

**Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați**  
**Școala doctorală de Inginerie Mecanică și Industrială**



# **TEZĂ DE DOCTORAT**

**REZUMAT**

**UN STUDIU TEORETIC ȘI EXPERIMENTAL AL  
PACHETELOR DE PROTECȚIE BALISTICĂ PENTRU  
BLINDAJE PE BAZĂ DE FIBRE DE STICLĂ**

**Doctorand**

**ing. George Ghiocel OJOC**

**Coordonator științific**

**prof. dr. ing. Lorena DELEANU**

**Seria I 6: Inginerie Mecanică nr. 63**

**Galați**

**2022**





UNIUNEA EUROPEANĂ



Instrumente Structurale  
2014-2020

„Excelența academică și valori antreprenoriale - sistem de burse pentru asigurarea oportunităților de formare și dezvoltare a competențelor antreprenoriale ale doctoranzilor și postdoctoranzilor – ANTREPENORDOC”, cod proiect: SMIS 123847, cod contract: POCU/380/6/13, contract nr. 36355/23.05.2019.

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați  
Școala doctorală de Inginerie Mecanică și Industrială



# TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

## UN STUDIU TEORETIC ȘI EXPERIMENTAL AL PACHETELOR DE PROTECȚIE BALISTICĂ PENTRU BLINDAJE PE BAZĂ DE FIBRE DE STICLĂ

Doctorand  
ing. George Ghiocel OJOC

Președinte	<b>Prof. univ. dr. ing. Cătălin FETECĂU</b> Președintele Senatului - Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați
Conducător științific,	<b>Prof. univ. dr. ing. Lorena DELEANU</b> Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați
Referent Oficial	<b>Prof. univ. dr. ing. Anton HADĂR</b> Universitatea POLITEHNICA București
Referent Oficial	<b>Prof. univ. dr. ing. Adrian ROTARIU</b> Academia Tehnică Militară „Ferdinand I” din București
Referent Oficial	<b>Prof. univ. dr. fiz. Gabriel MURARIU</b> Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați

Seria I 6: Inginerie Mecanică nr. 63  
Galați  
2022



Universitatea  
Ștefan cel Mare  
Suceava



**ICECON S.A.**

INSTITUTUL DE CERCETĂRI PENTRU ECHIPAMENTE ȘI TEHNOLOGII ÎN CONSTRUCȚII  
RESEARCH INSTITUTE FOR CONSTRUCTION EQUIPMENT AND TECHNOLOGY



CAMERA DE COMERT, INDUSTRIE,  
NAVIGATIE ȘI AGRICULTURĂ CONSTANȚA



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**
- Seria I 9: **Inginerie și management în agricultură și dezvoltare rurală**

**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**
- Seria U 4: **Filologie - Franceză**

**Domeniul MATEMATICĂ ȘI ȘTIINȚE ALE NATURII**

- Seria C: **Chimie**



## MULȚUMIRI

*Adresez mulțumiri celor care mi-au oferit sprijinul și m-au îndrumat pe parcursul acestei teze de doctorat.*

*Mulțumesc doamnei profesor doctor inginer Lorena Deleanu care, în calitate de conducător științific, mi-a oferit îndrumare, încurajare în anii de pregătire și de elaborare a tezei.*

*Mulțumiri și comisiei de îndrumare a lucrării, formată din domnii profesori prof. dr. fiz. Gabriel Murariu, prof. dr. fiz. Adrian Cîrciumaru și conf. dr. ing. Constantin Georgescu, pentru ajutorul oferit, pentru comentariile critice și soluțiile oferite pentru referate și teză, cu profesionalism, dar și pentru îndrumările și recomandările competente și de profesionalism.*

*Realizarea încercărilor le-am făcut cu ajutorul doamnei dr. fiz. Simona Sandu și a personalului de la CCIACBRNE – Centrul de Cercetare și Inovare pentru Apărare CBRN și Ecologie, București.*

*Doresc să mulțumesc celor de la INAS Craiova, în special doamnei Irina David și domnului ing. Florian Vlădulescu, pentru recomandări de utilizare și pentru asistența tehnică a soft-ului Ansys Explicit Dynamics.*

*Doresc să mulțumesc domnului dr. ing. Cătălin Pîrnu, Institutul Național de Cercetare Dezvoltare Aerospațială “Elie Carafoli” – INCAS București, pentru recomandările făcute pentru conceperea modelului.*

*Pentru imaginile SEM, obținute cu ajutorul microscopului electronic din cadrul Universității “Dunărea de Jos”, căutate cu răbdare, discutate, și care argumentează bine partea de investigație a mecanismelor de cedare, mulțumesc doamnei dr. fiz. Alina Cantaragiu Cioromila.*

*Pentru sprijinul acordat la utilizarea etuvei din cadrul Universității “Dunărea de Jos” mulțumesc domnului lector univ. dr. ing. chim. Dumitru Dima.*

*Mulțumesc celor de la MartPlast Urziceni, în special domnilor Dan Iorga și Mihai Victor Popescu, cu care am colaborat în elaborarea panourilor de protecție și cu care am fost la salonul de inventică de la Academia Forțelor Terestre “Nicolae Bălcescu” din Sibiu.*

*Această teză de doctorat a avut sprijinul proiectului „Excelența academică și valori antreprenoriale - sistem de burse pentru asigurarea oportunităților de formare și dezvoltare a competențelor antreprenoriale ale doctoranzilor și postdoctoranzilor – ANTREPRENORDOC, cod proiect: SMIS 123847, cod contract: POCU/380/6/13, contract nr. 36355/23.05.2019.*

*Cu recunoștință și dragoste, mulțumesc părinților mei și surorii mele, care au fost alături de mine și care m-au sprijinit în această perioadă.*

*Ing. George Ghiocel Ojoc*

*Galați, 21.04.2022*



Universitatea  
Ștefan cel Mare  
Suceava



INSTITUTUL DE CERCETĂRI PENTRU ECHIPAMENTE ȘI TEHNOLOGII ÎN CONSTRUCȚII  
RESEARCH INSTITUTE FOR CONSTRUCTION EQUIPMENT AND TECHNOLOGY





## Cuprins

<i>Mulțumiri</i> .....	3
Cuprins.....	5
<b>Capitolul 1.</b> Analiza stadiului recent de utilizare a fibrelor de sticlă pentru sisteme de protecția impact .....	7
1.1. Fibre folosite la sisteme de protecție .....	7
1.2. Țesături pentru sisteme de protecție .....	8
1.2.1. Tipuri de țesături în materiale compozite pentru sisteme de protecție.....	8
1.2.2. Fibre de sticlă.....	9
1.3. Proiectarea unui sistem de protecție.....	11
1.4. Problematici ale testării și evaluării sistemelor de protecție cu fibre de sticlă.....	12
1.5. Concluzii privind utilizarea fibrelor de sticlă pentru protecție balistică.....	14
1.6. Direcții de cercetare pentru acest studiu.....	14
<b>Capitolul 2.</b> Organizarea tezei.....	15
<b>Capitolul 3.</b> Modelarea impactului proiectil – panou stratificat la nivel macro.....	16
3.1. Modele constitutive de material.....	16
3.2. Criterii de cedare.....	16
3.3. Modelul impactului panou stratificat-proiectil.....	17
3.3.1. Rețeaua de discretizare a corpurilor implicate în model.....	18
3.3.2. Modele de material.....	19
3.4. Rezultate ale simulării și discuții.....	20
3.4.1. Scopul simulărilor rulate.....	20
3.4.2. Influența vitezei de impact asupra panoului modelat.....	25
3.4.3. Evaluarea prin simulare a unui interval de grosimi de panou, pentru $v_0=375$ m/s.....	27
3.7. Concluzii.....	30
<b>Capitolul 4.</b> Tehnologia la scară de laborator a panourilor de protecție balistică.....	32
4.1. Materialele implicate.....	32
4.1.1. Fibra de sticlă și țesătura de fibră de sticlă.....	32
4.1.2. Matricea de rășină epoxidică.....	33
4.2. Tehnologia de laborator pentru obținerea panourilor.....	35
4.2.1. Tehnologia de laborator pentru panourile proiectate .....	35
4.2.2. Caracterizarea panourilor elaborate .....	38
4.3. Concluzii privind realizarea panourilor.....	38
<b>Capitolul 5.</b> Campania experimentală și evaluarea rezultatelor.....	40
5.1. Standardizarea în domeniul protecției balistice.....	40
5.2. Campanii de testare pentru panouri rigide (blindaje sau componente de blindaje) .....	42
5.3. Echipamentul de încercare.....	42
5.4. Metodologia de încercare .....	43
5.5. Rezultate obținute în urma impactului .....	44
5.6. Mecanisme de cedare în compozitele testate.....	48
5.7. Identificarea componentelor care au participat la impact prin analiză EDX.....	51
5.8. Concluzii privind comportarea la impact balistic a panourilor proiectate.....	53
<b>Capitolul 6.</b> Concluzii și contribuții personale.....	54
6.1. Importanța temei.....	54
6.2. Concluzii finale asupra rezistenței balistice a panourilor testate.....	54
6.3. Contribuții personale.....	58
6.4. Direcții de cercetare inițiate de acest studiu.....	60
<i>Lista de lucrări științifice</i> .....	61
<i>Bibliografie</i> .....	62





# Capitolul 1. Analiza stadiului recent de utilizare a fibrelor de sticlă pentru sisteme de protecție la impact

## 1.1. Fibre folosite la sisteme de protecție

Domeniul fibrelor de înaltă performanță este de interes economic [38] de doar 100 ani, dar oferă tehnologii inovatoare relevante pentru sisteme de protecție la impact [12], [24], [30].

Fibrele de mătase și nylon au fost folosite pentru crearea de veste de protecție pentru soldați, dar eficiența lor este considerată limitată. Nylonul a fost brevetat de DuPont și comercializat în anul 1939. În anul 1960, DuPont a dezvoltat poliparafenilen tereftalamidă, o moleculă liniară mult mai rigidă, care a rezultat prin filarea unui soluții lichide cristaline, în fibre cu un grad mare de cristanilitate. Astăzi, acestea și fibre similare, cum ar fi Twaron [72] sunt esențiale în fabricarea sistemelor de protecție individuală. Alte fibre polimerice sunt destinate în mod deosebit pentru protecție balistică, cum ar fi: polietilena de foarte mare densitate (UHMWPE), polibenzobizoxal (PBO), polibenzenimidazole (PBI) [7], [14].

Grafice pentru câteva caracteristici mecanice, implicate în rezistența la impact, pentru diferite fibre, sunt date în Fig. 1.1, dar pentru nylon nu sunt trecute valorile deformației deoarece sunt între 1.5-2.5, mult mai mari decât valorile celorlalte fibre din grafic.

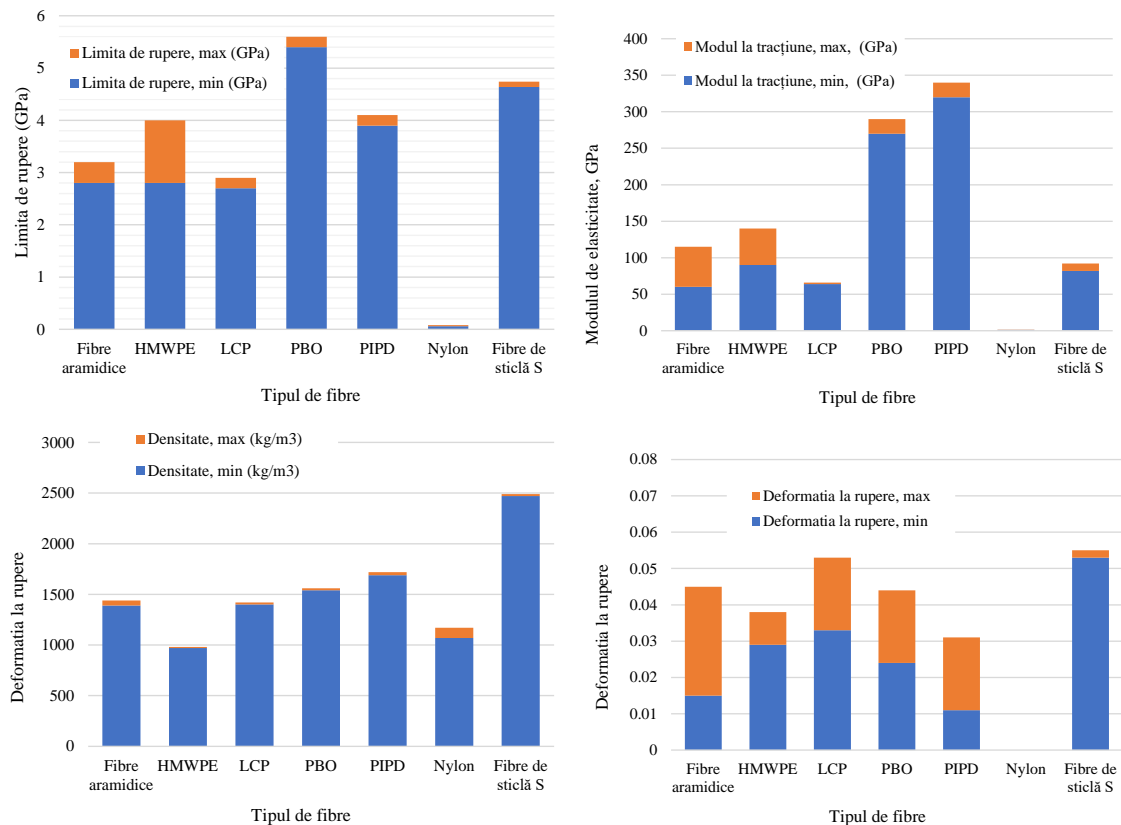


Fig. 1.1. Caracteristici mecanice, implicate în rezistența la impact, pentru fibre (HMWPE – polietilenă de foarte înaltă densitate, LCP – polimeri cu cristale lichide, PBO – polibenzoxazol, nylon – fibre de poliamidă), PIPD - [28]

Chiar dacă fibrele de sticlă au unele dezavantaje, acestea sunt utilizate în prezent pentru protecția vehiculelor și altor sisteme de protecție la impact. Realizarea unui sistem de protecție pe bază de fibre de sticlă implică câteva aspecte:

- calitatea țesăturii, dar și a fibrei/firelor,
- calitatea matricei (a rășinii sau polimerului care va "lega" straturile și firele între ele),
- eficacitatea tehnologiei în sensul realizării rapide, repetabile, cu același grad de calitate, a unor sisteme de dimensiuni și forme diferite, necesare aplicației, costurile relativ mai reduse, dar densități specifice mai mari, comparativ cu alte fibre (carbon, aramidice),
- disponibilitatea și interschimbabilitatea, timpul de utilizare și chiar reciclarea.

Rezistența la tracțiune a fibrelor crește cu micșorarea diametrului fibrelor și este limitată de defectele de fibră, de tensiunile reziduale și de neomogenitățile structurale. Riscul de a găsi defecte scade cu scăderea diametrului fibrelor. În zilele noastre, fibrele de carbon au diametrele între 4 μm și 10 μm; pentru fibrele polimerice și majoritatea fibrelor ceramice și de sticlă, diametrele sunt în intervalul de 10 μm până la 15 μm [45].

Comportarea la impact balistic a fibrelor polimerice sau nu este caracterizată prin abilitatea lor de a absorbi local energia cinetică a proiectilului și de a transmite energia absorbită repede în lungul lor, înainte ca să fie îndeplinite condiții de rupere/cedare, cuantificate prin energia absorbită pe unitatea de masă,  $E_{sp}$ , adică este raportată la limita de rezistență,  $\sigma_{fail}$ , de deformația fibrei la rupere,  $\epsilon_{fail}$ , și de densitatea fibrei,  $\rho$ , iar  $E_{sp} = 0.5 \sigma_{fail} \epsilon_{fail} / \rho$ . Abilitatea fibrelor să disipe energia este guvernată de viteza sunetului prin material, modulul de elasticitate longitudinal,  $E$ , și de densitatea lor,  $\rho$ , sub forma  $v_{sunet} = (E/\rho)^{(1/2)}$ . fibrele de sticlă au o poziționare bună a energiei absorbite pe unitatea de masă comparativ cu fibrele polimerice [9], [28].

## **1.2. Țesături pentru sisteme de protecție**

### **1.2.1. Tipuri de țesături în materiale compozite pentru sisteme de protecție**

Un criteriu de mare importanță pentru structurile rezistente la impact, care include și fibrele de sticle, este arhitectura firelor și/sau fibrelor. Studii asupra sistemelor de protecție care includ compozite stratificate sunt făcute la niveluri diferite: de la nivel micro pentru fibre și fire, la nivel mezo care se ocupă de țesături și straturi, până la nivel, macro când simularea și rezultatele experimentale sunt date pentru întreaga structură de protecție. Performanțele recente ale computerelor (hardware și software) fac posibile simulări ale unor panouri balistice luând în considerare firele și câteva straturi cu [51].

Proprietățile compozitelor ranforsate cu fibre lungi depind de natura fibrei, arhitectura firelor, matrice și tehnologia de asamblare, fracția volumică de fibre, grosimea pachetului. Fibrele de sticlă au o rezistență mare la costuri relativ mici; fibrele de carbon au rezistență mai mare, rigiditate mare și densitate mai mică, fibrele aramidice au rezistență mare și densitate mică, prevenind răspândirea focului și sunt penetrabile de undele radio. Poliesterii sunt de cele mai multe ori folosiți ca matrice deoarece oferă proprietăți bune la costuri relativ reduse. Rășinile epoxidice și poliamidele au proprietăți mai bune, dar sunt mai scumpe. Rezistența compozitelor crește dacă fracția volumică a fibrelor este mai mare și dacă orientarea fibrelor este paralelă cu direcția de solicitare [3], [20], [31].

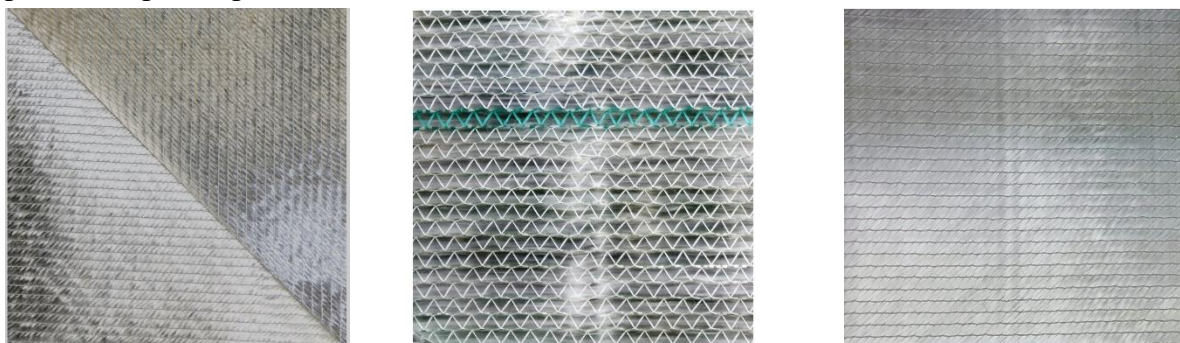
După arhitectura fibrelor și firelor, acestea se pot clasifica în materiale țesute, materiale tricotate și materiale ne-țesute sau unidirecționale. La acestea din urmă firele nu sunt ondulate, putând păstra rezistența pentru învingerea solicitării rezultate din întinderea firelor la impactul cu proiectilul [45]. Țesăturile se pot clasifica și după alte criterii, printre care reținerea apei, rezistența la foc, protecția balistică etc. Tradițional, un compozit dedicat protecției balistice se bazează pe o arhitectură 2D.

Arhitectura 2D include aranjamente ale firelor unidirecționale cu variante,  $(0^\circ/90^\circ)$ ,  $(0^\circ/90^\circ/45^\circ)$ ,  $(0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ)$ , iar cele țesute sunt 1/1, tip coș, satin, twill. Atașarea straturilor de fibre este o problemă de materiale și tehnologie (pensulare, formare în vid sau sub presiune, coasere etc.). În consecință, compozitele sunt controlate pe grosime de constituentul mai slab, de obicei matricea, iar în plan de proprietățile firelor/fibrelor.

Firma Castro are în portofoliu semifabricate pe bază de fibre de sticlă, unidirecționale (Fig. 1.2). Acestea au flexibilitate, dar au și rezistență mecanică și sunt adecvate pentru componente rezistente la impact. Rășinile recomandate pentru realizarea compozitului sunt poliesterii, vinil esterii și rășinile epoxidice și acrilic-uretanice.

Avantajele țesăturilor unidirecționale (simple sau multiaxiale) includ masa specifică mai bună și rezistența fibrei folosită pentru a face față sarcinii externe și nu încovoierii introduse de procesul tehnologic (cum este la țesere); orientări ale fibrelor pot fi la  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ , chiar și  $-22,5^\circ$  și  $+22,5^\circ$ , drapabilitatea și permeabilitatea (dacă este nevoie) sunt bune.

În general, semifabricatele cu fire multi-axiale duc la reducerea costurilor și timpilor de prelucrare pentru produsul final [79].



a) Țesătură unidirecțională biaxială ( $+45^\circ/-45^\circ$ ),  $800 \text{ g/m}^2$

b) Țesătură unidirecțională, cu fire auxiliare de legătură, tricotate,  $1200 \text{ g/m}^2$

c) Țesătură cuadriaxială ( $0^\circ/+45^\circ/90^\circ/-45^\circ$ ), cusută,  $1200 \text{ g/m}^2$

Fig. 1.2. Produse pe bază de fibră de sticlă, de la firma Castro [79]

### 1.2.2. Fibre de sticlă

Sub denumirea de filamente sau fibre de sticlă, acestea sunt materiale versatile, produse prin topirea oxidului de siliciu și a altor minerale, cu răcire rapidă ca să se împiedice cristalizarea și formarea fibrilației [67]. Tipurile de fibre de sticlă s-au grupat după una din caracteristicile pentru care sunt utilizate: E, S, C, A și D [42], [64].

Fibrele de sticlă și țesăturile cu fibre de sticlă au domenii variate de aplicație, de la mecanică, electricitate, protecție la coroziune, până la aplicații înguste, așa cum sunt și cele de protecție balistică. Printre grupele de fibre de sticlă, tipurile E și S (inclusiv varianta S2) sunt fibre cu performanțe mecanice mai bune. Tipul E are în compoziție  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , și  $\text{SiO}_2$ , uneori cu  $\text{B}_2\text{O}_3$ , de la 0 la 10 wt.%, fibrele fiind adecvate pentru realizarea, prin diferite

tehnici, a compozitelor cu fibre de sticlă (întâlnite în literatura de specialitate cu abrevierea GFRP – glass fiber reinforced polymer) [45]. În general, tipul S2 are o rezistență cu 35% până la 40% mai mare decât tipul E [45] și are o performanță mai bună în protecție balistică, pentru blindaje compozite sau stratificate. Deformația la rupere destul de mare, comparativ cu alte materiale pentru protecție balistică (de exemplu, fibrele aramidice), joacă un rol important în mecanismul de impact balistic. Structurile din fibre de sticlă sunt căutate și pentru protecția la foc, fum și gaze toxice, cost relativ mai mic și masă specifică mai mică comparativ cu aliaje metalice sau beton armat. Avantajele fibrelor de sticlă sunt: prețul relativ mic, rezistență la tracțiune și la impact, rezistență chimică, dar au și dezavantaje, cum ar fi modul de elasticitate mic, uzură prin abraziune, rezistență mică la oboseală și aderență slabă la unele rășini, ceea ce ridică prețul prin selectarea unei matrici scumpe [1].

Figura 1.3 oferă câteva proprietăți mecanice și termice pentru diferite tipuri de fibră de sticlă și se observă că tipul E (cu sau fără bor) are proprietăți mecanice bune, fiind depășite doar de marca S.

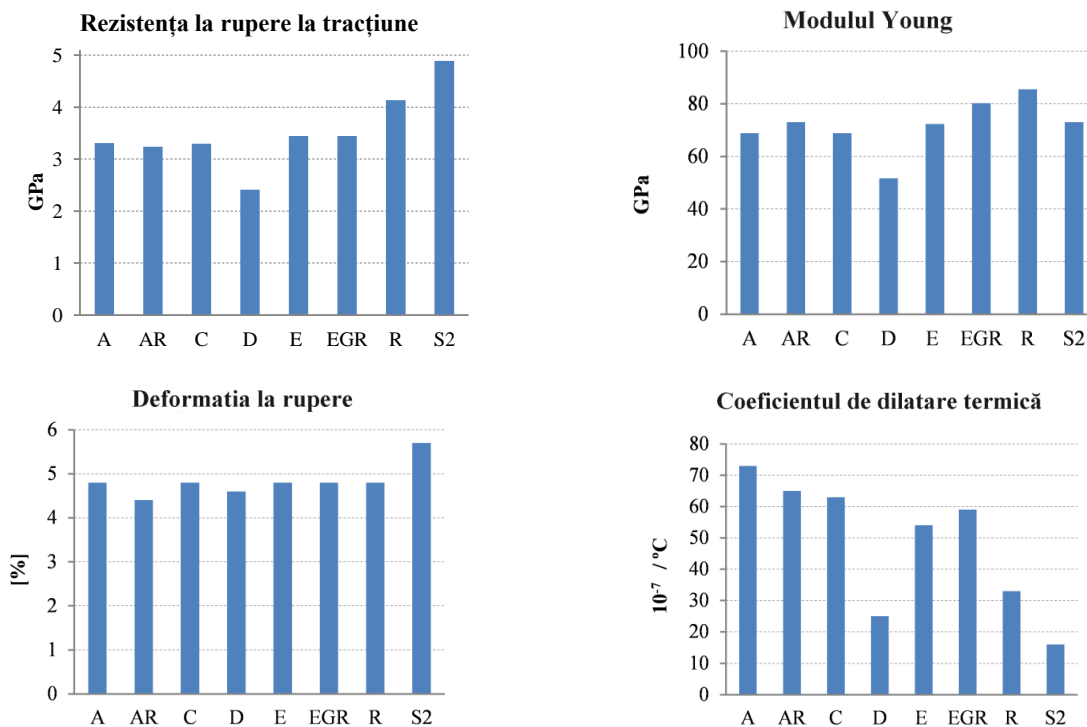


Fig. 1.3. Caracteristicile fibrelor de sticlă (după [60])

A – sticlă cu durabilitate, rezistență mecanică și rezistivitate electrică, C - sticlă cu rezistență la coroziune, D – sticlă cu constantă electrică mică, E – sticlă cu rezistență mecanică și rezistivitate electrică mari, AR - sticlă rezistentă la coroziunea alcalilor, R – sticlă cu rezistență mecanică și la coroziunea acizilor, EGR – sticlă pentru sisteme de recirculare a gazelor de ardere, S – sticlă cu cea mai mare rezistență la tracțiune, S2 – sticlă cu rezistență la tracțiune, modul de elasticitate și stabilitate mari

În domeniul protecției balistice, cele mai des utilizate tipuri de țesături sunt țesăturile 1/1 și cele tip coș (basket). Țesăturile sunt produse și cu fire unidirecționale, cu o singură orientare sau mai multe (două, trei și patru), pentru ultimul tip, unghiul dintre firele

substraturilor variind de la  $(0^\circ, 90^\circ)$ ,  $(-45^\circ, 45^\circ)$  până la  $(0^\circ, 90^\circ, -45^\circ, 45^\circ)$ . Cunniff [21] a observat că țesăturile țesute larg sau cu țesere neechilibrată duc la performanțe balistice slabe.

