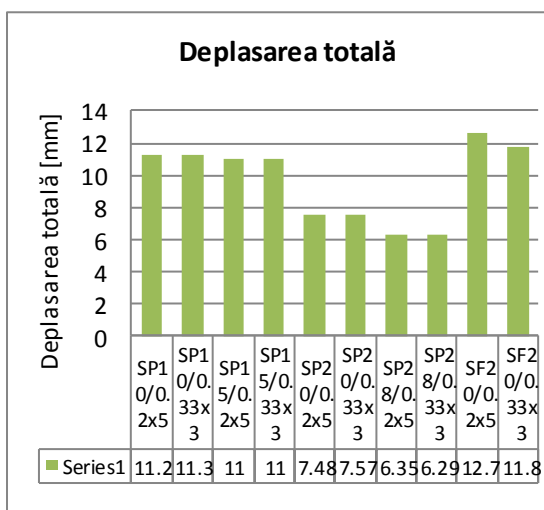


Figura 4.5 Deplasarea totală pentru cele 10 cazuri analizate

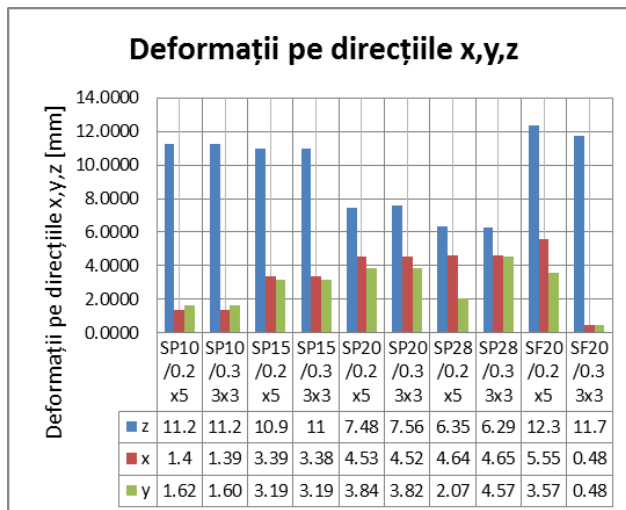


Figura 4.19 Deplasările pe direcția "z" de cădere a bilei

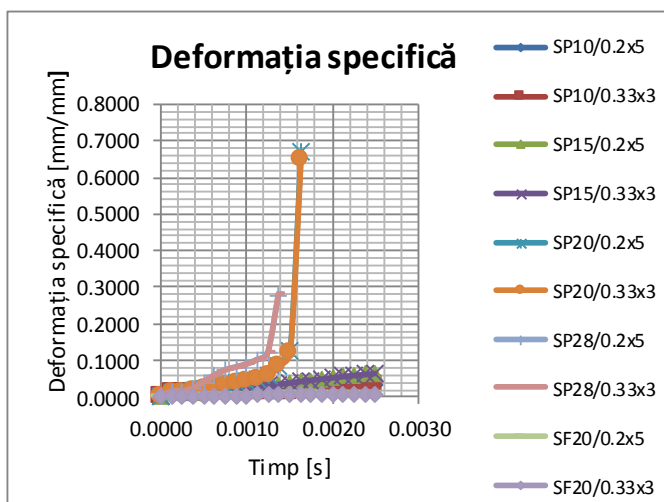


Figura 4.20 Deformațiile specifice pentru cele 10 cazuri analizate

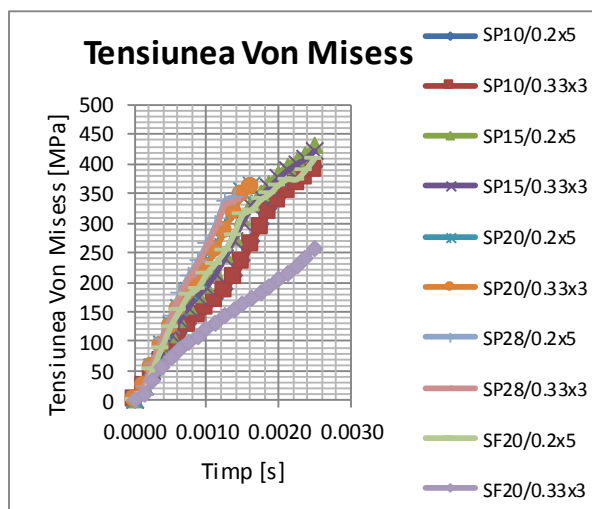


Figura 4.21 Tensiunile Von Mises pentru cele 10 cazuri analizate

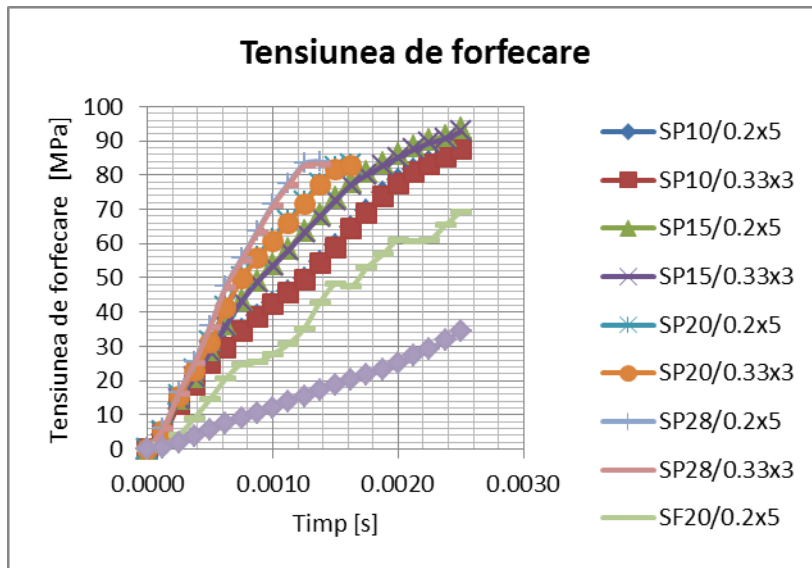


Figura 4.22 Tensiunile de forfecare pentru cele 10 plăci sandwich

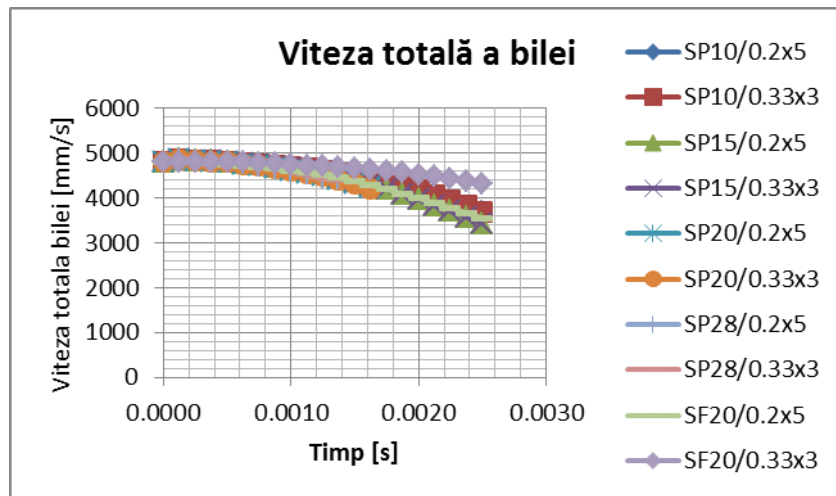


Figura 4.23 Vitezele totale ale bilei

Viteza totală = viteza bilei în timpul deplasării prin sandwich.

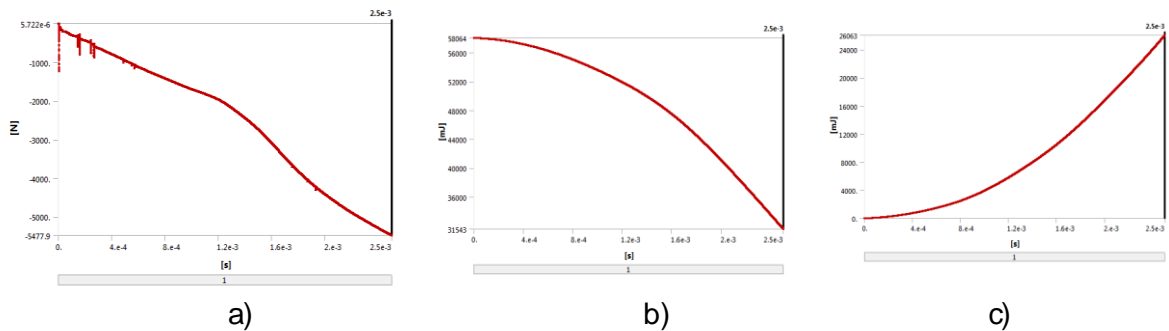


Figura 4.6 a) Graficul forței de contact, b) Graficul Energiei cinetice, c) Graficul Energiei interne, pentru placa sandwich SP10/0.33x3

Tabelul 4.6 Parametrii obținuți prin modelare cu elemente finite

Nr. crt	Specimenul de placă	Forța de contact [N]	Energia cinetică [mJ]	Energia internă [mJ]
1	SP10/0.2x5	5538.2	58064	26324
2	SP10/0.33x3	5477.9	58064	26063
3	SP15/0.2x5	6277	58064	31754
4	SP15/0.33x3	6202.3	58064	31514
5	SP20/0.2x5	4924.1	58064	20569
6	SP20/0.33x3	4951.4	58064	20839
7	SP28/0.2x5	4016.3	58064	16746
8	SP28/0.33x3	3971.9	58064	16689
9	SF20/0.2x5	4990	58064	26386
10	SF20/0.33x3	2343.2	58064	20865

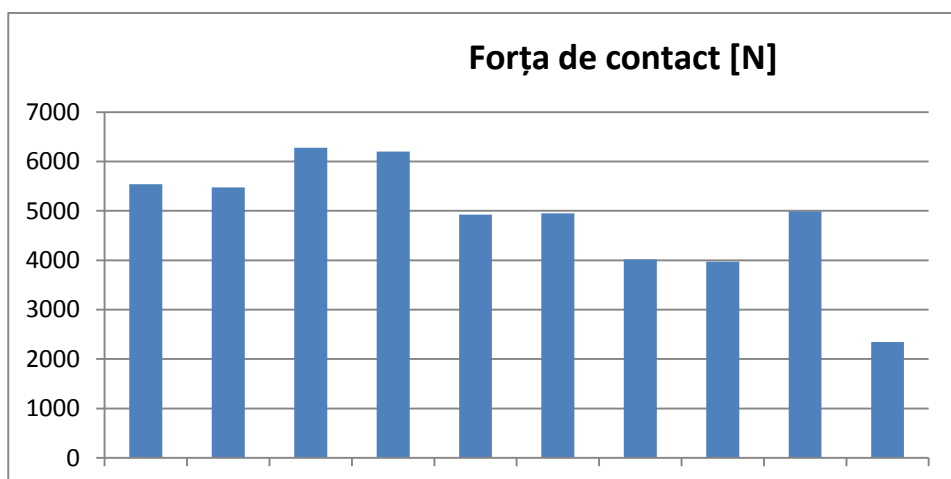


Figura 4.7 Graficul forțelor de contact pentru fiecare tip de placă

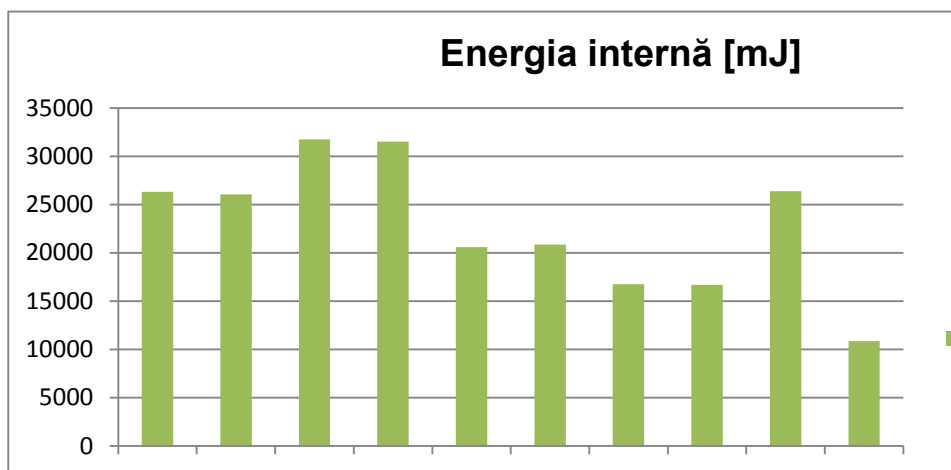


Figura 4.8 Graficul energiilor interne pentru fiecare tip de placă

4.6 Concluzii

S-au studiat static 10 tipuri de plăci cu elemente de solid respectiv Solid-Solid-Solid, mixt cu elemente Shell-Solid-Shell;

S-au determinat caracteristicile de material pentru fețele din compozitul format din rășină epoxidică și fibre de sticlă;

S-a modelat impactul dinamic pentru plăcile sandwich cu elemente de Solid pentru a determina parametrii cei mai importanți respectiv:

Deformația totală, proiecțiile deformațiilor pe cele trei direcții x,y,z, tensiunea echivalentă von Mises, deformațiile specifice, tensiunile de forfecare, vitezele totale ale bilei, forțele de contact maxime, energiile interne, energia cinetică.

Calculul s-a efectuat pentru durata a 2.5ms.

Scopul calculului a fost determinarea comportării fiecărui tip de material utilizat pentru plăcile de tip sandwich, astfel încât să se determine cea mai bună configurație și cel mai pretabil tip de material pentru solicitarea de impact. Din motive tehnice, analiza fenomenului s-a efectuat în 2.5ms (o parte din durata totală a fenomenului). Din analiza graficelor, se poate observa tendința fiecărei configurații, astfel încât să poată fi anticipată comportarea specișenelor de placă tip sandwich, pentru ca în final să fie luată o decizie din acest punct de vedere. Rezultatele obținute în acest calcul au putut fi comparate cu cele obținute în experimente, obținându-se pentru eșantionul de 2.5ms o bună concordanță. Pe baza acestei comparații se poate concluziona faptul ca anticiparea comportării plăcilor până la finalul fenomenului de impact în calculul numeric este justificată.

Metodologia utilizată poate fi aplicată și în proiectare, astfel încât se poate face economie de timp de calcul, doar în etapa de alegere a materialului și configurației plăcii de tip sandwich.

În figura 4.18 sunt prezentate deplasările totale apărute în urma impactului cu bila, obținându-se valori predictibile mai bune pentru plăcile sandwich cu grosimile miezului de 28 mm, respectiv specișenele SP28/0.2x5 și SP28/0.33x3.

Deplasările pe cele trei direcții x, y, z sunt prezentate în figura 4.19, unde direcția z este direcția de cădere a bilei.

Deformațiile specifice cele mai bune s-au obținut pentru spumele polistirenice respectiv specișenele SF20/0.33x3 și SF20/0.2x5 figura 4.20. Rezistență bună s-a obținut pentru specișenele SF20/0.33x3 cu valoarea tensiunii de 257.15 MPa, SP28/0.2x5 343.66 MPa și SP28/0.33x3 cu valoarea de 337.62 MPa din figura 4.21.

Problematika efectelor de forfecare într-o structură marină este foarte importantă pentru că aceeași structură poate răspunde diferit atunci când este supusă sarcinilor inclinate față de normala la placa. Unghiul de încărcare nu a fost studiat aici ci s-a luat în considerare doar forța normală pe suprafața plăcii sandwich. În figura 4.22 se observă că tensiunile de forfecare sunt mai mari pentru plăcile sandwich cu grosimile de miez din polipropilenă de 15 mm urmând cele de 10 mm iar valori mai bune sunt obținute pentru placile de tip sandwich cu miez din spume polistirenice.

4.7 Calculul la impact al plăcii SP10/0,2x5

În acest subcapitol s-a analizat la impact placa SP10/0,2x5, utilizându-se un calculator de tipul HP workstation (workframe) XW6200, cu următoarele proprietăți:

- procesor Intel (R) Xeon (TM), CPU 2,8 GH (2 procesoare);
- memorie RAM 8 GB;
- tipul sistemului de operare: 64 biti;
- timpul fizic de calcul pentru această modelare a fost de 277 de ore pe acest tip de calculator.

Această modelare a avut aceeași parametri ca și precedentele modelări din acest capitol, schimbându-se numai timpul de contact de la 0,002 secunde la 0,02 secunde așa cum se poate observa în figura 4.27.

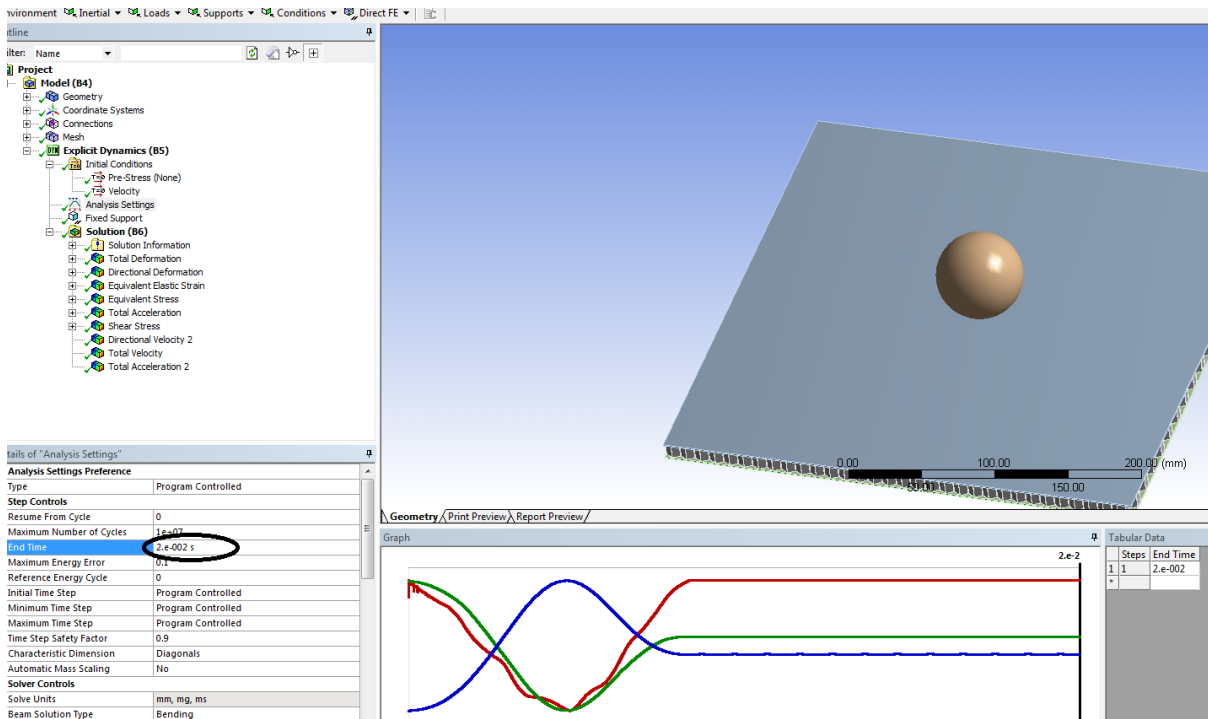


Figura 4.27 Timpul de contact pentru placa sandwich SP10/0,2x5 este de 0,02s

4.7.1 Rezultatele obținute

Variația în timp a energiei interne este arătată în figura 4.28.

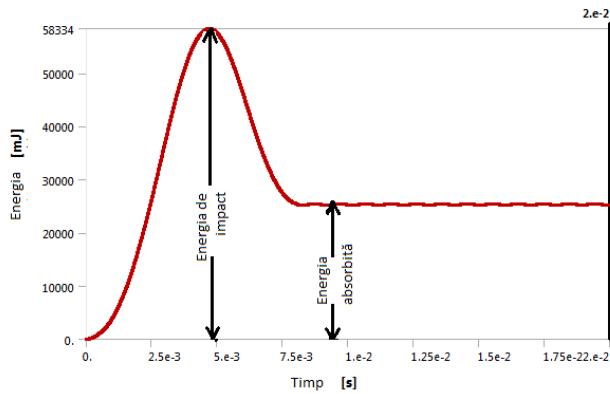


Figura 4.28 Curba energie-timp de impact pentru placa sandwich compozit SP10/0,2X5.