În general, fibrele cu o deformare relativ mai mare la o viteză de deformare mare, absorb mai bine energia decât cele cu deformare relativ mică la rupere [10], [49]. Interfața fibră-matrice joacă un rol critic în rezistența la impact. S-a observat că interacțiunea interfacială slabă a dus la o absorbție de energie mai mare [2], [54], [63] dar fiecare matrice trebuie să treacă proba experimentală pentru a fi acceptată. Compozitele cu țesături au mecanisme de cedare particulare, cum ar fi ruperea firelor, fibrilațiilor, dezlipirea fibră-matrice, delaminarea, alunecarea, fisurarea rețelei, dar și frecarea între componente și între ele și proiectile favorizează absorbția de energie.

### 1.3. Proiectarea unui sistem de protecție

Figura 1.4 prezintă o schemă logică pentru proiectarea unui nou sistem de protecție, evidențiind o buclă mai strânsă a cercetărilor atât pentru dezvoltarea de materiale noi, modelare și simulare, rezultând o reducere semnificativă a timpului necesar dezvoltării unei noi armuri. Aspectele legate de restricționarea informației în domeniu, duc la elaborarea de soluții punctuale sau doar parțial eficace [69]. Bucla de feedback între proiectarea sistemului de protecție și proiectarea materialului este în contrast cu practica curentă, în care fluxul de proiectare pune noile materiale “pe raft” pentru a fi încercate în procesul de testare (tragere) [69] (Fig. 1.4.).

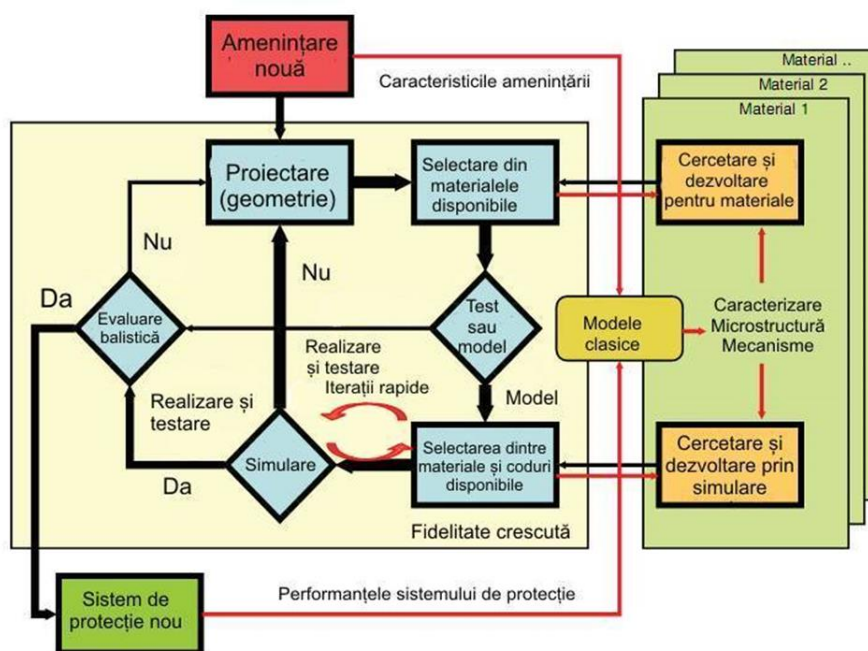


Fig. 1.4. Diagrama logică pentru re-proiectarea unei armuri sau a unui blindaj [69]

Parametrii de performanță ai unui blindaj din composite includ parametri măsurabili, dar și calitativi [25]. Cel mai important parametru măsurabil este limita balistică, adică viteza la care un anumit proiectil poate perfora o anumită țintă. Este important și răspunsul la lovituri multiple și toleranțele caracteristicilor de material și geometrice ale țintei, mai ales la penetrări parțiale, când interesează deteriorările și pe fața și pe spatele țintei, pentru a evalua



supraviețuirea pe termen lung a sistemului protejat [39]. Alți parametri includ densitatea de suprafață, prelucrabilitatea, interschimbabilitatea, mentenanța și costurile aferente introducerii soluției respective în locul celei vechi etc. [68].

Primul blindaj compozit a fost realizat la mijlocul anilor '50, de specialiștii americani sub denumirea de T95, și constă dintr-un strat de silicați, dispus între două plăci de oțel, ansamblul fiind realizat prin laminare [15].

Blindajul compozit are următoarele avantaje: rezistență bună la impact și vibrații, capacitate bună de amortizare a vibrațiilor și trepidațiilor, consum de energie relativ mic pentru tehnologie de serie mică sau mare, rezistență bună la agenți corozivi, dacă și componentele o au (rășină și fibre), rezistență bună la temperaturi ridicate, mase specifice de 2 – 3 ori mai mici ca ale oțelului. Blindajele cu compozite sunt folosite și la autovehiculele de transportat personal sau echipamente, fiind de cele mai multe ori introduse în caroseria autovehicolului, între suprafețele metalice.

Firma Protectolite Composites [73] produce plăci (foi) de protecție balistică din fibre de sticlă, obținute prin comprimare în matriță, cu precizie ridicată și repetabilitate. Sunt fabricate în dimensiuni de la 600 mm x 600 mm până la 1525 mm x 4000 mm. Plăcile laminate pot fi executate din țesături aramidice, de carbon, dar și de fibră de sticlă tip E sau S, utilizând ca matrice sau aderent rășini termorigide (vinilesterice, fenolice sau epoxidice) și folii sau rășini termoplastice. Panourile produse pot fi utilizate pentru vehicule militare, vehicule securizate și clădiri, vehicule pentru securitatea personalului, mașini blindate pentru transport de valori, blindaje compozite cu alte destinații și platforme aerospațiale sau aplicații de pe acestea (carcase pentru camere sau aparate de măsură). Plăcile oferă și o protecție pentru amenințări severe pentru jeep-uri, camioane militare de aprovizionare. Sunt utilizate și pentru echipamente ale poliției și soluții arhitecturale care necesită grad mare de protecție, inclusiv în justiție (Fig. 1.5).



a) vehicul blindat



b) componenta din compozit a blindajului



c) componente blindate cu panouri cu fibră de sticlă pentru vehicule militare

Fig. 1.5. Produse ale firmei Protectolite Composites [73]

#### **1.4. Problematici ale testării și evaluării sistemelor de protecție cu fibre de sticlă**

În figura 1.6, panoul realizat din fibre de sticlă și rășină epoxidică a oprit glonțul, raportul fibrelor pe înălțimea secțiunii plăcii fiind de aproximativ 70%, dar parametrii de fabricație a panoului sunt destul de severi [22].



Fig. 1.6. Compozit cu fibră de sticlă și rășină, de grosime 13 mm, după impact cu proiectilul de 9 mm FMJ, la viteza de 420 m/s [22]

Ansari și Chakrabarti [8] au prezentat o analiză experimentală și numerică a comportării la perforare a compozitelor laminate, ranforsate cu fibră de sticlă unidirecțională, după impact cu un proiectil cilindric de 52 g, cu suprafață plană de impact, pentru viteze de impact între 50-500 m/s. Testele de impact asupra țintei cu fibre orientate ( $0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ$ ) s-au realizat cu ajutorul unei puști pneumatice. În general, delaminarea este principala deteriorare din placa lovită de proiectil, atunci când lovește normal pe țintă, mărimea acestei deteriorări scăzând pe măsură ce unghiul de impact crește.

Rebouillat și alții [57] au comparat trei materiale de ranforsare (fire de oțel, fibre de sticlă și fibre aramidice), analizând rezultatele unui test de tăiere pe compozite. Compozitele manifestă un aspect sinergic comparativ cu componentele, aspect care este util în aplicații de protecție la impact. Unele cercetări au fost făcute pe materiale hibride, utilizând ranforsări cu două sau mai multe componente fibroase. Arhitectura dispunerii ranforsărilor este importantă, dar încercările s-au diversificat (standardizate sau nu) pentru a reproduce cât mai plauzibil solicitarea reală pentru care este folosit materialul format. Combinațiile de materiale fibroase pot da naștere unor soluții bune pentru protecția la impact. De exemplu, caracterul casant al fibrelor de sticlă este restrictiv pentru rezistența la tăiere, dar are o rezistență abrazivă destul de bună. O fibră de sticlă mai elastică, obținută tehnologic sau o țesătură mai flexibilă, obținută prin arhitectura firelor și tehnologia obținerii semifabricatului, pot fi soluții de îmbunătățire a răspunsului materialelor pe bază de fibre de sticlă.

Sabet și alții [58] au investigat compozite pe bază de fibre de sticlă ranforsate cu rășină poliestică, la o viteză de impact de 80...160 m/s. S-au folosit cinci tipuri de fibre de sticlă de tipul E, incluzând fibre scurte presate, țesătură 1/1, țesătură satin, țesătură unidirecțională și țesătură bidirecțională ( $0^\circ, 90^\circ$ ). Proiectilul folosit a fost un corp cu cap conic cu vârful ascuțit la  $30^\circ$ , cu lungimea totală de 30 mm și a corpului de 15 mm, cu greutatea de 9,74 g. Plăcile de compozit (150 mm x 150 mm) au fost realizate cu 3 mm și 6 mm grosime. Rezultatele au arătat o limită a vitezei balistice mai mare pentru plăcile de 3 mm cu fibră de sticlă tocată, urmată de țesătură bidirecțională, țesătură satin, țesătură 1/1. Epruvetele mai groase (6 mm), cu țesătură 1/1, au arătat performanțe balistice mai bune, urmate de cele țesătură bidirecțională, țesătură satin, cele unidirecționale și plăcile făcute din fibre de sticlă, tocate și presate. Modurile dominante de distrugere au fost: întinderea firului, ruperea firului la forfecare pentru plăcile mai subțiri și delaminare severă pentru plăcile mai groase. Plăcile cu

țesătură 1/1 și țesătură bidirecțională au avut o limită de viteză balistică mai mare comparativ cu celelalte tipuri de ranforsări. Absorbția de energie asociată cu țesătura 1/1 și țesătura bidirecțională a avut valori mai mari.

Diferențele între date din simulare și date experimentale pot fi explicate calitativ de disiparea energiei prin frecarea între straturi, așa cum este evidențiat și în [34].

În România, deși se lucrează la soluții autohtone de blindaje, ultima apariție semnificativă a fost un studiu de blindaj compozit ProtectComb, în 2010 [75]. Acest blindaj conținea, alternativ, straturi de fibre de sticlă și compozit ceramic de alumina în sandwich de plăci de aluminiu, înlocuit, în urma evaluărilor balistice, cu plăci de oțel.

### **1.5. Concluzii privind utilizarea fibrelor de sticlă pentru protecție balistică**

În dezvoltarea și testarea soluțiilor proiectate pentru protecție balistică, se ia în considerare noutățile din domeniul materialelor de protecție, dar și eventualele zone încă neexplorate astfel încât să se prioritizeze pentru testare tipurile de materiale și sisteme de protecție mai performante.

Chiar dacă compozitele pe bază de fibre de sticlă sunt concurate de cele cu fibre polimerice, de alte fibre metalice sau ceramice, acestea rămân încă de interes în aplicațiile balistice, fie ca parte a unui blindaj, fie ca întreg sistem de protecție, deoarece ele au o rezistență la impact bună la prețuri rezonabile. Cercetările vor fi efectuate în scopul creșterii raportului de fibre din compozit, dar și pentru stabilirea unor matrici adecvate aplicației.

### **1.6. Direcții de cercetare pentru acest studiu**

Solicitarea la impact a compozitelor este și va fi o provocare pentru cercetători având în vedere utilizarea tot mai intensă a acestor materiale și varietatea foarte mare de combinații care se pot obține pe baza matricelor și componentelor de ranforsare deja existente. Provocarea constă în realizarea unui compozit pentru protecție, astfel încât performanța balistică, structura și tehnologia de obținere să fie competitive pe o piață care include produse de înaltă complexitate, pe baza combinației unor materiale și tehnologii, unele considerate „clasice”, altele de ultimă oră.

Obiectivul acestui studiu este să se proiecteze un compozit pe bază de țesături unidirecționale de fibre de sticlă, pentru un blindaj de nivel FB2 sau mai mare pentru autovehicule. Studiul va include o documentare, o propunere de tehnologie la scară de laborator a compozitelor, simulări și teste experimentale, investigații ale mecanismelor de cedare.



## Capitolul 2. Organizarea tezei

Figura 2.1 prezintă o diagramă sugestivă a organizării tezei, din care rezultă obiectivele, tehnologia de realizare a panourilor, simularea comportării lor la impact și testarea și interpretarea rezultatelor.

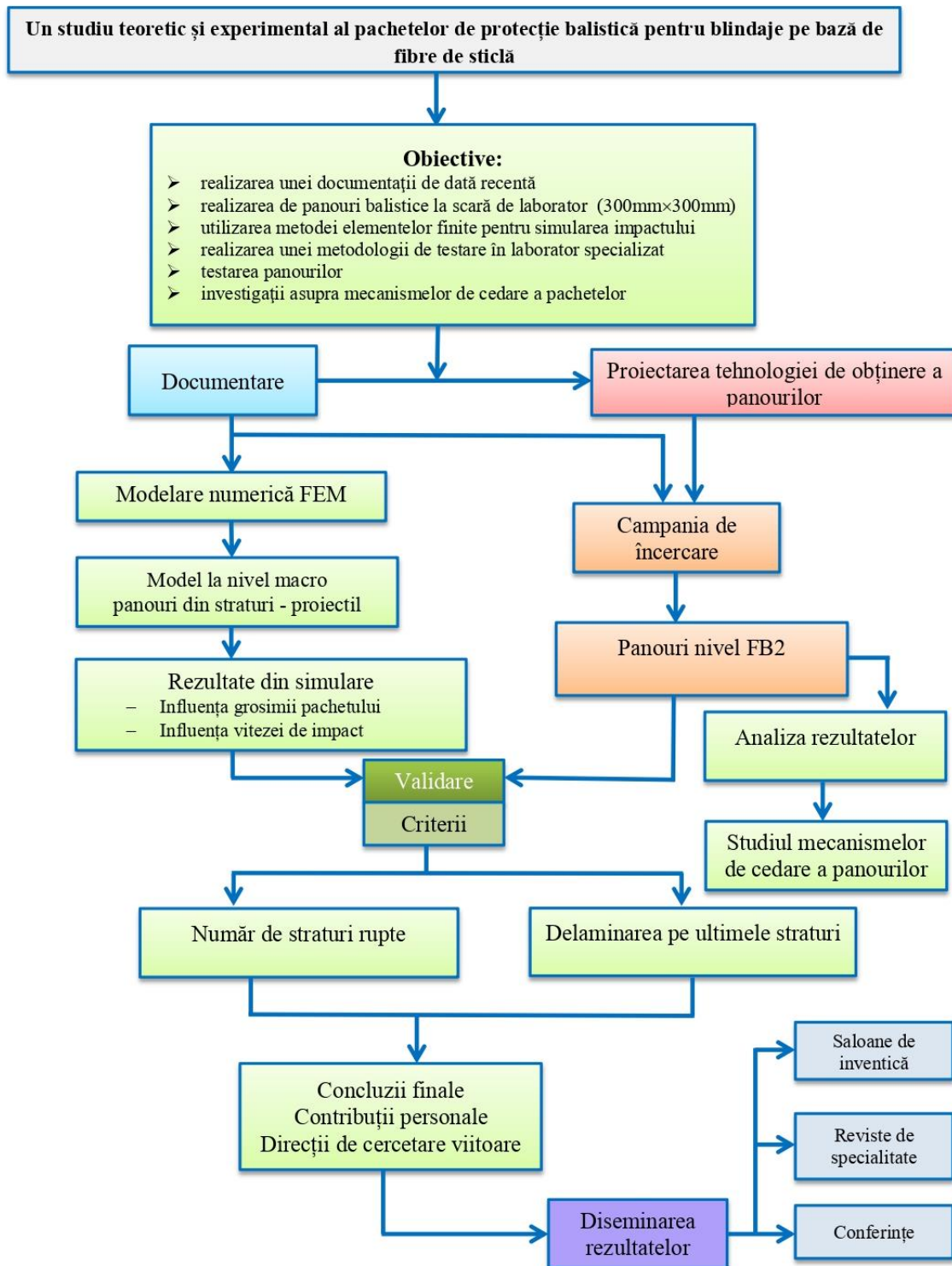


Fig. 2.1. Diagrama tezei

## Capitolul 3. Modelarea impactului proiectil – panou stratificat la nivel macro

### 3.1. Modele constitutive de material

Materialele, mai ales cele folosite în domeniul balistic, au un răspuns complex la sarcina dinamică și se cer modelate următoarele procese: răspunsul neliniar la solicitare, întărirea pe durata solicitării și în funcție de viteza de deformare, înmuierea termică, compactarea (pentru materiale poroase), răspunsul ortotrop (pentru compozite cu fibre), deteriorarea prin strivire (în cazul ceramicilor, sticlelor, betonului), procese care implică energie chimică (în cazul exploziilor), distrugerea la tracțiune, modificări de faze (trecerea de la solid-lichid-gaz și invers). Modelarea acestor procese poate fi descompusă în trei componente: ecuația de stare, modelul rezistenței materialului și modelul de distrugere (de cedare) [23], [32], [40], [47].

În cazul impactului proiectil-panou de protecție analizat aici, utilizarea proprietăților fără dependența de temperatură este justificată de înregistrări cu camere termice, de rezultatele modelelor [6], [27], [28], [29], [43], [48], [52], [62] și de caracteristicile materialelor utilizate pentru panouri, unele (cum ar fi fibrele aramidice sau de sticlă), având proprietăți constante pe un interval de temperatură destul de mare. Din studiul documentar, modelarea unui impact de glonț de calibru (9 mm sau 7.62) în domeniul vizat de autor (100...400 m/s), este analizată în condiții izoterme. Există un efect termic, dar acesta este considerat slab comparativ cu mecanismele de cedare ale solidelor implicate (rupere, deformare, delaminare, frecare).

În cazul compozitelor stratificate se pot introduce legi de evoluție a tensiunii și cedării interlaminare, cum ar fi modelul zonei coezive (de grosime zero) [17], [36].

Modelul biliniar cu durificare este utilizat în analize cu deformații mari. Curba este definită dacă se cunosc limita de curgere și modulul tangent.

Modelul Johnson-Cook [35], [61] este utilizat pentru materiale metalice în general, supuse la viteze mari de deformare și temperaturi ridicate. Plasticitatea dependentă de temperatură poate fi introdusă doar prin acest model. Acesta redă comportarea materialelor tipic metalice, supuse la deformații mari, viteze mari de deformații și temperaturi înalte. Limita de curgere,  $Y$ , variază cu deformația, viteza de deformație și temperatură:

$$Y = [A + B\varepsilon_p^n][1 + C\varepsilon_p^*][1 - T_H^m] \quad (3.1)$$

în care  $\varepsilon_p$  este deformația plastică efectivă (reală),  $\varepsilon_p^*$  este viteza deformației plastice efective,  $T_H$  este temperatura relativă în relația lui Johnson-Cook,  $T_{room}$  este temperatura ambiantă,  $T_{melt}$  este temperatura de topire a materialului,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $n$  și  $m$  fiind constante de material.

### 3.2. Criterii de cedare

În Ansys Explicit Dynamics se pot introduce următoarele modele de cedare: cedare la deformație plastică, cedare la tensiune principală, cedare la deformație principală, cedare statistică, cedare la tracțiune, cedare prin fisurare și relaxare, cedare Johnson-Cook și cedare prin exfoliere.

Cedarea la deformație plastică se folosește pentru materiale ductile. Inițierea cedării se bazează pe deformația plastică reală în material. Utilizatorul trebuie să introducă o valoare a deformației plastice maxime. Dacă deformația plastică reală a materialului este mai mare decât această valoare, apare cedarea. Materialul cedează instantaneu. Acest model de cedare trebuie folosit coroborat cu un model de rezistență a materialului, plastic sau casant.

Criteriul de cedare Johnson Cook poate fi folosit pentru modelele ductile de materiale care sunt supuse la presiuni mari, viteze mari de deformație și intervale mari de temperatură. Acest model de cedare este elaborat într-un mod similar cu modelul de rezistență Johnson-Cook. Constă din trei termeni independenți care definesc deformația la rupere dinamică ca o funcție de tensiune, viteza de deformație și temperatură.

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^f} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon^f = \left[ D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*} [1 + D_4 \ln|\dot{\varepsilon}^*|] \right] [1 + D_5 T^*] \quad (3.3)$$

în care  $\varepsilon^f$  este deformația la rupere, prima paranteză reflectă dependența distrugerii de tensiune prin termenii  $D_1$ ,  $D_2$  și  $D_3$ ; a doua paranteză reflectă influența vitezei de deformare asupra deteriorării prin termenul  $D_4$ , ultima paranteză este introdusă pentru a cuantifica influența temperaturii cu ajutorul termenului  $D_5$ , iar  $\Delta \varepsilon$  este variația deformației pentru un element. Materialul este presupus intact până când parametrul de deteriorare,  $D$ , este egal cu 1. În acest moment se inițiază fisura elementului și se declanșează un răspuns post-cedare instantaneu. Acest model se poate aplica numai corpurilor solide [71].

### 3.3. Modelul impactului proiectil-panou balistic stratificat

Modelul este format din mai multe corpuri, glonțul din două corpuri cu conexiune cămașă-miez de tip „perfect bonded” și panou, la rândul lui compus din 8, 10, 12, 16 sau 24 de straturi.

Panoul are o suprafață de 120 mm x 120 mm. Placa reală, realizată și testată, este de 300 mm x 300 mm, ceea ce a permis efectuarea a 3 focuri (lovituri), la o distanță între ele de 120 mm, în triunghi echilateral. Din motive de timp de rulare și caracteristici de hardware, autorul a optat pentru simularea unei singure lovituri pe o suprafață mai mică (120 mm x 120 mm), fiind suficientă pentru a cuprinde procesul de delaminare pentru un singur foc.

Glonțul a fost desenat după [66]. Pentru a diminua timpul de rulare, glonțul a fost adus cât mai aproape de panou, distanța între vârful glonțului și placă fiind de 0,258 mm.

Conexiunea dintre straturi fiind de tip „bonded”, cu condiția de desprindere „breakable” (desprinderea nodurilor realizându-se condiționat de depășirea unei valori pentru tensiunea normală și de forfecare și care a fost introdusă cu valoarea de 90 MPa pentru tracțiune (întindere) și 60 MPa pentru tensiunea de forfecare, valori caracteristice rășinii utilizate pentru lipirea/atașarea straturilor în panou.

În acest model s-a optat pentru opțiunea „Breakable”, setată cu „Stress Criteria” (criteriu de tensiune), și atunci conexiunea se poate rupe sau desface pe durata analizei. Criteriul de rupere este definit astfel:

$$\left( \frac{\sigma_n}{\sigma_n^{limit}} \right)^n + \left( \frac{|\sigma_s|}{\sigma_s^{limit}} \right)^m \geq 1 \quad (3.4)$$

în care  $\sigma_n^{limit}$  – valoarea pentru limita de rupere pentru tensiunea normală (în acest model,  $n$  – valoarea exponentului din relația (3.4), pentru raportul tensiunilor normale,  $n$  este 1,  $\sigma_s^{limit}$  – valoarea pentru limita de forfecare,  $m$  – valoarea exponentului din relația (3.4), pentru raportul tensiunilor de forfecare,  $m$  este 1.

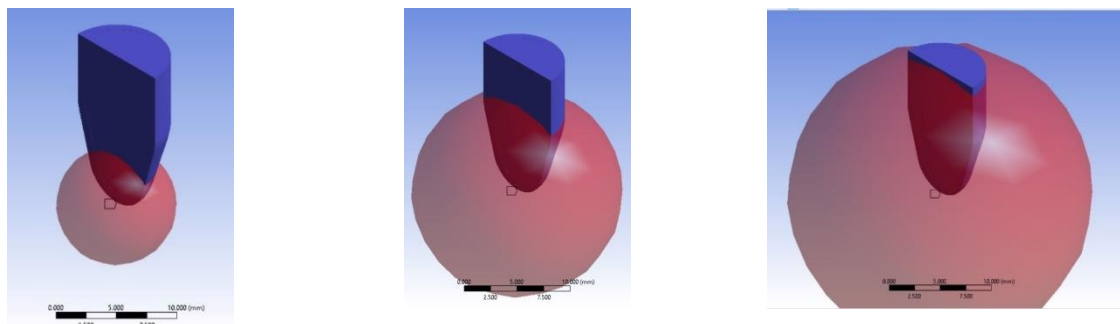
Interacțiunea între corpuri este considerată cu frecare, coeficientul de frecare fiind constant, setat la COF=0,1. Valoarea coeficientului de frecare în cazul impactului este greu de măsurat, încercările din literatură fiind făcute pentru viteze relativ mai mici decât în realitate și luând în considerare doar alunecarea dintre două corpuri. Intervalul găsit în literatură este de la valori sub 0.1 până la 0.4 [33], [46]. În realitate, în procesul de impact, coeficientul de frecare nu este constant și depinde de cuplul de materiale între care are loc mișcarea și de solicitarea pe direcția normală.

### 3.3.1. Rețeaua de discretizare a corpurilor implicate în model

Rețeaua de discretizare s-a făcut după o documentare asupra subiectului din care a rezultat că mărimea elementului și stilul de discretizare este important, dar trebuie adaptat la cazul particular care se modelează [28].

Pentru glonț s-a folosit o rețea tetraedrală cu minim două elemente pe grosimea cămășii, obținută dintr-o discretizare inițială, peste care s-a finisat o discretizare cu 3 sfere de influență, cu raza sferei de 5 mm, 10 mm și 15 mm (Fig. 3.1) , pentru a avea o creștere relativ controlată și mai redusă a elementelor rețelei. Pentru sfera de 5 mm, mărimea elementului a fost 0,35 mm, pentru următoarea sferă a fost 0,45 mm, iar pentru cea mai mare sferă, de 0,55 mm.

Fiecare strat al panoului are grosimea de 0,8 mm (ca și stratul utilizat pentru formarea compozitului în laborator), cu un element pe grosime (Fig. 3.2).



a) Sfera cu rază de 5 mm      b) Sfera cu rază de 10 mm      c) Sfera cu rază de 15 mm

Fig. 3.1. Sferile de influență pentru rețeaua de discretizare a glonțului

Condiția inițială este dată de viteza glonțului, aici considerată  $v_0=375$  m/s, valoare determinată experimental în campania de teste (vezi Capitolul 5).

Modelul conține un plan de simetrie care este trece prin centrul pătratului care definește aria plăcii (și conține secțiunea longitudinală a proiectilului)

Condițiile limită implică fixarea plăcii. Fiecare strat din placă este încastrat pe suprafața laterală a acestuia.

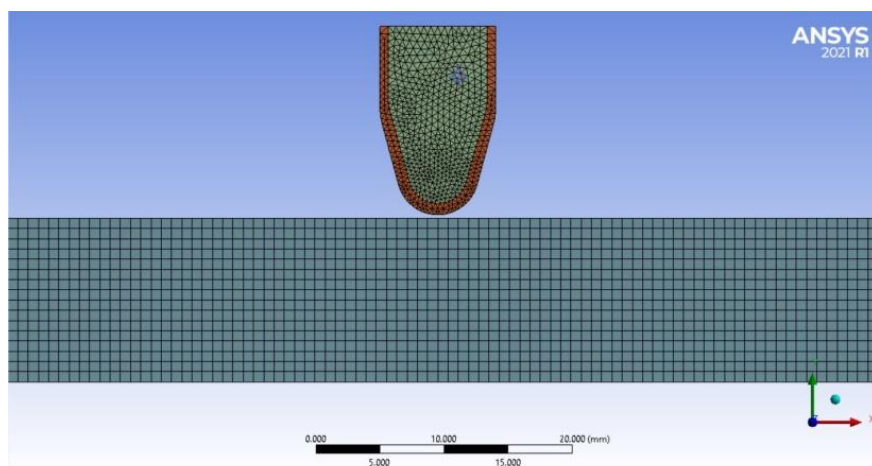


Fig. 3.2. Rețeaua de discretizare pentru modelul analizat

### 3.3.2 Modele de material

În aceste simulări a fost folosit modelul Johnson–Cook pentru materialul miezului (un aliaj de plumb) și al cămașii (un aliaj de alamă), pe baza datelor experimentale obținute de [13], [26], [55] (Tabelul 3.1). Fiecare strat al plăcii are caracteristicile mecanice din Tabelul 3.2.

Modelul este izoterm, din două motive. Explicit Dynamics nu suporta modele adiabactice, iar din literatură s-a constatat că în acest domeniu de viteze de impact, 100 m/s până la 450 m/s, influența termică poate fi neglijată în evaluarea distrugerii.

**Tabelul 3.1.** Proprietăți mecanice pentru cămașa și miezul proiectilului

Proprietate	Cămașă	Miez
Densitate [ $kg\ mm^{-3}$ ]	8,45e-006	1,135e-005
Căldura specifică la presiune constantă [ $mJ\ kg^{-1}\ C^{-1}$ ]	380	1,288e+005
Modulul lui Young [ $MPa$ ]	90000	16000
Coeficientul Poisson	0,344	0,44
Temperatură [ $^{\circ}C$ ]	22	22
<b>Constante pentru modelul Johnson_Cook</b>		
Limita de curgere inițială [ $MPa$ ]	90	1
Constantă de întărire [ $MPa$ ]	628	55
Exponent pentru întărire	0,72	9,8e-002
Constanta vitezei de deformare	0,266	0,231
Exponentul înmuierii termice	604	221
Temperatura de topire [ $^{\circ}C$ ]	927	327,5
Viteza de deformare plastică (/sec)	1	1
<b>Deformația plastică la rupere</b>	0,4	0,4

Între straturi a fost introdus CZM (cohesive zone model, modelul zonei coezive, de grosime zero) [70], denumirea în comenzile Explicit Dynamics fiind pentru modelarea rezistenței „Bilinear for interface delamination” (delaminării biliniare la interfață) (Tabelul 3.3), [71], criteriul de rupere fiind setat pentru „Fracture energies based debonding” (delaminare bazată pe energii de rupere) (Tabelul 3.4) în modul I de deschidere a fisurii.

**Tabelul 3.2.** Proprietăți mecanice pentru straturi

Proprietate	Valoare
Densitate [ $kg\ mm^{-3}$ ]	1,904e-006
Căldura specifică la presiune constantă [ $mJ\ kg^{-1}\ C^{-1}$ ]	6,e+005
Modulul lui Young [ $MPa$ ]	50000
Coefficientul Poisson	0,3065
Temperatură [ $^{\circ}C$ ]	22
<b>Model cu întărire biliniar izotropă</b>	
Limita de curgere inițială [ $MPa$ ]	550
Modulul tangent [ $MPa$ ]	10000
Temperatura [ $^{\circ}C$ ]	22
<b>Deformația plastică la rupere</b>	0,09

**Tabelul 3.3.** Parametrii pentru modelarea rezistenței biliniare la delaminare interlaminară

Temperatura, $^{\circ}C$	Limita la tracțiune normală, MPa	Saltul de deplasare la terminarea delaminării cu întindere, mm	Limita la forfecare, MPa	Saltul de deplasare tangențială la terminarea delaminării, mm	Raport
23	70	5	50	0,1	0,3

**Tabelul 3.4.** Parametrii pentru energia de rupere la delaminare

Temperatura, $^{\circ}C$	Tensiunea normală maximă de contact, MPa	Energia critică la cedare pentru separarea normală, $J/m^2$	Tensiunea tangențială maximă de contact	Energia critică la cedare pentru alunecare tangențială, $J/m^2$	Coefficient de amortizare artificială
22	100	3000	-	-	0,1

### 3.4. Rezultate ale simulării și discuții

#### 3.4.1. Scopul simulărilor rulate

Modelul și simulările au fost realizate pentru a evidenția următoarele aspecte:

– posibilitatea modelării impactului la nivel macro, cu straturi cu caracteristici izotrope, simplificare acceptabilă pentru că un strat are 4 substraturi orientate ( $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $-45^{\circ}$ ), care conferă uniformitate caracteristicilor mecanice, cel puțin în planul țesăturii, astfel încât pe baza unor criterii de validare, modelul să fie utilizat pentru evaluarea rezistenței balistice pentru un nivel superior celui deja testat,

– criteriile de validare sunt: calitative (forma orificiului de penetrare, forma delaminării) și cantitative (numărul de straturi rupte și mărimea maximă a delaminărilor observabile pe model).

În acest studiu s-a discutat influența numărului de straturi și influența vitezei de impact, pentru același proiectil, 9 mm FMJ.

Rulările au fost realizate pentru următoare cazuri:

– număr de straturi: 8, 10, 12, 16 și 24 straturi; de menționat că testele sunt realizate doar pentru panourile cu 8, 16 și 24 de straturi, dar simularea ar permite evaluarea unor valori intermediare ale numărului de straturi care ar duce la scăderea densității specifice, pentru protecție împotriva aceleiași amenințări,

– viteza inițială 375 m/s și 420 m/s; viteza mai mare (pentru care nu există teste de laborator) ar corespunde unui nivel superior de protecție (FB3) și simulările ar permite o

evaluare pe baza căreia se va programa o viitoare campanie de încercări pentru nivelul superior.

Plăcile cu 10 și 12 straturi nu au avut corespondent în campania de testare, dar simularea poate oferi informații utile privind rezistența compozitului între valorile testate în laborator, pentru plăcile de 8 și 16 straturi, astfel putându-se optimiza greutatea specifică a plăcii de protecție în mediul virtual, urmând o testare doar pentru grosimea sau grosimile considerate eficiente din simulare.

După simulări, s-au comparat formele de distrugere în mediul virtual cu cele obținute pe plăci testate. S-au analizat distribuțiile de tensiuni echivalente pe fiecare strat, cu ajutorul funcției "Path" (Fig. 3.3) și s-au comparat pentru diferite grosimi ale plăcii, obținându-se influența numărului de straturi asupra evoluției tensiunilor echivalente în timp, pe un strat de interes. Din simulare se pot extrage imagini (momente) care aparțin etapelor procesului de impact.

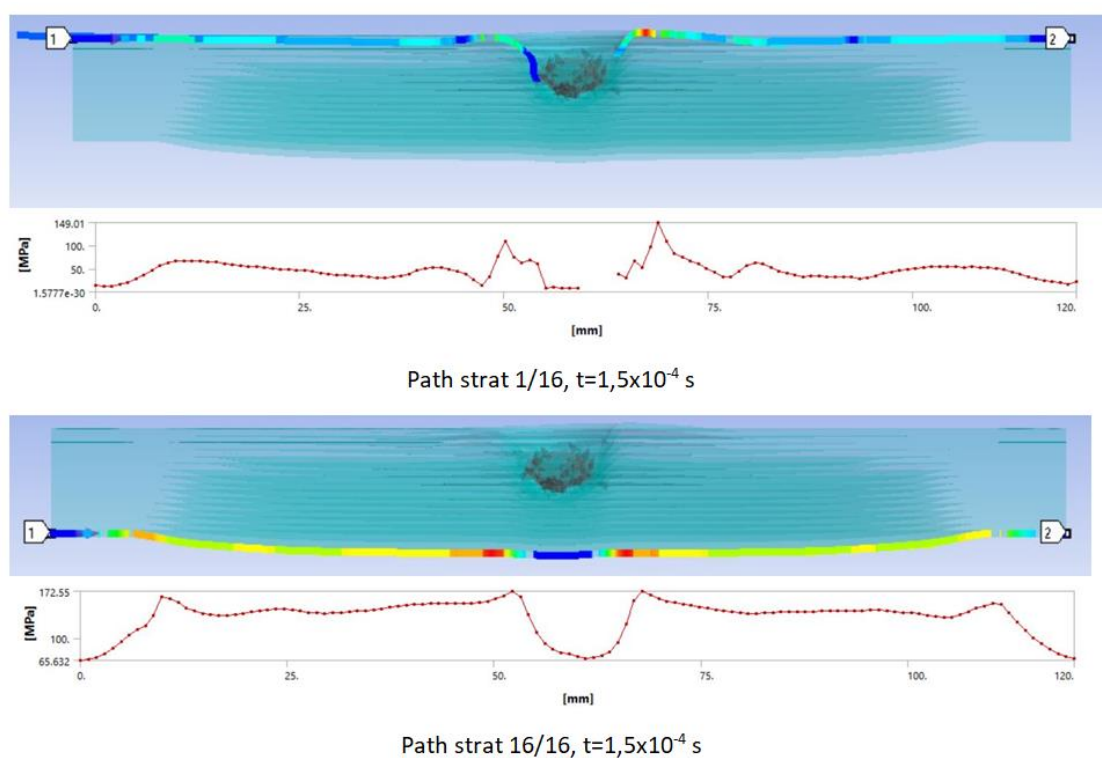


Fig. 3.3 Analiza tensiunilor echivalente pe un strat (pe stratul 1 din panoul cu 16 straturi-sus și pe ultimul strat din același panou-jos)

Pentru penetrare totală (panoul de 8 straturi) (Fig. 3.4), etapele observate din simulare sunt:

– etapa de tensionarea straturilor fără rupere este o etapă foarte scurtă, pe această simulară doar la momentul  $7,5 \times 10^{-6}$  s nu se observă fire rupte, dar valorile tensiunilor echivalente ating valori mari, aproape de rupere (1490 MPa în Fig. 3.4.a), iar primul strat este puternic deformat prin comprimare,

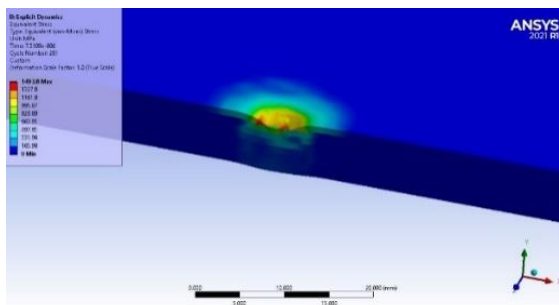


–etapa de la momentul  $t=1,5 \times 10^{-5}$  s când se inițiază ruperea stratului 2 și 3 și delaminarea între straturile 1-2 și 2-3; se observă și un început de delaminare în zona în care deformația ultimului strat este mare,

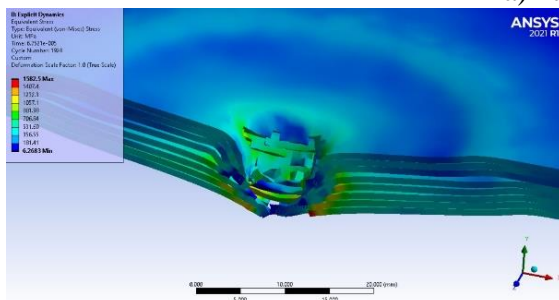
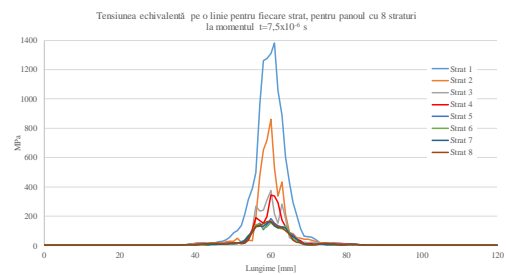
–etapă în care sunt rupte succesiv toate straturile ( $2,25 \times 10^{-5} \dots 6,75 \times 10^{-5}$  s),

–etapă în care glonțul continuă să avanseze față de panou, între glonț și resturile de panou există frecare și glonțul, chiar dacă este deteriorat (deformat, zgâriat), produce încovoieri puternice ale marginilor canalului de penetrare, deja rupte, rezultând mici fragmente.

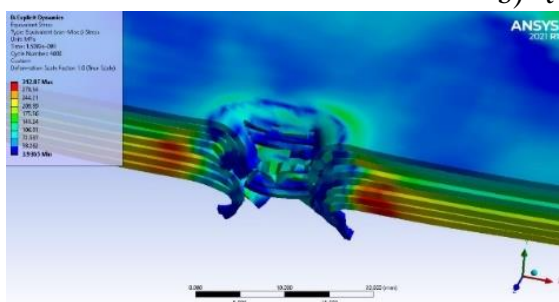
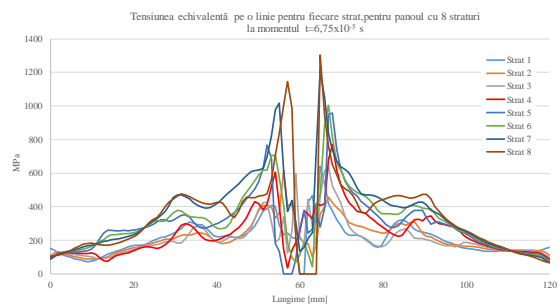
Pe grafice, ruperea unui strat este reflectată prin scăderea la zero a tensiunii echivalente.



a)  $t=7,5 \times 10^{-6}$  s



b)  $t=6,75 \times 10^{-5}$  s



c)  $t=1,5 \times 10^{-4}$  s

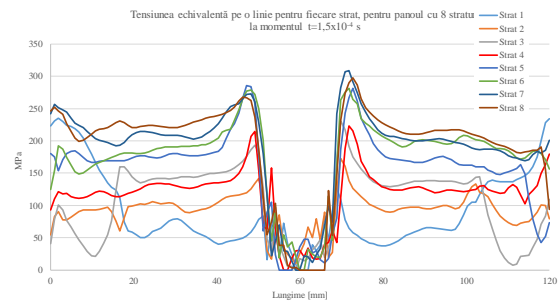


Fig. 3.4. Momente importante în desfășurarea procesului de impact pe panoul cu 8 straturi, cu penetrare totală

Graficele nu au simetrie față de axa proiectilului pentru că ruperea straturilor nu este identică în secțiune. Acest lucru este explicabil prin asimetria locală a rețelei de discretizare inițială și a condițiilor de contact. Și în realitate nu se observă o simetrie a orificiului de penetrare într-un material izotrop din diverse cauze, incluzând diferențe locale ale structurii, deformațiilor etc.



Spre momentele finale ale impactului tensiunile mari apar sub formă de concentratori de tensiune pe marginile fragmentelor puternic încovoiate de trecerea proiectilului; pe măsură ce proiectilul avansează și părăsește contactul cu unele straturi, aceste straturi au tensiuni din ce în ce mai mici. Vezi, de exemplu, distribuția tensiunii echivalente pentru stratul 1 din graficul pentru  $t=1,5 \times 10^{-4}$  s.

Pentru penetrare parțială (panoul de 16 straturi) (Fig. 3.5), tensionarea straturilor fără rupere este o etapă foarte scurtă, pe această simulare, doar la momentul  $7,5 \times 10^{-6}$  s nu se observă fire rupte, dar valorile tensiunilor echivalente ating valori mari, aproape de rupere (1520 MPa pentru stratul 2, în Fig. 3.5a). La momentul final al simulării, se observă oprirea glonțului între straturile 4-5, iar pentru celelalte straturi graficul tensiunilor echivalente este aproximativ similar.

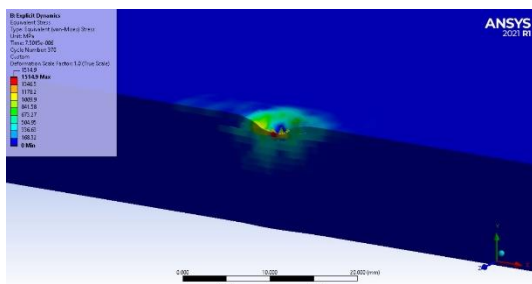
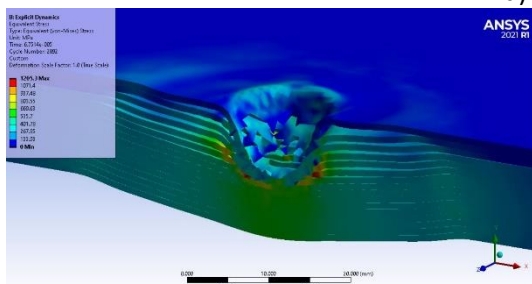
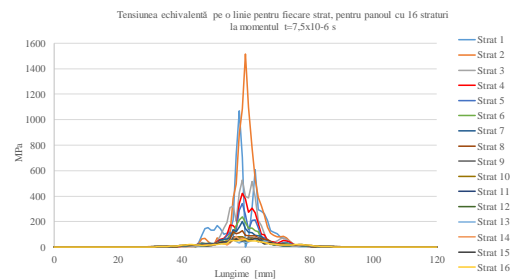
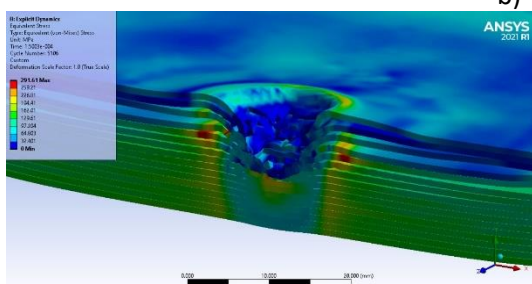
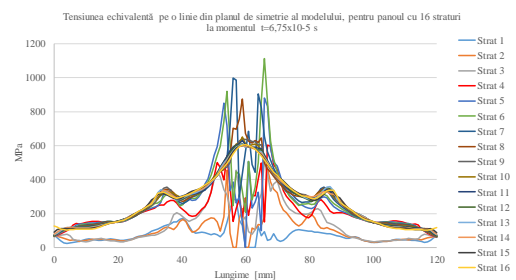
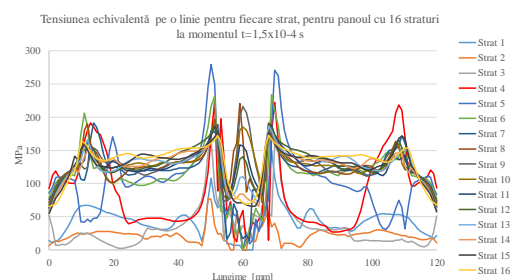
a)  $t=7,5 \times 10^{-6}$  sb)  $t=6,75 \times 10^{-5}$  sc)  $t=1,5 \times 10^{-4}$  s

Fig. 3.5. Momente importante în desfășurarea procesului de impact pe panoul cu 16 straturi, cu penetrare parțială

Figura 3.6 prezintă gruparea graficelor tensiunii echivalente pe secțiunea ultimului strat pentru panoul cu 16 straturi și Figura 3.7 prezintă aceleași grafice pentru panoul cu 24 de straturi. Există asemănări și diferențe între cele două figuri, deși etapele stabilite calitativ sunt aceleași.

La graficele notate cu a) se observă că la primul moment al simulării ( $7,5 \times 10^{-6}$  s) valoarea de maxim se obține la 24 straturi (110...115 MPa), mai mare decât la panoul de 16 straturi (60...80 MPa), probabil din cauza elasticității panoului mai subțire. Pentru ultimul moment din această etapă se constată valori mai mari la panoul cu 16 straturi (600 MPa) și 460 MPa la panoul cu 24 de straturi. Graficele pentru următoarele două etape (b și c) se aseamănă dar, tot așa, valorile mari se obțin pe panoul cu 16 straturi. Diferențe de formă apar doar în ultima etapă, panoul mai subțire având o zonă mai tensionată sub proiectil.

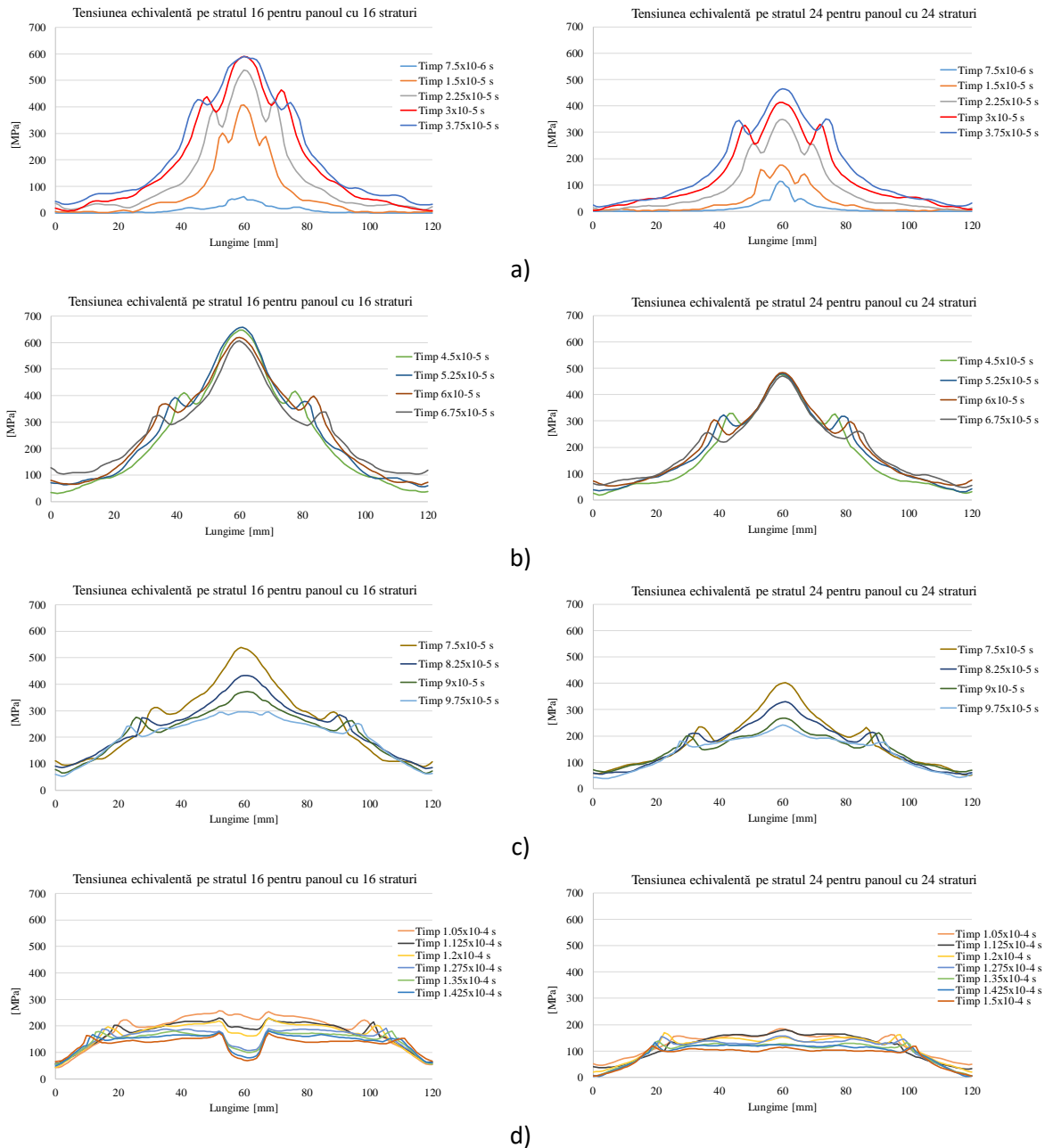


Fig. 3.6. Stratul 16 pentru panoul de 16 straturi      Fig. 3.7. Stratul 24 pentru panoul de 24 straturi

Intervalul de timp studiat în simulare ( $1,5 \times 10^{-4}$  s) nu reprezintă tot procesul de impact, adică intervalul de timp la sfârșitul căruia materialele implicate nu mai sunt tensionate sau tensionate foarte puțin (tensiuni remanente) și/sau corpurile sunt în repaus.

### 3.4.2. Influența vitezei de impact asupra panoului modelat

Testele realizate pot fi incluse la nivelul FB2, dar s-a observat că pentru panourile cu 16 și 24 de straturi, numărul de straturi distruse (rupte) este relativ mic, 3...4 straturi la panoul de 16 straturi (adică 18,75%...25%, din numărul de straturi) și tot atâtea straturi pentru panoul de 24 de straturi (ceea ce reprezintă 12,5%...16,6% din numărul de straturi).

Aceste valori mici sugerează că panourile ar putea fi testate și la un nivel superior pentru a vedea dacă rezistă. Simularea pentru viteza medie de la nivel FB3, 420 m/s, ar putea fi utilă în sensul că rezultatele ei ar fi un punct de plecare în a stabili dacă merită sau nu să se facă teste la nivelul superior.