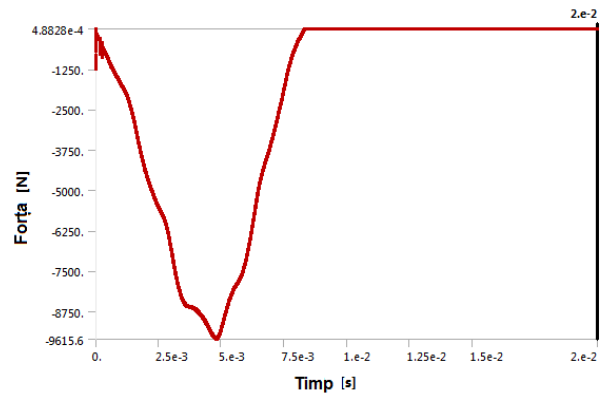


Figura 4.29 Curba forță – timp de impact pentru placa sandwich compozit SP10/0,2x5.

După cum se poate observă, energia de impact (numită și energie internă) pentru acest caz este 58334 mJ. Energia absorbită rezultată este 25255 mJ.

Forța maximă de contact este obținută la vârful curbei având valoarea de 9,6156kN, așa cum se poate observa în figura 4.29.

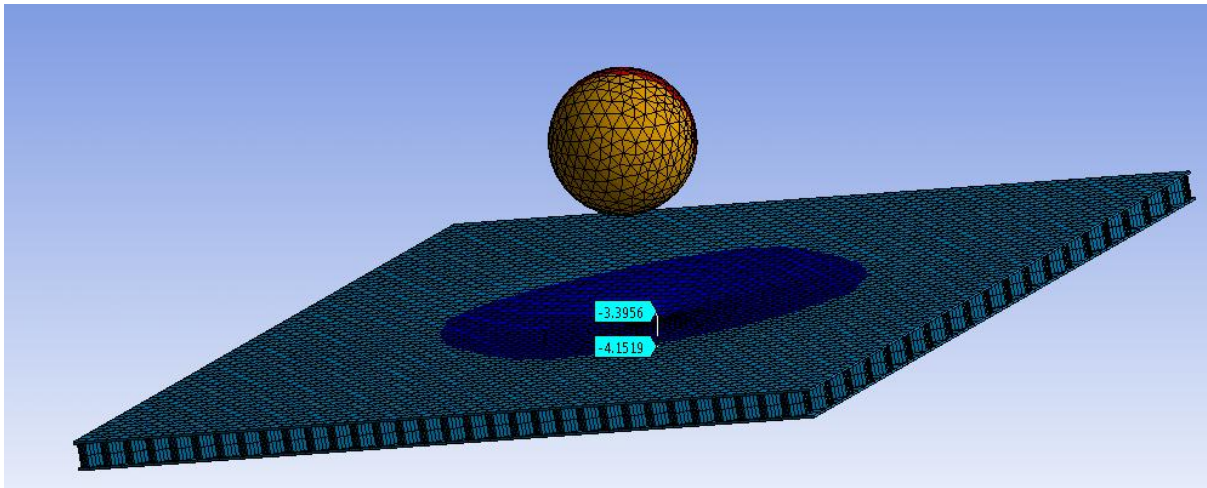


Figura 4.30 Deformația maximă obținută pentru placa sandwich compozit SP10/0.2x5

Deformația pe direcția căderii bilei a fost măsurată sub placă (figura 4.30). Deformația maximă obținută pentru placa sandwich compozit SP10/0.2x5 are valoarea de -4,1519mm.

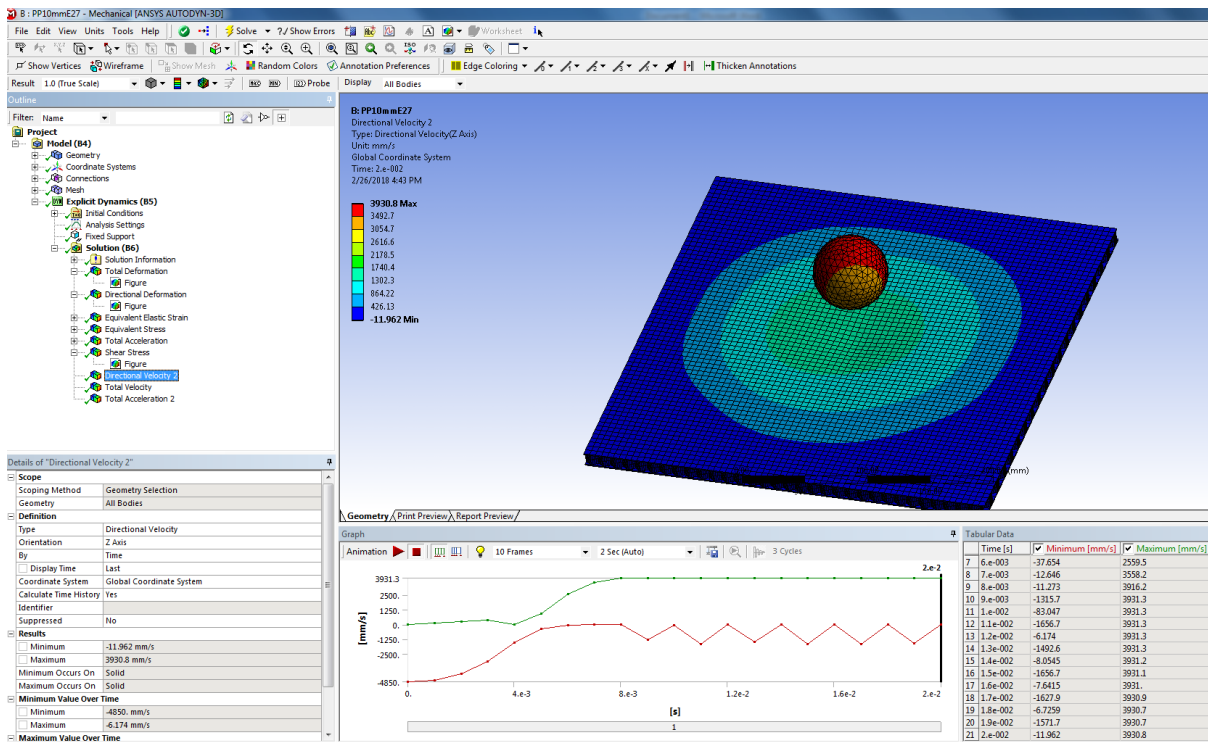


Figura 4.31 Viteza de întoarcere a bilei este 3,93m/s.

Energy Summary

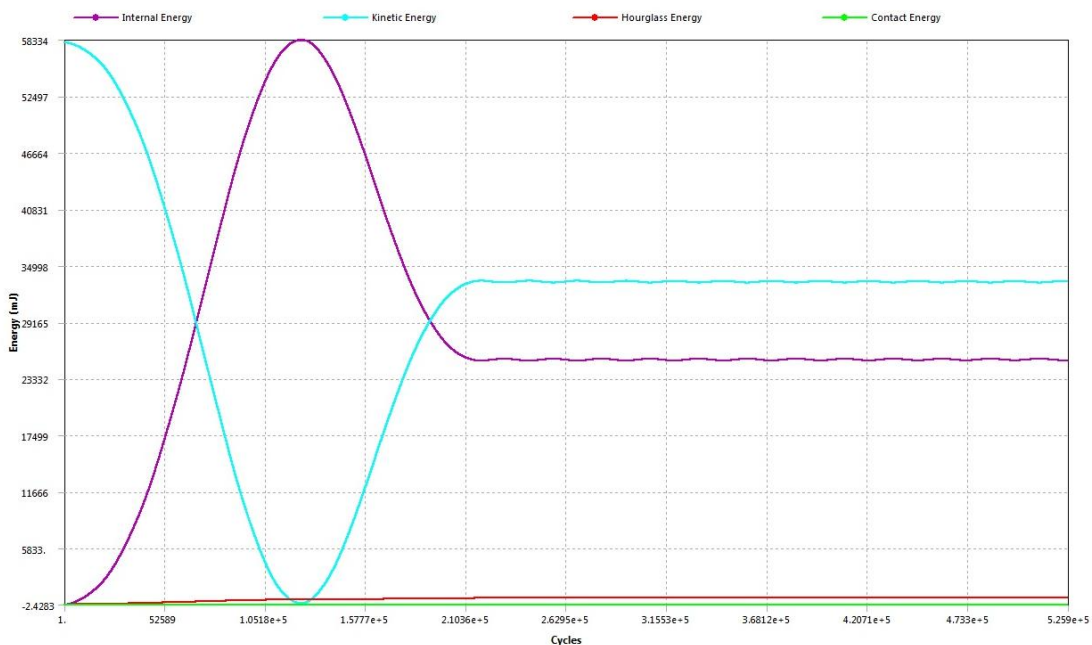


Figura 4.32 Graficul energiilor însumate

Concluzii:

Am efectuat calculul structurii sandwich compozit al plăcii SP10/0.2x5, având învelișurile realizate din 5 straturi de rășină epoxidică armată cu țesătură din fibre de sticlă tip T160, supusă unui impact cu o bilă cu masa de 5 kg.

Această modelare este una convergentă (durata rulării a fost de 277 ore). În figura 4.32 sunt trasate variațiile, în timpul impactului, ale energiei interne și energiei cinetice (cu verde).

Viteza calculată la căderea bilei a fost de 4,85m/s iar viteza de întoarcere a bilei a fost de 3,93m/s.

S-a obținut o deformație maximă a plăcii sandwich compozit de 4,1519 mm (valoarea obținută în experiment fiind de 2.8535 mm; diferența între calcul și experiment este de 1,3055 mm).

Foța maximă de contact pentru această placă sandwich compozit este de 9,6156kN.

CAPITOLUL 5 SIMULĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND IMPACTUL

5.1. Generalități

Pentru simulările experimentale la impact s-au proiectat și construit trei standuri. Scopul a fost ca fiecare stand să permită determinarea parametrilor impactului plăcilor, și în special al plăcilor de tip sandwich compozit. În principiu, standurile sunt compuse dintr-un sistem care dezvoltă forța de impact (de tip gravitațional sau de tip pneumatic), un sistem de fixare a plăcii și un al treilea sistem compus din instrumente de monitorizat parametrii impactului (valoarea forței de impact, valoarea deplasării maxime, valoarea vitezei de impact).

Măsurarea deformațiilor elastice ale plăcii s-a efectuat cu ajutorul tensometriei electrice rezistive.

La impactul materialelor compozite, energiile care se dezvoltă sunt mai mici decât în cazul metalelor. Compozitele au energii de impact mai mici, deoarece acestea au rezistența la forfecare transversală și interlaminară scăzută, aceste materiale neputându-se deforma plastic. Spre deosebire de metale, care după deformarea plastică încă își mai păstrează într-o anumită măsură integritatea structurală, materialele compozite nu suferă deformare plastică, iar odată ce acestea ajung la un anumit nivel al tensiunii suferă o deteriorare permanentă. Acest lucru poate duce la pierderea portanței locale sau structurale.

Într-o structură compozită stratificată (cazul invelisurilor plăcilor de tip sandwich) pot apărea cinci moduri de distrugere după deformarea elastică:

- Ruperea fibrelor sau fisurarea;
- Microfisuri sau chiar fisuri mari care apar în rășină;
- Dezlipirea între fibre și matrice (debonding);
- Delaminări ale laminelor adiacente;
- Extragerea fibrelor din matrice.

Atunci când compozitele sunt solícitate static, distrugerea prin delaminare apare mai rar. În schimb, atunci când acestea sunt supuse la sarcini de șoc, delaminarea este modul cel mai frecvent de distrugere.

5.2 Caracteristicile încercărilor dinamice

Proiectarea structurilor se bazează în general pe caracteristicile oferite de producătorii de materiale, care de obicei sunt sub forma diagramelor caracteristice tensiune-deformație specifică. Aceste diagrame sunt obținute pe modele statice, proprietățile materialului fiind obținute în timpul unor încercări cvasistatice, adică solícitățile de deformare ale specimenului sunt foarte lente. În general, standardele referitoare la determinarea caracteristicilor de material se referă la viteze de încercare (deformare) a materialelor de aproximativ 0,001 mm/s sau mai puțin (Tabel 5.1).

Caracteristicile materialelor sunt de obicei determinate din curba caracteristică a materialului de tip tensiune-deformație specifică, trasată pe baza încercării cu o mașină de testare în condiții cvasi-stactice, adică, cu viteze de deformare mici. Cu toate acestea, comportamentul materialului poate diferi în mod substanțial la solícitarea cu sarcini dinamice. În funcție de caracterul dinamic al sarcinilor care apar într-o structură, inginerul proiectant trebuie să cunoască proprietățile dinamice ale materialului. În mod normal, o mașină de testare convențională a materialelor nu este în măsură să aplice vitezele de deformație ridicate cerute de solícitarea dinamică.

Comportamentul structurilor la impact a fost de-a lungul timpului de mare interes pentru mulți ingineri atât pentru scopuri de proiectare precum și pentru dezvoltarea de

modele constitutive ale materialelor testate. Cu toate acestea, caracteristicile mecanice ale materialelor au fost determinate de-a lungul anilor în condiții de solicitare statică, astfel încât rezistența acestora să fie determinate doar pentru acest tip de solicitare la care sunt supuse structurile. De aceea, ar fi necesar determinarea caracteristicilor elastice ale materialelor în regim dinamic. Scopul încercărilor dinamice este de a se determina caracteristicile de material în condiții de viteze de deformații mari, așa cum este cazul unor fenomene care au loc în practică, cum ar fi impact, șoc, fenomene balistice etc.)(Tabelul 5.1).

Diferențele între curbele caracteristice ale materialelor obținute cu diferite viteze sunt prezentate în figura 5.1 ([83] Carlo Albertini, Ezio Cadoni, George Solomos, Advances in the Hopkinson bar testing of irradiated/non-irradiated nuclear materials and large specimens, Phil. Trans. R. Soc, 2014). În figură se observă că în funcție de viteza de încercare a materialului, rezultatele obținute pentru valoarea maximă a tensiunii, pentru aceeași valoare a deformației specifice diferă de la 10% până la 30%.

Cu toate acestea, au existat puține cercetări cu privire la efectul pe care viteza de încărcare l-a avut asupra proprietăților materialului. Începând din anii 1950 și 1960 a existat un vârf în interes cu privire la studiul comportamentului mecanic la viteze ridicate de încărcare. Aceste studii au fost impuse în special odată cu creșterea interesului în domeniul cercetării militare care s-a ocupat cu aplicații balistice. Un alt interes a fost cel din industria aerospațială care s-a preocupat de impactul meteorităților asupra sateliților și lovirea avioanelor de către păsări.

Tabelul 5.1 Regimuri de încercare utilizate în funcție de viteza de deformație $\dot{\epsilon}$

Viteza de deformație [s ⁻¹]	$\dot{\epsilon} < 10^{-5}$	$10^{-5} < \dot{\epsilon} < 10^{-1}$	$10^{-1} < \dot{\epsilon} < 10^2$	$10^2 < \dot{\epsilon} < 10^4$	$10^4 < \dot{\epsilon}$
Fenomenul fizic	Fluaj	Cvasi-static	Intermediar	Viteza mare	Impact
Forțe de inerție	Neglijabile		Importante		
Tipul de încercare	Izotermice		Adiabatică		
Echipamente utilizate	Mașini de încercat convenționale (hidraulice sau electromecanice)		Sisteme speciale cu acționare servohidraulică	Sisteme de tipul Hopkinson bar	Sisteme de tipul: Impact Taylor, Inele de expandare etc.

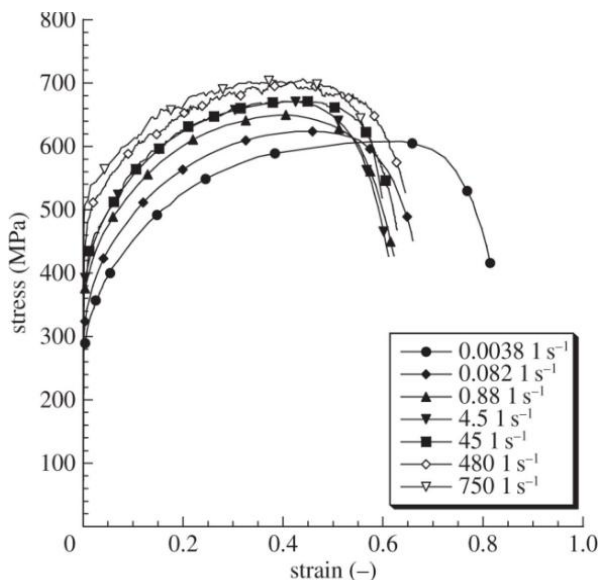


Figura 5.1 Curbele caracteristice ale materialelor pentru diferite viteze de încercare [83]

Materialele compozite (cum ar fi compozitele polimerice, spumele polimerice, spumele metalice) sunt considerate drept materiale moi (soft materials), adică materiale pentru care rezistența și rigiditatea au valori mici. Cu toate acestea, materialele ingineresti moi au bune caracteristici de șoc fiind în același timp și bune izolatoare la vibrații, fiind utilizate în ultimul timp într-o serie mare de aplicații din domeniile aerospațial, automobile, naval, cu destinații militare sau civile.

În aceste aplicații, cele mai multe dintre materialele “moi” sunt solicitate la sarcini cum ar fi impact, explozii, coliziuni de mare viteză.

Pentru modelarea numerică a acestora, de o mare importanță este utilizarea curbelor de material (tensiune-deformație specifică) care să ofere cât mai fidel modul de comportare a acestora în timpul solicitărilor. Experimente fiabile, pe materialele de studiu au scopul să determine curbele tensiune-deformație specifică, care să ofere valori cât mai precise pentru obținerea unor răspunsuri reale ale structurilor. Comparate cu experimentele cvasi-stactice, caracterizarea dinamică a materialelor, în special a celor “moi” la viteze mari de deformație este încă în studiu și capătă o mare importanță odată cu creșterea numărului de fenomene de impact.

5.3 Determinarea caracteristicilor mecanice ale polistirenului extrudat

Caracteristicile mecanice ale polistirenului extrudat s-au determinat prin metode standardizate ISO 844 și ASTM D 1621 în condiții de laborator la Facultatea de Inginerie a universității Dunărea de Jos din Galați.

Determinarea caracteristicilor mecanice ale polistirenului extrudat s-a efectuat prin încercarea la compresiune a acestui tip de material. Pentru acest test s-au efectuat încercări la compresiune pe 2 probe.



a)



b)

Figura 5.2 a) Încercarea la compresiune pentru determinarea caracteristicilor mecanice ale polistirenului extrudat; b) Eșantionul de dimensiunile 100X100 [mm], din polistiren extrudat

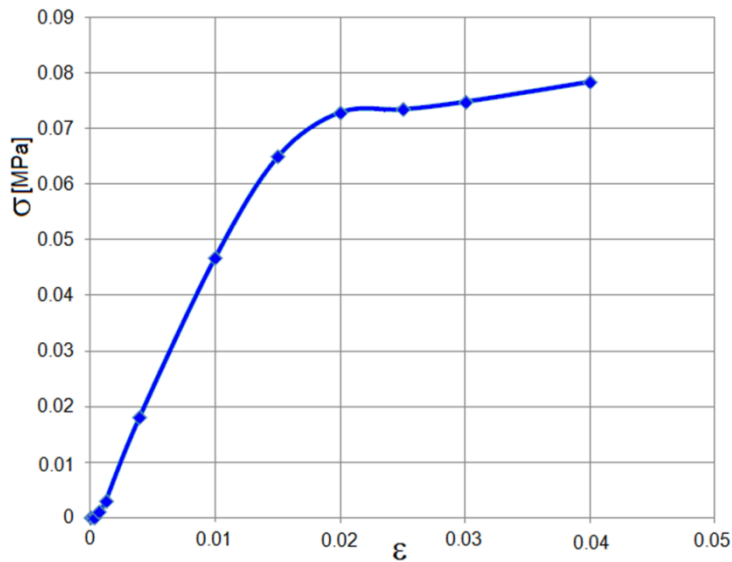


Figura 5.3 Diagrama caracteristică a spumei poliuretanică (polistiren extrudat) în zona elastică și elasto-plastică

Rezultatele măsurate au dat pentru modulul lui Young $E_c = 3.81$ [MPa], iar coeficientul lui Poisson $\nu_c = 0.08$. Modulul de elasticitate transversal $G = 1.76$ [MPa] calculat cu ecuația 5.1:

$$G_c = \frac{E_c}{2(1+\nu_c)} \quad (5.1)$$

Rezultatele sunt comparabile cu cele din [84] obținute de cercetătorul Pokharel în 2003. Mai multe detalii despre acest material se mai pot găsi și în lucrarea lui Elragi din [85] "Selected Engineering Properties and Applications of EPS Geofoam".