Figurile ce urmează (Fig. 3.8 până la Fig. 3.10) prezintă o comparație între distribuțiile de tensiuni echivalente pentru panourile cu 8, 16 și 24 de straturi la vitezele de impact  $v_0=375\text{m/s}$  și  $v_0=420\text{m/s}$ .

Scopul acestei comparații este de a evalua, pe simulările rulate, dacă panourile analizate ar putea face obiectul unor teste de laborator la un nivel superior (FB3). Din datele experimentale (vezi Capitolul 5), am observat că pentru panourile de 16 straturi și 24 straturi, "rezerva" de material sau de straturi, adică straturile neperforate sunt relativ multe și ar sugera o rezistență balistică la amenințări mai periculoase.

În Figura 3.8 sunt date distribuțiile de tensiuni echivalente la primul moment al simulării ( $t=7,5\times 10^{-6}\text{ s}$ ). Creșterea vitezei a dus la modificări substanțiale ale distribuției de tensiuni, dar și distrugerii provocate de același proiectil, dar cu viteză diferită.

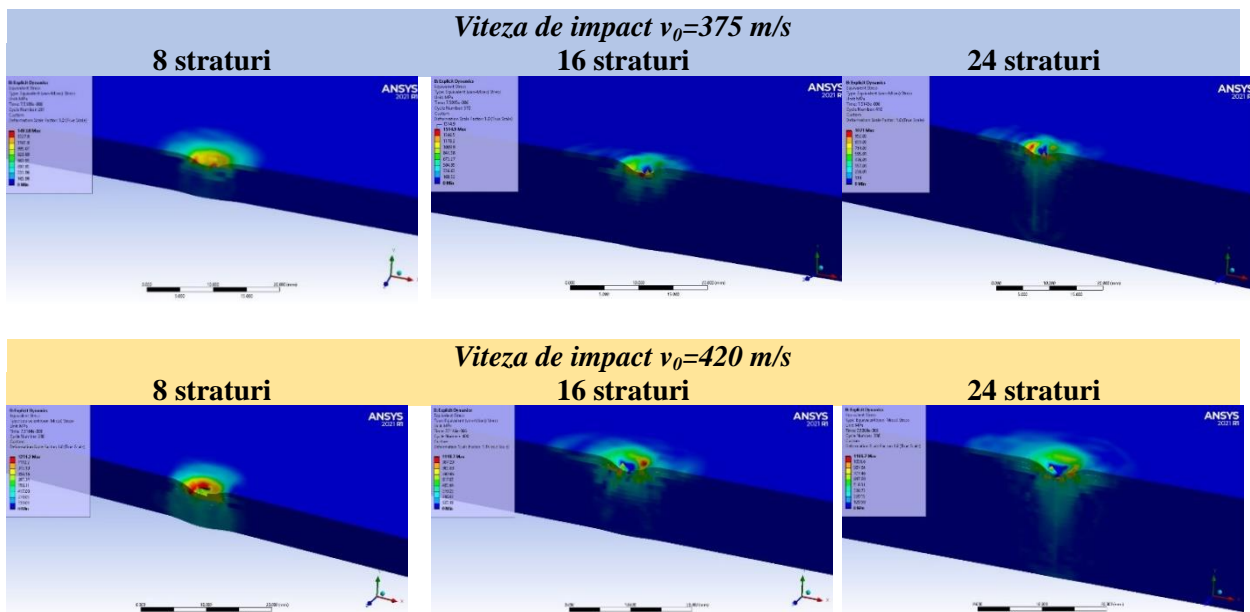


Fig. 3.8. Distribuția de tensiuni echivalente la momentul  $t=7,5\times 10^{-6}\text{ s}$ , pentru panouri cu diferite numere de straturi

Pentru panoul cu 8 straturi, viteza mai mare a indus deja ruperea primului strat și inițierea de delaminări mici, ca dimensiune, între straturile 1-2 și 2-3. La viteza mai mică, ultimele 4 straturi nu sunt tensionate încă, pe când la  $v_0=420\text{ m/s}$ , se observă o distribuție cilindrică de tensiuni de ordinul 100-200 MPa până la ultimul strat. Această mărire a zonelor

mai solicitate se observă și pe panourile cu 16 straturi și 24 straturi. Delaminarea este mai pronunțată la viteza mai mare și apare între mai multe straturi (1-2, 2-3).

Pentru panourile mai groase, se observă tendința glonțului de a rupe mai puține straturi, comparativ cu panoul de 8 straturi. Diferența fiind că, la viteza mai mică, numărul de straturi rupte este mai mic. Delaminarea nu mai este vizibilă pe straturile inferioare, dar separarea între straturi este mai mare la viteza mai mare.

Pentru panourile mai groase, diferența constă în dezvoltarea delaminării, în planul panoului, iar proiectilul a distrus 1-2 straturi în plus pentru viteza mai mare.

Pentru  $t=7,5 \times 10^{-5}$  s (Fig. 3.9), panoul de 8 straturi este deja perforat în întregime, dar la viteza mai mare, distrugerea este mai agresivă, iar orificiul de trecere este mai mare. Tot la această viteză apar încovoieri mai mari ale ultimelor straturi din spatele panoului. Pentru panoul cu 16 straturi viteza mai mică a distrus 6 straturi, iar viteza de 420 m/s a distrus 8 straturi.

Se păstrează aceeași tendință și pentru panoul cu 24 de straturi (4 straturi rupte la  $v_0=375$  m/s și la  $v_0=420$  m/s sunt 6 straturi rupte).

Pentru momentul  $t=9,75 \times 10^{-5}$  s (Fig. 3.24), pentru panourile 16 straturi și 24 straturi, se poate spune că glonțul a fost deja oprit la viteza de 375 m/s pentru că nu mai apar straturi distruse, iar maximele de tensiune sunt sub limita de curgere considerată pentru materialul stratului. Iar pentru viteza mai mare tensiunile echivalente depășesc limita de curgere pentru panoul cu 16 straturi, dar la panoul cu 24 straturi cea mai mare tensiune echivalentă înregistrată la aceste momente este de doar 416 MPa. Dezvoltarea delaminărilor continuă pentru ambele panouri.

Pentru panoul cu 8 straturi, la viteza mică, glonțul încă se mai freacă de ultimele straturi, pe când la viteza mai mare a părăsit zona de contact cu panoul.

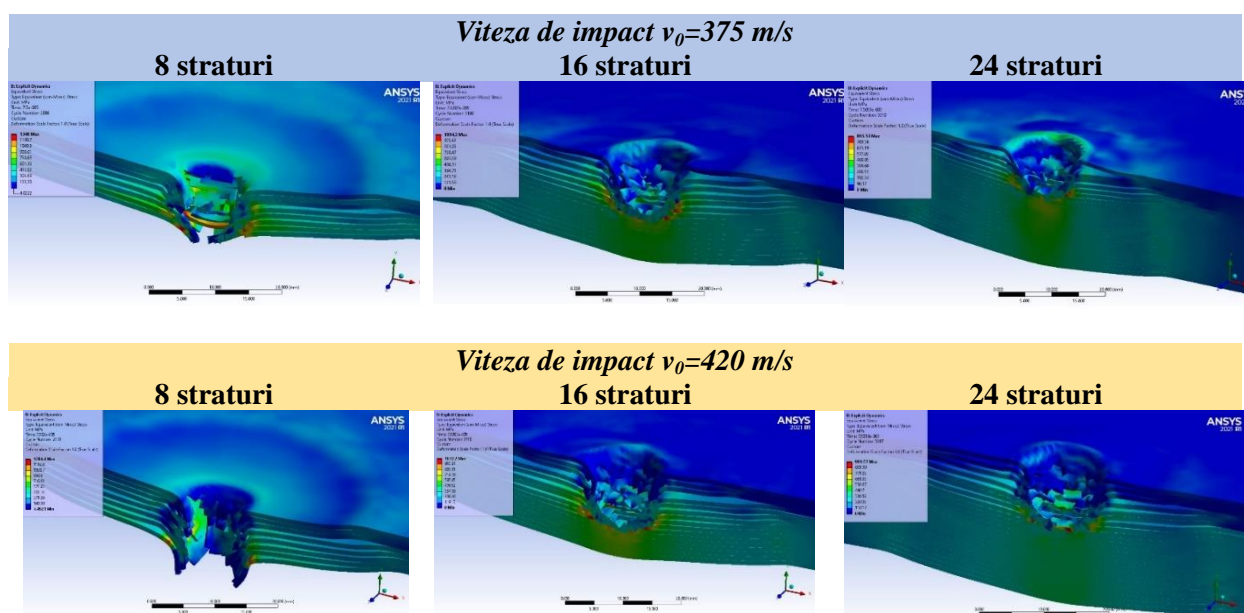


Fig. 3.9. Distribuția de tensiuni echivalente la momentul  $t=7,5 \times 10^{-5}$  s pentru panouri cu diferite numere de straturi



Analiza ultimului moment al simulării (Fig. 3.10) arată tensiuni sub limita de curgere pentru ambele viteze și toate panourile, dar momentul surprinde rezultatul fragmentării ultimelor straturi pentru viteza mai mare (la panoul cu 8 straturi).

Pentru panourile cu penetrare parțială, diferențele de aspect sunt foarte importante.

Panoul cu 16 straturi, are la viteza de 375 m/s, 5 straturi distruse, ceea ce reprezintă 31,2% din grosimea lui. La viteza de 420 m/s, același panou a avut distruse 12 straturi, ceea ce reprezintă 75% din grosimea lui. În unele referințe [18], se consideră recomandabil un panou dacă "rezerva" acestuia (materialul rămas intact) este în jur de 30% din grosimea lui. Ar rezulta că acest panou de 16 straturi nu ar fi recomandabil, sau ar trebui făcute mai multe teste astfel încât să confirme sau să infirme simularea. Luând în considerare aceleași criterii, panoul cu 24 straturi ar face față proiectilului cu viteză superioară, deoarece straturile rupte reprezintă doar 25% din grosimea panoului (la viteza de 420 m/s).

Conform rezultatelor din simulare este probabil ca un panou cu un număr mai mic de straturi (20-22 straturi) să îndeplinească și el cerințele de protecție la viteza de  $v_0=420$  m/s, dar să aibă o densitate de suprafață mai mică. Aceste rezultate din modelare nu pot fi puse în practică decât după încercări în laborator, conform standardelor în vigoare, extrapolarea rezultatelor de la modelare direct la produs nefiind acceptată în acest domeniu de mare risc.

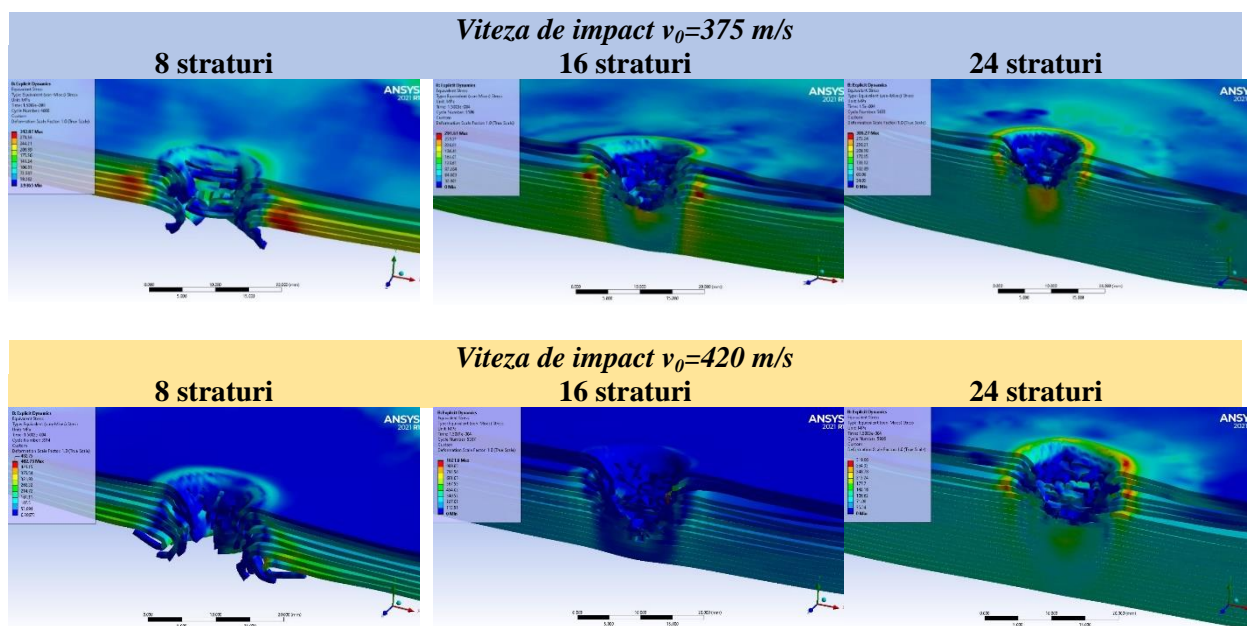


Fig. 3.10. Distribuția de tensiuni echivalente la momentul  $t=1,5 \times 10^{-4}$  s, pentru panouri cu diferite numere de straturi

### 3.4.3. Evaluarea prin simulare a unui interval de grosimi de panou, pentru $v_0=375$ m/s

Scopul acestei analize este de a argumenta o soluție intermediară între două soluții deja modelate și confirmate prin teste de laborator. Ideea este că ar fi de dorit o densitate de suprafață cât mai mică, fără a afecta calitatea răspunsului panoului la amenințări.

Experimental și numeric, există două variante de panou cu comportări extreme:

- panoul de 8 straturi, care are penetrare totală (inacceptabil din punct de vedere al rezistenței balistice),

- panoul de 16 straturi care a rezistat bine și la încercările de laborator și a cărei distrugere este simulată cu un grad mare de verosimilitate.

Întrebarea la care ar răspunde această analiză este: există, în intervalul 8...16 straturi, un panou care să aibă un număr mai mic de straturi decât 16, dar care să aibă performanțele unui panou care să merite să fie încercat în laborator și apoi ca prototip? Având în vedere spațiul acordat acestui subcapitol, am simulat și impactul panourilor cu 10 și respectiv 12 straturi, pentru a vedea care dintre acestea ar putea fi un candidat pentru realizare la scară de laborator.

Următoarele figuri prezintă, comparativ, la același moment din simulare, panoul, glonțul fiind transparent pentru a se observa mai bine modurile de cedare ale panoului.

La primul moment al simulării impactului ( $t=7,5 \times 10^{-6}$  s), distribuția de tensiuni echivalente este similară în sensul creării de zone locale cu valori mari ale tensiunii (Fig. 3.11).

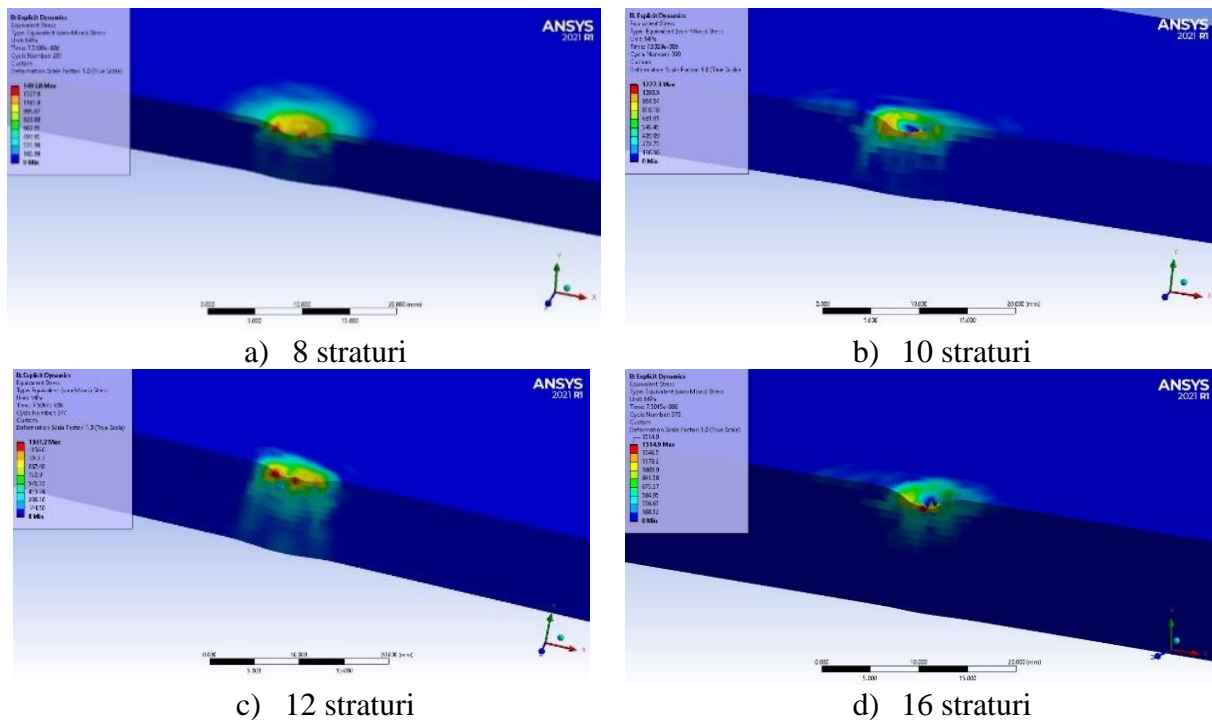


Fig. 3.11. Tensiunile echivalente în panou la momentul  $t=7,5 \times 10^{-6}$  s ( $v_0=375$  m/s)

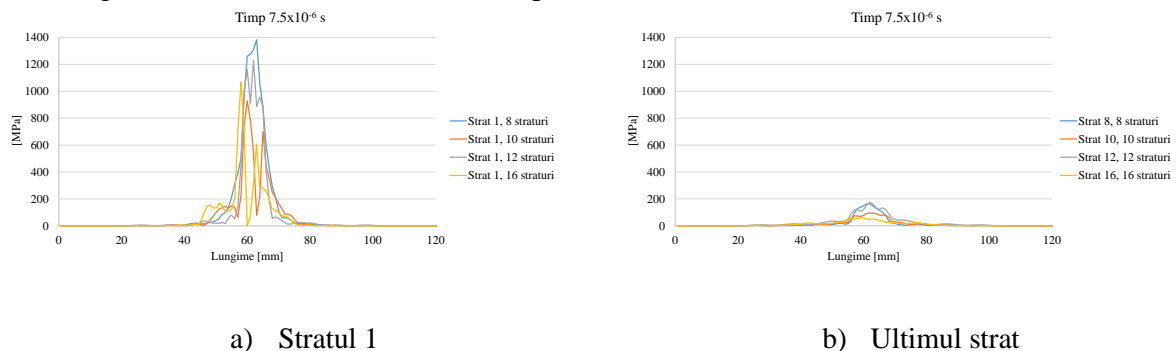


Fig. 3.12. Graficul tensiunilor echivalente pe stratul 1 (a) și pe ultimul strat (b), pentru viteza de impact  $v_0=375$  m/s

Aceste valori ale tensiunii echivalente se observă mai bine pe graficele pentru stratul 1 de pe fiecare panou, date în Fig. 3.12 a. Latura fiecărui strat al modelului este de 120 mm, valoarea de 60 mm fiind chiar în dreptul axei proiectilului și care coincide cu direcția de impact (perpendiculară pe suprafața panoului). Panourile mai groase (n=12 straturi și n=16 straturi) au minime în zona de lovire. Atingerea valorii de zero (pentru panoul cu n=16) sugerează ruperea stratului iar valori puțin mai mari ca zero (60...70 MPa pentru panoul cu 10 straturi) că momentul ruperii este în jurul momentului de timp redat de simulare. Pentru aceste minime este posibil ca ruperea să nu fie poziționată în planul de simetrie analizat. Pentru panoul cu n=8 straturi și n=12 straturi, valorile tensiunii echivalente sunt mari și în creștere, sugerând că ruperea încă nu s-a realizat în secțiunea analizată.

La momentul  $t=3,75 \times 10^{-5}$  s (Fig. 3.13 și Fig. 3.14), valori maxime ale tensiunii echivalente sunt la marginea contactului dintre proiectil și panou, cu excepția panoului cu n=16 straturi. Valorile maximelor depășesc limita de curgere asociată materialului stratului (550 MPa). Micro-zonele de culoare roșie (valori maxime) sunt fie sub proiectil, fie lateral, din cauză că proiectilul presează și împinge lateral straturile. Cu excepția panoului cu n=16 straturi, celelalte panouri dezvoltă maxime de 700... 800 MPa. Delaminarea există pe toate panourile.

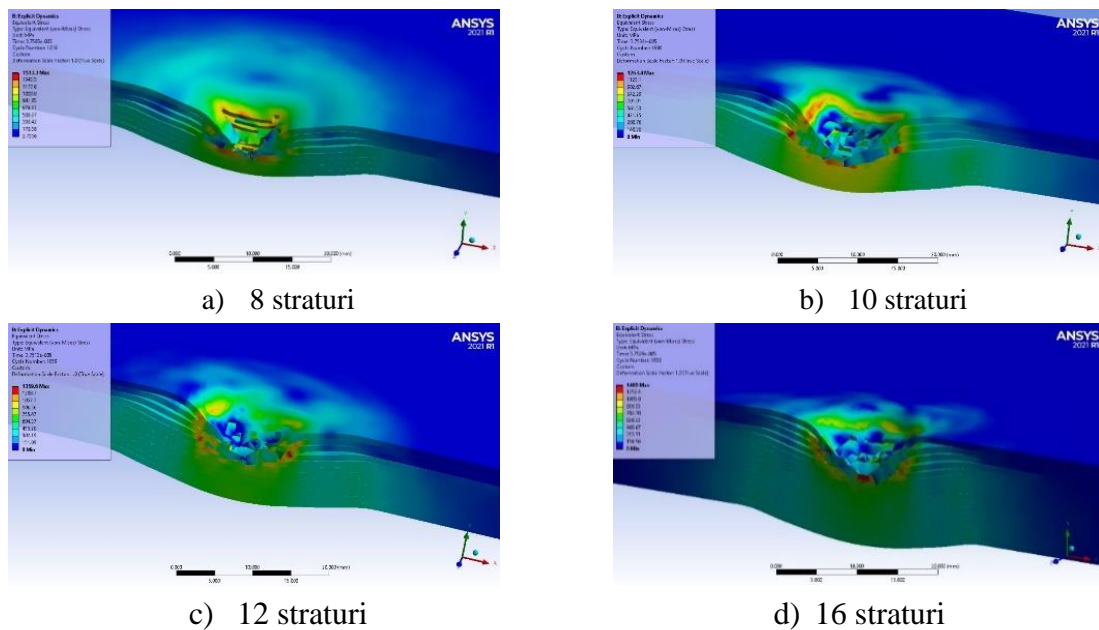


Fig. 3.13. Tensiunile echivalente, la momentul  $t=3,75 \times 10^{-5}$  s

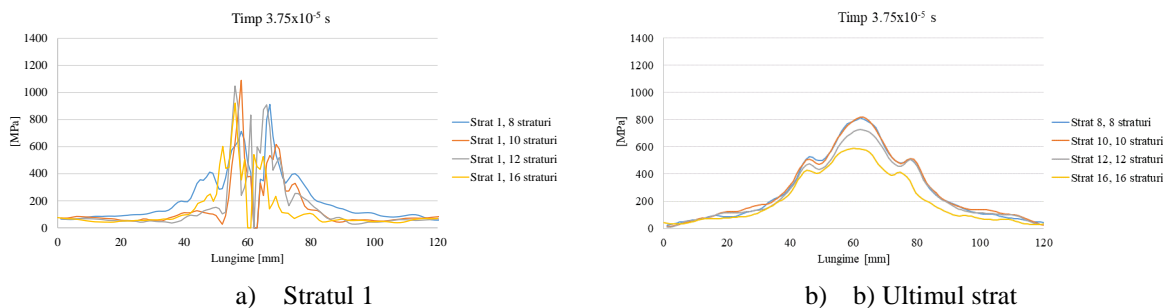


Fig. 3.14. Graficul tensiunilor echivalente pe stratul 1 (a) și pe ultimul strat (b), pentru panouri cu diferite numere de straturi

La finalul simulării, tensiunile scad și pe primul strat și pe ultimul (Fig. 3.15)

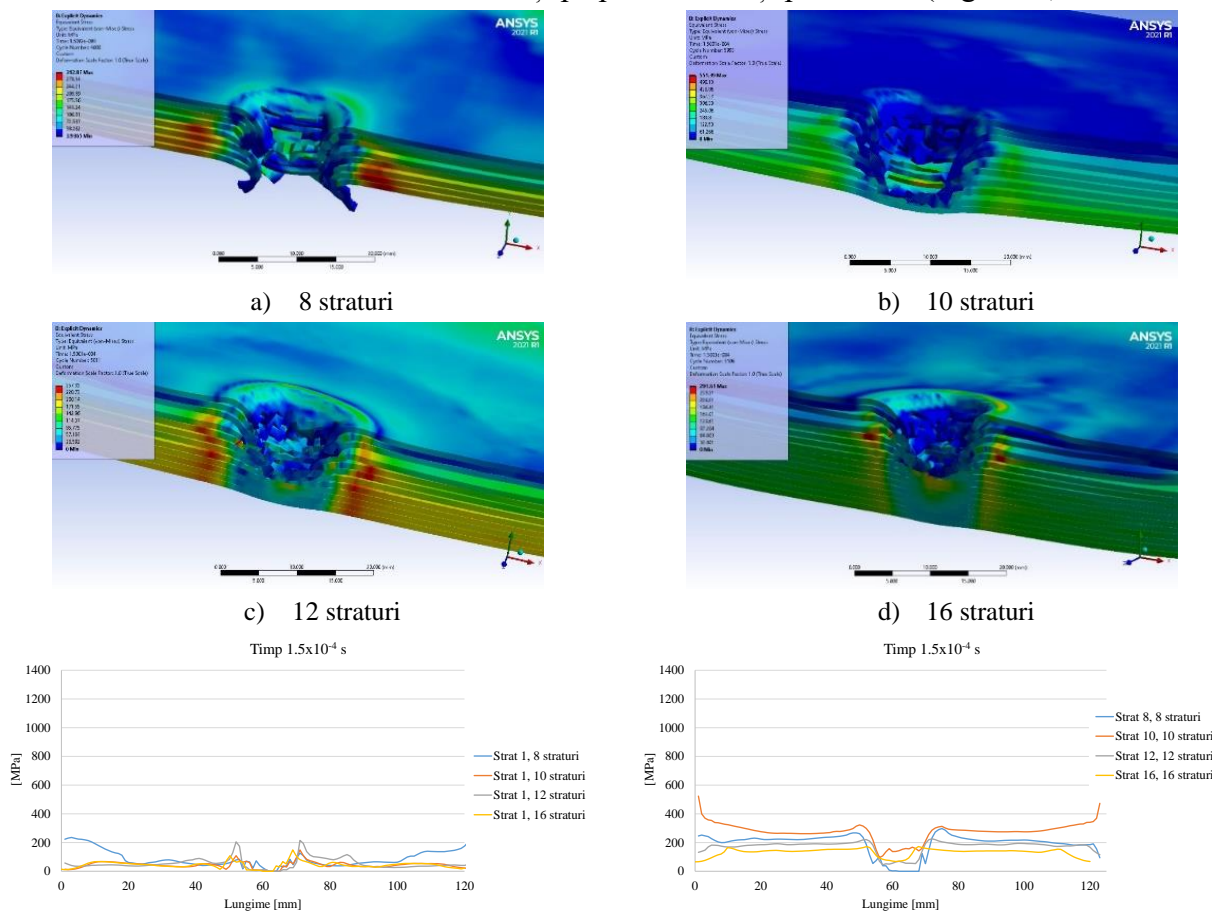


Fig. 3.15. Tensiunile echivalente pe stratul 1 (a) și pe ultimul strat (b), la momentul  $t=1,5 \times 10^{-4}$  s

### 3.5. Concluzii

Acest capitol a prezentat un model de impact panou stratificat – proiectil, la nivel macro, cu următoarele aspecte:

- toate corpurile și materialele implicate sunt în domeniul elasto-plastic, cu criteriu de cedare EPS (deformația plastică echivalentă) [19], [41]; simulările cu toate corpurile deformabile sunt mai realiste,

- modelarea delaminării prin condiționarea la rupere a straturilor panoului,

- identificarea etapelor pentru penetrarea totală și penetrarea parțială

- simulări pentru panourile testate în laborator și s-a validat modelul pe criteriul numărului de straturi rupte ( $\pm 1$  strat) și cel al mărimii delaminării pe spatele panoului,

- simularea unor cazuri pentru grosimi intermediare între 8 și 16 straturi pentru că, din rezultatele testelor de laborator, s-a constatat o „rezervă” de rezistență la impact, în sensul stabilirii la nivel de modelare a unor grosimi eficiente, dar mai mici pentru aceeași amenințare,

- rularea a 5 cazuri la viteza de 375 m/s, care a fost determinată și pentru încercările realizate în laborator și a 3 cazuri la viteza de 420 m/s, viteză caracteristică pentru nivel FB3, cu aceeași muniție.

Din rezultatele obținute pentru aceste rulări s-au putut formula următoarele concluzii:



- deși modelul de material al stratului a fost simplificat la un model bilinar izotrop cu durificare, cu date din literatură, rezultatele au fost validate prin numărul de straturi distruse pentru plăcile cu penetrare parțială și prin mărimea delaminării pe spatele ultimului strat al panoului,

- pe baza rezultatelor pentru panouri modelate și testate real, s-au rulat cazuri cu grosimi intermediare acestora, pentru panouri de 10 straturi și 12 straturi, din care a rezultat o soluție numerică care ar putea fi validată prin testare și care să ofere o protecție balistică bună, dar cu densitate de suprafață (implicit, grosimea panoului) mai mică.

Tabelul 3.5 prezintă informații referitoare la dimensiunea delaminărilor, pe panourile testate în laborator și pe simulări. Cea mai mare diferență, de 29,4% față de valoarea măsurată pe panoul testat, s-a obținut pentru panoul cu 8 straturi, cu penetrare totală. Această diferență ar fi putut rezulta din cauza elasticității mai mari a panoului real și a faptului că la trecerea glonțului prin ultimele straturi desprinderea dintre ele a fost mai severă. Pentru panoul cu 16 straturi, s-a obținut o diferență mică, de 10,1%, între panoul real și cel simulat, acceptabilă în condiții de simulare la nivel macro. Pentru panoul mai gros, de 24 straturi, diferența între panoul testat și panoul simulat la impact a fost de 14,4 %, rezultatele fiind rezonabil de apropiate pentru a utiliza modelul de material și în alte simulări, în intervale nu foarte mari ale parametrilor (număr de straturi, viteza de impact).

**Tabelul 3.5.** Diametre ale cercurilor de delaminare pe eșantioanele testate, pe spate

Placa	Grosimea plăcii (medie)	Diametrul 1 focul 1	Diametrul 2 focul 2	Diametrul 3 focul 3	Media valorilor	Diametrul din modelare
8 straturi	6,37	165	165,9	158,09	<b>162,99</b>	<b>117,04</b>
16 straturi	12,49	105,86	111,5	108,62	<b>108,66</b>	<b>100,19</b>
24 straturi	18,26	102,17	100,6	98,14	<b>100,3</b>	<b>86,1</b>

## Capitolul 4. Tehnologia la scară de laborator a panourilor de protecție balistică

### 4.1. Materialele implicate

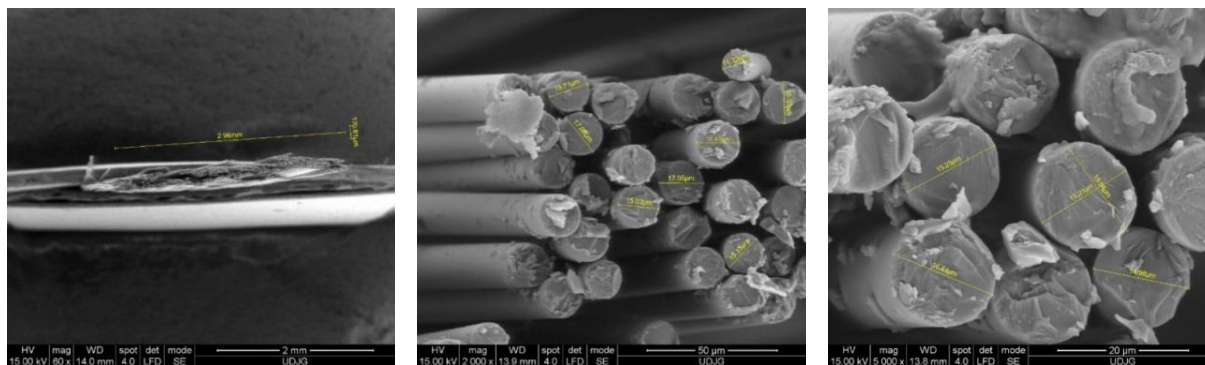
#### 4.1.1. Fibra de sticlă și țesătura de fibră de sticlă

Țesătura utilizată în acest studiu este stratificată, în patru substraturi, cu orientare ( $0^\circ/+45^\circ/90^\circ/-45^\circ$ ), ceea ce presupune din start că țesătura va avea o comportare cvasi-isotropă. Denumirea comercială este 1200 g/m<sup>2</sup> Quatriaxial Glass Cloth ( $0^\circ/+45^\circ/90^\circ/-45^\circ$ ) 127, având codul WTVQX1200-1 E-glass, Q1200E10Q [80]. În Tabelul 4.1 este detaliată construcția țesăturii. Figura 4.1 prezintă mărimea firelor de fibre de sticlă măsurate la microscopul electronic. Rolele de fibră de sticlă au fost păstrate în laborator la o umiditate relativă de 40-70% și la o temperatură de 18-30° C, așa cum recomandă producătorul. Rășinile compatibile cu această țesătură sunt rășini de tip poliesterice, vinil-esterice și epoxidice. Conținutul de apă este de maxim 0,2% masic (conform ISO 3344).

**Tabelul 4.1.** Caracterizarea arhitecturii țesăturii

Construcția ramforsării țesăturii			
	Strat	Tipul fibrei	Greutatea suprafeței
1.	0 °	600 Tex	283 g/m <sup>2</sup>
2.	45 °	300+600 Tex	300 g/m <sup>2</sup>
3.	90 °	600 Tex	307 g/m <sup>2</sup>
4.	-45 °	300+600 Tex	300 g/m <sup>2</sup>
5.	Fir auxiliar	76 DTex	10 g/m <sup>2</sup>

**Total: 1200 g/m<sup>2</sup> (±%3)**



a) dimensiunile unui fir

b) măsurători ale diametrelor fibrelor de sticlă

Fig. 4.1 Mărimea firelor de fibre de sticlă măsurate la microscopul electronic

Figurile 4.2-4.3 prezintă analize elementale EDX pentru țesătura utilizată în această lucrare. S-au analizat atât secțiuni transversale prin fibră, cât și pe teaca fibrei, punctual sau în zone rectangulare mici (cu latura de 2...5 μm).

Din Fig. 4.4 se observă că predomină borul (B), carbonul (C), aluminiu (Al), siliciu (Si) și calciu (Ca), cu urme de fier (Fe), zinc (Zn) și titan (Ti), o compoziție care ar putea fi

poziționată între sticla E și S, particularitatea compoziției fiind alocată zonei de extracție a materiei prime.

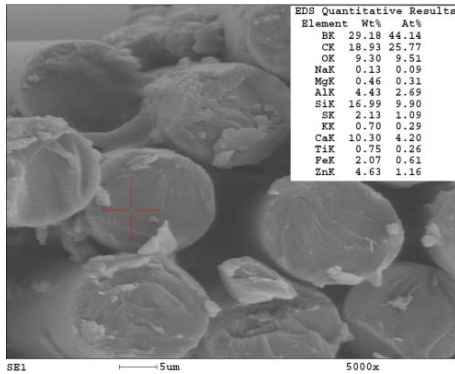


Fig. 4.2. Analiză elementală EDX, punctuală, în secțiunea fibrei de sticlă

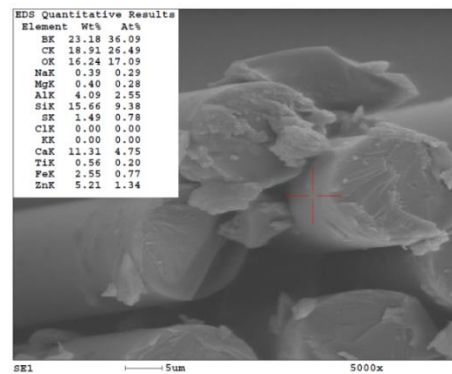


Fig. 4.3. Analiză elementală EDX, pe teaca fibrei de sticlă (pe suprafața exterioră a fibrei)

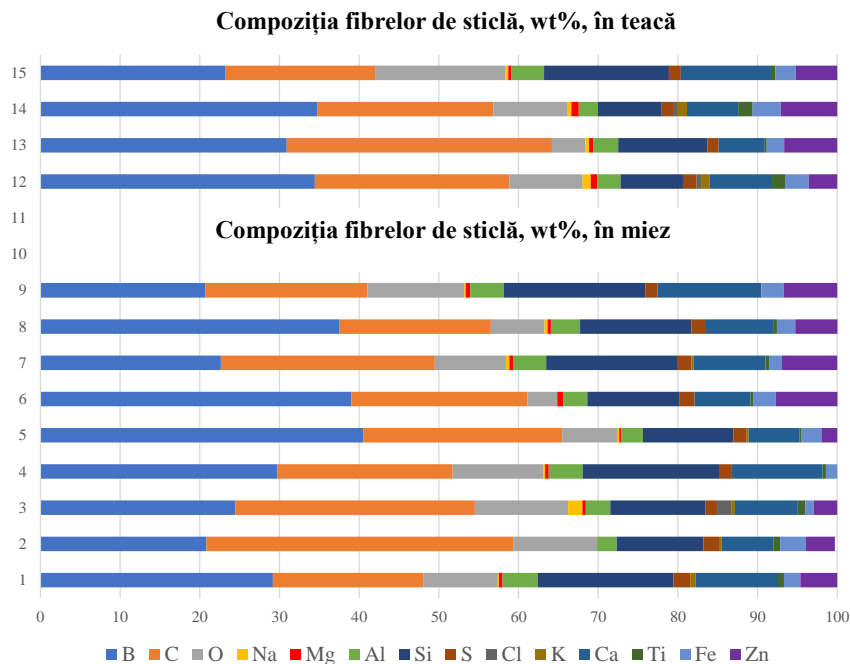


Fig. 4.4. Compoziția fibrelor de sticlă, analiză elementală EDX

#### 4.1.2. Matricea de rășină epoxidică

După o documentație în domeniul rășinilor pentru compozite cu fibră de sticlă, din experiența colectivului contractului 725/2017 [22], am selectat rășina bicomponentă Biresin® CR82 cu întăritor CH80-2, din gama oferită de producătorul Sika Group [82].

Raportul de amestecare trebuie să fie respectat cu acuratețe, așa cum este dat în fișa tehnică a rășinii pentru a obține rezultate optime. Abaterea de la aceste rapoarte va duce la reducerea performanțelor. Valorile finale pentru proprietăți termice și mecanice depinde de ciclurile de tratament după îmbătrânire.

Biresin® CR82 este o rășină epoxidică pentru formare prin pensulare individuală, manuală, a straturilor, pentru formare în vid și proces de înfășurare, mai ales pentru aplicații

în care temperatura de tratament termic  $\geq 75^{\circ}\text{C}$  nu poate fi aplicată. Poate fi folosită în marină și compozite generale pentru industrie. Materialul și procesarea se recomandă să fie de la 18 la  $35^{\circ}\text{C}$  [74].

Tabelul 4.2 prezintă familia de întăritori adecvați pentru rășină Biresin® CR82. Firma Sika (prin PolyChem București) oferă 4 întăritori (B) cu un singur raport masic de amestecare pentru fiecare. Tabelul 4.3 prezintă proprietățile mecanice și termice ale rășinii deja formate și tratate termic și se observă că utilizând întăritorul CH80-2, se obține o limită la tracțiune destul de mare pentru o rășină epoxidică. Nu am ales întăritorul CH80-1, care are o limită de rezistență doar cu 5% mai mare decât rășina obținută cu întăritorul CH80-2, din cauza timpului de prelucrare, care este mai mic.

**Tabelul 4.2.** Caracteristici ale rășinii Biresin® CR82 și întăritorilor utilizabili [74]

Date Fizice		Rășină (A)	Întăritor (B)			
Componente individuale		Biresin® CR82	Biresin® CH80-1	Biresin® CH80-2*	Biresin® CH80-6	Biresin® CH80-10
Raport de amestecare	Masă	100	27			
Raport de amestecare	Volum		32	31	32	32
Vâscozitate, $25^{\circ}\text{C}$	mPa.s	~1,600				
Densitate, $25^{\circ}\text{C}$	g/ml	1,11	0,95	0,99	0,95	0,95
			Amestec			
Potlife, 100g/RT (aprox.)	min		80	80	220	330
Vâscozitate, $25^{\circ}\text{C}$ (aprox.)	mPa.s		850	600	400	390

\* Întăritorul utilizat în realizarea panourilor

**Tabelul 4.3.** Proprietățile mecanice și termice ale rășinii [74]

Proprietăți mecanice tipice pentru rășina întărită complet						
Rășină Biresin® CR82 (A)	Cu întăritor Biresin® (B)		CH80-1	CH80-2	CH80-6	CH80-10
Rezistență la rupere la tracțiune	ISO 527	MPa	94	90	84	82
Modul de elasticitate la tracțiune	ISO 527	MPa	3000	3000	2900	2900
Deformația la rupere	ISO 527	%	4,9	5,6	6,4	6,2
Rezistență la încovoiere	ISO 178	MPa	140	130	127	118
Modul de elasticitate la încovoiere	ISO 178	MPa	3300	3200	2900	2800
Rezistența la compresiune	ISO 604	MPa	120	105	110	110
Densitate	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1,14	1,14	1,14	1,14
Duritate Shore	ISO 868	-	D 85	D 85	D 85	D 85
Rezistența la impact	ISO 179	kJ/m <sup>2</sup>	38	66	55	56
Proprietăți termice tipice pentru rășina întărită complet						
Temperatura de deformare la cald	ISO 75A	°C	93	83	71	71
Temperatura de tranziție vitroasă	ISO 11357	°C	97	90	83	85

Un ciclu adecvat de tratament poate fi următorul:

- viteza de încălzire a panoului de aproximativ  $0,2^{\circ}\text{C}/\text{min}$  până la aproximativ  $10^{\circ}\text{C}$  sub temperatura de tranziție vitroasă,  $T_g$ ,
- menținere în matriță la această temperatură între 2 și 12 ore,

- compozitul va fi răcit cu  $\sim 0,5^{\circ}\text{C}$  pe minut.

Tratamentul de răcire specific trebuie adaptat cerințelor tehnice și economice:

Cu întăritorii (B) Biresin® CH80-1 și CH80-2 se poate face scoaterea din matriță, la temperatura camerei.

## 4.2. Tehnologia de laborator pentru obținerea panourilor

### 4.2.1. Tehnologia de laborator pentru plăcile proiectate

Scopul tehnologiei a fost realizarea la scară de laborator a unor plăci protecție balistică (OGe) (Fig. 4.6), destinate blindajelor ușoare pentru autovehicule și incinte protejate. Placa poate fi integrată în sisteme de protecție. Avantajul tehnologiei propuse este că se pot executa plăci de grosimi diferite cu aceleași etape și cu unele caracteristici într-un interval îngust (de exemplu, concentrația masică de fibre, toleranțe la grosimi etc.).

Tăierea s-a efectuat cu ajutorul unei foarfece electrice marca Vibromat S-54, având diametrul discului de tăiere de 50 mm, greutatea fiind de 700 g, puterea de ieșire 80 W, iar înălțimea de tăiere a straturilor fiind de maxim 12 mm.

Laboratorul de lucru a fost organizat astfel: stand de lucru pentru tăierea fibrei de sticlă și încă un stand pentru fabricarea panourilor OGe (Fig. 4.7).

Cântărirea componentelor rășinii și a panourilor s-a realizat cu un cântar electronic de precizie.

Amestecarea componentelor rășinii. Deoarece se lucrează la nivel de laborator, s-a realizat câte un amestec de 800 g de rășină CR82 și 200 g de întăritor CH80-2 pentru plăcile cu mai mult de 16 straturi și amestecuri de câte 400 g de rășină CR82 și 100 g de întăritor CH80-2 pentru plăcile cu mai puțin de 16 straturi.

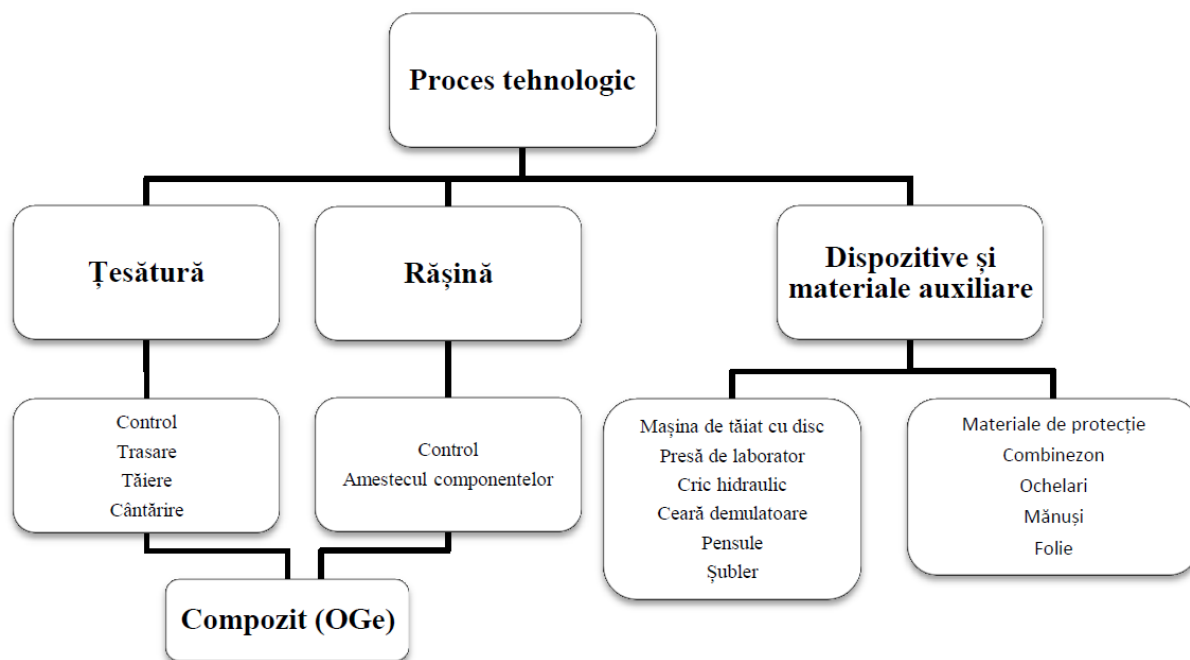


Fig. 4.6. Diagrama procesului tehnologic, la scară de laborator, pentru producerea compozitelor



Fig. 4.7. Organizarea laboratorului pentru realizarea panourilor

Pe suprafața matriței și pe foile de placaj, care să asigure desprinderea mai ușoară a compozitului din matriță, se aplică un strat de ceară de extracție. CIREX CP 10 este o ceară de extracție (furnizor Airétec, distribuitor RomPolimer Composites), utilizată pentru rășini poliesterice și rășini epoxidice. Este un agent de demulare moale, care se evaporă la temperatura camerei și formează un strat subțire monomolecular, care aderă la pereții matriței și nu are afinitate pentru rășină. Matrița trebuie lustruită înainte de aplicarea rășinii. Se prezintă sub formă de pastă sintetică, cu greutate moleculară mare, dispersată în solvenți volatili care se evaporă pentru a elibera agentul de demulare activ. Punctul de aprindere este  $>40^{\circ}\text{C}$ . Se aplică cu pensula sau cu un burete, într-un strat sau două și se așteaptă evaporarea solvenților înainte de aplicarea celui de-al doilea strat sau de intrarea în contact cu laminatul.

Pensularea constă în întinderea rășinii, pe fiecare strat în parte, cu ajutorul unei pensule (Fig. 4.8).

Panourile de protecție au fost menținute cel puțin 8 ore în presă (Fig. 4.9).



Fig. 4.8. Impregnarea straturilor cu amestecul de rășină și întăritor



Fig. 4.9. Presă pentru fabricarea compozitului OGe, în poziția de presare

După finalizarea procesului de întărire, panourile sunt scoase din presă și acestea necesită operațiuni de finisare a marginilor fără a afecta zona cu ranforsare. După finisarea marginilor, compozitul a fost verificat pentru integritate, cântărit și codificat (Fig. 4.10).

Îmbătrânirea constă în menținerea timp de 7 zile la temperatura camerei.



Tratamentul termic a fost efectuat după îmbătrânirea naturală, în două etape, ținând cont de soft-tul etuvei utilizate, de câte 3 ore fiecare, la 60°C la etuva din cadrul Universității Dunărea de Jos din Galați, Facultatea de Științe și Mediu, Departamentul de Chimie, Fizică și Mediu (Fig. 4.11).

Figura 4.12 prezintă diagrama Gantt pentru programarea producerii unui set de 5 plăci.

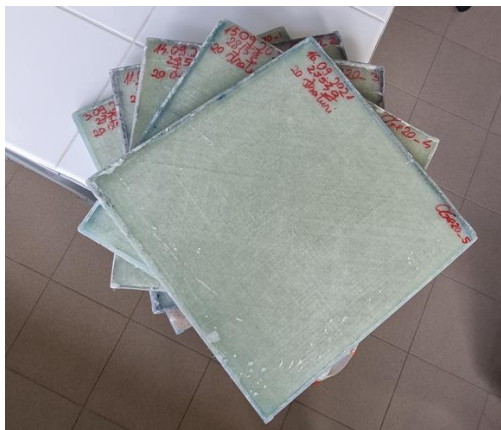


Fig. 4.10. Un set de 5 plăci de 20 de straturi



Fig. 4.11. Aranjarea plăcilor în etuvă, cu distanțiere de lemn setul de panouri cu 20 straturi

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	<b>24 straturi cuadriaxiale</b>																
Tăiere, cântărire, amestecarea rășinii, aplicare și presare în matriță																	
Placa 1																	
Placa 2																	
Placa 3																	
Placa 4																	
Placa 5																	
Polizare + Control																	
Tratament																	
Control+ împachetare																	

	Tăiere, cântărire, amestecarea rășinii, aplicare și presare în matriță
	Îmbătrânire naturală 7 zile
	Polizare + Control
	Tratament post-îmbătrânire naturală
	Control+ împachetare

Fig. 4.12. Diagrama Gantt pentru programarea producerii unui set de 5 plăci

În regim de laborator, pentru un set de 5 plăci, timpul necesar fabricării acestora este de 12...13 zile.

**Concluzie.** Timpul de prelucrare depinde în foarte mică măsură de numărul de straturi (operația de pensulare și de tăiere, care depinde de numărul de operatori responsabili cu această operație).

#### 4.2.2. Caracterizarea plăcilor elaborate

Pe baza observațiilor din documentație și din câteva teste preliminare pe plăci de 24 straturi și 16 straturi, s-au elaborat următoarele seturi de plăci: 3 plăci de 8 straturi, 5 plăci de 16 straturi, 5 plăci de 20 de straturi, 5 plăci de 22 straturi, 5 plăci de 24 straturi și 3 plăci de 32 straturi. Pentru fiecare set s-au calculate parametrii din Tabelele 4.4...4.5.