5.4 Determinarea caracteristicilor mecanice ale compozitului polimeric confecționat din fibră de sticlă și matrice epoxidică

Determinarea caracteristicilor mecanice ale compozitului polimeric compus din fibră de sticlă și matrice epoxidică, utilizat pentru învelisuri s-a făcut pe baza reglementarilor din standardul american ASTM 3039 [86].

Evaluarea rezistenței la tracțiune pentru epruveta din compozit polimeric este reprezentată în figura 5.4.

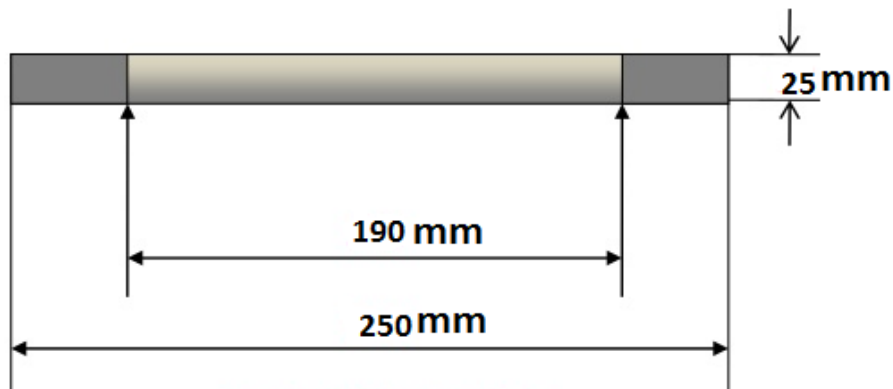


Figura 5.4 Epruveta din fibră de sticlă și matrice epoxidică

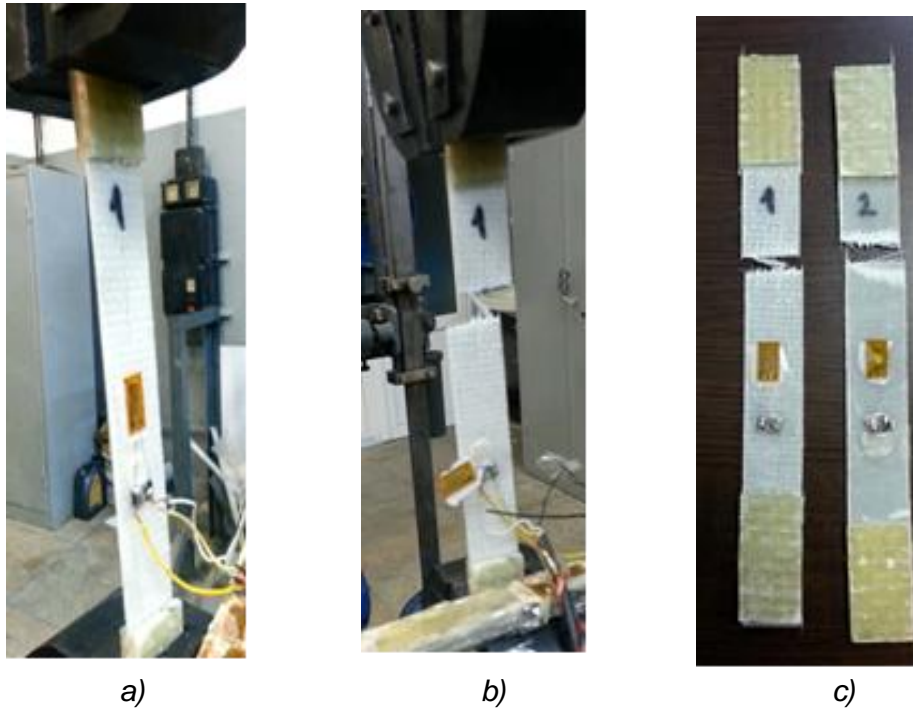


Figura 5.5 Încercarea la tracțiune pentru determinarea caracteristicilor mecanice ale compozitului polimeric

În figura 5.5 sunt reprezentate epruvetele 1 și 2 care au fost încercare la tracțiune. În imagine se observa că pe epruvete au fost lipite mărci tensometrice pentru determinarea deformațiilor echivalente. În imaginile a și b sunt reprezentate epruvetele înainte și după rupere.

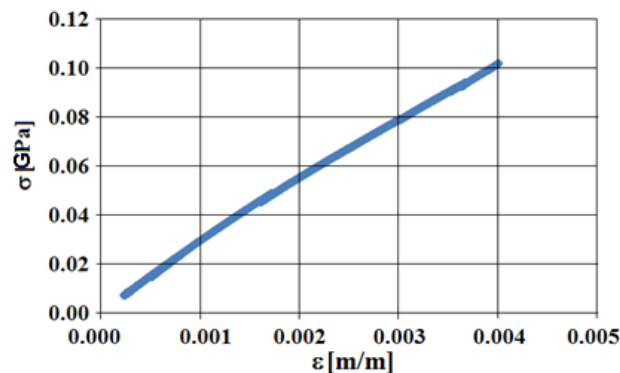


Figura 5.6 Diagrama caracteristică a compozitului polimeric în zona elastică

Dimensiunile epruvetei confectionata din compozit polimeric au fost: $L=250$ [mm], $b=25$ [mm], $t=1.2$ [mm]. Din diagrama de solicitare la tracțiune a epruvetei (Figura 5.6) .

5.5 Procesul de fabricație a structurilor de tip sandwich compozit testate

Materialele compozite sunt materiale inventate de om, fiind compuse din două sau mai multe materiale diferite între ele, având interfețe de separare, confectionate cu scopul obținerii unor performanțe superioare față de cele ale materialelor constitutive. Structura noului material compozit reprezintă de fapt o fază continuă (matricea) în care sunt inserate diverse faze discontinue (armătura).

Pentru fabricarea învelișurilor plăcilor de tip sandwich compozit matricea este confectionată

din polimeri termorigizi (rășini epoxidice) iar armătura din fibre de sticlă. Pentru confecționarea materialelor compozite, se utilizează procese tehnologice diferite de cele ale materialelor convenționale. În timpul acestor procese, prin copolimerizare (policondensare) cu ajutorul unui monomer, rășinile poliesterice nesaturate trec din stare lichidă în stare solidă. Pentru activarea reacției de polimerizare este utilizat un agent chimic (care se mai numește și „întăritor”). Alegerea unei tehnologii de fabricație depinde de diversi factori: forma geometrică și dimensiunile piesei, caracteristicile mecanice proiectate a se obține, structura finală a materialului compozit, precizia dimensională și calitatea pieselor etc.

Scopul lucrării este determinarea combinației optime pentru realizarea plăcilor compozite structurale complexe de tip "sandwich" cu inimi din polistiren extrudat și faguri din polipropilenă cu grosimi impuse. Fețele sandwich-ului sunt realizate din compozite pe bază de țesături din fibre de sticlă și rășină epoxidică, nesaturată.

Pentru procesul de fabricație al structurilor de tip sandwich compozit a fost nevoie de mai multe etape de pregătire și anume:

- Fabricarea invelisurilor:

- pregătirea țesăturilor (fig. 5.8);
- debitarea țesăturilor (fig.5.9);
- pregătirea suportului de turnare (o placă din sticlă - fig.5.10 a.);
- operația de turnare a rășinii epoxidice, pentru realizarea invelisurilor (fig.5.10 c);

- Fabricarea miezurilor:

- tăierea plăcilor simple din faguri / polistiren extrudat, pentru miez;
- lipirea straturilor pentru formarea sandwichurilor.

5.5.1 Fabricarea invelisurilor

Metoda de lucru pentru confecționarea placilor stratificate pentru învelișuri se numește "Hand Lay up technique" [87, 88, 89, 90, 91] cu uscarea plăcilor la temperatura mediului ambiant respectiv 22 °C timp de 1-2 zile. Țesătura se pregătește pentru debitare și se întinde pe o suprafață dreaptă astfel încât să se poată tăia (cunoscându-se faptul că prin tăiere fibra "alunecă"). Pentru întinderea rășinii epoxidice s-a utilizat o rolă metalică .

Pentru a se întări rășina epoxidică s-a utilizat o soluție numită accelerator de întărire. Proporția pentru acest amestec este de: 100 părți rășină pentru 17 părți întăritor pentru un timp de lucru de 50 de minute. Este foarte important să se respecte această proporție deoarece rășina fie nu se va întări și va rămâne moale fie se va întări foarte repede în recipient și nu se va mai putea folosi amestecul. Deasemenea, nerespectarea amestecului va duce la scăderea proprietăților mecanice și termice. Reacția chimică la amestecul de rășină cu accelerator este exotermă adică după cele 50 de minute de lucru are loc degajarea de căldură, semn că cele două soluții au intrat în reacție și se produce întărirea.



Figura 5.7 a) Pregătirea sticlei-suport pentru turnarea rășinii epoxidice, b) Cântărirea soluțiilor și împrăștierea rășinii epoxidice, c) Turnarea

În figurile 5.8 și 5.9 sunt prezentate tipurile de țesături din fibre de sticlă, care au fost utilizate pentru fețele sandwichului. Prima are o grosime de 0,2mm iar cealaltă are o grosime de 0,33mm. Grosimea finală a fețelor sandwichului a fost de 1mm, realizata din cinci straturi, respectiv trei straturi. Astfel, pentru grosimea de 0,2 s-au utilizat 5 straturi iar pentru 0,33 s-au utilizat 3 straturi de țesătură. Când s-a adăugat rășina epoxidică grosimea nu s-a modificat (nu are loc o creștere mare în volum) deoarece aceasta s-a înglobat în totalitate în fibra de sticlă prin reacție chimică. În tabelul 5.2 sunt prezentate caracteristicile țesăturilor utilizate.



Figura 5.8 Tesătură Twill, grosime de 0,2mm



Figura 5.9 Tesătură cu grosime de 0,33mm

5.5.2 Fabricarea miezurilor

Miezurile sandwichului s-au fabricat prin debitarea plăcilor (de tip fagure și respectiv polistiren extrudat) (figurile 5.10 și 5.11).



Figura 5.10 Debitarea fagurilor



Figura 5.11 Debitarea polistirenului extrudat tip wafe

Polistirenul extrudat este de 20mm grosime, de tip wafe având parametrii: XPan 20 mm: XPS-EN 13164-T3-DLT(1)5-CS(10/Y)250-WL(T)0.7-WD(V)3-MU150-FT2, conform tabelului 5.2. Structura celulară închisă, controlul parametrilor procesului, calitatea aditivilor introduși conduc la obținerea caracteristicilor tehnice superioare și de lungă durată. Acest material are următoarele proprietăți [92]:

- rezistență mecanică superioară;
- rezistență la ciclurile de îngheț- dezgheț;

- elasticitate bună;
- aderența marită;
- conductibilitate termică redusă;
- lipsa capilarității;
- structura celulară omogenă;
- manipulare ușoară;
- rezistență ridicată la umezeală;
- tăiere (fasonare) ușoară cu unelte obișnuite;
- rezistență la difuziunea vaporilor;
- curat, inodor și neiritant pentru piele.

Placa din fagure din polipropilenă poate fi realizată cu sau fără un voal de poliester neșesut pentru o mai bună lipire. De asemenea, poate avea o barieră de film sub voal de poliester pentru a limita cantitatea de consum de rășină. În acest studiu s-au utilizat plăci din polipropilenă cu voal din poliester, pentru o mai bună lipire.

Caracteristicile generale ale fagurelui din polipropilena sunt:

- Rezistență mare în raport cu greutatea
- Bună rezistență la coroziune, ciuperci, putregai, chimicale și rezistent la umiditate
- Atenuază sunetul și vibrațiile
- Absoarbe energia
- Termoformabil
- Utilizarea temperaturii la 85°C
- Reciclabilă.

Tabelul 5.2 Caracteristici tehnice pentru polistirenul extrudat [92]

Caracteristica	Cod SREN 13164	Grosime panou [mm]	Unitate de măsură	Valoarea
Conductivitate termică	λ_D	15-60	W/m ² K	0,033
		80-120		0,034
Rezistența termică	R_D	15	m ² KW	0,45
		20		0,61
		30		0,91
		40		1,21
		50		1,52
		60		1,82
		80		2,35
		100		2,94
		120		3,53
Rezistența la compresiune pentru o deformație de 10%	CS(10/Y)	15-20	KPa	<250
		30-120		≥300
Rezistența la forfecare	ζ	15-120	KPa	190
Transmisia vaporilor de apă	MU	15-120	-	150
Absorbția apei, de lungă durată, prin imersare totală	WL(T)0,7	15-120	%	≤ 0,7
Absorbția de apă prin difuzie	WD(V)	15-120	%	≤3
Clasa de reacție la foc	-	15-20	Euro - clasa	F
		30-120		E
Capilaritate	-	15-120	-	0
Rezistență îngheț-dezghet	FT2	15-120	%	1
Temperaturi limită de utilizare		15-120	°C	-50 ÷ +170

Proprietățile mecanice ale polipropilenei sunt prezentate în tabelul 3.1.

5.5.3 Tipodimensiuni ale plăcilor compozite tip sandwich

S-au confectionat 10 plăci compozite de tip sandwich, având caracteristicile date în tabelul 5.3. Plăcile sunt de forma pătrat, cu dimensiunile brute de 380X380 [mm]. Datorită sistemului de fixare cu cadru de lățime de 20[mm], dimensiunea netă a plăcilor, măsurată între marginile interioare ale cadrului este de 340[mm]. Grosimile plăcilor sandwich variază de la 22[mm], până la 30[mm], în funcție de grosimea miezurilor, așa cum este arătat în tabelul 5.3.

Tabelul 5.3 Tipuri de placi compozite sandwich testate dinamic

Nr.	Tip placă	Învelișuri			Inima (miez)		Adeziv la interfața înveliș-miez
		Tip	Material	Gros. [mm]	Material	Gros. [mm]	
1	SP10/0.2x5	Compozit stratificat 0.2x5	(fibră de sticlă-E) și rășină epoxidică	1	polipropilenă	10	Rășină epoxidică
2	SP10/0.33x3	Compozit stratificat 0.33x3	(fibră de sticlă-E) și rășină epoxidică	1	polipropilenă	10	Rășină epoxidică
3	SP15/0.2x5	Compozit stratificat 0.2x5	(fibră de sticlă-E) și rășină epoxidică	1	polipropilenă	15	Rășină epoxidică
4	SP15/0.33x3	Compozit stratificat 0.33x3	(fibră de sticlă-E) și rășină epoxidică	1	polipropilenă	15	Rășină epoxidică
5	SP20/0.2x5	Compozit stratificat 0.2x5	(fibră de sticlă-E) și rășină epoxidică	1	polipropilenă	20	Rășină epoxidică
6	SP20/0.33x3	Compozit stratificat 0.33x3	(fibră de sticlă-E) și rășină epoxidică	1	polipropilenă	20	Rășină epoxidică
7	SP28/0.2x5	Compozit stratificat 0.2x5	(fibră de sticlă-E) și rășină epoxidică	1	polipropilenă	28	Rășină epoxidică
8	SP28/0.33x3	Compozit stratificat 0.33x3	(fibră de sticlă-E) și rășină epoxidică	1	polipropilenă	28	Rășină epoxidică
9	SF20/0.2x5	Compozit stratificat 0.2x5	(fibră de sticlă-E) și rășină epoxidică	1	Polistiren extrudat	20	Spumă poliuretanică
10	SF20/0.33x3	Compozit stratificat 0.33x3	(fibră de sticlă-E) și rășină epoxidică	1	Polistiren extrudat	20	Spumă poliuretanică

În figura 5.16 sunt prezentate produsele finale ale plăcilor de tip sandwich, dispuse în ordinea grosimilor miezului.

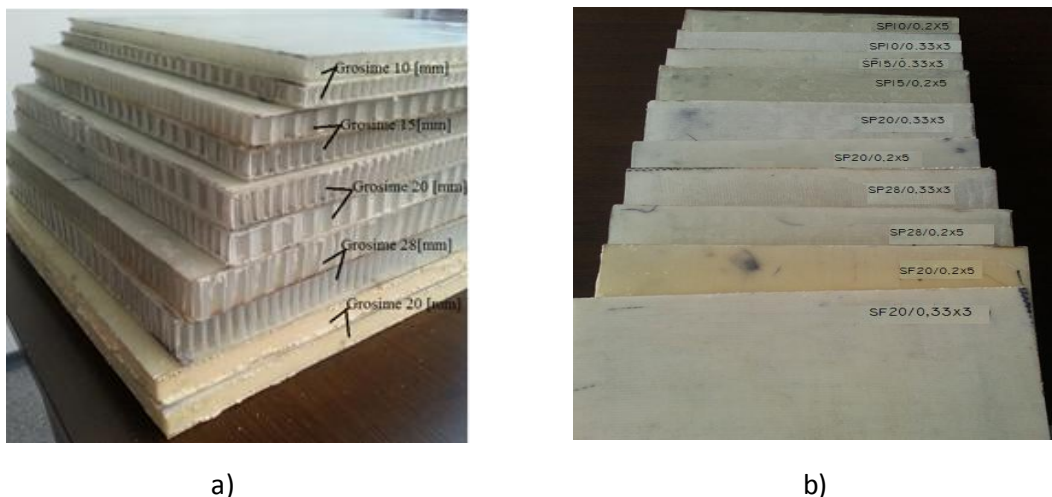


Figura 5.12 a) Structurile de tip sandwich fabricate (tipuri de grosimi ale miezului)
b) Structurile de tip sandwich, fabricate și aranjate după numărul cazului

5.5.4 Concluzii

- polimerii folosiți drept matrice pentru fabricarea învelișurilor au în general proprietăți vâscoelastice pronunțate.
- fibrele de armare se comportă în general liniar elastic la valori mari ale tensiunii.
- rezultatele testelor sunt puternic influențate de viteza de încercare, care trebuie aleasă astfel încât să asigure condițiile de impact.
- rezultatele încercărilor depind de proporția elementului de armare.
- temperatura de obținere a probelor de amestecuri de polimeri influențează rezistența la rupere și alungirea la rupere. Pe baza testelor realizate experimental, pentru a determina proprietățile mecanice, s-a constatat că există diferențe între valorile rezultate pentru fiecare epruvetă în parte.

5.6 Condiții de funcționare a standurilor experimentale

Pentru funcționarea optimă și reproductibilă a standurilor experimentale s-au efectuat numeroase încercări pentru descoperirea și eliminarea eventualelor probleme, multe dintre ele nefiind anticipate, iar de unele probleme m-am lovit doar în utilizarea practică a standului, soluțiile adoptate necesitând timp și un număr foarte mare de experimente practice. Calibrarea standului experimental pentru măsurarea forței de impact s-a făcut utilizând un traductor de forță. Pentru a putea funcționa cu adevărat, este necesar ca două experimente executate în aceleași condiții să producă rezultate asemănătoare..

5.7 Simulări experimentale privind solicitarea statică

Încercările statice oferă posibilitatea de a depista zonele cele mai solicitate ce trebuie investigate în mod obligatoriu la încercările dinamice.

Aceste teste se mai realizează și pentru determinarea unor caracteristici de material atunci când se fac încercări pe epruvete la întindere sau compresiune, la mașinile de încercat standardizate. Diferența dintre încercările statice și cele dinamice/ciclice constă în timpul de încărcare (viteza de încărcare sau viteza de deformare). Dacă aplicarea forței durează mai mult de 0.1 secunde atunci încercarea este de tip „static”. Cu ajutorul unor dispozitive

suplimentare pot fi efectuate și încercările de încovoiere, forfecare și torsiune. Cele mai utilizate încercări mecanice sunt încercările statice, când în timpul încercării forța crește lent, aceasta având o durată de câteva minute, la temperatura mediului ambiant. Încercarea pieselor utilizate în condiții deosebite (temperaturi ridicate sau coborâte, încărcări prin șoc sau variabile, radiații etc.), trebuie să se facă în condiții cât mai apropiate de cele întâlnite în exploatare [12].

5.7.1 Procedura experimentală de lucru

Pentru realizarea testelor statice s-au utilizat greutateți, cântărite cu ajutorul cântarului electronic. Astfel greutatețile 1,2,3,4 și 5 (suport de fixare) au valorile masei: 1) $m = 5.355\text{kg}$; 2) $m = 2.4\text{kg}$; 3) $m = 0.830\text{kg}$; 4) $m = 0.665\text{kg}$; 5) $m = 0.005\text{kg}$.



Figura 5.13 Greutăți utilizate la testul static

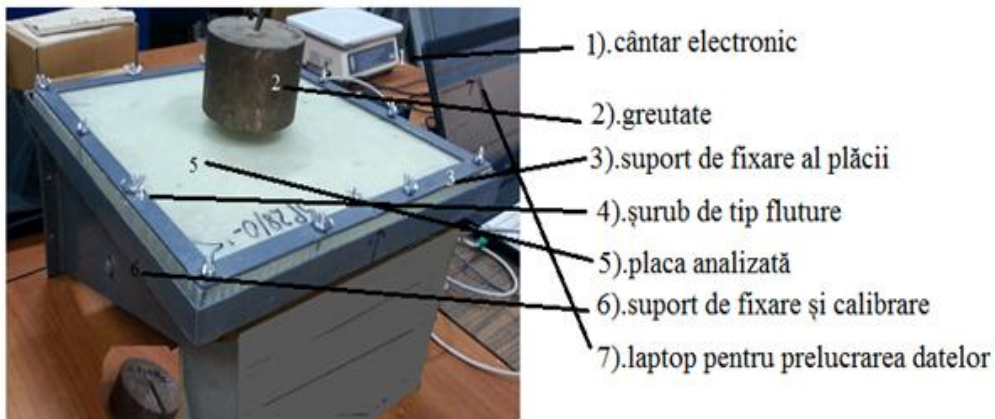
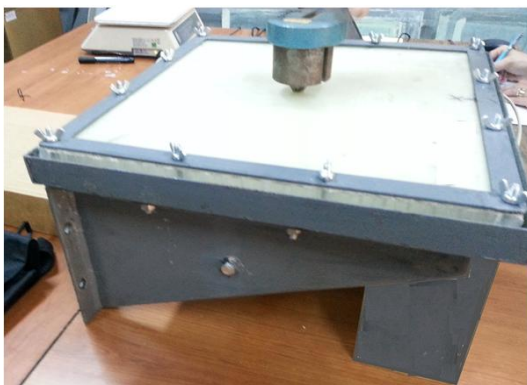


Figura 5.14 Elementele componente utilizate la testele statice



a)



b)

Figura 5.15 a) Detaliu pentru una din încercările statice b) Poziționarea traductorului de deplasare (LVDT) pe spatele plăcii sandwich

Pentru încercările statice s-a fixat fiecare placă în cadrul metalic cu ajutorul șuruburilor. După fixare și calibrare s-au poziționat greutatele una câte una în centrul plăcii. Pentru fiecare greutate (solicitare) s-a măsurat deplasarea maximă (în centrul plăcii) cu un traductor de deplasare (Fig. 5.15 b)).

5.8 Rezultatele și concluziile testelor statice

În tabelul 5.4 sunt prezentate rezultatele testelor experimentale, în static. Au fost analizate cele 10 plăci sandwich la solicitarea de încovoiere, înregistrându-se deplasările maxime (obținută în centrul feței opuse încărcării) pentru fiecare greutate aplicată.

Tabelul 5.4 Deplasările maxime obținute la solicitarea statică de încovoiere

Nr.crt	Caz studiat	Deplasarea maximă δ [mm] la aplicarea unei greutăți cu masa în [kg]			
		0,830[kg]	1,495[kg]	3,895[kg]	5,355[kg]
1	SP10/0,2x5	0.0111	0.0201	0.0523	0.0719
2	SP10/0,33x3	0.0114	0.0205	0.0533	0.0733
3	SP15/0,2x5	0.0078	0.0141	0.0368	0.0505
4	SP15/0,33x3	0.0080	0.0145	0.0377	0.0519
5	SP20/0,2x5	0.0012	0.0110	0.0287	0.0394
6	SP20/0,33x3	0.0062	0.0113	0.0294	0.0404
7	SP28/0,2x5	0.0047	0.0085	0.0220	0.0303
8	SP28/0,33x3	0.0048	0.0086	0.0224	0.0308
9	SF20/0,2x5	0.0076	0.0136	0.0355	0.0488
10	SF20/0,33x3	0.0075	0.0136	0.0354	0.0487

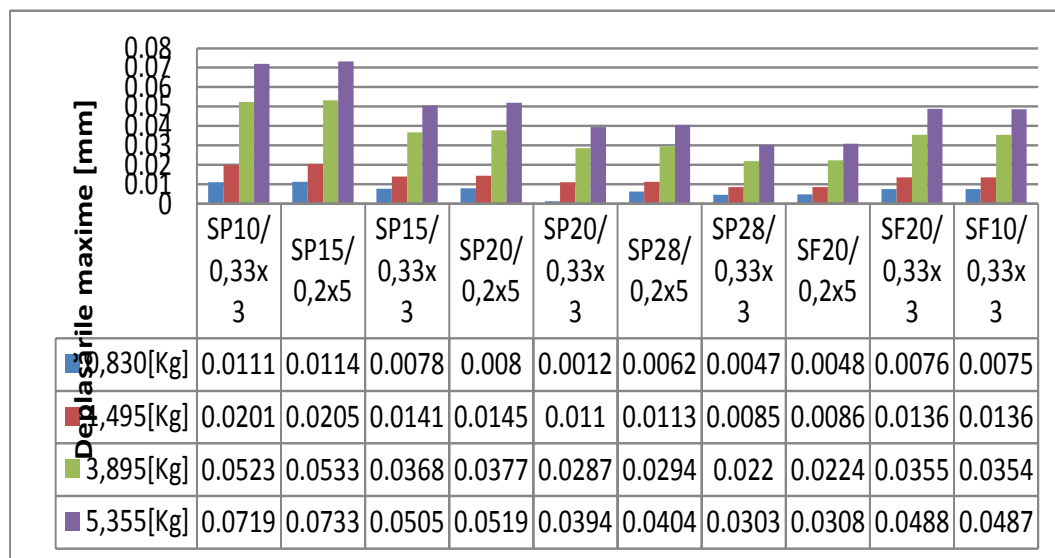


Figura 5.16 Deplasările maxime ale plăcilor la aplicarea forțelor concentrate în centrul plăcii

5.9 Teste experimentale de impact

Materialele compozite, în special sub formă de structuri sandwich, cu greutate redusă și capacitatea de absorbție a energiei ridicată sunt foarte atractive pentru aplicațiile care necesită structuri ușoare, cum ar fi industria navală, transporturilor etc. în special datorită comportării deosebite la impact.

În afară de analiza vizuală a deteriorărilor după impact, se mai poate face și o analiză tomografică 3D pentru a se putea vedea deteriorările apărute în fibre cât și în miez, așa cum s-a efectuat în lucrarea lui Crupi și colab din [94], unde s-a analizat comportamentul la impact al unor plăci compozite de tip sandwich cu miezuri și fețe diferite. După impact plăcile au fost supuse analizei la un Tomograf, care poate edita imagini 3D și s-au putut vedea deteriorările apărute în fibre cât și în miez. Acest studiu experimental investighează comportamentul de impact al diferitelor tipologii de compozite, comparând răspunsul lor la impact, în ceea ce privește absorbția de energie și a modului de defectare. În [94] s-au efectuat teste de impact cu viteză mică pe o serie de tipuri de compozite: compozite laminate, sandwich-uri cu miez de tip spumă PVC, spumă de aluminiu și de tip fagure. Rezultatele testelor au confirmat faptul că straturile armate cu fibre Kevlar au avut, după cum era de așteptat, o bună performanță de impact și că sandwichurile cu spumă PVC, care au o grosime mai mare, necesită o cantitate mai mare de energie pentru a produce colapsul complet. O tehnică avansată nedistructivă, cum ar fi tomografia cu raze X, a fost utilizată pentru a investiga modul de avarie și daunele compozitelor supuse încărcării prin impact prin analiza vederilor secțiunii transversale. În [95], impactul s-a realizat cu viteză redusă utilizându-se un impactor pneumatic Instron-Dynatup 8250 de tipul Drop-weight. Impactorul a avut 5.1kg iar forma lui a fost de emisferă cu diametrul de 16 mm. Au fost analizate plăci compozite de tip sandwich cu fețe din material hybrid woven S2-glass-IM7, fibre de grafit/rășină epoxydică (tratată la 177°C), la diferite energii după care au fost supuse analizei cu ultrasunete la mașina UltraPAC utilizându-se software-ul UTW. Unele rezultate și concluzii din acest studiu seamănă cu rezultatele din teza de față, deoarece a fost utilizat un impactor cu masa de 5 kg în ambele situații. Concluziile din (Brown și colab.) care sunt valabile și pentru teză sunt:

- majoritatea compozitelor se delaminează după impact redus;
- delaminarea apare uneori în interiorul compozitului și nu poate fi văzut cu ochiul liber;
- forma deteriorărilor apărute pe placă este în formă semnul plus "+";
- atunci când perforarea are loc la un anumit nivel de energie, există de obicei delaminare mai mică decât s-ar întâmpla dacă nu ar exista nicio perforare. Acest lucru se întâmplă deoarece la o perforare mai slabă, energia este absorbită și distribuită în specimen.

5.9.1 Teste experimentale de impact gravitațional cu cădere liberă

Pentru această parte experimentală s-a utilizat standul cu cinci componente principale ale sistemului: cadrul de dirijare a impactorului, impactorul, suportul pentru placa sandwich, LVDT(traductorul de deplasare), camera de mare viteză.

Parametrii standului:

- Impactorului este o bilă cu masa de 5[kg] și diametrul de 106 [mm].
- Distanța de cădere a impactorului: $H=1180$ [mm]
- Forța maximă de impact a fost măsurată cu traductorul de forță, obținându-se valoarea: $F=0,8668$ kN.

În figura 5.18 se prezintă standul de impact gravitațional, cu cădere liberă.

Standul este alcătuit din:

- cadru din bare de oțel sudat;
- un suport cu formă pătrată prevăzut cu 12 șuruburi de prindere a plăci;
- un suport orizontal, prevăzut cu șurub de stângere și fixare în vederea susținerii traductorului de deplasare;
- impactorul din oțel prevăzut cu un șurub, care are rolul de suspendare a bilei (figura 5.17).

Dimensiunile plăcilor sandwich sunt de 380X380 mm iar grosimile au variat de la 22 până la 30 mm. Plăcile sunt prinse într-un cadru de susținere cu 12 șuruburi. Șuruburile asigură forța de strângere necesară, pentru realizarea legăturilor de tip încastrare pe contur. Elementul de lovire este compus dintr-o bilă din oțel cu un șurub sudat și piuliță, necesare pentru prindere în sistem. Piulița este prevăzută cu o gaură prin care trece un “zăvor” pentru a fi retractat. Când se trage imbusul din suport, bila se eliberează și cade perpendicular pe placă (figura 5.17. Diametrul bilei este de 106 [mm] și masa de 5 [kg]. Înălțimea de cădere este de 1180 mm (cu diferențe între 22 și 30 mm, în funcție de grosimile plăcilor).

Testele s-au desfășurat conform standardului ASTM D 3029.

În lucrarea lui Vineela [93] s-a studiat impactul unor plăci compozite din rășină epoxidică armate cu fibre de sticlă de tip E cu fibre orientate diferit (0/90; 30/60; 45/90). Au fost studiate experimental și analitic utilizându-se software-ul ABAQUS iar ca standard s-a utilizat același tip pentru ”drop-weight”.



Figura 5.17 Impactorul cu masa de 5 [kg]



Figura 5.18 Standul de impact gravitațional, cu cădere liberă



Figura 5.19 Camera de mare viteză



Figura 5.20 Standul pentru impact gravitațional. Cadrul cu suport pătrat

Viteza de cădere este determinată cu ajutorul înregistrărilor camerei de mare viteză. Calibrarea încercărilor a realizată cu aplicația AOS Imaging Studio (Fig. 5.21-5.24). Calibrarea se face în această aplicație, după ce au fost extrase filmele video realizate cu camera de mare viteză.

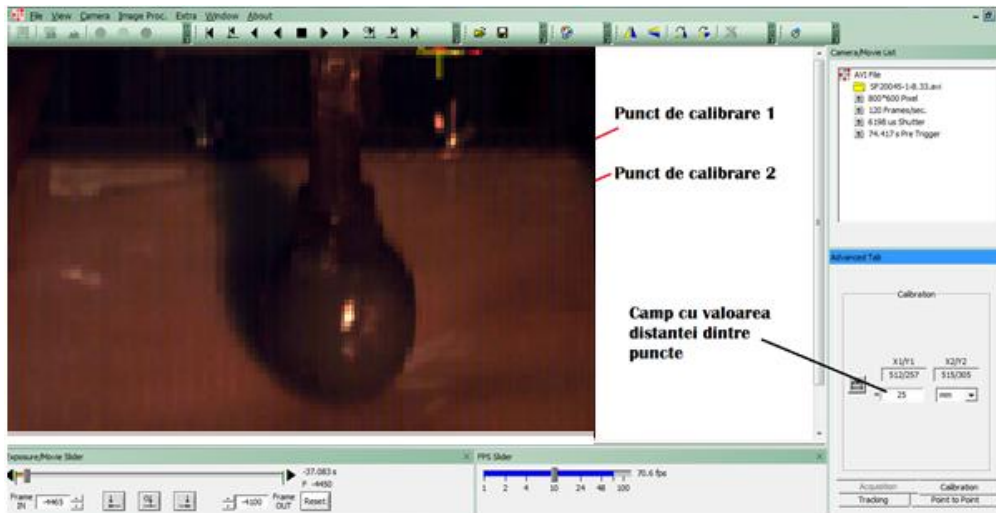


Figura 5.21 Calibrarea sistemului cu ajutorul aplicației AOS Imaging Studio

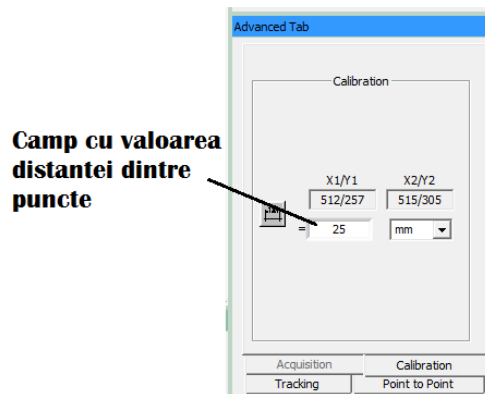


Figura 5.22 Câmp din AOS Imaging Studio, cu valoarea distanței dintre puncte

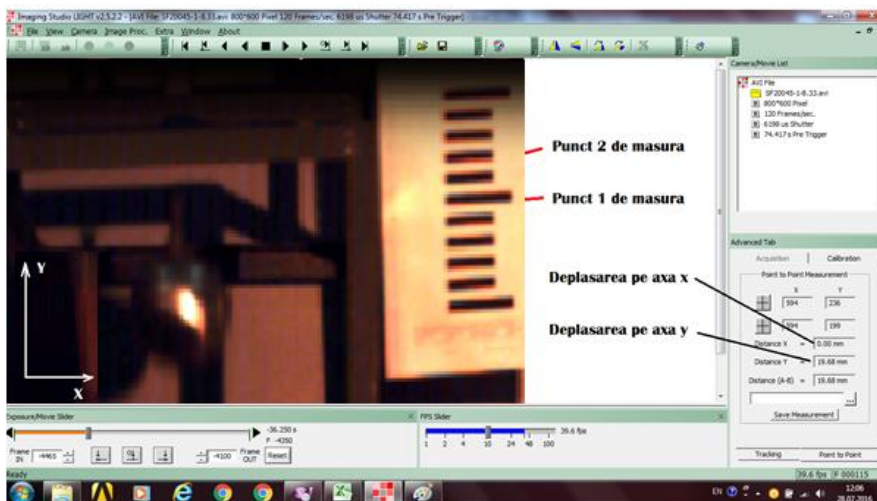


Figura 5.23 Alegerea metodei de calcul a vitezei prin puncte (Point to point)

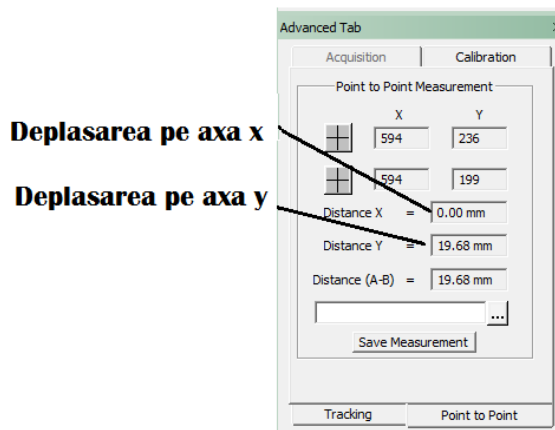


Figura 5.24 Proiecțiile pe axele x și y ale deplasării impactorului

5.9.2 Determinarea energiei absorbite de placă în momentul impactului

Comportamentul ansamblului este caracterizat de cele 4 faze ale încercării:

1. *Pregătirea sistemului* – reprezintă faza în care placa este montată în sistemul de prindere, iar impactorul este poziționat la înălțimea maximă și pregătit pentru impact. În această fază, energia totală a impactorului este egală cu energia potențială a acestuia aflat la înălțimea maximă;
2. *Căderea impactorului* – în această fază se eliberează impactorul pentru căderea liberă. Pe măsură ce impactorul accelerează, energia potențială se transformă în energie cinetică. În momentul în care impactorul atinge placa, va avea energie cinetică maximă la viteza V_{impact} , relația (5.2);
3. *Deformarea plăcii* – în această fază, energia cinetică a impactorului este cedată plăcii, care se deformează atât elastic cât și plastic. Deformațiile plastice se manifestă prin apariția unor deteriorări în structura plăcii (fisuri, delaminări, ruperi de fibre). Deformarea plastică produce absorbția ireversibilă de energie, care nu mai poate fi cedată înapoi impactorului;
4. *Revenirea după impact* – în această fază, energia de deformare elastică acumulată de placă, este transferată înapoi impactorului, sub formă de energie cinetică. În momentul desprinderii de placa de test, impactorul va avea energie cinetică la viteza $V_{revenire}$, (relația 5.3).

Energia absorbită de placa de test, reprezintă diferența dintre energia cinetică pe care o are impactorul înainte și energia cinetică după impact, conform relației (5.4).

$$V_{impact} = \frac{D_{impact}}{dt} + \frac{1}{2} \cdot g \cdot dt \quad (5.2)$$

$$V_{revenire} = \frac{D_{revenire}}{dt} + \frac{1}{2} \cdot g \cdot dt \quad (5.3)$$

$$E_{abs} = \frac{1}{2} m (V_{impact}^2 - V_{revenire}^2) \quad (5.4)$$

V_{impact} este viteza impactorului înainte de impact

D_{impact} – deplasarea impactorului între două cadre măsurată pe imagine înainte de impact

$V_{revenire}$ – viteza impactorului după revenire

$D_{revenire}$ – deplasarea impactorului între două cadre, măsurată pe imagine după revenire

$dt = \frac{n}{fps}$ – diferența de timp între cele două cadre pe care se măsoară deplasarea impactorului, unde fps reprezintă numărul de cadre pe secundă setat pe camera de mare viteză și n numărul stabilit de cadre pentru măsurare (1,2 sau 4 cadre).

E_{abs} – energia absorbită de placă

m – masa impactorului.

5.9.3 Procedura de măsurare a deplasărilor impactorului

Deplasarea impactorului s-a înregistrat cu camera video, înregistrările fiind apoi prelucrate în aplicația AOS Imaging Studio. Procedura de determinare a deplasărilor cuprinde etapele:

1. Se încarcă fișierul video în aplicația AOS Imaging Studio;
2. Se efectuează calibrarea prin marcarea pe imagine a celor două puncte de calibrare 1 și 2 (distanța între puncte a fost măsurată înainte de începerea experimentelor, de exemplu: grosimea plăcii, vârfuri de senzori etc.) și se setează valoarea distanței dintre puncte în câmpul corespunzător din aplicație (Figura 5.21);
3. Se derulează filmul până în momentul când impactorul atinge placa, după care se marchează pe un reper de pe imagine primul punct de măsură (Figura 5.23);
4. Se rulează pe film, cadru cu cadru, un număr stabilit de n cadre, și se marchează pe un reper de pe imagine al doilea punct de măsură (Figura 5.23);
5. Se notează valoarea deplasării pe direcția axei x sau y (Figura 5.24);
6. Se completează valorile în fișierul Excell.

În paralel, deplasarea maximă a fost măsurată cu traductorul de deplasare LVDT. Rezultatele sunt prezentate în Tabelul 5.8.