**Tabelul 4.4.** Caracteristicile plăcilor cu 8 straturi

Nr Crt.	Masa țesăturii	Masa plăcii	Masa rășină*	Raportul masic țesătură/placă**	Densitatea de suprafață***	Grosime în 4 puncte				
						1	2	3	4	medie
	[g]	[g]	[g]		[kg/ m <sup>2</sup> ]	[mm]				
Placa 1	840	1130	290	0,743	12,55	6,41	6,21	6,27	6,70	6,40
Placa 2	827	1112	285	0,743	12,35	6,23	6,46	6,20	6,62	6,38
Placa 3	837	1106	269	0,756	12,28	6,32	6,25	6,64	6,12	6,33
<b>Media</b>	<b>835</b>	<b>1116</b>	<b>281</b>	<b>0,747</b>	<b>12,39</b>					<b>6,37</b>
Max	840	1130	290	0,756	12,55					
Min	827	1106	269	0,743	12,28					
Deviația standard	<b>5,56</b>	<b>10,19</b>	<b>8,96</b>	<b>0,006</b>	<b>0,11</b>					<b>0,029</b>

\* Masa rășină = Masa plăcii – masa țesăturii, adică (col 2- col 1)

\*\* Raportul masic țesătură/placă= masa țesăturii/ masa plăcii, adică (col 1/ col 2)

\*\*\*Densitatea de suprafață= masa placa/arie placă (0,09 m<sup>2</sup>)

**Tabelul 4.5.** Caracteristicile plăcilor cu 16 straturi

Nr Crt.	Masa țesăturii	Masa plăcii	Masa rășină*	Raportul masic țesătură/placă**	Densitatea de suprafață***	Grosime în 4 puncte				
						1	2	3	4	medie
	[g]	[g]	[g]		[kg/ m <sup>2</sup> ]	[mm]				
Placa 1	1675	2145	470	0,780	18,61	11,71	11,84	11,37	11,93	11,71
Placa 2	1620	2230	610	0,726	18	13,22	12,78	13,51	11,95	12,86
Placa 3	1702	2315	603	0,735	18,91	12,31	12,94	12,84	13,52	12,90
Placa 4	1675	2220	545	0,754	18,61	12,47	12,43	12,51	12,56	12,48
Placa 5	1680	2195	515	0,765	18,66	11,84	13,45	12,05	12,62	12,49
<b>Media</b>	<b>1670</b>	<b>2221</b>	<b>549</b>	<b>0,752</b>	<b>18,59</b>					<b>12,49</b>
Max	1702	2315	610	0,780	18,91					
Min	1620	2145	470	0,726	18					
Deviația standard	<b>27,11</b>	<b>55,44</b>	<b>53,01</b>	<b>0,019</b>	<b>0,302</b>					<b>0,427</b>

\* Masa rășină = Masa plăcii – masa țesăturii, adică (col 2- col 1)

\*\* Raportul masic țesătură/placă= masa țesăturii/ masa plăcii, adică (col 1/ col 2)

\*\*\*Densitatea de suprafață= masa placa/arie placă (0,09 m<sup>2</sup>)

#### 4.3. Concluzii privind realizarea panourilor

Acest capitol prezintă o tehnologie originală la scară de laborator pentru obținerea plăcilor de protecție balistică.

Procedeul are repetabilitate, precizie și robustețe.



Rețeta pentru realizarea panourilor și tehnologia de laborator este originală.

Realizarea s-a făcut cu respectarea normelor de securitate și sănătate în muncă, cu echipament de protecție adecvat.

Panourile OGe au fost efectuate la dimensiunile 300 mm x 300 mm.

Procesul tehnologic de realizare a panoului OGe, grosimea variind în funcție de numărul de straturi și cuprinde următoarele faze:

- tăierea straturilor de țesătură (și cântărirea straturilor tăiate care vor fi incluse în panou);

- realizarea amestecului rășină + întăritor;

- pensularea matricei lichide și suprapunerea straturilor de țesătură;

- presarea și control al grosimii panoului în presă;

- tratament termic, menținere la 60°C, timp de 6 h (2 tratamente a câte 3 h), după 7 zile de îmbătrânire naturală;

- control de calitate (cântărire, măsurare grosime).

Caracteristicile panourilor elaborate sunt date în Tabelul 4.6. Analizând valorile, se observă deviații standard mici și un raport fibre/panou aproape constant, indiferent de grosimea plăcilor, (mediile sunt pentru 5 panouri cu excepția panourilor de 8 și 32 de straturi, pentru care media s-a calculat pentru trei bucăți).

**Tabelul 4.6.** Caracteristicile panourilor elaborate

Tipul de panou	Grosime medie	Deviația standard	Masa	Densitatea de suprafață	Raportul masic țesătură/panou
	[mm]		[g]	[kg/ m <sup>2</sup> ]	
<b>OGe8</b>	6,37	0,029	1116	12,39	0,747
<b>OGe16</b>	12,49	0,427	2221	18,59	0,752
<b>OGe20</b>	15,53	0,550	2821	22,97	0,733
<b>OGe22</b>	18,11	0,940	3196	25,15	0,709
<b>OGe24</b>	18,26	0,225	3183	27,51	0,778
<b>OGe32</b>	25,73	0,857	4506	36,55	0,729

În funcție de rezultatele testelor balistice, tehnologia poate fi îmbunătățită pentru grosimile selectate, în sensul reducerii timpului de realizare și control, pe baza experienței realizării acestor seturi de panouri.

## Capitolul 5. Campania experimentală și evaluarea rezultatelor

### 5.1. Standardizarea în domeniul protecției balistice

Standardizarea în domeniul protecției balistice, mai mult decât în alte domenii, se încadrează în principiile declarației CEN/CENELEC că „standardele generează încredere” (“standards build trust”) [76] și promovează inovația și introducerea de noi soluții performante, pe baza unor proceduri de încercare, performante, care sunt capabile să evidențieze calitatea și siguranța pentru astfel de sisteme. În ultimele decenii, metodele de testare s-au rafinat, iar dispozitivele de măsurare au devenit mai complexe [11], [53].

Specificațiile din standard sunt folosite pentru:

- evaluarea performanțelor și calității prin încercări,
- evaluarea unor materiale și soluții noi sau îmbunătățite, în aceleași condiții ca și pentru cele “clasice”,
- investigarea și înțelegerea mecanismelor de cedare ale sistemelor de protecție,
- abordarea logică, integrată, a soluțiilor de protecție împotriva amenințărilor balistice,
- înțelegerea și evitarea consecințelor loviturilor asupra personalului și echipamentelor,
- protejarea și păstrarea disponibilității personalului și echipamentelor la nivel eficace.

Testele pentru protecție balistică se efectuează în condiții impuse și particularizate. În realitate, condițiile pot fi diferite. O condiție de testare este evaluată ca sensibilă dacă o modificare relativ minoră este suficient să producă un rezultat mult diferit [37].

Reglementările pot fi grupate în două clase:

- recomandări standard incluse în legislație națională sau regională; acestea sunt elaborate de organizații recunoscute ca având domeniu de standardizare și devin obligatorii,
- recomandări care nu sunt incluse în legislație; acestea sunt instrucțiuni stabilite de organizații economice sau publice, cu scopul de a putea avea un sistem de testare de referință pentru anumite produse.

Metodele de încercare au două variante, pentru aceste produse fiind aplicabile ambele:

- testarea unei viteze de penetrare minim definite ( $v_{50}$ ) care furnizează informații asupra protecției balistice, relevând în același timp calitatea produsului și variante de producere a sistemului de protecție,
- testarea la o viteză definită de impact pentru care sistemul de protecție nu este penetrat total și cu suficient coeficient de siguranță, pentru un număr impus de lovituri.

Tabelul 5.1 prezintă informațiile incluse într-un raport al unui test balistic. Rezultatele se compară, calitativ și cantitativ (prin parametri și măsurători), cu cerințele din standard, dacă părțile interesate o cer. Pentru sisteme de protecție destinate echipamentelor, Figura 5.1 prezintă câteva aspecte legate de încercări standardizate sau nu, pentru protecție balistică.

În standarde, amenințările sunt clasificate pe nivele și, în consecință, un sistem asigură protecție împotriva amenințărilor de un anumit nivel. Nu este permis să se presupună că un nivel mai înalt recomandă implicit un nivel mai mic, fără testare.

**Tabelul 5.1.** Informații într-un raport de încercare balistică

<ul style="list-style-type: none"> <li>- informații despre contractor</li> <li>- echipamente de măsură și înregistrare</li> <li>- informații pentru contactarea personalului/firmei care face încercarea</li> <li>- numărul lotului și cantitățile</li> <li>- numărul și specificațiile articolului de testat</li> <li>- Specificații pentru produsul încercat</li> <li>- Descrierea materialelor pentru armuri</li> <li>- Identificarea materialului pentru fiecare eșantion</li> <li>- Temperatura și umiditatea în facilitățile de încercare</li> <li>- Data efectuării încercărilor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Personalul care efectuează testul și orice martori agreați de ambele părți</li> <li>- Arma sau armele utilizate</li> <li>- Informații privind proiectilele utilizate: cod, masă, soluție sau varianta constructivă, materiale, dimensiuni, furnizor, design, condiționare</li> <li>- Informații privind materialul de propulsare: tip, masa acestuia la fiecare lovitură, compoziție etc.,</li> <li>- Rezultatele includ: viteza de impact în calculul pentru <math>V_{50}</math>, cu cea mai mare penetrare parțială, cea mai mică valoare pentru penetrare complete, intervale de împrăștiere ale parametrilor de testare, ale rezultatelor.</li> <li>- Caracteristicile piesei/sistemului martor e</li> <li>- Remarci asupra modului de efectuare a testului sau asupra comportării materialului/sistemului</li> <li>- Fotografii, filme, imagini obținute la microscop sau prin alte mijloace agreate de părțile interesate</li> <li>- (dacă se cere) mecanismele de cedare evidențiate</li> <li>- Numărul standardului sau reglementării</li> </ul>
--	---

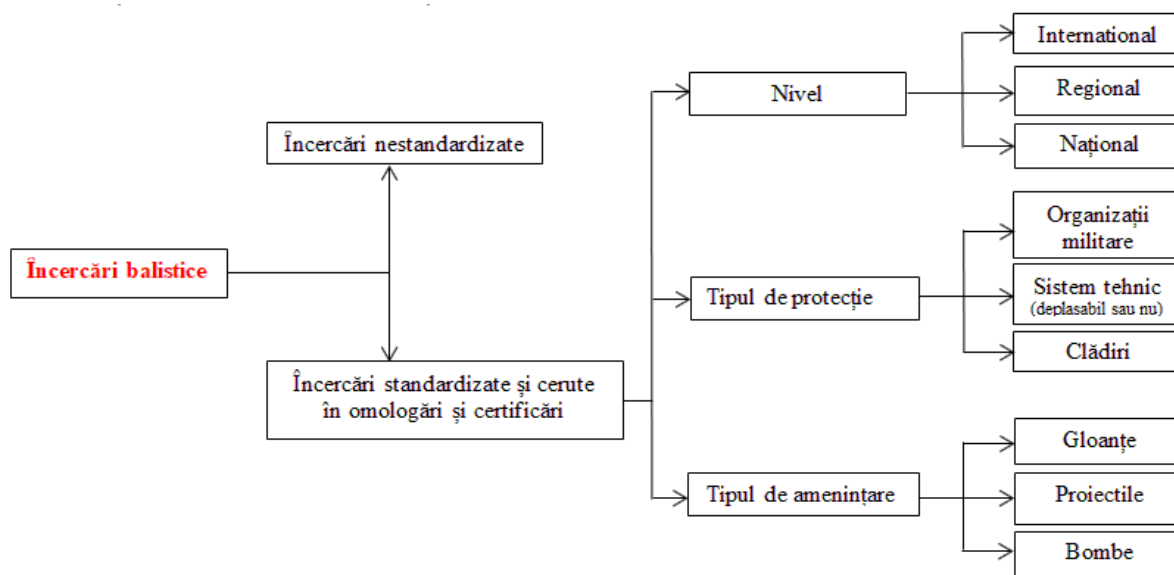


Fig. 5.1. Teste pentru protecție balistică

Pe piața acestor produse intră în prezent noi compozite hibride deoarece au parametri îmbunătățiți în termeni de raport rezistență-densitate specifică, o durată de viață mai mare și proprietăți termice mai bune [56].

Avantajele utilizării eșantioanelor nstandardizate (ca dimensiuni) sunt:

- disponibilitatea de a fi realizate în laborator (de obicei, se realizează eșantioane pătrate cu latura de 100 mm până la 250 mm),
- mai ușor de fixat pe cadrele de laborator,
- mai ușor de realizat investigații suplimentare, cu ajutorul camerelor de filmare rapidă, camere termice etc.,
- mai ușor de decupat eșantioane care să fie analizate cu ajutorul microscopelor

electronice, profilometrelor cu laser sau microscopelor atomice etc.

Dezavantajele utilizării eșantioanelor nestandardizate pot include:

- dificultate în extrapolarea răspunsului panoului atunci când este mai mare; în acest domeniu al materialelor de protecție balistică nu se acceptă astfel de extrapolări decât la nivel de concepție, tendință, care trebuie imperativ verificat prin încercări,
- dimensiuni prea mici ale eșantioanelor pot evidenția unele cedări, dar pot ecrana altele sau chiar împiedica dezvoltarea unora, cum ar fi delaminarea,
- modul de fixare poate induce un răspuns diferit comparativ cu panoul real care va fi montat, posibil, într-un cadru mai complex (de exemplu, portierele vehiculului).

Procedurile de încercare standardizate se aplică, de obicei, după încercări preliminare la scară de laborator, care îndeplinesc doar o parte din cerințele din standard, în special cele cerute de natura și tipul amenințării (tipul proiectilului, viteza și masa acestuia). La început, tehnologia de realizare a eșantioanelor depinde de mărimea acestora și, astfel, răspunsul eșantionului nestandardizat poate diferi de cel care se va obține pe panoul standard. De asemenea, soluția reală pentru implementarea protecției balistice poate diferi, inclusiv sistemul de fixare al blindajului, prezența altor componente ale sistemului care va fi protejat, putând influența performanța (cum ar fi, de exemplu, muchii sau colțuri de fixare a panourilor de protecție balistică).

## **5.2. Campanii de testare pentru plăci rigide (blindaje sau componente de blindaje)**

Fibrele de sticlă pot avea rezultate satisfăcătoare, dar nu se recomandă pentru viteze foarte mari și nici pentru o protecție a corpului uman [1].

Scopul acestui capitol include:

- testarea dacă pachetele concepute de autor rezistă la impact balistic cu glonț de 9 mm FMJ, conform Ps-02512C-14.00-017 Determinarea rezistenței la impactul proiectilelor și SR EN 1523-1:2004 [78],
- investigarea proceselor și etapelor de cedare cu ajutorul fotografiei macro, a imaginilor SEM și a analizei elementale (EDX),
- stabilirea influenței numărului de straturi pentru panourile proiectate pe baza rezultatelor experimentale.

Pentru acest studiu de cercetare, testele s-au efectuat pe panouri realizate din aceleași materiale, dar cu un număr diferit de straturi de țesătură quadriaxială de fibre de sticle: cu 8 straturi și 32 straturi (3 panouri disponibile) și cu 16 straturi, 20 straturi, 22 straturi și 24 straturi (5 panouri disponibile),

## **5.3. Echipamentul de testare**

Campania de încercări a avut ca scop evaluarea comportării panourilor de protecție balistică realizate de autor, la acțiunea gloanțelor de calibru 9 mm FMJ, prin trageri în laborator specializat, metoda fiind cea recomandată în standardul EN 1522/2004 [77].

Aparatura utilizată la campania de testare:

Viteza inițială este notată cu  $v_0$  și se măsoară cu ajutorul unui sistem de măsurare a vitezelor proiectilelor, cronograful model Oehler 43. Cronograful realizează următoarele măsurători: viteza la gura țevii, viteza de control, timpul proiectilului în aer, viteza la țintă. O schemă de aranjare a unui laborator de tragere este dată în Fig. 5.2.

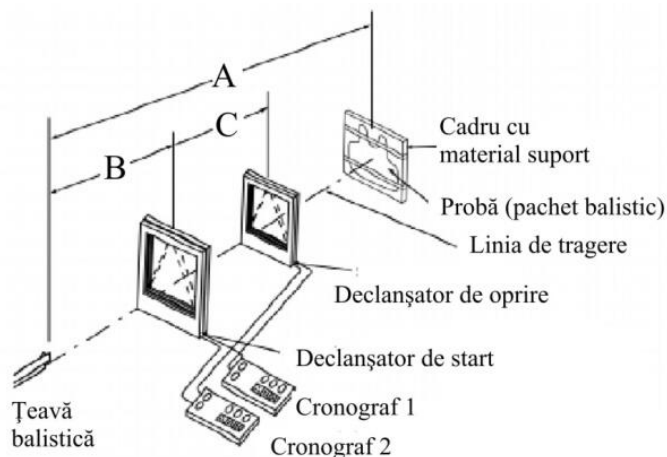


Fig. 5.2. Schema echipamentului de monitorizare a tragerii [81]

#### 5.4. Metodologia de încercare

Determinarea rezistenței balistice a panourilor de protecție balistică la acțiunea gloanțelor de infanterie de calibru 9 mm FMJ, s-a realizat conform EN 1522/2004, astfel: pentru glonț, cu viteza inițială medie de 373 m/s, la distanța de 5 m (condiții normale), cu excepția dimensiunilor panourilor încercate, care au fost de 300 mm x 300 mm, față de 500mm x 500 mm, cât prevede standardul, deoarece presa de laborator, materialul disponibil, etuva avută la dispoziție pentru tratamentul termic al compozitului au permis doar aceste dimensiuni, de 300 mm x 300mm.

Tragerile au avut loc în laboratorul de la Centrul de Cercetare și Inovare pentru Apărare CBRNE și Ecologie, București.

Încercările au fost făcute conform procedurilor operaționale și instrucțiunilor de lucru aprobate în cadrul acestui laborator.

Tragerile au fost executate de personalul calificat al CCSACBRNE. Au fost respectate normele de protecție și regulamentele specifice acestui tip de laborator.

Toate panourile au fost executate după tehnologia de laborator proiectată de autor (vezi Capitolul 4).

Aprecierea penetrării totale a unui panou este simplă, putându-se recupera proiectilul sau fragmente din acesta.

Aparatura și materialele necesare pentru determinarea rezistenței balistice la acțiunea gloanțelor muniției de infanterie sunt următoarele:

- cronograf stabil în domeniul de temperatură 5-40°C, cu precizia de 0,3 %,
- suport rigid pentru țevi balistice,

- țevi balistice care nu depășesc limita uzurii acceptate pentru efectuarea încercării,
- muniție corespunzătoare cu SR EN 1522/2004,
- higrometru cu precizia de măsurare de 1%,
- barometru cu precizia de măsurare de 1 mm Hg,
- termometru cu precizia de măsurare de 1°C,
- ladă suport pentru eșantionul de testare, conform SMT 40202/1-2000;
- cameră climatică, care permite temperarea la  $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ,
- etuvă pentru temperarea muniției,
- masă de tragere, cu recul compensat.

Condiții ale mediului ambiant în laborator au fost: temperatura:  $21 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , umiditatea relativă: 65%, presiunea atmosferică:  $764 \pm 15$  mm Hg.

Pentru efectuarea încercării se parcurg următoarele etape:

- echipamentul de încercare se poziționează în suportul de prindere, la distanța impusă față de gura țevii; se folosesc tipurile de armament și muniție necesare nivelului de protecție pentru care se efectuează încercarea, în acest studiu, pentru nivelul FB2 [77],

- se poziționează sistemul de măsurare a vitezei glonțului, începând cu distanța de 2 m de la gura țevii, astfel încât cadrele sistemului să fie în plane perpendiculare pe direcția de tragere; distanța între cadrele sistemului de măsurare a vitezei este de 0,5 m; măsurarea distanțelor se realizează cu o precizie de 1 mm;

- se execută 3 focuri asupra pachetului de testare, acestea fiind aranjate sub forma unui triunghi echilateral, cu latura de aproximativ 120 mm.

### 5.5. Rezultate obținute în urma impactului

Rezultatele obținute și mecanismele de cedare ale țintei (la penetrare totală și penetrare parțială) sunt discutate în continuare cu scopul de a îmbunătăți răspunsul țintei, prin modificarea unor parametri cum ar fi numărul de straturi ale panoului.

Pentru 12 măsurători ale vitezei proiectilului, prezentate și în Fig. 5.3, s-au determinat: viteza medie (372,66 m/s), deviația standard (2,211 m/s, ceea ce reprezintă doar 0,593% din viteza medie), valoarea maximă: 376 m/s și valoarea minimă: 369 m/s.

Viteza medie cu care s-au realizat testele corespunde cel puțin nivelului FB2 de protecție, fiind intermediară între nivelul FB2 și FB3.

S-au realizat fotografiile față (fața s-a considerat suprafața compozitului care vine prima oară în contact cu proiectilul și spate (partea opusă a compozitului), detalii ale fiecărui foc, tot pe fața și spatele compozitului. În plus, una din plăci din fiecare set a fost tăiată cu un disc abraziv de mare viteză pentru a putea vizualiza orificiul de penetrare al proiectilului.

În acest rezumat sunt prezentate rezultate pentru panourile de 8 straturi, 16 straturi și 24 de straturi, campania de încercări din teză incluzând și panourile de 20, 22 și 32 de straturi.

Figura 5.4 prezintă detalii ale secțiunilor prin panoul OGe8, cu 8 straturi. Se observă o penetrare totală, cele trei focuri produc o distrugere similară panoului, neobservându-se o creștere a deteriorării orificiilor în funcție de ordinea focurilor, ceea ce înseamnă un răspuns

calitativ bun al panoului la impact multiplu. Se observă o ușoară delaminare a substraturilor de pe stratul 1 și a substraturilor de pe ultimul strat al compozitului. Pe fețele panoului delaminările sunt influențate de direcția firelor de pe acestea. Există delaminare și între straturile intermediare, mărimea suprafețelor delaminatate fiind mai vizibilă în vedere (Fig. 5.5.). Se consideră față a panoului suprafața care este impactată de proiectil și spatele panoului se consideră suprafața opusă impactului cu proiectilul.

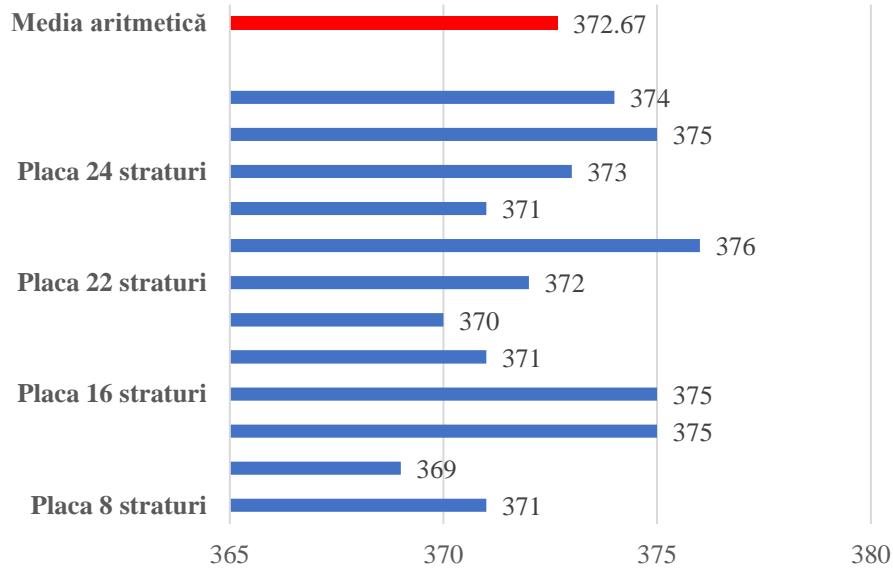
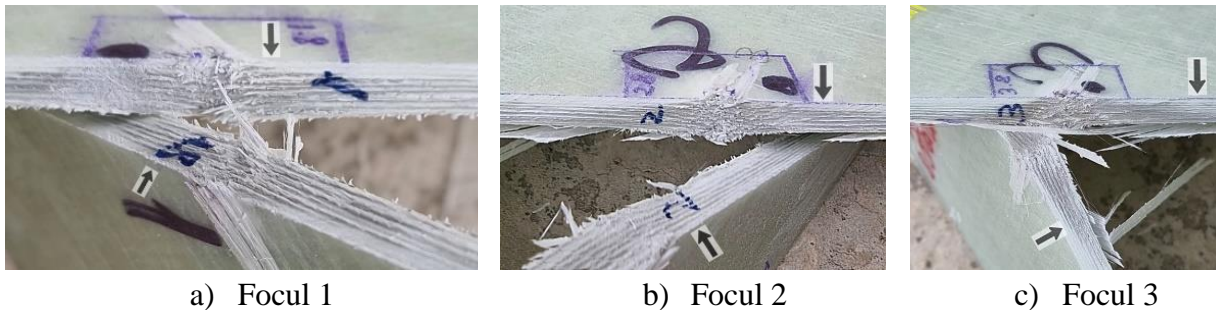


Fig. 5.3. Vitezele proiectilului (măsurate pentru fiecare foc)



a) Focul 1

b) Focul 2

c) Focul 3

Fig. 5.4. Panou de protecție balistică OGe8 (tăiere uscată cu disc abraziv de mare viteză)

Faptul că delaminarea este vizibilă ca diferență de culoare mai mult pe vederea din spate, arată că acest proces este mai intens în ultimele straturi. Forma aproape circulară a delaminărilor pentru fiecare foc indică faptul că arhitectura țesăturii ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $-45^\circ$ ) uniformizează comportarea panoului multistrat.

Delaminarea pe stratul 1 – față este localizată și a depins de poziționarea firelor pe primul sub-strat al țesăturii. Pe spate delaminarea se poate observa în grosimea plăcii prin schimbarea culorii. Se observă cercuri aproape de același diametru, zonele de suprapunere a zonelor circulare de delaminare nesugerând distrugerii suplimentare. De asemenea și pe spate, ultimul strat este mai distrus, observându-se clar orientarea  $-45^\circ$  a firelor de pe ultimul sub-strat. Calitatea răspunsului la lovituri multiple se observă prin diferențele mici între dimensiunile zonelor delaminatate pentru fiecare foc.



Fig. 5.5. Rezultatele tragerii pe placa cu 8 straturi cuadriaxiale de fibră de sticlă: a) față, b) spate

Delaminarea are aspect diferit pe fața panoului față de delaminarea care s-a observat pe spatele panoului. Delaminarea pe fața primului strat evidențiază orientarea fibrelor pe primul substrat al stratului 1 (orientare de  $0^\circ$ ) iar pe spatele panoului este evidentă orientarea substratului de suprafață la  $-45^\circ$ , cu o delaminare mult mai intensă.

Din toate fotografiile suprafețelor spate ale panourilor s-a observat că această țesătură cuadriaxială a generat urme de delaminare aproape circulare, iar diametrele acestora au valori apropiate, ceea ce reflectă calitativ o comportare a straturilor fără un caracter pronunțat de anizotropie în planul țesăturii.