5.9.4 Rezultate și concluzii

Tabelul 5.5 Rezultatele testelor experimentale obținute cu ajutorul camerei de mare viteză. Primul contact cu placa sandwich

Metoda	Proba	dt	$D_{impact1}$	$V_{impact1}$	$D_{revenire1}$	$V_{revenire1}$	E_{abs1}
		[ms]	[mm]	[m/s]	[mm]	[m/s]	[J]
Impactor gravitațional	SP10/0,2x5	8.33	40.4	4.85	34.57	4.15	31.52
Impactor gravitațional	SP10/0,33x3	8.33	40.4	4.85	33.65	4.04	36.02
Impactor gravitațional	SP15/0,2x5	8.33	40.4	4.85	33.63	4.04	36.13
Impactor gravitațional	SP15/0,33x3	8.33	40.4	4.85	33.25	3.99	37.94
Impactor gravitațional	SP20/0,2x5	8.33	40.4	4.85	34.03	4.09	34.16
Impactor gravitațional	SP20/0,33x3	8.33	40.4	4.85	33.42	4.01	37.11
Impactor gravitațional	SP28/0,2x5	8.33	40.4	4.85	35.03	4.21	32.19
Impactor gravitațional	SP28/0,33x5	8.33	40.4	4.85	33.08	3.97	33.78
Impactor gravitațional	SF20/0,2x5	8.33	40.4	4.85	34.08	4.09	33.93
Impactor gravitațional	SF20/0,33x3	8.33	40.4	4.85	33.46	4.02	38.85

Tabelul 5.6 Rezultatele testelor experimentale obținute cu ajutorul camerei de mare viteză. Contactul al doilea cu placa sandwich

Metoda	Proba	dt	$D_{\text{impact}2}$	$V_{\text{impact}2}$	$D_{\text{revenire}2}$	$V_{\text{revenire}2}$	$E_{\text{abs}2}$
		[ms]	[mm]	[m/s]	[mm]	[m/s]	[J]
Impactor gravitațional	SP10/0,2x5	8.33	17.32	2.07	13.89	1.67	3.73
Impactor gravitațional	SP10/0,33x3	8.33	19.05	2.29	9.52	1.14	9.81
Impactor gravitațional	SP15/0,2x5	8.33	25.73	3.45	20.07	2.41	4.29
Impactor gravitațional	SP15/0,33x3	8.33	26.04	2.66	12.17	1.46	6.32
Impactor gravitațional	SP20/0,2x5	8.33	30.05	3.73	24.25	2.91	13.55
Impactor gravitațional	SP20/0,33x3	8.33	29.37	2.61	8.14	0.98	15.61
Impactor gravitațional	SP28/0,2x5	8.33	28.11	3.37	25.16	3.02	13.66
Impactor gravitațional	SP28/0,33x3	8.33	26.12	2.94	11.87	1.42	16.29
Impactor gravitațional	SF20/0,2x5	8.33	19.68	2.36	15.42	1.85	5.39
Impactor gravitațional	SF20/0,33x3	8.33	23.09	2.67	6.75	0.81	16.31

Tabelul 5.7 Rezultatele testelor experimentale obținute cu ajutorul camerei de mare viteză. Contactul al treilea cu placa sandwich

Metoda	Proba	dt	$D_{\text{impact}3}$	$V_{\text{impact}3}$	$D_{\text{revenire}3}$	$V_{\text{revenire}3}$	$E_{\text{abs}3}$
		[ms]	[mm]	[m/s]	[mm]	[m/s]	[J]
Impactor gravitațional	SP10/0,2x5	8.33	12.77	1.53	9.46	1.14	2.65
Impactor gravitațional	SP10/0,33x3	8.33	4.21	0.51	2.38	0.29	0.43
Impactor gravitațional	SP15/0,2x5	8.33	19.55	2.35	11.93	1.43	8.64
Impactor gravitațional	SP15/0,33x3	8.33	11.63	1.40	6.11	0.73	3.53
Impactor gravitațional	SP20/0,2x5	8.33	23.98	2.88	18.25	2.19	8.72
Impactor gravitațional	SP20/0,33x3	8.33	7.58	0.91	0	0.00	2.07
Impactor gravitațional	SP28/0,2x5	8.33	24.96	3.00	18.27	2.19	10.42
Impactor gravitațional	SP28/0,33x3	8.33	10	1.20	5.55	0.67	2.49
Impactor gravitațional	SF20/0,2x5	8.33	14.9	1.79	11.7	1.40	3.07
Impactor gravitațional	SF20/0,33x3	8.33	6.35	0.76	1.7	0.20	1.35

Tabelul 5.8 Energia totală consumată de impactor

Metoda	Proba	$E_{\text{abs}1}$	$E_{\text{abs}2}$	$E_{\text{abs}3}$	E_{tot}
		[J]	[J]	[J]	[J]
Impactor gravitațional	SP10/0,2x5	31.52	3.73	2.65	37.9
Impactor gravitațional	SP10/0,33x3	36.02	9.81	0.43	46.26
Impactor gravitațional	SP15/0,2x5	36.13	4.29	8.64	49.06
Impactor gravitațional	SP15/0,33x3	37.94	6.32	3.53	47.79
Impactor gravitațional	SP20/0,2x5	34.16	13.55	8.72	56.43
Impactor gravitațional	SP20/0,33x3	37.11	15.61	2.07	54.79
Impactor gravitațional	SP28/0,2x5	32.19	13.66	10.42	56.27
Impactor gravitațional	SP28/0,33x5	33.78	16.29	2.49	52.56
Impactor gravitațional	SF20/0,2x5	33.93	5.39	3.07	42.39
Impactor gravitațional	SF20/0,33x3	38.85	16.31	1.35	56.51

5.9.5 Observații și Concluzii

Testele experimentale sunt necesare pentru a determina atât tipul deteriorării cât și energia absorbită de placa sandwich. În fiecare placă s-a produs o delaminare, pentru aceasta fiind absorbită o cantitate de energie. Dacă deteriorarea este minoră, aproape toată energia cinetică este înmagazinată în energie elastică a plăcii. În tabelele 5.5, 4.6 și 5.7 sunt redată valorile parametrilor: D_{impact} (deplasarea impactorului între două cadre, măsurată pe imagine înainte de impact), V_{impact} (viteza impactorului înainte de impact) $D_{revenire}$ (deplasarea impactorului după revenire, măsurată între două cadre pe imagine), $V_{revenire}$ (viteza impactorului la revenirea după impact), E_{abs} (energia absorbită de placă).

În timpul impactului, energia absorbită de către placă trebuie să corespundă unei anumite deteriorări în material.

Energia potențială a impactorului la începutul mișcării verticale se transformă în totalitate în energie de deformare a plăcii, neglijându-se doar frecarea cu aerul.



Figura 5.25 Imagini cu deteriorările plăcilor sandwich rezultate în urma impactului gravitațional cu cădere liberă

Tabelul 5.9 Parametrii zonelor degradate ale plăcilor

Specimenul de placă	Săgeata remanentă [mm]	Dimensiunea pe direcția x a zonei deteriorate [mm]	Dimensiunea pe direcția y a zonei deteriorate [mm]	Starea de degradare finală a învelișului plăcii
SP10/0,2x5	0	55	56	Dezlipită
SP10/0,33x3	0.5	100	73	Fisurată
SP15/0,2x5	0	71	64	Dezlipită
SP15/0,33x3	2.3	62	76	Fisurată
SP20/0,2x5	0	55	51	Dezlipită
SP20/0,33x3	1.2	43	49	Fisurată
SP28/0,2x5	0	46	59	Dezlipită
SP28/0,33x3	0.1	69	71	Fisurată
SF20/0,2x5	0	60	65	Dezlipită
SF20/0,33x3	5.1	96	0	Fisurată

În imaginile din figura 5.25 sunt ilustrate deteriorările plăcilor sandwich după impact, pentru cazurile în care învelișurile au câte 5 straturi pentru fiecare față, tipul de țesătură având grosimea de 0,2mm. Se observă că deteriorarea în aceste cazuri este de tipul delaminare,

fără rupere. Delaminările plăcilor din figura 5.25 au valori care se încadrează între 43 și 100mm. Cea mai mare deteriorare apare în cazul SP10/0,2x5. Valoarea cea mai mică a deteriorărilor din acest set s-a înregistrat pentru SP20/0,2x5, atât pe direcția orizontală (axa x) cât și pe verticală (axa y).

5.9.6 Rezultatele variațiilor deplasărilor pentru standul gravitațional cu cădere liberă

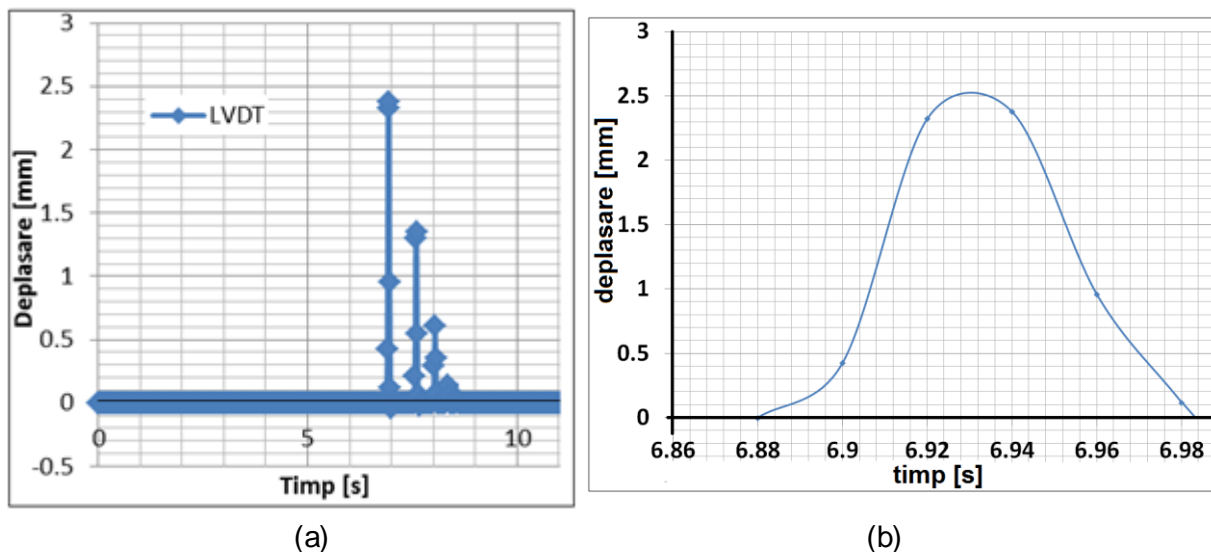


Figura 5.26 Variația deplasării în timp pentru cazul SP15/0,2x5

Variațiile deplasărilor în timp arată ca în figura 5.26 (a), în care se prezintă doar cazul plăcii SP15/0,2x5. În figura 5.26 (b) este prezentat în detaliu, variația deplasării în zona primului contact (perioada de la 6.88s la 6.98s).

În tabelul 5.10 se prezintă valorile deplasărilor maxime obținute pentru cele 10 plăci, solicitate la impact gravitațional.

Tabelul 5.2 Valorile deplasărilor maxime

Nr.crt	Placa sandwich	Deplasarea maximă [mm]
1	SP10/0,2x5	2.8535
2	SP10/0,33x3	2.3495
3	SP15/0,2x5	2.391
4	SP15/0,33x3	2.221
5	SP20/0,2x5	2.254
6	SP20/0,33x3	2.0755
7	SP28/0,2x5	1.2525
8	SP28/0,33x3	0.8987
9	SF20/0,2x5	2.5435
10	SF20/0,33x3	2.1785

În Tabelul 5.10 și în Fig. 5.27 sunt prezentate variațiile deplasării maxime obținute pentru cele 10 plăci analizate (pentru fața inferioară). Valorile deplasărilor nu sunt semnificative pentru fenomenele dinamice. Cel mai important parametru este energia absorbită de fiecare placă, scopul pentru care se fac analizele în această teză.

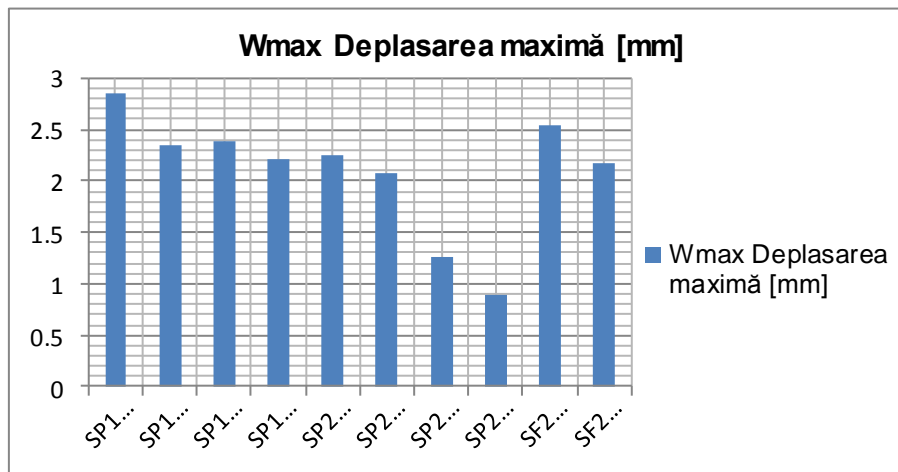


Figura 5.27 Rezultatele deplasărilor maxime obținute cu sistemul gravitațional cu cădere liberă

În graficul din figura 5.27, se observă că tendința curbei de variație a deplasării maxime funcție de grosimea și tipul de placă este cel așteptat.

Din graficul prezentat în figura 5.27 se poate observa că deplasările mai mari sunt obținute de plăcile sandwich cu fețe cu 5 straturi și grosimea de 0,2mm/strat. Însă deteriorările mai mari apar pentru plăcile cu fețe cu 3 straturi și grosimea de 0,3mm/strat. De asemenea absorbția de energie mai mare apare tot la aceste tipuri de plăci sandwich.

5.9.7 Concluzii

Importanța cercetărilor realizate este legată de luarea unor măsuri pentru diminuarea riscului formării fisurilor în învelișurile subțiri ale plăcilor de tip sandwich.

Se pot formula câteva aprecieri:

- Rezultatele testelor făcute cu standul cu cădere liberă sunt mai apropiate de realitate întrucât energia necesară deformării plăcilor nu este influențată de pierderile prin frecare, pe traseul căderii impactorului.
- Rigiditatea plăcilor cu miezul confecționat din spumă poliuretanică este mai mare decât cea a plăcilor cu miezul confecționat din faguri din polipropilenă.
- Energia absorbită de plăcile cu miezul confecționat din polistiren este mai mică decât cea a plăcilor cu miezul confecționat din faguri din polipropilenă.

5.10 Teste de impact efectuate cu ajutorul sistemului pneumatic de încercări dinamice

5.10.1 Modelarea experimentală dinamică a comportării plăcilor compozite de tip sandwich

Efectul vitezei de deformație a materialelor asupra proprietăților mecanice este de mare importanță pentru tipul de solicitare la care este supus în timpul exploatării. Aceasta dependență a fost observată în timpul testelor cvasi-statice, care au aratat faptul că rezistența materialelor crește odată cu creșterea vitezei de deformație. Acest fenomen apare cu atât mai mult cu cât materialul este mai "moale". Pentru a analiza în detaliu acest fenomen, s-a realizat un sistem de determinare a caracteristicilor materialelor în regim dinamic, bazat pe forța dezvoltată de destinderea unui gaz comprimat.

Încercarea la șoc s-a făcut în Laboratorul de Rezistența materialelor avansate din Departamentul de Inginerie mecanică al Universității Dunărea de Jos din Galați, utilizând standul pentru încercări la șoccare folosește forța dezvoltată de un sistem pneumatic. Standul de încercări dinamice este compus din (Fig. 5.28):

- sistemul de dezvoltare a forței;
- sistemul de susținere a plăcii compozite;
- sistemul de măsurare a parametrilor încercării;
- butelie de gaz comprimat.



Figura 5.28 Stand pneumatic de încercări dinamice

Măsurarea vitezei se face cu ajutorul unui senzor tensometric amplasat pe cilindrul de lansare (Fig. 5.29).

Timpul se măsoară cu două mărci tensometrice, lipite pe câte o lamelă elastică 1 și 2, fixate pe suporturi rigizi 3 și 4, toate constituind tocmai senzorul tensometric. La destinderea gazului în cilindrul 7, bara de impact 5 se va deplasa împreună cu umărul 6. În mișcarea lui, umărul 6 va lovi pe rând, la momentele t_1 și t_2 , capetele lamelor 1 și 2, producând în acestea deformații elastice, ϵ_1 și respectiv ϵ_2 (Fig. 5.30 și 5.34). Întrucât placa de achiziție primește datele în timp real, diferența de timp în care apar impulsurile în mărci este $\Delta t = t_2 - t_1$.

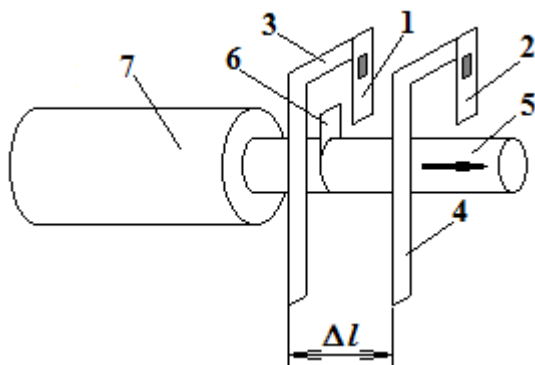


Figura 5.29 Senzorul electrorezistiv

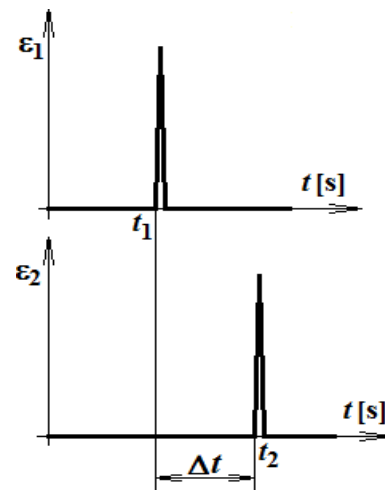


Figura 5.30 Determinarea timpului

Ținând seama că cei doi senzori sunt amplasați la distanța Δl unul de celălalt, se poate determina viteza de lovire

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (5.4)$$

Când impactorul lovește placa, energia sa cinetică se transformă în energie de deformare a plăcii.

Sistemul de dezvoltare a forței este compus din: butelie de gaz comprimat, regulator de presiune, declanșator, cilindru de destindere a gazului, piston cu tija-impactor.

Butelia de gaz este una standard, care conține un gaz comprimat la o anumită presiune p_1 . Gazul ales este azot pentru că are proprietatea de a menține componentele în mișcare la o temperatură joasă, pentru a nu se produce pierderi de energie prin încălzirea pieselor în mișcare datorită frecării.

Regulator de presiune este un sistem care ajustează presiunea de la valoarea din butelie, p_1 , la o valoare necesară destinderii gazului în cilindrul de lucru (de dezvoltare a forței de impact), p_2 . Acest regulator are două manometre, cu ajutorul cărora se poate ști în orice moment valoarea presiunii în cele două conducte de legătură (butelie-regulator și regulator-declanșator).

Declanșatorul introduce instantaneu gazul (aflat la presiunea p_2) în cilindrul de acționare. Se presupune că destinderea este adiabatică, astfel încât există relația:

$$p_2 \cdot V_2 = p_3 \cdot V_3 \quad (5.5)$$

unde:

- V_2 este volumul conductei pe traseul regulator-declanșator;
- V_3 este volumul cilindrului;
- p_3 este presiunea din cilindrul de acționare. Este presiunea care acționează asupra pistonului, dezvoltând astfel forța de impact, F .

Cilindrul hidraulic este spațiul în care gazul se destinde pentru a crea forța de impact. Cilindrul a fost construit astfel încât să asigure presiunea necesară dezvoltării forței de impact.

Pistonul cu tija de acționare sunt astfel confecționate, încât să poată lovi structura de încercat. Între piston și cămașa cilindrului s-au amplasat inele de etanșare care să permită transmiterea întregii presiuni p_3 a gazului pe suprafața pistonului.

Tot sistemul este astfel proiectat încât să poată fi dezvoltată o anumită forță, cu o anumită viteză.

Pentru calibrarea sistemului s-au efectuat măsurători, care sunt prezentate în tabelul 5.11.

Tabelul 5.11 Variația forței în funcție de presiunea dezvoltată în cilindru

P [MPa]	F1 [kN]	F2 [kN]	F3 [kN]	F4 [kN]	F5 [kN]	Fmed [kN]
1.5	0.2361	0.1933	0.1984	0.1498	0.1962	0.1948
2.0	0.2808	0.2716	0.2671	0.2623	0.2431	0.2650
2.5	0.2225	0.2855	0.3896	0.3678	0.3339	0.3199
3.0	0.3498	0.3375	0.3425	0.3715	0.3482	0.3499

În tabelul 5.11 sunt arătate valorile celor 5 încercări la 4 presiuni diferite. Valorile depind și de pasul de reglare al presiunii din piston (de aceea se utilizează valoarea medie a forțelor).

În urma calibrării sistemului (Tabelul 5.11) s-a obținut diagrama din figura 5. 31, care reprezintă variația forței medii funcție de presiunea dezvoltată în cilindru.

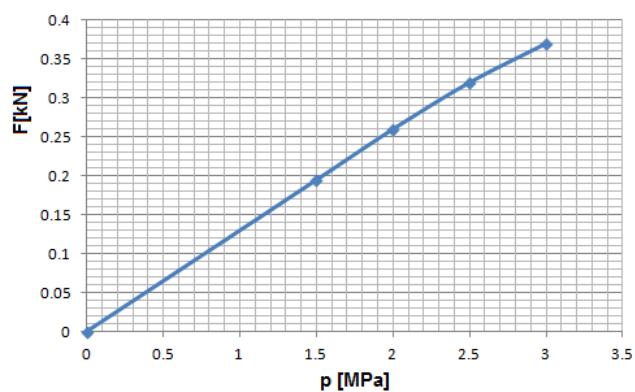


Figura 5.31 Variația forței de impact în funcție de presiunea dezvoltată în cilindru

Manometrul are cadranul divizat în [bar]. Tabelul 5.11 și figura 5.31 au fost realizate pentru presiunea transformată în [MPa] (1 bar=0.1MPa).

5.10.2 Teste de impact

Valorile maxime ale deformației plăcilor compozite s-au măsurat cu traductorul de deplasare LVDT, fiind prezentate în Tabelul 5.12.

Tabelul 5.12 Rezultatele deplasărilor maxime rezultate cu traductorul de deplasare

Nr.crt	Cazuri	Marca1	Marca2	Traductorul de deplasare LVDT [mm]
1	SP10/0,2x5	0.1479	0.01731	0.3966
2	SP10/0,33x3	0.05995	0.035	0.2772
3	SP15/0,2x5	0.01840	0.02328	0.1625
4	SP15/0,33x3	0.03184	0.02827	0.1976
5	SP20/0,2x5	0.02677	0.02473	0.2838
6	SP20/0,33x3	0.04572	0.04233	0.2880
7	SP28/0,2x5	0.06017	0.08414	0.1542
8	SP28/0,33x3	0.8720	0.01692	0.1866
9	SF20/0,2x5	0.1114	0.1655	0.5307
10	SF20/0,33x3	0.02607	0.06843	0.2509



Figura 5.32 Măsurarea deformației maxime a plăcii

Tabelul 5.13 Rezultatele energiei absorbite de placă

Proba	dt [ms]	Deformația maximă la impact [mm]	Viteza de impact1 [m/s]	Deformația de revenire1 [mm]	Viteza de revenire1 [m/s]	Energia absorbită [J]
SP10/0,2x5	4.00	3.22	0.81	0.97	0.24	0.59
SP10/0,33x3	4.00	3.44	0.86	1.25	0.31	0.64
SP15/0,2x5	4.00	2.41	0.60	1.03	0.26	0.30
SP15/0,33x3	4.00	2.96	0.74	0.74	0.19	0.51
SP20/0,2x5	4.00	2.92	0.73	0.83	0.21	0.49
SP20/0,33x3	4.00	2.9	0.73	1.29	0.32	0.42
SP28/0,2x5	4.00	4	1.00	1.6	0.40	0.84
SP28/0,33x3	4.00	2.31	0.58	0.38	0.10	0.32
SF20/0,2x5	4.00	3.45	0.86	1.38	0.35	0.62
SF20/0,33x3	4.00	2.76	0.69	1.03	0.26	0.41

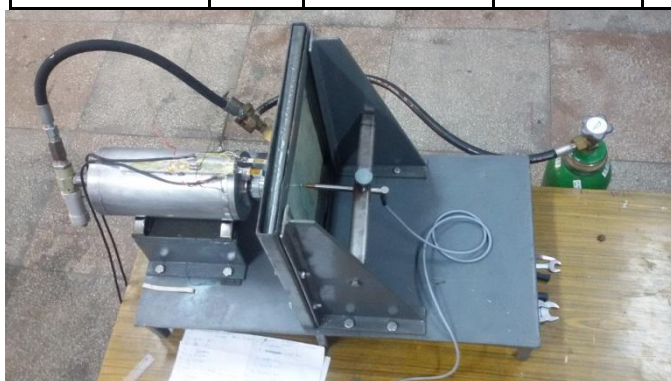


Figura 5.33 Măsurarea deplasării plăcii
– vedere de sus

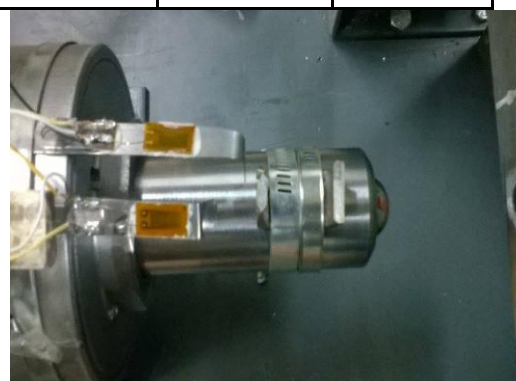


Figura 5.34 Sistemul tensometric
pentru determinarea vitezei de impact

În timpul testului dinamic s-a măsurat variația în timp a deplasării punctului de lovire cu ajutorul traductorului de deplasare. De asemenea, întregul parcurs al impactorului a fost înregistrat cu camera de mare viteză (1000 cadre/s).

În figura 5.35 sunt prezentate echipamentele de înregistrare, utilizate în timpul testului dinamic.



Figura 5.35 Testul dinamic – echipamente utilizate

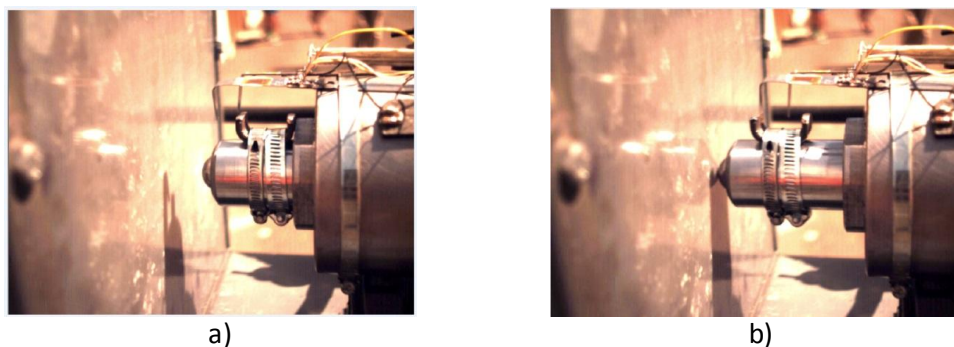


Figura 5.36 a) Testul dinamic la momentul $t=0$ (imagine realizată cu camera de mare viteză)
 b) Testul dinamic la momentul $t=0.022s$ – momentul lovirii suprafeței plăcii (imagine realizată cu camera de mare viteză)

5.10.3 Rezultatele testelor cu impactorul pneumatic

În Figura 5.37 se prezintă variația în timp a semnalelor obținute în cele două mărci tensometrice pentru placa SF20/0,33x3. Distanța în timp între cele două vârfuri reprezintă diferența de timp în care umărul de pe tija-impactor a lovit fiecare dintre cele două lamele. Cunoscând distanța între cele două lamele, s-a determinat viteza de deplasare a impactorului.

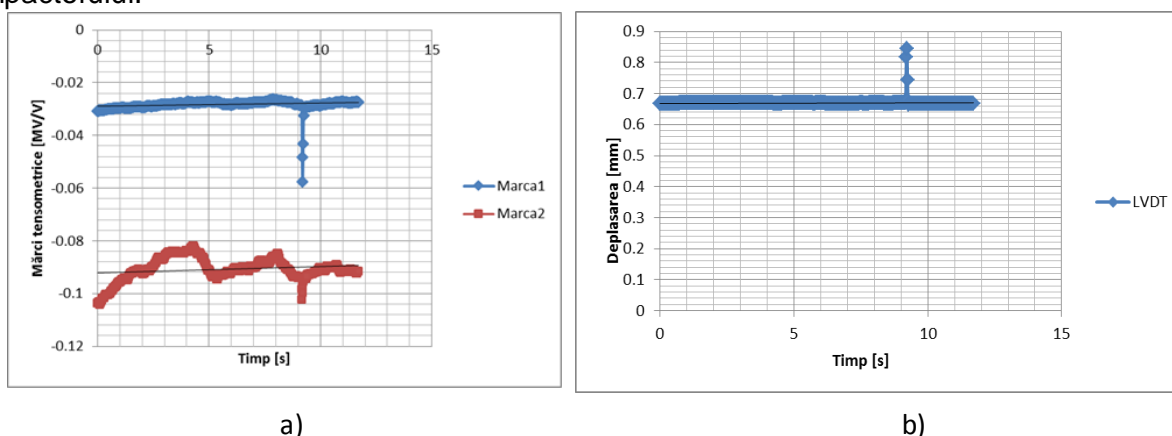


Figura 5.37 a) Variația deformației dată de mărcile tensometrice ale senzorului electrezistiv, în funcție de timp, pentru cazul SF20/0,33x3; b) Variația deplasării în timp pentru cazul SF20/0,33x3

În figura 5.37 este prezentată variația în timp a deplasării maxime a plăcii SF20/0,33x3 pe durata impactului.

5.10.4 Concluzii

Energia absorbită de materialul plăcii este caracteristica care ne poate da informații referitoare la comportarea la șoc a acestuia.

În urma încercărilor efectuate pot fi elaborate următoarele observații:

- Diferența între modul de rezemare (încăstrare) considerat teoretic în calculele FEM și modul real de rezemare al plăcilor în timpul experimentelor, pot fi considerate drept erori care să influențeze măsurările;
- Erori ar putea apărea din cauza reglării necorespunzătoare a presiunii;
- Alte erori care să influențeze rezultatele măsurărilor pot fi legate de fabricația plăcii (imperfecțiuni, incluziuni, delaminări etc.).

Cerințele de comportare la care trebuie să răspundă structura compozită de tip sandwich sunt legate de rezistența și rigiditatea bună, stabilitate dinamică, stabilitate la diverse tipuri de deteriorări.

CAPITOLUL 6 ANALIZA COMPARATIVĂ A REZULTATELOR

6.1 Analiza comparativă a calculelor statice

În acest capitol se compară rezultatele numerice și experimentale prezentate separat în capitolele 4 și 5. În tabelul 6.1 sunt selectate valorile deplasărilor maxime pentru cele zece tipuri de plăci sandwich studiate, pentru cazul solicitării statice cu forța $F=53.55$ [N], deoarece aceasta este cea mai reprezentativă valoare fiind și cea mai mare dintre toate. (La această valoare a forței erorile care ar fi apărut din cauza sensibilității citirii valorilor de pe diagramă în momentul când acestea erau citite sunt mai mici).

Tabelul 6.1 Rezultatele comparative pentru deplasările sandwich-ului obținute în calcule cu modele de tip Solid-Solid-Solid, Shell-Solid-Shell și în experimente

Nr. crt.	Placa	Rezultate cu elemente de Solid-Solid-Solid (Ansys)	Rezultate cu elemente Shell-Solid-Shell (Ansys)	Rezultate Experimentale
		F=53.55 [N]		
1	SP10/0,2x5	0.07765	0.1206	0.0719
2	SP10/0,33x3	0.07841	0.1217	0.0733
3	SP15/0,2x5	0.05432	0.0750	0.0505
4	SP15/0,33x3	0.05475	0.0755	0.0519
5	SP20/0,2x5	0.04128	0.0553	0.0394
6	SP20/0,33x3	0.04153	0.0556	0.0404
7	SP28/0,2x5	0.03137	0.0403	0.0303
8	SP28/0,33x3	0.03152	0.0405	0.0308
9	SF20/0,2x5	0.04942	0.0593	0.0488
10	SF20/0,33x3	0.04971	0.0591	0.0487

Tabelul 6.1 prezintă rezultatele obținute numeric (cu modelele de tip solid-solid-solid și shell-solid-shell) și experimental.

Tabelul 6.2 Calculul diferențelor între rezultatele numerice și cele experimentale pentru $F=53.55$ [N]

Nr. crt.	Placa	Diferența absolută [mm]			Diferența procentuală (%)		
		Mixt-Solid	Solid -Exp.	Mixt -Exp.	Mixt-Solid	Solid -Exp.	Mixt -Exp.
1	SP10/0,2x5	0.04295	0.00575	0.0487	36	8	68
2	SP10/0,33x3	0.04329	0.00511	0.0484	36	7	66
3	SP15/0,2x5	0.02068	0.00382	0.0245	28	8	49
4	SP15/0,33x3	0.02075	0.00285	0.0236	27	5	45
5	SP20/0,2x5	0.01402	0.00188	0.0159	25	5	40
6	SP20/0,33x3	0.01407	0.00113	0.0152	25	3	38
7	SP28/0,2x5	0.00893	0.00107	0.01	22	4	33
8	SP28/0,33x3	0.00898	0.00072	0.0097	22	2	31
9	SF20/0,2x5	0.00988	0.00062	0.0105	17	1	22
10	SF20/0,33x3	0.00939	0.00101	0.0104	16	2	21

În tabelul 6.2 se prezintă diferențele între deformațiile maxime obținute în modelele numerice (modelul cu elemente de tip solid, modelul mixt: shell-solid-shell) și experiment pentru $F=53.55[N]$.

Diferențele procentuale între cele două tipuri de modelări numerice (coloana Mixt–Solid) se încadrează între 16% și 36%.

Diferențele procentuale între modelările numerice cu elemente de tip solid și experiment (coloana Solid–Exp.) se încadrează între 1% și 8%.

Diferențele procentuale între modelările numerice cu elemente de tip mixt (shell-solid-shell) și experiment (coloana Mixt–Exp.) se încadrează între 21% și 68%.

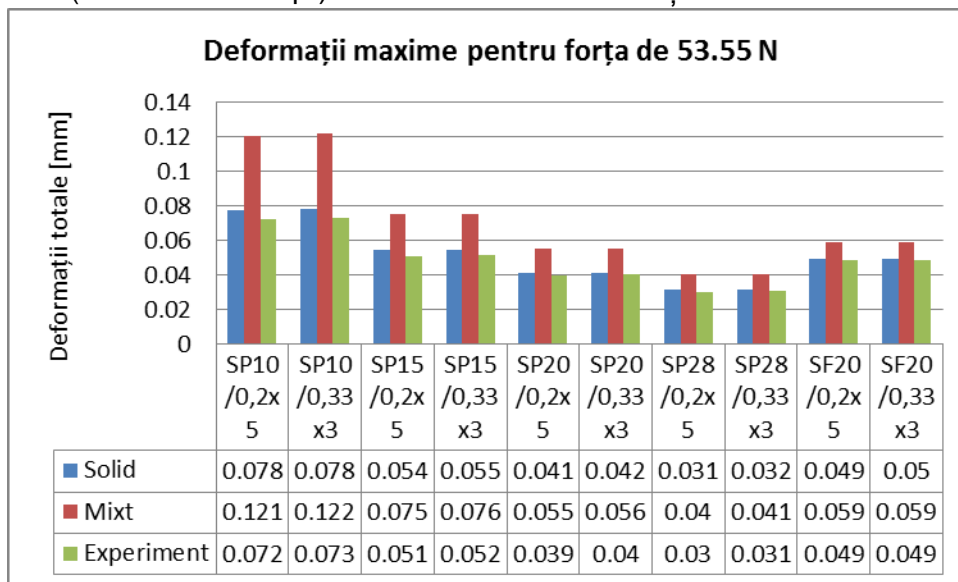


Figura 6.1 Variațiile deformațiilor obținute în modelările numerice cu elemente de tip Solid, respectiv Mixt și în experiment

Așa cum se observă în figura 6.1 cele mai apropiate valori de cele ale deformațiilor maxime obținute la experiment sunt cele obținute în modelul cu elemente de tip solid.

În general, deși au aceeași grosime totală, învelișurile cu trei straturi au o rezistență mai mică decât învelișurile cu cinci straturi. Rigiditatea plăcilor ale căror învelișuri au cinci straturi este mai mică decât a celor cu 3 straturi.

6.2 Analiza comparativă a calculelor la impact dinamic

În tabelul 6.3 sunt comparate rezultatele obținute experimental cu rezultatele obținute numeric în software-ul ANSYS (Explicit Dinamic –ANSYS Autodyn PrePost). Se pot observa diferențe semnificative datorită mai multor tipuri de erori. Diferențele pot fi atribuite erorilor experimentale. Pentru erorile posibile apărute în calculul numeric există o serie de cauze posibile, care se pot enumera astfel:

- Alegerea tipului de model, așa cum s-a procedat pentru calculul static, unde s-a utilizat și metoda mixtă pentru rețeaua de discretizare, respectiv Shell-Solid-Shell a dat diferențe mari, atât în raport cu experimentul, cât și în raport cu al doilea model. Cu această metodă s-au întâmpinat o serie de neajunsuri (erori din software, din cauza cărora nu se putea finaliza calculul);
- Probleme la discretizare care s-au întâmpinat din cauza procesorului slab al calculatorului din cauza caruia nu s-a putut efectua o discretizare mai fină;
- Date insuficiente pentru caracteristicile de material.

În analizele dinamice (impact) interesează în primul rând energia consumată pentru deformarea structurilor, și mai puțin valorile deplasărilor maxime obținute.

Calculul s-a efectuat pentru durata a 2.5ms.

Scopul calculului a fost determinarea comportării fiecărui tip de material utilizat pentru plăcile de tip sandwich, astfel încât să se determine cea mai bună configurație și cel mai pretabil tip de material pentru solicitarea de impact. Din motive tehnice, analiza fenomenului s-a efectuat în 2.5ms (o parte din durata totală a fenomenului). Din tendința fiecărei configurații, astfel încât să poată fi anticipată comportarea specișenelor de placa tip sandwich, pentru că în final să fie luată o decizie din acest punct de vedere rezultă o comportare conforma cu experimentele. Rezultatele obținute în acest calcul au putut fi comparate cu cele obținute în experimente, obținându-se pentru eșantionul de 2.5ms o bună concordanță. Pe baza acestei comparații se poate concluziona faptul că anticiparea comportării plăcilor până la finalul fenomenului de impact în calculul numeric este justificată.

Metodologia utilizată poate fi aplicată și în proiectare, astfel încât se poate face economie de timp de calcul, doar în etapa de alegere a materialului și configurației plăcii de tip sandwich.

Tabelul 6.3 Valorile obținute pentru energia absorbită, determinată experimental și numeric

Nr. crt	Specimene de plăci	Energia internă[J] (Rezultate experimentale) pentru impactorul cu cădere liberă (primul impact)	Energia internă [J] (ANSYS) (Doar pentru primele 2.5ms)
1	SP10/0.2x5	31.52	26.324
2	SP10/0.33x3	36.02	26.063
3	SP15/0.2x5	36.13	31.754
4	SP15/0.33x3	37.94	31.514
5	SP20/0.2x5	34.16	20.569
6	SP20/0.33x3	37.11	20.839
7	SP28/0.2x5	32.19	16.746
8	SP28/0.33x3	33.78	16.689
9	SF20/0.2x5	33.93	26.386
10	SF20/0.33x3	38.85	20.865

Tabelul 6.4 Valorile obținute pentru deplasări proiectate pe direcțiile x și y,[mm] determinate numeric și experimental

Specimen de placă	Deplasarea pe direcția x Numeric (ANSYS)	Deplasare pe direcția y Numeric (ANSYS)	Deplasarea pe direcția x -Experiment-	Deplasarea pe direcția y -Experiment-	Starea de degradare finală
SP10/0,2x5	1.4	1.6	5.5	5.6	Dezlipită
SP10/0,33x3	1.4	1.6	10	7.3	Fisurată
SP15/0,2x5	3.4	3.2	7.1	6.4	Dezlipită
SP15/0,33x3	3.4	3.2	6.2	7.6	Fisurată
SP20/0,2x5	4.5	3.8	5.5	5.1	Dezlipită
SP20/0,33x3	4.5	3.8	4.3	4.9	Fisurată
SP28/0,2x5	4.6	2.0	4.6	5.9	Dezlipită
SP28/0,33x3	4.6	4.6	6.9	7.1	Fisurată
SF20/0,2x5	5.5	3.6	6	6.5	Dezlipită
SF20/0,33x3	0.5	0.5	9.6	6	Fisurată

În tabelul 6.3 sunt prezentate valorile energiei absorbite de placă pentru distrugere, în urma impactului de ordinul întâi (impactul principal).

În timpul experimentelor au apărut fisuri doar în învelișurile cu 3 straturi. Rezultă că rezistența acestora la impact este mai mică decât învelișurile cu 5 straturi deși grosimea totală este aceeași. Se observă că tendința de variație numerică a energiei absorbite este aceeași, atât în calcule cât și în experimente.