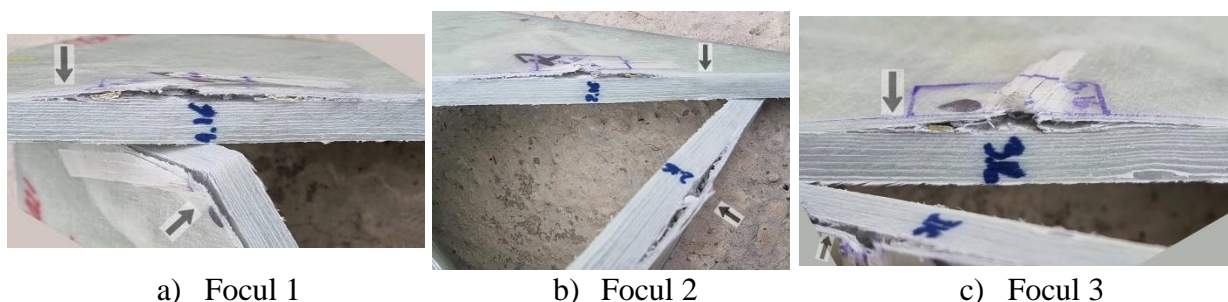


Fig. 5.6. Panoul de protecție balistică OGe16 (16 straturi de țesătură cuadriaxială); secțiuni obținute după testare

Figura 5.6 prezintă detalii ale secțiunilor prin panoul OGe16, cu 16 straturi. Pentru acest panou, penetrarea este parțială, pe grosimea a 2-3 straturi. Pentru această amenințare, definită prin mărimea, materialele și viteza proiectilului, panoul de 16 straturi rezistă foarte bine, deși urme de delaminare sunt vizibile și pe fața și pe spatele panoului. Din secțiunile prezentate în figura de mai sus se observă o delaminare puternică (distanțare și propagare a delaminării) între ultimul strat perforat de proiectil și stratul pe care se oprește. Conturul acestor delaminări mari se observă atât pe fața panoului cât și pe spate.

O secțiune prin două focuri, 1 și 2 (Figura 5.7.c), arată o distrugere similară pentru ambele focuri, distanța dintre punctele de ochire de 120 mm nu a dus la o desprindere continuă în zona delaminată, se observă o delaminare foarte ușoară (distanțare foarte mică



între straturi) pentru ultimele straturi, lucru vizibil prin schimbarea de culoare de pe spatele panoului.

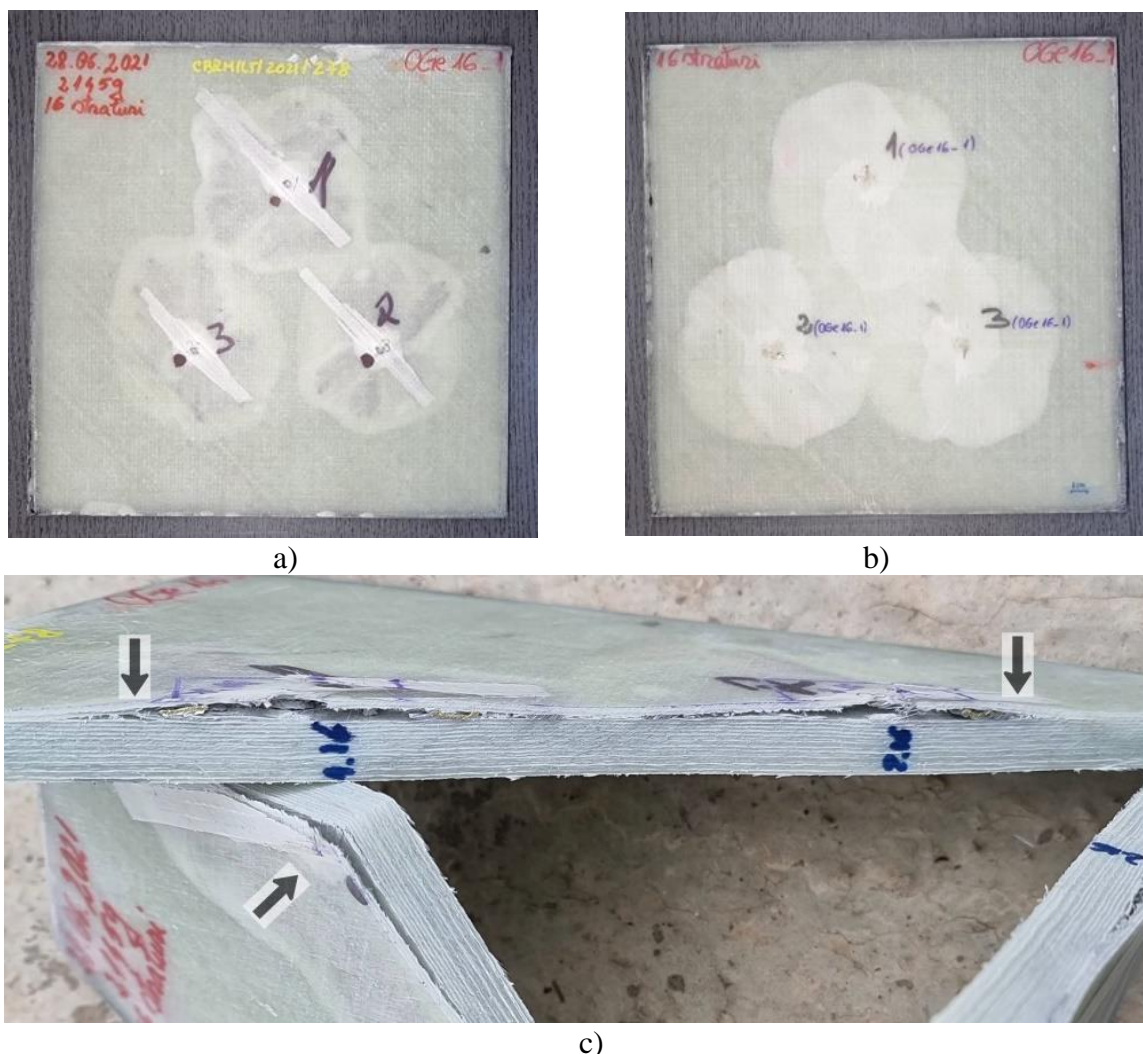


Fig. 5.7. Rezultatele tragerii pe placa cu 16 straturi cuadriaxiale de fibră de sticlă: a) față (suprafața care este impactată de proiectil), b) spate (suprafața opusă impactului cu proiectilului) c) Secțiune prin două focuri

Delaminarea are forma aproape circulară ceea ce reflectă faptul că țesătura cuadriaxială are un răspuns apropiat în planul țesăturii. Pe spatele panoului, chiar pe direcția impactului, se observă fisuri neprofundes, implicit se văd și pe macrofotografiile câteva fire rupte, deși zona dintre stratul pe care s-a oprit glonțul și spatele panoului nu este fisurată pe direcția de impact (Fig. 5.7).

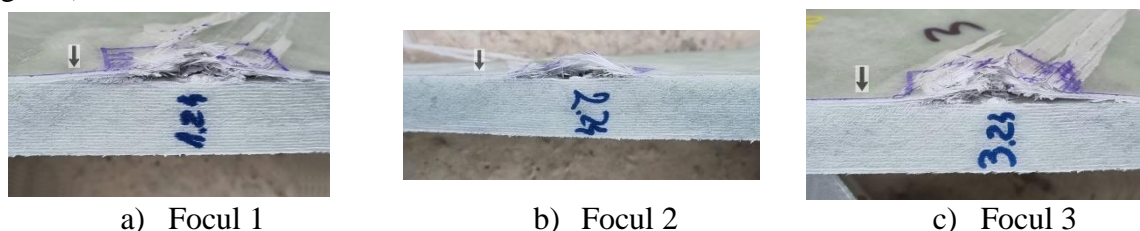


Fig. 5.8. Panou de protecție balistică OGe24

Figurile 5.8 și 5.9 prezintă detalii ale secțiunilor prin panoul OGe24, cu 24 straturi de țesătură cuadriaxială. Pentru acest panou, penetrarea este parțială, pe grosimea a 2-3 straturi. Pentru această amenințare, definită prin mărimea, materialele și viteza proiectilului, panoul de 24 straturi rezistă foarte bine. Din aceste macro-fotografii nu se observă deformații mari ale ultimelor straturi, evidențiindu-se caracterul rigid al panoului de această grosime, pentru această amenințare.

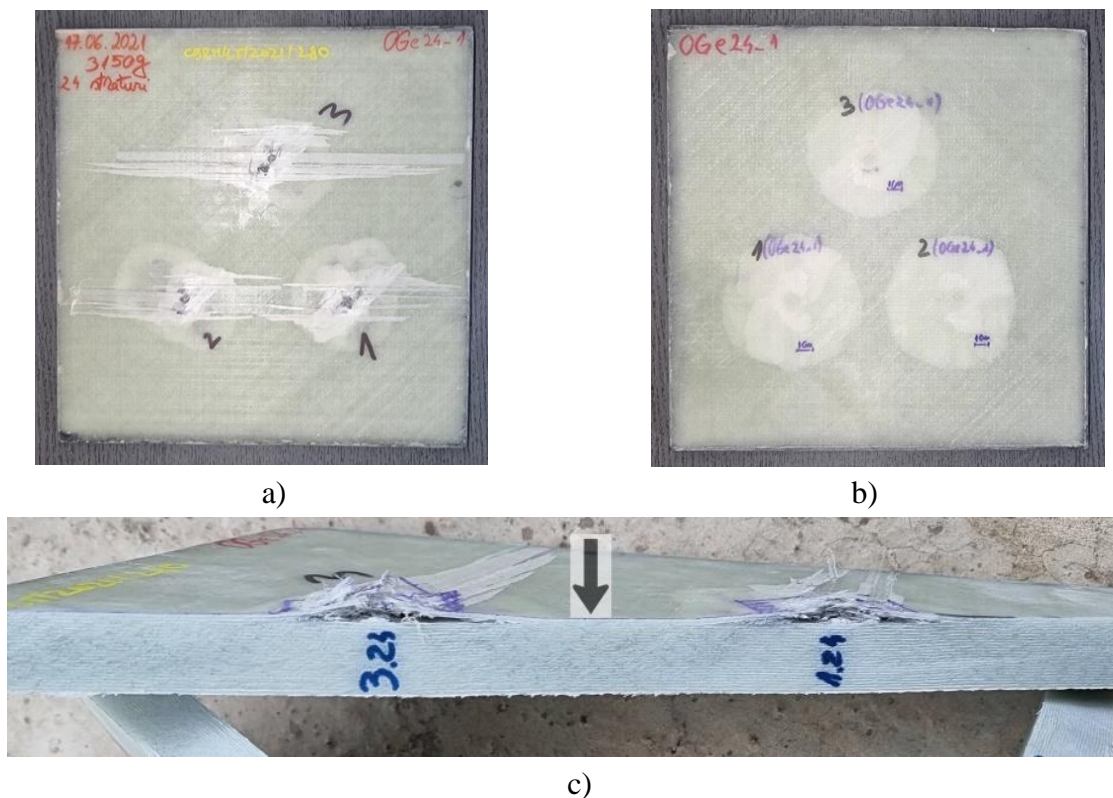


Fig. 5.9. Rezultatele tragerii pe placa cu 24 straturi cuadriaxiale de fibră de sticlă: a) față, b) spatei, c) Secțiune prin două focuri

### 5.6. Mecanisme de cedare în compozitele testate

Având în vedere natura materialelor posibil de evidențiat în câmpul vizual al microscopului cu baleiaj electronic (metale, polimeri, sticlă) probele au fost acoperite cu aur.

Înainte de a fi analizate la microscopul cu scanare cu electroni, probele au fost montate pe un suport de aluminiu, prin fixarea cu o bandă de carbon dublu adezivă. Datorită caracterului slab conductor al polimerilor sau compozitelor care conțin polimeri, este necesară acoperirea (metalizarea) suprafețelor probelor prin procedeul pulverizării în vid (vaporizare catodică – sputtering). Acest procedeu constă în aplicarea unui strat foarte subțire metalic (grosime maximă 7 nm) de aur, iar echipamentul folosit este model SPI Sputter Coater Module (SPI Supplies, USA). Se produc descărcări în plasmă cu o intensitate a curentului de 18 mA, în atmosferă controlată, cu atomi ai unui gaz inert (argon). Condițiile de lucru au fost: timp maxim de acoperire 120 s, presiunea vidului 0,1 mbar.

În funcție de nivelul încercat, de tipul proiectilului și de natura materialelor ținte pot exista două situații:

- când efectele termice ale impactului pot fi neglijabile,
- când efectele termice ale impactului nu sunt neglijabile [4], [5], [65].

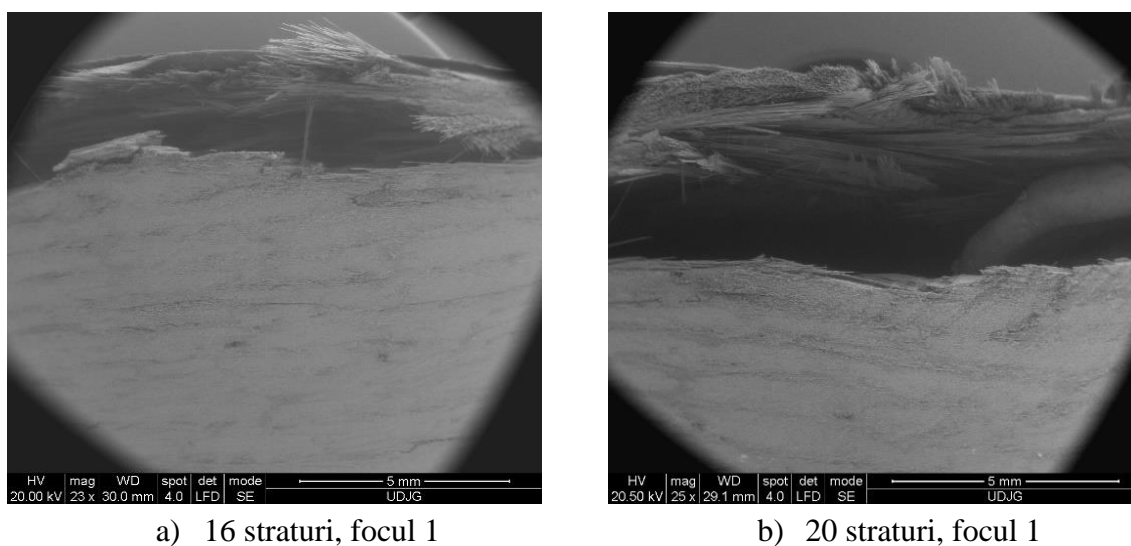
Pentru plăcile din a doua categorie, particularitățile și intensitatea proceselor sunt dependente și de grosimea țintei.

Delaminarea poate apărea între straturi și/sau între substraturile compozitului (Fig. 5.10). Forma, mărimea și zona în care apare delaminarea pot diferi în funcție de mai mulți factori, între care tipul de penetrare (totală sau parțială), grosimea panoului și caracteristicile amenințării (tipul de proiectil, energia de impact, materialele care participă la formarea proiectilului).

În Fig. 5.11 sunt date, sintetic, mecanisme de cedare a țintei. Deși acestea pot fi descrise separat, pe țintă, pe orificiul de penetrare, pe straturile distruse sau în apropierea lor, aceste mecanisme se pot suprapune, rezultatul fiind sinergic și uneori mai dificil de identificat. Aceste mecanisme ar trebui diferențiate în funcție de rezistența la impact a țintei:

- mecanisme caracterizând penetrarea totală și
- mecanisme de cedare caracteristice arestării proiectilului.

Penetrarea totală face vizibile mai multe zone de delaminare, mai intense între primele și ultimele straturi. Inexistența unui material în fața sau în spatele primelor sau ultimelor straturi inițiază delaminarea și o dezvoltă substanțial.



a) 16 straturi, focul 1

b) 20 straturi, focul 1

Fig. 5.10. Delaminare între stratul pe care se oprește proiectilul și ultimul strat penetrat

La penetrare parțială pot apărea trei zone cu delaminare:

- între primele straturi, mecanismul și aspectul delaminării fiind apropiate de cele de la penetrare totală; primul strat are fibre încovoiate, cu curbura în afara planului inițial al stratului
- delaminare intensă între ultimul strat perforat și primul strat pe care se oprește proiectilul, deoarece oprirea glonțului îl obligă să se deformeze lateral și să se fragmenteze, fragmentele fiind împinse lateral și forțând delaminarea,
- delaminare între ultimele straturi, vizibilă mai bine la panourile mai subțiri cu penetrare parțială (16 straturi) și mai puțin la panourile mai groase (cu 24 straturi și 32 straturi).



Fig. 5.11. Mecanisme de cedare, caracteristice țintei

Se observă că orificiul de trecere al proiectilului nu este bine delimitat din cauza ruperii asimetrice a straturilor succesive de țesătură (și din cauza orientării pe diverse direcții ale firelor din cele 4 substraturi ale țesăturii). Se observă și revenirea firelor care au fost încovoiate în domeniul elastic. Detalii pentru orificiului de pătrundere, din care se observă direcțiile firelor pe diferite substraturi, sunt date în Fig. 5.12.

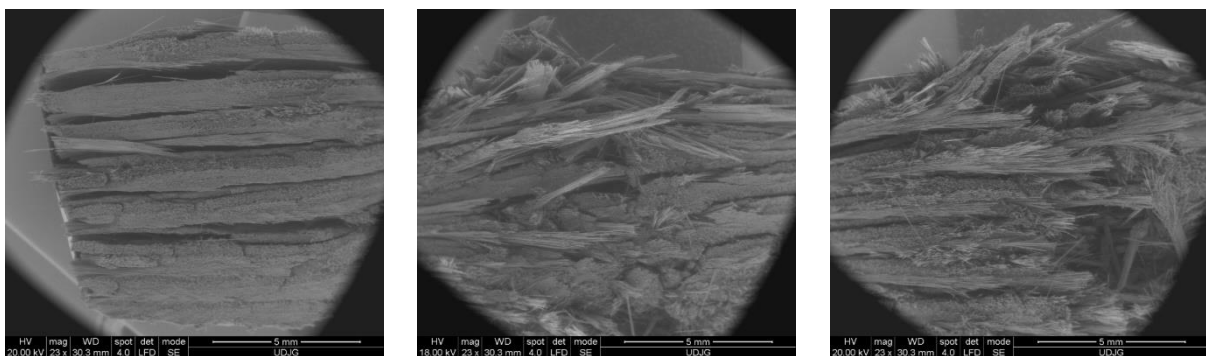
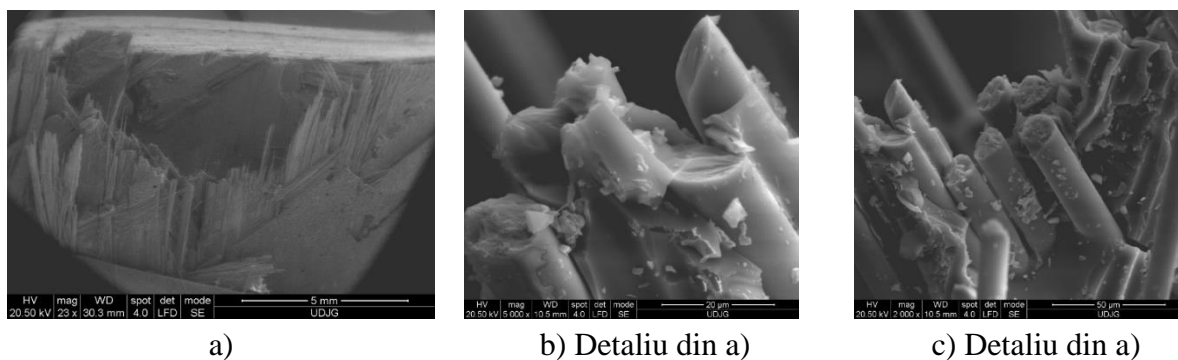


Fig. 5.12. Imagini SEM, în secțiune, pentru placa de 8 straturi (penetrare totală)

Figura 5.13 prezintă ruperea aproape circulară, câteva fragmente de fire sau straturi sunt presate pe primul strat care a rezistat și care la rândul lor, produc fragmentarea glonțului și împingerea acestora în lateral, depărtând mai mult straturile deja delaminat. În Figura 5.13.a) este prezentat un detaliu asupra focului 1 de pe panoul cu 20 straturi.





a) b) Detaliu din a) c) Detaliu din a)  
Fig. 5.13. Vedere de sus a feței plăcii de 20 de straturi, focul 1

### 5.7. Identificarea componentelor care au participat la impact prin analiză EDX

Figura 5.14 prezintă o analiză a elementelor unei zone punctuale din secțiunea prin compozitul cu 22 de straturi (OGe22), după executarea tragerii, pentru focul 1.

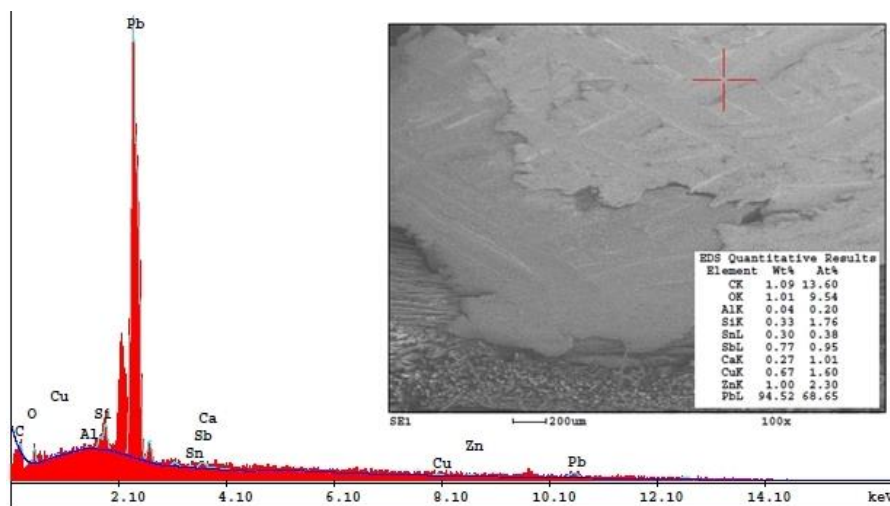


Fig. 5.14. Analiză elementală EDX, placă de 22 straturi, focul 1, punctul 1

Imaginea este luată pe direcția de impact, prin orificiul de pătrundere a glonțului. Se observă că materialul de culoare deschisă este aliajul de plumb-zinc din care este realizat miezul proiectilului și imprimarea țesăturii pe aliajul de plumb, de aici și urme de carbon (de la rășina compozitului) și de aluminiu, oxigen (de la fibra de sticlă). Urmele de elemente metalice (Sn, Sb) pot fi de la aliajul miezului, iar alte elemente metalice, cum ar fi zincul, pot fi rămase de la cămașă. Cuprul este prezent în această zonă punctuală ca rezultat al frecării aliajului de plumb cu cămașa, pe durata comprimării miezului în cavitatea generată prin împingerea laterală a glonțului în momentul în care a fost oprit.

Pe imaginea SEM din Fig. 5.15 s-a conturat un dreptunghi cu linii roșii pentru a identifica de unde provine materialul de culoare mai deschisă. Zona analizată conține mult Pb (64,79%wt), ceea ce înseamnă că fragmentele mai deschise sunt din miezul proiectilului. Prezența carbonului, destul de mare (27,19%wt), arată că fragmente de matrice relativ mici, de ordinul zecilor de microni cel mult au fost amestecate în masa miezului, din cauza impactului.

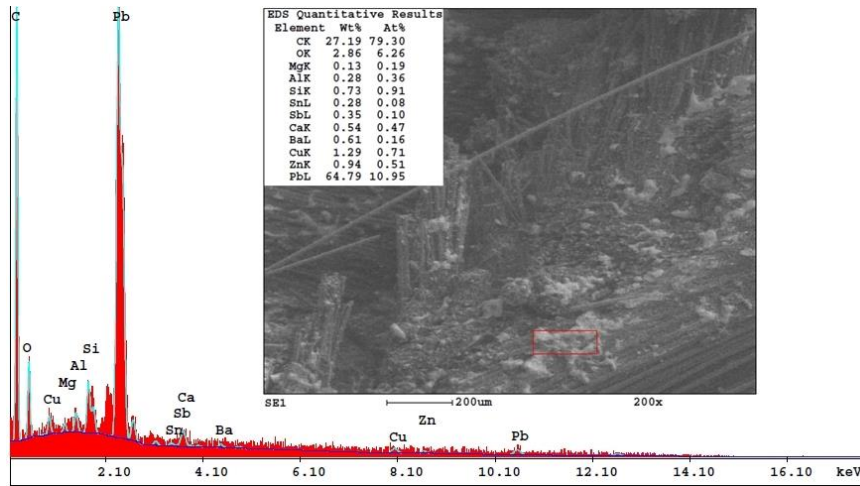


Fig. 5.15. Placa de 24 straturi. Fragmentarea și împrăștierea miezului proiectilului

Figura 5.16 prezintă un detaliu al zonei de impact de pe stratul în care s-a oprit proiectilul, care pune în evidență următoarele: fragmente rupte din matrice, fragment din fibră de sticlă (colțul din stânga sus), fragmente de formă sferoidală. Acestea au fost analizate EDX, dovedindu-se că micro-picăturile observate (de altfel, rare) sunt din aliaj de plumb, forma sugerând că datorită vitezei impactului (373 m/s), bucăți mici de plumb au ajuns în stare topită și s-au solidificat rapid. Concentrația de plumb în această zonă punctuală este de 81,45%wt, elementele caracteristice fibrei nefiind prezente, dar posibil fragmente și mai mici de matrice să fie înglobate în picătura de Pb, deoarece concentrația locală de C este 12,37%wt.

În Fig. 5.17 sunt date mecanisme de distrugere în zona în care a fost oprit proiectilul, A – fragment de compozit, desprins din straturile distruse și strivit de straturile care nu au mai cedat; B – miezul proiectilului deformat puternic și cu fragmente de fibră de sticlă; C – fir rupt, din fibre de pe care s-a detașat matricea.