Energia totală la impact are două componente:

- Energia absorbită pentru deformări elastice;
- Energia absorbită pentru deformări neelastice (inclusiv fisuri).

În cazul plăcilor cu deformări neelastice energia consumată a fost utilizată atât pentru deformarea elastică a plăcii cât și pentru fenomenele de degradare a învelișului și inimii.

Alte concluzii:

- Experimentele și simulările care stau la baza răspunsurilor dinamice pot fi folosite pentru a proiecta structuri mai rezistente și mai eficiente la șoc sau chiar a exploziilor la solicitări dinamice extreme.

Pentru intensitățile ridicate de încărcare, învelișurile fețelor ușoare și miezurile cu densitate redusă, permit cea mai mare atenuare a șocurilor. Este evident că miezurile cu densitate mare se confruntă cu fragmentări și rupturi la scară largă și nu sunt semnificativ superioare structurilor cu densitate mică conform rezultatelor din tabelul 6.4.

Pentru intensități reduse de încărcare structurile sandwich cu miezuri cu densitate mare pot fi utilizate pentru a economisi spațiu și pentru a asigura o rezistență eficientă împotriva șocurilor, deoarece sunt mult mai subțiri decât structurile sandwich cu miezuri cu densitate mică (pe bază de greutate). Cu condiția ca restricțiile dimensionale să fie îndeplinite, pe bază de masă, o combinație de miezuri groase, cu densitate redusă și fețe subțiri rigide asigură o mai bună atenuare a șocurilor.

- Experimentele sunt susținute de simulări cu elemente finite, care reflectă efectele degradărilor sub formă de fisuri, rupturi, deformări și dezlipiri în învelișuri, deformări, fisuri, rupturi în miezuri. Răspunsul dinamic al panourilor sandwich este investigat folosind modelarea cu elemente finite și arată că experimentele și simulările sunt în acord.

- În general, deși au aceeași grosime totală a învelișurilor, energia internă a plăcilor ale căror învelișuri au cinci straturi este mai mare decât a celor cu 3 straturi. Explicația este dată de existența tensiunilor tangențiale interlaminare suplimentare la cele cu 5 straturi față de cele cu 3 straturi, care efectuează lucru mecanic suplimentar față de cele cu 3 straturi.

- Din cercetările efectuate reiese că a face o comparație între rezultatele experimentale și cele numerice se poate finaliza cu anumite erori care pot apărea din cauza multitudinilor de parametri și caracteristici de material care trebuie introduși în calculul. Software-ul utilizat în prezenta teză a fost ANSYS. În concluziile tezei se poate observa că una din cauzele erorilor apărute în calcul este dificultatea de a considera naturale proprietățile mecanice ale materialelor de exemplu. În lucrare s-a efectuat studiul de impact pentru plăci de tip sandwich compozit. În final s-au comparat rezultatele experimentale și cele numerice pentru energia absorbită de plăci. În [99] și [100] s-au realizat analize comparative pentru specimene stratificate atât experimental cât și în ANSYS unde de asemenea rezultatele au diferit puțin și atunci a fost necesar calculul procentului de erori.

CAPITOLUL 7 CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI PERSPECTIVE

7.1. Concluzii generale

Datorită dezvoltării economice și tehnologice, în special a materialelor avansate, reducerea consumurilor de energie la nivel global, criza de materii prime tradiționale (lemn, oțel, alte metale etc.) și amplificarea politicii de protecție a mediului prin reducerea emisiilor poluante, s-a ajuns la crearea de noi tipuri de materiale și de noi tehnologii nonconformiste.

Materialele compozite de tip sandwich se încadrează în grupa materialelor compuse. Având în vedere însușirile și evoluția lor viitoare, o importanță deosebită este acordată materialelor compozite, care erau denumite inițial materiale plastice consolidate. Acestea au proprietăți superioare și sunt rezultatul amestecului a cel puțin două componente. Proprietățile componentelor se completează unele pe altele, rezultatul fiind un material superior cu calități specifice fiecărui material ce îl alcătuiește. Aceste materiale au fost create pentru a substitui într-o măsură cât mai mare materialele tradiționale deja existente (feroase și neferoase), care prezentau anumite lipsuri în privința performanțelor, a proceselor de realizare și prelucrare, mase, volume, complexități geometrice, costuri importante și domenii de utilizare.

În ceea ce privește partea tehnică, termenul de material compozit face referire la materialele ce prezintă proprietățile următoare:

- sunt o îmbinare a cel puțin două materiale care sunt sub aspect chimic diferite, între acestea existând o suprafață evidentă de separație;
- sunt realizate artificial, prin îmbinarea unor componente diferite;
- au proprietăți pe care nici un material component luat de unul singur nu le prezintă.

Dezvoltarea tehnologiilor de fabricație a materialelor compozite a impus realizarea unor încercări pentru determinarea caracteristicilor structurilor confecționate din aceste materiale și mai ales ale celor dinamice.

Testele experimentale la șoc se fac cu diferite standuri de încercare și control ale calității acestora, cu o structură adecvată, având, în primul rând, un sistem de măsurare cu achiziția datelor privind evoluția în timp a valorilor parametrilor dinamici și care să permită realizarea procedurilor de testare specifice. Cele mai flexibile standuri utilizează componente pneumatic/hidraulice care intră în alcătuirea sistemului de acționare și dezvoltare a forței dinamice.

În cadrul tezei s-au realizat o serie de activități pentru atingerea obiectivului principal:

- Execuția (fabricarea) plăcilor compozite tip sandwich;
- Prelucrarea plăcii compozite;
- Calibrarea standului (determinarea forței de impact în funcție de presiunea gazului din cilindru, determinarea vitezei impactorului funcție de presiunea gazului din cilindru, utilizând tensometria electrică rezistivă);
- Lipirea mărcilor tensometrice pe suprafața plăcilor și introducerea acestora în circuitul punții tensometrice;
- Testul de solicitare statică a plăcilor compozite tip sandwich;
- Teste de solicitare la impact al plăcilor compozite tip sandwich cu standul gravitațional;
- Teste de solicitare la impact al plăcilor compozite tip sandwich cu standul pneumatic.

Încercările la șoc s-au efectuat în Laboratorul de Rezistența Materialelor avansate din Departamentul de Inginerie Mecanică al Universității "Dunarea de Jos" din Galați, utilizându-se două standuri:

- Stand pentru încercarea la șoc utilizând forța dezvoltată de un sistem pneumatic;
- Stand pentru încercarea la șoc utilizând forța gravitațională dezvoltată prin căderea liberă a unei bile rigide de la o anumită înălțime.

Analizele numerice și experimentale, rezultatele obținute, concluziile și discuțiile formulate reprezintă contribuții originale care, în sinteză, pot fi formulate astfel:

1. Conceperea, elaborarea și aplicarea metodelor și tehnologiei de realizare a stratificatelor pentru confectionarea învelișurilor, cu utilizarea completă a rezultatelor obținute, fundamentarea, sub aspect teoretic, a bazelor modelului fizic și matematic al compozitelor stratificate pentru obținerea unei plăci sandwich cu o bună rezistență.
2. Realizarea unei baze de date numerice și experimentale referitoare la materialele utilizate, care să permită dezvoltarea unor cercetări experimentale și evidențierea unor aspecte de interes din punct de vedere științific;
3. În urma analizei macromecanice a fiecărui strat și a stratificatului învelișurilor în ansamblu, s-a observat faptul că, pentru aceeași grosime a stratificatului, rigiditatea și rezistența depind de numărul de straturi, proprietățile fiecărui strat și de modul de orientare a laminelor în stratificatul învelișurilor;
4. În analizele experimentale, utilizând echipamente bazate pe tensometria electrică rezistivă, au fost determinate caracteristicile mecanice principale ale materialelor compozite utilizate în construcția plăcilor. Rezultatele testelor de tracțiune au fost comparate cu datele oferite de producătorul țesăturilor din fibre de sticlă și cu caracteristicile găsite în literatura de specialitate, remarcând faptul că modulele de elasticitate E se corelează foarte bine. De asemenea, pentru valorile obținute pentru tensiunile de rupere σ_r , pentru epruvetele confectionate din țesătură bidirecțională s-au obținut diferențe de 10 % față de cele indicate de producătorul țesăturilor din fibre de sticlă și cu caracteristicile găsite în literatura de specialitate;
5. A fost elaborat modelul structural al plăcilor (s-au modelat învelișul și miezul din material compozit). În urma simulărilor statice și de impact cu structura plăcilor s-a verificat rigiditatea și rezistența plăcilor la solicitarea statică. Rezultatele simulărilor experimentale multiple au fost validate de rezultatele obținute cu testele numerice;
6. A fost verificată rezistența plăcilor la impact conform următoarelor criterii: al tensiunilor și deformațiilor maxime, Tsai-Wu, Tsai-Hill;
7. A fost urmărit modul de degradare al plăcilor în urma impactului experimental, obținându-se concluzii de tipul: învelișurile cu trei straturi au o rezistență mai mică decât învelișurile cu cinci straturi, deși grosimea totală a stratificatului este aceeași.

7.2. Contribuții originale

Obiectivul de ansamblu al tezei constă în investigarea mecanismelor de rezistență la impact care influențează fenomenele de degradare ale plăcilor compozite de tip sandwich. Pentru realizarea acestui obiectiv de ansamblu sunt identificate trei obiective esențiale, fiecare dintre acestea fiind tratate în capitolul de analiză numerică a impactului și în capitolul de analiză experimentală.

În urma analizelor numerice se pot desprinde următoarele concluzii de ordin general privind:

- Identificarea unui model numeric capabil să surprindă fenomenele ce apar la impactul plăcilor compozite de tip sandwich.

Modelul numeric realizat în ANSYS, calibrat și validat pe baza analizelor experimentale se compune din următoarele elemente de modelare:

- reprezentarea comportării materialului plăcii de tip sandwich, utilizând elemente finite volumice.
- adaptarea procedurii de tip dinamic-explicit în vederea studiului fenomenelor statice și quasi-stactice.
- Analizele numerice de validare, realizate în ANSYS/Explicit indică o bună capacitate a modelului numeric de reprezentare a răspunsului structural atât la determinarea caracteristicilor de rezistență ale elementelor de volum, cât și ale elementelor de placă.

Principalele elemente de originalitate ale tezei sunt:

1. În urma analizelor teoretice ale fenomenului de impact, am realizat o modelare originală a fenomenului apărut în plăcile tip sandwich.
2. Construirea unui stand experimental original, utilizat pentru studiul impactului gravitațional cu cădere liberă.
3. Capacitatea standului de a realiza experimente de impact reproductibile, datorită calibrării suficient de exactă.
4. Măsurarea tensometrică a forței de impact cu ajutorul traductorului de forta și a vitezei de lovire a impactorului asupra plăcilor fixate în standul experimental.
5. Experimentele efectuate care au evidențiat faptul că solicitarea de impact produce fenomene de degradare nereproductibile, depinzând de tipul de material.
6. Evidențierea caracteristicilor mecanice de material, care determină în mod hotărâtor comportarea acestora la solicitarea de impact.
7. Efectuarea măsurării urmelor de degradare lăsate de impactor pe suprafețele impactate.
8. Determinarea dimensiunilor relative ale urmelor de impact, în baza acestora putându-se efectua o comparație între diferite materiale supuse la impact.

În cadrul programului de pregătire pentru doctorat am elaborat, în colaborare, o serie de 6 lucrări științifice, în care am expus progresul în studiile mele de impact .

Această lucrare conține un studiu elaborat despre comportarea plăcilor de tip sandwich compozit, care au fost analizate din punct de vedere mecanic supuse la solicitări statice și dinamice. S-a început cu analiza geometriei diferitelor tipuri de celule: circulară, hexagonală și pătrată. Acest studiu s-a realizat pentru a se observa comportamentul lor la solicitări statice pentru ca mai apoi să se facă o alegere de formă a miezului pentru întreaga placă.

Rezultatele analizei celulelor au fost totuși nesatisfăcătoare deoarece prezenta pe alocuri incertitudini și întrebări despre cum se va comporta întreaga placă la solicitări. În aceste condiții, a trebuit să se analizeze static plăcile sandwich întregi.

9. S-a analizat forma geometrică a miezurilor din polipropilenă: celule circulare, hexagonale și pătrate. În cazul celor circulare și pătrate s-a analizat și forma nestructurată. Rezultatele au fost comparate utilizându-se grafice care prezintă inflexiuni și salturi dar și cu ajutorul tabelelor pentru evidențierea valorilor obținute. Pentru aceste modele, fețele au avut grosimea de 1mm iar materialul compozit a fost rășină epoxidică armată cu fibre de sticlă unidirecțională. Grosimile miezurilor analizate static au fost de 20 mm. După ce s-au făcut aceste modelări cu ajutorul Softului ANSYS prin metoda elementelor finite s-a ales pentru studiu mai amanunțit miezul de tip sandwich cu celule hexagonale pentru a trece în etapa de analiză experimentală.

Alegerea acestui material s-a făcut după proprietățile și caracteristicile bune descoperite în urma analizei cu elemente finite. O bună parte decizională s-a făcut pe baza costurilor de achiziție a materialului.

10. Experimentele s-au realizat atât static cât și dinamic pe plăci sandwich de tip fagure hexagonal din polipropilenă cu diferite grosimi și anume: 10, 15, 20, 28 [mm].

La fel s-a procedat și pentru spume: au fost analizate prin metoda elementelor finite în softul ANSYS, atât static cât și dinamic diferite spume: SAN Foam 81 Kg/m³ (SAN styrene acrilonytrile), SAN Foam 103kg/m³, PVC Foam 60 kg/m³, PVC Foam 80kg/m³ cu grosimi de 20 mm, iar apoi pentru studiul mai amanunțit s-a ales polistirenul extrudat cu densitate de 30Kg/m³, cu grosime de 20mm pentru miez. Această alegere a fost strict din punct de vedere al prețului mult mai mic în comparație cu celelalte materiale, dar și pentru că are o densitate foarte mică care ajută structurile globale să fie mult mai ușoare, având în vedere această tendință de căutare în toate domeniile dar mai cu seamă în industria navală și aerospațială.

11. S-au analizat diferite tipuri de fețe ale sandwichurilor, și anume: fețe cu straturi unidirectionale și cu straturi bidirecționale însă materialele au fost mereu aceleași: Rășină Epoxidică armată cu fibre de sticlă. S-au folosit țesături de tip Plain cu grosime de 0,33mm și țesătură satinată cu grosimea de 0,2mm. Pentru miezuri, materialele utilizate au fost: polipropilena și o categorie de spume.

12. După ce au fost analizate static și au fost discutați noii parametrii obținuți, sandwichurile compozite au fost analizate la șoc cu două sisteme diferite și anume impact gravitațional și impact pneumatic. Impactul pneumatic este o metodă modernă și un concept relativ nou, deoarece sistemul impactorului pneumatic a fost conceput în Laboratorul de Rezistența materialelor avansate al Facultății de Inginerie, "Universitatea Dunărea de Jos", și îmbunătățit de mine împreună cu profesorul și conducătorul meu de doctorat.

13. Îmbunătățirile au constat în aplicarea sistemului o butelie nouă cu argon și un reductor de presiune dar și îmbunătățiri pentru suportul de fixare al plăcilor de diferite grosimi. Am adăugat sistemului de prindere al cadrului metalic, douăsprezece șuruburi de tip fluture pentru a se realiza cu succes fixarea plăcilor. Aceste îmbunătățiri au contribuit la eliminarea unor erori apărute la frecarea pistonului în cilindru datorită noilor achiziții.

14. De asemenea îmbunătățiri și contribuții am adus și standului gravitațional. La standul gravitațional s-au înregistrat multe erori din cauza frecărilor apărute în ghidaje și a trebuit să renunț la acel sistem pentru a concepe altul unde nu există frecări decât cu aerul.

15. Plăcile de tip sandwich compozit au fost realizate manual de către mine. Am proiectat și format două seturi a câte zece tipuri de plăci sandwich diferite astfel:

- 1) SP10/0,2x5; 2) SP10/0,33x3; 3) SP15/0,2x5; 4) SP15/0,33x3; 5) SP20/0,2x5;
- 6) SP20/0,33x3; 7) SP28/0,2x5; 8) SP28/0,33x3; 9) SF20/0,2x5; 10) SF20 0,33x3.

SP este prescurtarea de la sandwich cu miez din polipropilenă urmat de grosimea în mm a miezului plăcii, care poate fi 10,15, 20, 28. După grosimea miezului se adaugă grosimile fețelor, notate 0,2x5 sau 0,33x3 (grosimea unei țesături poate fi de 0,2mm sau 0,33mm, urmate de numărul straturilor de formare, respectiv 5 straturi sau 3 straturi.

15. În ceea ce privește caracteristicile materialelor utilizate în această lucrare, unele dintre ele au fost luate din diferite surse cum ar fi: biblioteca Ansys-ului, care conține o bună parte de caracteristici utilizate în acest studiu, din lucrări de cercetare și testele experimentale ale unor autori. Astfel s-au determinat unele caracteristici de material pentru: polistirenul extrudat și pentru matricea polimerică armată cu țesături din fibre de sticlă.

Această cercetare este bazată pe analizarea unui număr mare de lucrări științifice desfășurate în această direcție, lucrări care au constituit sursă de inspirație pentru această teză și unele metode folosite de alți cercetători au fost îmbunătățite sau comparate.

7.3. Propuneri pentru studii viitoare

În continuare se pot îmbunătăți standurile pe care am realizat testele, pentru o mai bună acuratețe a valorilor și dispariția completă a erorilor.

Folosirea altor standuri sau altor dispozitive de măsurare a impactului de exemplu impactul balistic, sau impactul cu ciocanul Charpy, aparate profesionale pentru testarea impactului, ar putea fi o soluție mai eficientă.

Cercetări experimentale privind solicitările plăcilor sandwich la: încovoiere în trei sau patru puncte, oboseală, forfecare, delaminare, încovoiere după impact, compresiune după impact, vibrații, rupere interlaminară ar putea oferi rezultate remarcabile ale dezvoltărilor avansate ale analizelor plăcilor de tip sandwich.

Proiectarea și realizarea altor tipuri de plăci sandwich cu alte tipuri de materiale utilizate pentru fețe și miezuri cum ar fi: pentru fețe se mai pot utiliza și fibre de carbon, kevlar, fibre aramidice, iar matricea poate fi din rășini poliesterice nesaturate, vinilesterice, fenolice (termorigide). Miezurile mai pot fi de exemplu COREMAT, lemn de balsa, alte spume cu alte densități decât cele utilizate în această teză, miezuri din aluminiu.

Metoda cu elemente finite abordată în această teză a fost elaborată în softul ANSYS, utilizând deopotrivă modulele Explicit Dynamic pentru calculul impactului. În această direcție se mai pot utiliza și alte softuri cum ar fi ABAQUS-ul și LS-DYNA sau extensii ale acestora gen VUMAT sau AUTODYN.

Bibliografie selectivă

- [1] N. Manafi, *Bazele Mecanicii Aplicate, Partea V-a Dinamica solidului rigid conținut*, ([http://cat.mec.pub.ro/archive/Bazele%20Mecanicii%20Aplicate%20\(6\)%20-%20DINAMICA%20SOLIDULUI%20RIGID.pdf](http://cat.mec.pub.ro/archive/Bazele%20Mecanicii%20Aplicate%20(6)%20-%20DINAMICA%20SOLIDULUI%20RIGID.pdf)).
- [2] R. Voinea, D. Voiculescu și V. Ceașu, *Mecanica*, București, 1975.
- [3] L. Tong, A. P. Mouritz și M. K. Bannister, *3D Fibre Reinforced Polymer Composites*, Elsevier Science Ltd, Londra, 2002.
- [4] G. Jeronimidis și J. Hou, *Impact and postimpact mechanics of composite laminate circular plates*, ICAM'96, Beijing.
- [5] M. Szarvas, *Thesis: Crash of the boat into the pier*, Slovak University of Technology Bratislava, 2011.
- [6] S. V. Kilchert, *Nonlinear finite element modelling of degradation and failure in folded core composite sandwich structures*, institute Aircraft Design, University of Stuttgart, 2013.
- [7] M. Bunea Schițanu, *Contribuții la studiul solicitărilor la impact ale compozitelor cu matrice epoxidică armate cu țesături*, Universitatea "Dunarea de Jos", Galați, 2015.
- [8] T. Anderson și E. Madenci, „Experimental investigation of low-velocity impact characteristics of sandwich composites,” *Composite Structures*, vol. 50, nr. 3, p. 239–247, 2000.
- [9] J. P. Dear, H. Lee și S. A. Brown, „Impact damage processes in composite sheet and sandwich honeycomb materials,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 32, nr. 1-4, p. 130–154, 2005.
- [10] J. H. Park, S. K. Ha, K. W. Kang, C. W. Kim și H. S. Kim, „Impact damage resistance of sandwich structure subjected to low velocity impact,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 201, nr. 1-3, p. 425–430, 2008.
- [11] K. B. Shin, J. Y. Lee și S. H. Cho, „An experimental study of low-velocity impact responses of sandwich panels for Korean low floor bus,” *Composite Structures*, vol. 84, nr. 3, p. 228–240, 2008.
- [12] A. D. Borîtu, *Contribuții privind evaluarea integrității materialelor și structurilor compozite prin inspecție nedistructivă*, București, 2011.
- [13] S. Abrate, *Impact on composite structures*, Southern Illinois University at Carbondale, First published 1998, This digitally printed first paperback version 2005 ISBN 0-521-47389-6.
- [14] I. Chirică, *Elasticitate - Fundamente. Exemple. Aplicații*, Editura Tehnică, București, ISBN 973-31-1129-5, 1997.
- [15] D. Alcalay. [Interactiv]. Available: <http://www.carmel-lab.com/sites/deven.cometousa.co.il/files/Drop%20Shock%20Theory.pdf>.
- [16] M. Aktas, H. E. Balcioglu, A. Aktas, E. Turker și M. Deniz, *Impact and post impact behaviour of layer fabric composites*, vol. 94, *Composite structures*, vol. 94, p. 2809–2818, 2012, p. 2809–2818.
- [17] S. Heimbs, J. Cichosz, S. Kilchert și M. Klaus, *Sandwich panels with cellular cores made of folded composite material: mechanical behaviour and impact performance*, ICCM17, Germany, 2009.

- [18] N. A. Apetre, *Thesis: Sandwich panels with functionally graded core*, University of Florida, 2005.
- [19] C. Akin și M. Şenel, *An Experimental Study of Low Velocity Impact Response for Composite Laminated Plates*, DPU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi , Sayı 21, Nisan, 2010.
- [20] M. A. Hassan, S. Naderi și A. R. Bushroa, *Low-velocity impact damage of woven fabric composites: Finite element simulation and experimental verification*, Materials and Design 53, p. 706–718, 2014, p. 706–718.
- [21] N. Tarim, F. Findik și H. Uzun, „Ballistic impact performance of composite structures,” *Compos Struct*, vol. 56, nr. 1, p. 13–20, 2002.
- [22] F. Findik și N. Tarim, „Ballistic impact efficiency of polymer composites,” *Compos Struct*, vol. 61, nr. 3, p. 187–92, 2003.
- [23] F. Findik, M. Misirlioglu și U. Soy, „The structural features of glass fibre reinforced polyester matrix composites,” *Sci Eng Compos Mater*, vol. 10, nr. 4, p. 287–295, 2002.
- [24] *Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event1 D7136/D7136M– 12*.
- [25] S. V. Lefter, *Teza: Contribuții la Calculul Structurilor Navale confecționate din Plăci Armate cu Fibre de Sticlă, la solicitări dinamice de impact*, Universitatea „Dunărea de Jos” Galați, 2011.
- [26] M. Altenaiji, G. K. G.K.Schleyer și Y. Y. Zhao, „Characterisation of Aluminium Matrix Syntactic Foams Under Static and Dynamic Loading, Capitolul 19, Materials Science, Composite Materials,” în *"Composites and Their Properties"*, book edited by Ning Hu, ISBN 978-953-51-0711-8, 22. August, 2012.
- [27] W. Cantwell și J. Morton, „Impact perforation of carbon fibre reinforced plastic,” *Composites science and technology*, vol. 38, p. 119–141, 1990.
- [28] A. Ahmed și L. Wei, *The low-velocity impact damage resistance of the composite structures (a review)*, Rev.Adv.Mater.Sci., vol. 40 (2015), p. 127-145, 07 iulie 2014, p. 127–145.
- [29] C. Naslund și O. O. UYANIK, *Parametric Study of Joint Design in a HSLC Composite Vessel – Load-carrying Characteristics of Foam Core and Joint Geometry in Sandwich Structures*, Sweden: Department of Shipping and Marine Technology, Gothenburg, Sweden, 2011.
- [30] L. Aktay, *Thesis: Improved Simulation Techniques for Modelling Impact and Crash Behaviour of Composite Structures*, Turcia: University Stuttgart, Ankara, Turcia, January 2010.
- [31] E. Green și Associates, *Marine Composites*, Annapolis Maryland, ISBN 0-9673692-0-7, 1999.
- [32] A. Sheno, R. Beck, D. Boote, P. Davies, A. Hage, D. Hudson, K. Kageyama, J. A. Keuning, P. Miller și L. Sutherland, *Sailing Yacht Design*, vol. 2, Korea: 17th International ship and offshore structures congress, 16-21 august, Volume2, Seoul, Korea, 2009.
- [33] I. Chirică, E. F. Beznea și I. Gavrilăscu, *Metode moderne de calcul al structurilor compozite*, Ed. Cermi, Iasi, ISBN 978-973-667-283-5, 2007.
- [34] E. F. Beznea și I. Chirica, *Structuri compozite*, Editura Galați University Press, ISBN 978-606-8008-86-8, 2010.

- [35] G. Vasile, *Teza: Structuri cu rigiditate ridicată, din material compozite, utilizate în construcția de autovehicule*, Nr. 5981 din iulie 2013, Brașov, Romania.
- [36] A. Zinno, *Thesis: Multiscale Approach for the Design of Composite Sandwich Elements*, University of Napoli FEDERICO II, 30 November 2010.
- [37] Z. Voyiadjis G. și P. I. Kattan, *Mechanics of Composite Materials with MATLAB*, ISBN-10 3-540-24353-4 Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN-13 978-3-540-24353-3 Springer Berlin Heidelberg New York, 2005.
- [38] R. Murugan, K. Padmanabhan și R. Ramesh, *Study of vibration characteristics and interaction of cyclic fatigue loading on vibration responses of thin walled woven fabric glass-carbon epoxy composites for structural applications*, 13.ian.2016.
- [39] P. K. Mallick, *Fiber Reinforced composites, Materials, Manufacturing and Design*, U. of Michigan-Dearborn și F. a. T. E. C. R. C. P. Group, Ed., University of Michigan-Dearborn, Editura CRC Press Taylor and Francis Group , Boca Raton London New York, International Standard Book Number-13: 978-0-8493-4205-9, 2008.
- [40] K. K. Autar, *Mechanics of Composite Materials second edition*, F. a. T. E. Group, Ed., Editura Tailor and Francis Group, International Standard Book Number-13: 978-0-8493-1343-1, 2006.
- [41] B. Okutan, *Stress and failure analysis of laminated composite pinned joints*, Dokuz Eylül University, Thesis of PhD, 2001.
- [42] Y. Chen, *Finite Element Micromechanical Modeling of Glass Fibedepoxy Crossply Laminates*, University of Alberta, Thesis of MS, 2000.
- [43] F. E. Sezgin, *Mechanical Behaviour and Modeling of Honeycomb Cored Laminated Fiber/Polymer Sandwich Structures. Thesis (Master)*, Izmir Inst. of Technol., 2008 (library.iyte.edu.tr/tezler/master/makinamuh/T000703.pdf), p. 2008.
- [44] J. Araboui, Y. Schmitt, J. L. Pierrot și F. X. Royer, *Experimental bending behaviour of multy-layer sandwich structures*, Archives of Metallurgy and Materials, Volume 54, 2009.
- [45] L. Zhuang și J. Crocker M., *A study of the damping in sandwich structures*, Sweden: 7-10 july 2003, Stockholm, Sweden, Tenth International Congress, p. 227.
- [46] *Sandwich concept, DIAB sandwich handbook*, Available from www.diabgroup.com.
- [47] P. T. Sarafin, *Spacecraft Structures and Mechanisms: From Concept to Launch*, Microcosm Press, Kluwer Academic Publishers, 2011.
- [48] G. Bianchi, *Thesis: Structural Performance of Spacecraft Honeycomb Panels*, University of Southampton, April 2011.
- [49] D. Zenkert, *An Introduction to Sandwich Construction*, Chameleon Press LTD, London, 1995.
- [50] [Interactiv]. Available: <http://www.scribub.com/tehnica-mecanica/Materiale-de-armare-anvelope85125.php>.
- [51] H. Lei, *Theses: Composite sandwich structures with honeycomb core subjected to impact*, Clemerson University, 2012.
- [52] R. Roy, J. H. Choi și S. J. Park, *Characterization of Nomex honeycomb core constituent material mechanical properties*, Impact Factor: 3.12, DOI: 10.1016/j. comp struct, 2014.06.033, Composite Structures, November 2014.
- [53] A. Petras și M. Sutcliffe, *Failure mode maps for honeycomb sandwich panels*, vol. 44, Composite structure 44, p. 237-252, 1999, p. 237–252.
- [54] S. Heimbs, J. Cichosz, M. Klaus, S. Kilchert și A. F. Johnson, „Sandwich structures with

- textile-reinforced composite foldcores under impact loads,” *Elsevier, Composite Structures*, vol. 92, p. 1485–1497, 2010.
- [55] I. Chirică, E. F. Beznea și R. Chirica, *Placi compozite*, Editura Fundatiei Universitare Dunarea de Jos, Galati, ISBN (10) 973-627-337-7; ISBN (13) 978-973-627-337-7, 2006, p. 978–973, 2015.
- [56] H. Tuwair, M. Hopkins, J. Volz, M. ElGawady, M. Mohaned, K. Chandrashekhara și V. Birman, *Evaluation of sandwich panels with various polyurethane foam-cores and ribs*, *Composites Part B* 79, p. 262-276, 2015.
- [57] F. Amir, R. Othman A. și H. M. Akil, *Damage Characterization of Polypropylene Honeycomb Sandwich Panels Subjected to Low-Velocity Impact*, vol. 2013, Hindawi Publishing, Volume 2013, Article ID 129864, 10 pages , 2 October 2013, p. 10.
- [58] *ANSYS Mechanical APDL Element Reference*, 2013.
- [59] L. J. Gibson și M. F. Ashby, *Cellular solids, Structure and properties, Second edition*, Editura Cambridge University Press, First paperback edition (with corrections), 1999 version on line 2016.
- [60] J. a. A. M. F. Zhang, „Buckling of Honeycombs under In-plane Biaxial Stresses,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 34, nr. 6, p. 491–509, 6 June 1992.
- [61] F. Rotaru Paraschiv, I. Chirică și E. F. Beznea, *Influence of the Honeycomb Geometry on the Sandwich Composite Plate Behavior*, *Advanced Materials Research*, ISSN: 1662-8985, Vol. 1143, pp 139-144, Trans Tech Publications, Switzerland 2017.
- [62] D. Zeleniakienė, P. Griškevičius, V. Leišis și D. Milašienė, *Numerical investigation of impact behaviour of sandwich fiber reinforced plastic composites*, Article in mechanika Impact Factor: 0.29· JANUARY 2010.
- [63] *ANSYS, Contact Technology Guide*, 2009.
- [64] *ANSYS, Introduction to Contact, ANSYS Mechanical Structural Nonlinearities, ANSYS, Inc. Proprietary 2010*, 2010.
- [65] A. İlke, *Thesis: Investigation of design and analyses principles of honeycomb structures*, Department of Aerospace Engineering, noiembrie 2007.
- [66] C. Naresh, A. Gopi, K. Chand, S. R. Kumar și P. Chowdary, *Numerical Investigation into Effect of Cell Shape on the Behavior of Honeycomb Sandwich Panel*, vol. 2, ISSN: 2319-8753, India, Vol. 2, Issue 12, December 2013.
- [67] Z. Xue și W. Hutchinson, „Crush dynamics of square honeycomb sandwich cores,” *Int. J. Numer. Meth. Engng* 2006, vol. 65, p. 2221–2245, 10 online 26 October 2005.
- [68] F. Wu, R. Spong și G. Wang, *Using Numerical Simulation to Analyze Ship Collision*, ICCGS 2004, Izu, Japan, October 25-27, 2004.
- [69] A. Vaziri, Z. Xue și J. W. Hutchinson, „Performance and failure of metal sandwich plates subjected to shock loading,” *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, vol. 2, nr. 10, 2007.
- [70] F. Rotaru, I. Chirica și E. F. Beznea, *Static behavior of the sandwich composite plates*, la conferința Advanced Composite Materials Engineering COMAT 2014 Brașov.
- [71] F. Rotaru, I. Chirica și E. F. Beznea, *Strength Analysis of a Composite Joint Used in Ship Structure*, Conferinta CSUD-ului din 4-5 Iunie 2015 The Annals of ”Dunărea de Jos” University of Galați . Fascicle IX Metallurgy and materials science.
- [72] L. Albertario, *Development and rapid prototyping of new numerical models oriented to the honeycomb sandwich panels modelling*, 2009 - 2010.

- [73] M. Dirk, „Multi-scale finite-strain plasticity model for stable metallic honeycombs incorporating microstructural evolution,” *International Journal of Plasticity*, vol. 22, p. 1899–1923, 10 October 2006.
- [74] S. Debruyne, D. Vandepitte, E. Debrabandere și M. Hongerlout, *Influence of design parameter variation on the dynamic behaviour of thermoplastic honeycomb panel*, 10th International Conference RASD 2010, Southampton, July 2010.
- [75] S. Debruyne, L. Mehrez, D. Vandepitte, E. Debrabandere și M. Hongerlout, *Influence of design parameter variability on the dynamic behaviour of honeycomb sandwich panels*, vol. 2010, ISMA2010 0644, Belgium, p. 0644.
- [76] F. Rotaru și B. E. F. Chirica I., *Impact rate evaluation of composite sandwich plates used in shipbuilding*, la conferința ”Computational mechanics and virtual engineering” COMEC 2015 Brașov.
- [77] S. Tickoo și C. Technologies, *ANSYS Workbench 14.0: A Tutorial Approach*, CADCIM Technologies, 2012.
- [78] B. Gama, S. Chowdhury și J. J. Gillespie, *Finite element analysis of low velocity impact and compression after impact of sandwich composite structures*, 18th International Conference on Composite materials, 2011.
- [79] P. G. Golanó, *Thesis: Design of a carbon fibre rim for a fuel efficient competition vehicle*, University of Gavle, 2014.
- [80] F. Rotaru Paraschiv, R. Roșculeț, I. Chirică și E. F. Beznea, *Experimental analysis of the sandwich composites loaded to mechanical impact*, de la conferința Internațională The 40th International Conference on Mechanics of Solids, Acoustics and Vibrations & The 6th International Conference on “Advanced Composite Materials Engineering” ICMSAV2016& COMAT2016, Brașov, ROMANIA, 24-25 November 2016.
- [81] F. Rotaru Paraschiv, I. Chirică, F. Beznea E. și I. Iacob, *Numerical simulation and experimental bending composite sandwich plates*, de la conferința Internațională The 40th International Conference on Mechanics of Solids, Acoustics and Vibrations & The 6th International Conference on “Advanced Composite Materials Engineering” ICMSAV2016& COMAT2016, Brașov, ROMANIA, 24-25 November 2016.
- [82] C. Menna, D. Asprone, G. Caprino, V. Lopresto și A. Prota, *Numerical Simulation Of Impact Tests On GFRP Composite Laminates*, *International Journal of Impact Engineering*, <10.1016/j.ijimpeng.2011.03.003>. <hal-00829115> Elsevier, 2011.
- [83] C. Albertini, E. Cadoni și G. Solomos, *Advances in the Hopkinson bar testing of irradiated/non-irradiated nuclear materials and large specimens*, *Phil. Trans. R. Soc.*, 2014.
- [84] N. Poharel, *Thesis: Behaviour and design of sandwich panels subject to buckling and flexural wrinkling effects*, School of Civil Engineering, Queensland University of Technology, November 2003.
- [85] F. Elragi A., *Selected Engineering Properties and Applications of EPS Geofoam*, Softoria, 2006.
- [86] *ASTM D 3039/D 3039M Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, in, 2002.
- [87] *AMTS STANDARD Workshop practice for wet lay-ups*, *AMTS_SWP_0014_2008*, 2008.
- [88] [Interactiv]. Available:
<http://nptel.ac.in/courses/112107085/module5/lecture4/lecture4.pdf>.
- [89] A. Brent Strong, *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods*, 2nd

- edition, 2nd edition ed., Society of Manufacturing Engineers, 2008.
- [90] W. J. Callister, *Materials Science and Engineering An Introduction. Seventh Edition*, 2007.
- [91] SME video on 'Manual Composite Layup and Spray Up' Product ID: DV05PUB5 from www.SME.org.
- [92] [Interactiv]. Available: http://www.zentyss.ro/products/termosistemul-agrementat-zentyss-term-e/polistiren-extrudat/polistiren-extrudat-xpan/docs_ro/fisa-tehnica/Fisa%20tehnica%20XPS%20Zentyss.pdf.
- [93] G. Vineela, G. Tadepalli și A. Krishnaiah, *Impact behaviour of Fibre Reinforced composites with change in Fibre Orientation*, vol. 6, International Journal of Current Engineering and Technology E-ISSN 2277 – 4106, P-ISSN 2347 – 5161, Vol.6, No.1, 03 Feb 2016.
- [94] V. Crupi, G. Epasto și E. Guglielmino, „Computed Tomography analysis of damage in composites subjected to impact loading,” *Frattura ed Integrità Strutturale*, vol. 17, p. 32–41, 2011.
- [95] T. Brown și E. Sevkati, *Ultrasound Studies of Drop-Weight Impact responses of Woven Hybrid Glass-Graphite/Toughened Epoxy Composites*, Step Ultrasound Composites Final Report, april 2006.
- [96] R. Miriyunjay, Doddamani și M. K. Satyabodh, *Flexural Behaviour of Functionally Graded Sandwich Composite, Chapter 6*, Mechanical Engineering, National Institute of Technology Karnataka, Surathkal, India, 2012.
- [97] R. Cormos, H. Petrescu, A. Hadar, M. Adir G. și H. Gheorghiu, „Finite Element Analysis of the Multilayered Honeycomb,” *Materiale Plastice*, vol. 54, nr. 1, 2017.
- [98] S. Mohiyuddin C., R. Jayalakshmi și H. Manjunath, *A Study On Behavior of Sandwich Panels under Impact Loads*, SSRG International Journal of Civil Engineering (SSRG-IJCE) – EFES April 2015.
- [99] B. Berek, R. Karakuzu, M. Icten B., V. Arikan, Y. Arman, C. Atas și A. Goren, „An experimental and numerical investigation on low velocity impact behaviour of composite plates,” *Journal of composite materials*, vol. 50, nr. 25, p. 3551–3559, 2016.

Lista cu lucrări publicate

- [1]. F. **Rotaru**, I. Chirica, E.F. Beznea *Impact rate evaluation of composite sandwich plates used in shipbuilding*, la conferința "Computational mechanics and virtual engineering" COMEC 2015, Brașov; BDI.
- [2]. F. **Rotaru**, I. Chirica, E.F. Beznea *Static behavior of the sandwich composite plates*, la conferința Advanced Composite Materials Engineering COMAT 2014, Brașov; BDI.
- [3]. F. **Rotaru**, I. Chirica, E.F. Beznea *Strength Analysis of a Composite Joint Used in Ship Structure*, Conferinta CSUD-ului din 4-5 Iunie 2015 The Annals of "Dunărea de Jos" University of Galați . Fascicle IX Metallurgy and materials science. BDI.
- [4]. F. **Rotaru** Paraschiv, I.Chirică E.F. Beznea, *Influence of the Honeycomb Geometry on the Sandwich Composite Plate Behavior*, Advanced Materials Research, ISSN: 1662-8985, Vol. 1143, pp 139-144, Trans Tech Publications, Switzerland 2017; ISI (fără factor de impact).
- [5]. F. **Rotaru** Paraschiv, I Chirică, E. F. Beznea, I. Iacob, *Numerical simulation and experimental bending composite sandwich plates*, de la conferinta Internațională The 40th International Conference on Mechanics of Solids, Acoustics and Vibrations &The 6th International Conference on "Advanced Composite Materials Engineering" ICMSAV2016& COMAT2016 Brașov, ROMANIA, 24-25 November 2016; BDI.
- [6]. F. **Rotaru** Paraschiv, R. Roșculeț, I. Chirică , E.F. Beznea, *Experimental analysis of the sandwich composites loaded to mechanical impact*, de la conferința Internațională The 40th International Conference on Mechanics of Solids, Acoustics and Vibrations &The 6th International Conference on "Advanced Composite Materials Engineering" ICMSAV2016& COMAT2016 Brașov, ROMANIA, 24-25 November 2016. BDI.