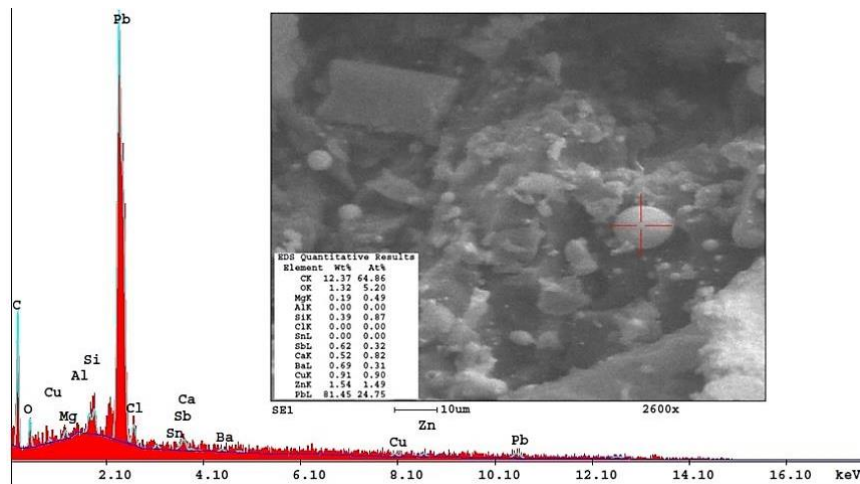


Fig. 5.16. Placa de 24 straturi. Topirea și solidificarea fragmentelor din miezul proiectilului (din aliajul de plumb)

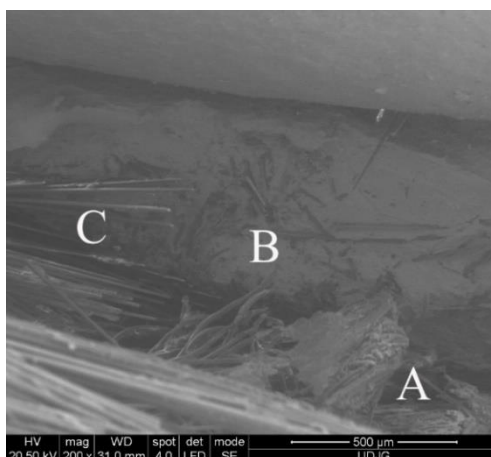


Fig. 5.17. Câteva mecanisme de distrugere în zona în care a fost oprit proiectilul

### 5.8. Concluzii privind comportarea la impact balistic a panourilor proiectate

După efectuarea testelor (care s-au încadrat la nivel FB2) și compararea rezultatelor prin numărul de straturi rupte de proiectil, s-au constatat următoarele: panoul de 8 straturi a fost penetrat complet, celelalte panouri au rezistat prezentând penetrare parțială cu distrugerea câtorva straturi (panourile de 16, 20, 22, 24 straturi prezintă câte 3-4 straturi rupte, la panoul cu 32 straturi au fost rupte 2 straturi, iar glonțul a fost ricoșat).

Creșterea grosimii plăcii testate, a dus la reducerea cercurilor care sugerează delaminarea pe spatele plăcilor, ceea ce reflectă faptul că fenomenul de delaminare scade în intensitate (spre spatele plăcilor) dacă numărul de straturi din compozit crește.

Din aceste rezultate se pot trage următoarele concluzii: pentru nivelul testat, panoul de 16 straturi este suficient de rezistent, micșorarea numărului de straturi nu se poate discuta decât după efectuarea unor teste pe panouri cu grosimi intermediare (între 8 și 16 straturi).

Având în vedere comportarea panourilor mai groase, de 20 până la 32 straturi, autorul propune continuarea testelor pe panourile de aceste grosimi pentru un nivel superior, nivel FB3 și FB4, conform SR EN 1522:2004.

Analiza imaginilor macro și SEM a evidențiat procesele de distrugere din compozit și faptul că materialele selectate (țesătura și rășina) sunt adecvate pentru această aplicație.

## **Capitolul 6. Concluzii și contribuții personale**

### **6.1. Importanța temei**

Teza de doctorat cu titlul „Un studiu teoretic și experimental al pachetelor de protecție balistică pentru blindaje pe bază de fibre de sticlă” se încadrează în domeniul cercetărilor privind protecția balistică a echipamentelor. „Războiul modern devine din ce în ce mai puțin o confruntare directă între două armate ale unor state sau alianțe, și tot mai mult o confruntare între două forțe disproporționate economic și militar, în care fiecare parte încearcă să găsească noi tehnici de a câștiga lupta” [59].

Această teză de doctorat a avut ca obiectiv proiectarea, realizarea la scară de laborator și caracterizarea unui panou de protecție, tip compozit, pe bază de țesătură cuadriaxială de fibre de sticlă unidirecționale în matrice epoxidică, prin analiză numerică și o campanie de încercări. S-a validat un model la scară macro și care a putut fi aplicat pentru îmbunătățirea soluției inițiale și reducerea intervalelor unor parametri ca numărul de straturi. Campania de încercări a urmărit comportamentul panourilor de protecție balistică la acțiunea glonțului de 9 mm FMJ (nivel FB2).

### **6.2. Concluzii finale asupra rezistenței balistice a panourilor testate**

Acest studiu de cercetare este o lucrare unitară și include o sinteză documentară asupra rezultatelor din literatura deschisă, a experimentelor raportate privind performanțele balistice ale materialelor și panourilor de protecție realizate pe bază de țesături de fibre de sticlă, făcută cu ajutorul accesului la baza de date, oferit de Biblioteca Universității „Dunărea de Jos”.

Lucrarea are 6 capitole interdependente, care, prin succesiune, oferă soluții privind interpretarea și înțelegerea comportării materialelor tip compozit stratificat, pe bază de țesături multiaxiale din fibre de sticlă, pe baza datelor obținute prin simulare și prin încercări.

Capitolul 1 evidențiază studii recente (rapoarte, alte teze de doctorat, cărți și articole apărute în reviste de prestigiu) asupra încercării panourilor balistice, cu referire la cele realizate din țesături cu fibre de sticlă. Capitolul 1 constituie punctul de plecare de la care s-a inițiat dezvoltarea lucrării și face o trecere în revistă pentru studiul cercetării privind panourile de protecție balistică, pe plan internațional și național.

Sistemele de protecție balistică există într-o mare varietate de soluții, din punct de vedere al structurii lor, cât și al naturii materialelor și combinațiilor acestora. Diversitatea de interacțiuni, mecanisme de cedare și modificarea comportamentului materialelor participante la impact, necesită o abordare sistematică a proiectării protecției la impact balistic și o analiză detaliată a proceselor de cedare. Modelele analitice, empirice sau semi-empirice, încearcă să descrie comportarea sistemului de protecție în cazuri particulare, cu aplicabilitate într-un interval îngust al parametrilor de influență, de multe ori doar pentru o anumită amenințare.

Capitolul 2 prezintă o schema logică a activităților incluse în studiul de cercetare, sugerând conexiunile între capitole și activitățile realizate de autor. Diagrama accentuează



legătura dintre simulare și rezultatele experimentale și importanța acestei legături în îmbunătățirea soluției finale de proiectare a panoului de protecție balistică.

Capitolul 3 prezintă o simulare a impactului cu ajutorul unui model parametric la nivel macro. Parametrii avuți în vedere de autor au fost: viteza de impact a proiectilului, numărul de straturi ale panoului modelat. Modelul a introdus modele constitutive de material care țin seamă de viteza de deformare a materialelor, pentru miez și cămașa proiectilului. S-a modelat delaminarea din condiția de salt (inițierea) fisurii dacă se atinge o anumită valoare a tensiunii la solicitare de tracțiune și forfecare. Modelul a introdus un criteriu de cedare bazat pe deformația plastică echivalentă (EPS), prin valori caracteristice pentru fiecare din materialele care au participat la impact.

Prin simularea impactului glonț - panou stratificat și studierea influenței grosimii panoului (cu 8 straturi, 10 straturi, 12 straturi, 16 straturi și 24 straturi) s-a evidențiat penetrarea totală pentru panoul cu 8 straturi și penetrare parțială pentru celelalte panouri. Din rezultatele încercărilor prezentate în Capitolul 5, panourile cu 8 straturi au avut penetrare totală, fără reținerea glonțului. Din simularea procesului de impact pe panoul cu 8 straturi, s-a obținut o cedare a panoului cu penetrare totală, la fel ca și în cazul testelor de laborator. Aceasta reprezintă o validare a modelului elaborat de autor, întrucât numărul de straturi rupte în simulare este același cu numărul de straturi rupte obținute din testele experimentale.

Autorul a realizat o validare a numărului de straturi rupte în model și variantele de panou compozit încercat. Pentru panourile mai groase, de 16 straturi, 24 straturi, experimental s-au obținut 3...4 straturi distruse, așa cum s-au obținut și pe modelul panoului stratificat. Stratul real de țesătură cuadriaxială a fost modelat simplificat ca fiind dintr-un material izotrop, simplificare argumentată de faptul că dispunerea firelor unidirecționale la ( $0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ$ ), tind să uniformizeze proprietățile mecanice ale stratului în plan. Proprietățile mecanice ale fibrei de sticlă au fost luate din literatura specializată [50] și din catalogul de produs al firmei CastroCompositesSL. În simulare distrugerea glonțului este asemănătoare cu cea observată în experimente pentru proiectilele care au penetrat total sau parțial diferite variante ale panoului, dar deformarea și fragmentarea glonțului în simulare nu este atât de severă ca cea rezultată din testele făcute în laborator, având în vedere că software-ul utilizat (Ansys Explicit Dynamics) nu a luat în considerare efectul termic asupra materialelor.

Modelul de impact panou stratificat – proiectil, proiectat și rulat de autor, în Ansys Explicit Dynamics este la nivel macro, cu următoarele caracteristici:

- toate corpurile și materialele implicate sunt în domeniul elasto-plastic, cu criteriu de cedare EPS (Equivalent plastic strain- deformare plastică la rupere); multe referințe studiate de autor, au unul din corpurile (proiectilul, cel mai adesea) considerat rigid [16], [44] ceea ce modifică răspunsul la impact substanțial,

- s-a modelat delaminarea din condiția de separare a legăturilor între straturi, cu valori ale tensiunii la tracțiune și forfecare, model care a dat rezultate satisfăcătoare privind mărimea delaminării între straturi, comparativ cu delaminările obținute experimental,

- s-au identificat etape pentru penetrarea totală și penetrarea parțială,

- s-au realizat simulări pentru panourile testate în laborator și s-a validat modelul pe criteriul numărului de straturi rupte ( $\pm 1$  strat) și mărimea delaminării pe spatele panoului,
- s-au simulat cazuri pentru grosimi intermediare între 8 și 16 straturi pentru că, din rezultatele testelor de laborator, s-a constatat o „rezervă” de rezistență la impact, în sensul stabilirii la nivel de modelare a unor grosimi eficiente, dar mai mici pentru aceeași amenințare,
- numai pentru această lucrare, fără a lua în considerare modele și rulări anterioare stabilirii acestora, însumate, s-au rulat 5 cazuri la viteza de 375 m/s, viteză care a fost o viteză a încercărilor realizate în laborator și 3 cazuri la viteza de 420 m/s, viteză caracteristică pentru nivel FB3, cu aceeași muniție.

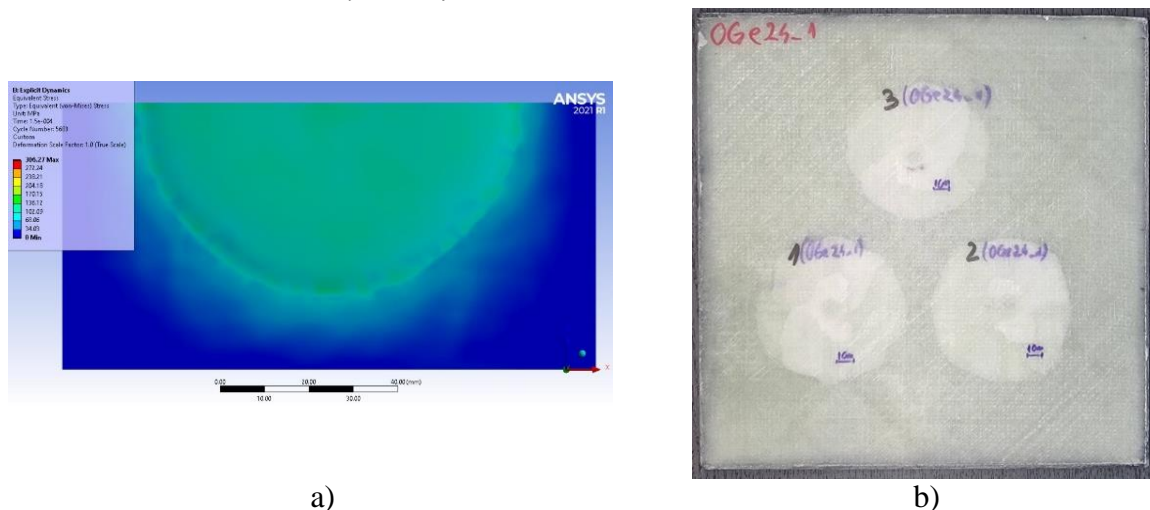


Fig. 6.1. Delaminarea pe spatele panoului de 24 de straturi: a) din simulare (87,60 mm), b) pe panoul testat (100,60 mm). Condiții de testare, viteza inițială a proiectilului 375 m/s

Figura 6.1 prezintă un exemplu de comparare al mărimii delaminării de pe ultimul strat din simulare și din experiment, pentru panoul cu 24 straturi. Diferența între diametrele delaminărilor a fost de doar 13 mm, ceea ce reprezintă 12,9% din diametrul delaminării obținute experimental. Și pentru alte grosimi s-au obținut diferențe similare sau mai mici.

Din rezultatele obținute pentru aceste rulări s-au putut formula următoarele concluzii,

- deși modelul de material al stratului a fost simplificat la un model bilinear izotrop cu durificare, pe baza datelor din literatură, rezultatele obținute pentru parametrii cu care s-au efectuat testele reale au fost validate prin numărul de straturi distruse pentru plăcile cu penetrare parțială și prin mărimea delaminării pe spatele ultimului strat,

- din analiza tensiunilor echivalente la diferite momente și pe diferite straturi s-au putut distinge etapele impactului pentru penetrare totală și penetrare parțială,

- pe baza rezultatelor pentru panouri testate în laborator, s-au rulat cazuri cu grosimi intermediare (sau număr de straturi) între panoul cu 8 straturi și panoul cu 16 straturi; s-au rulat simulări pentru panouri de 10 și 12 straturi din care a rezultat o soluție numerică care ar putea fi validată prin încercare de laborator și care să ofere o protecție balistică bună, dar cu densitate de suprafață (și, implicit, grosimea panoului) mai mică.

Același model a fost rulat pentru condiții specifice nivelului FB3 pentru grosimi de 8 straturi, 16 straturi și 24 straturi, din care a rezultat că ultimul panou ar putea să reziste foarte bine la următorul nivel, cu același proiectil, dar de viteză mai mare (420 m/s).

Generarea unor simulări ale impactului de viteze mari cât mai aproape de realitate, prin metoda elementelor finite, este condiționată de luarea în considerare a unor aspecte legate de deplasări și deformații mari, fisurări, metode de eroziune a elementelor prea mici, prea deformate etc., neliniarități ale comportării materialelor implicate și proprietăților lor la viteze de deformare mari. Utilizarea solverelor de tip Explicit Dynamics, specializate în simularea proceselor dinamice, cu introducerea unor modele constitutive de material complexe, modele bazate pe rezultate experimentale, ajută la reducerea semnificativă a intervalului de încercare pentru anumiți parametri, cum ar fi grosimea panourilor (sau numărul de straturi), succesiunea materialelor în panourile hibride, asamblarea straturilor. Simularea este foarte utilă pentru că reduce costurile legate de realizarea primelor eșantioane și de încercările în poligon.

Capitolul 4 prezintă o tehnologie de laborator prin care se pot obține panouri cu diverse grosimi, prin pensulare și presare. Procesul realizat de autor are repetabilitate, precizie și robustețe. Rețeta pentru realizarea panourilor și tehnologia de laborator este originală.

Panourile de protecție balistică (OGe) sunt destinate blindajelor ușoare pentru autovehicule și incinte protejate și asigură gradul de supraviețuire în acțiuni de protecție pentru nivel specificat (FB2, conform EN 1522/2004 "Ferestre, uși, obloane și jaluzele. Rezistență la atacul cu glonț. Condiții și clasificare" și SR EN 1523/2004 "Ferestre, uși, obloane și jaluzele. Rezistență la glonț. Metodă de încercare"). Autorul a folosit o țesătură de fibră de sticlă cuadriaxială de la Castro Composites SL, cu  $1200 \text{ g/m}^2$ , ( $0^\circ/+45^\circ/90^\circ/-45^\circ$ ), de înaltă rezistență, destinată și aplicațiilor balistice, și rășină epoxidică bicomponent (Biresin CR82 cu întăritor Biresin CH80-2, de la Sika AG), cu tratament termic de stabilizare.

Procesul tehnologic de realizare a panoului OGe, de diverse grosimi, cuprinde o succesiune de faze, care includ tăierea straturilor de țesătură (și cântărirea setului care participă la realizarea panoului), realizarea amestecului rășină + întăritor, pensularea și presarea, monitorizarea și controlul grosimii panoului în presă, un tratament termic de menținere la  $60^\circ\text{C}$ , timp de 6 h după o îmbătrânire naturală și un control de calitate (cântărire, măsurarea grosimii, calculul deviației standard și a densității de suprafață). Analizând valorile caracteristicilor panourilor realizate de autor (Fig. 6.2), se observă un raport fibre/panou aproape constant, indiferent de grosimea plăcilor (mediile sunt pentru 5 panouri, cu excepția panourilor de 8 straturi și 32 de straturi, pentru care media s-a calculat pentru trei bucăți).

În Capitolul 5 sunt prezentate rezultatele încercărilor efectuate în laboratorul specializat al CCIACBRNE, aparatura de măsurare și monitorizare, procedura de încercare, standardele care sunt aplicate în această campanie de încercări. Rezultatele testelor balistice, însoțite de un raport de cercetare specializat, analizate cu ajutorul imaginilor fotografice și SEM, susțin și conferă panourilor de protecție balistică, proiectate de autor, performanțe care justifică recomandarea lor, de a fi utilizate în prototipuri ale sistemelor de protecție. Pe baza imaginilor SEM, analizelor EDX și seturilor de fotografii la nivel macro, autorul a descris procese de cedare caracteristice acestui tip de panou de protecție balistică (straturi din țesătura cuadriaxială de fibre de sticlă și rășină epoxidică). Pentru viteza de impact măsurată ( $373 \text{ m/s} \pm 3 \text{ m/s}$ ), oprirea proiectilului s-a făcut după distrugerea integrității primelor straturi (2...4 straturi pentru panourile de 16 straturi, 20 de straturi, 22 straturi și 24 de straturi), ceea

ce reflectă o dependență mai slabă a adâncimii de pătrundere a proiectilului în cazul compozitului cu număr de straturi mai mare. La panoul de 32 de straturi s-a observat o distrugere a unui număr de 1...2 straturi, cu ricoșarea proiectilului puternic fragmentat.

Capitolul 6 prezintă importanța temei de cercetare, concluzii finale pe baza rezultatelor numerice și a celor experimentale, contribuțiile autorului și direcții viitoare de cercetare în domeniul utilizării acestor compozite în sisteme de protecție balistică.

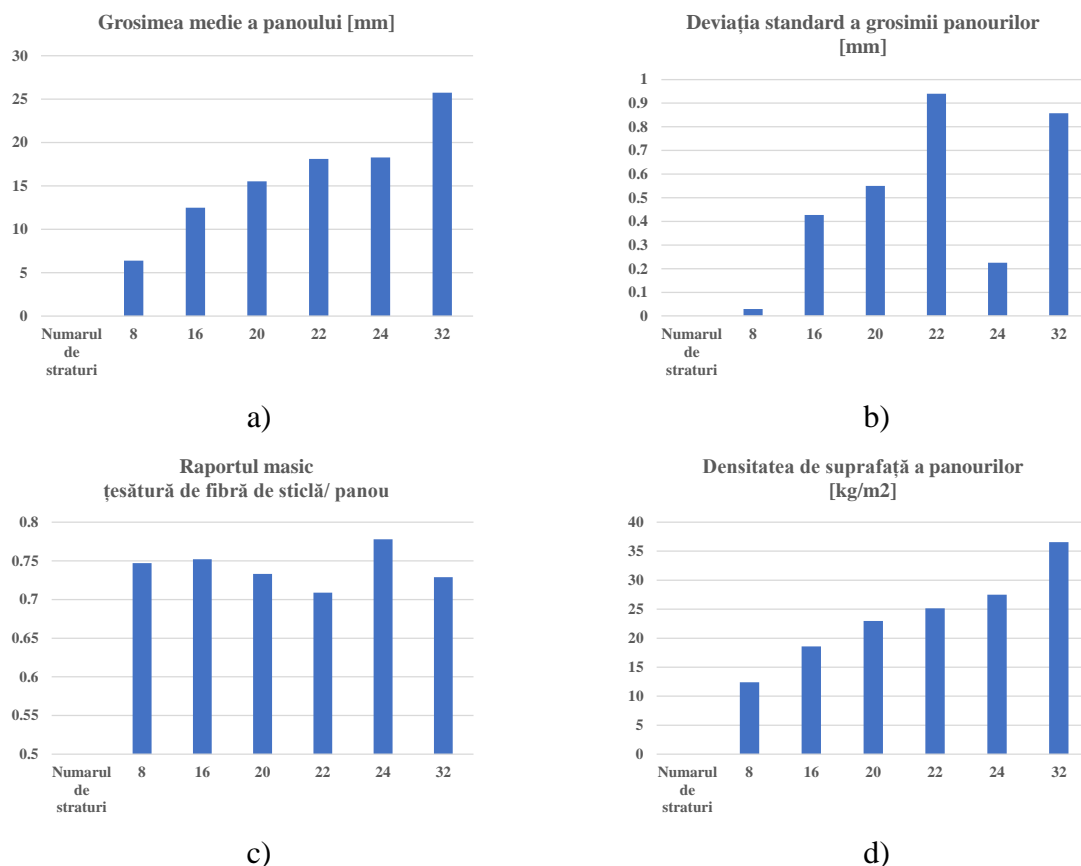


Fig. 6.2 Valorile caracteristicilor panourilor realizate de autor

### 6.3. Contribuții personale

Rezultatele studiului de cercetare, abordarea sinergică între experiment și simulare au dus la evidențierea următoarelor contribuții originale în domeniul proiectării și testării materialelor pentru protecție balistică:

- selectarea și analiza critică a unei documentații referitoare la materiale, încercări și modelări ale țesăturilor cu aplicații balistice, sistematizarea acestor referințe,

- identificarea și justificarea temei de cercetare: utilizarea unor compozite pe bază de fibre de sticlă,

- conceperea unui model numeric al impactului proiectil-panou stratificat, la nivel macro, pentru a evalua prin simulare rezistența la impact a unei familii de panouri. Modelul a fost rulat pentru a evidenția influența numărului de straturi și influența vitezei de impact, până la nivel FB3. Rezultatele simulării au fost validate de încercările de laborator pentru panourile de 8 straturi, 16 straturi și 24 straturi, cu considerarea următoarelor criterii de validare: numărul de straturi distruse, mărimea delaminării vizibile pe ultimele straturi.

Utilizarea simulării pentru a detalia răspunsul la impact a panourilor cu un număr de straturi intermediare între 8 și 16 straturi, deoarece din datele experimentale s-a constatat că panoul de 16 straturi a rezistat foarte bine la încercări (nivel FB2) și, deci, este necesar un studiu pe model care să recomande eventual un panou de grosime mai mică, care să reziste la aceeași amenințare. Din datele obținute din simulare se pot recomanda încercări inițiale de laborator pe panoul cu 12 straturi. Simulările au fost realizate și la viteza mai mare (420 m/s, corespunzătoare nivelului FB3), pentru că din analiza distrugerii panourilor la nivel FB2, se poate recomanda testarea acestei soluții de proiectare a panourilor și pentru un nivel superior. Trebuie subliniat încă odată că în acest domeniu de mare risc, al protecției balistice, extrapolarea rezultatelor din simulare se face numai pe baza testării ulterioare în laborator.

- analiza rezultatelor campaniei de testare care au constatat în recomandarea panoului pentru nivel FB2,

- analiza mecanismelor de cedare ale panourilor în funcție de grosimea acestora.

Pe baza rezultatelor experimentale se poate compara răspunsul panoului proiectat de autor cu alte soluții deja existente, raportate în literatura de specialitate. Trebuie menționat obținerea unui raport masic țesătură-panou, de 0,709...0,77 pentru toate panourile realizate de autor, ceea ce reflectă o tehnologie de laborator adecvată, cu grad mare de repetabilitate. Calitatea panourilor realizate este reflectată și în deviația standard măsurată pentru grosimea panourilor, care nu depășește 0,94 mm. Având în vedere timpul și resursele limitate pentru această temă, cercetarea s-a efectuat pe o familie de eșantioane, pentru un număr de straturi (8 straturi, 16 straturi, 20 straturi, 22 straturi, 24 straturi și 32 straturi), astfel încât să se evalueze calitatea panourilor la lovituri multiple (3 focuri), răspunsul uniform al panourilor de aceeași grosime, și o eventuală cercetare pentru utilizarea acestui tip de panou (materiale, tehnologie) pentru un nivel superior de protecție.

Comportarea panourilor la amenințarea de nivel FB2 și „rezerva de material” nedistrus pentru plăcile cu 16 straturi până la 32 straturi, rezultatele analizelor SEM, recomandă utilizarea tehnologiei și a panourilor pentru încercări FB3 sau mai mari.

-realizarea, împreună cu specialiștii de la Centrul de Cercetare și Inovație pentru Apărare CBRN și Ecologie București, a unei campanii de încercări a panourilor balistice realizate de autor, sub aspectul echipamentului de tragere utilizat, aparatelor de măsură și monitorizare,

-diseminarea rezultatelor pe parcursul întregii perioade a studiilor doctorale; începând cu modelări la impact și terminând cu rezultate experimentale,

-rețeta compozitului este originală, bazată pe materiale cu proprietăți superioare (țesătură cuadriaxială din fibre de sticlă și rășină Biresin CR82), de la Castro Composites SL,

-tehnologia de laborator: este o tehnologie care se aplică compozitelor de înaltă rezistență și parametrii aplicați de autor au dus la obținerea unei game de panouri de protecție cu intervale mici de abatere pentru grosimea panoului, densitatea de suprafață și, implicit, raportul masic țesătură-panou,

-metodologia de testare preliminară a avut rezultate omologate conform nivelului FB2, conform standardului EN1522/2004 și EN1523/2004 și raportului de cercetare,

– analiza mecanismelor de cedare a materialelor implicate în impact cu ajutorul macro fotografiei, imaginilor SEM și analizei EDX.

#### **6.4. Direcții de cercetare deschise de teză**

În domeniul echipamentelor de protecție la impact balistic, totul se află într-o competiție dinamică, spiralată, dintre penetrator și mijloacele de protecție balistică. Tendința acestei competiții este obținerea de sisteme de protecție balistică cât mai flexibile și cât mai rezistente la amenințări multiple. Direcțiile de cercetare în acest domeniu, sunt:

– obținerea și caracterizarea de materiale compozite și/sau hibride noi, pe baza fibrelor de înaltă rezistență,

– ierarhizarea soluțiilor obținute pe baza unor criterii legate de flexibilitatea echipamentelor mobile, masa specifică, manevrabilitate,

– simularea fenomenelor de impact la niveluri diferite, de la nivel micro, la nivel macro, cu scopul de a utiliza cât mai eficient proprietățile de material și de arhitectură a materialelor,

– extinderea aplicării acestor soluții de protecție balistică în industrii civile, unde există risc de impact (aerospațiale, industria energetică, industrii grele, industria automobilelor, industria navală, etc.)

Studiul efectuat de autor, poate fi continuat în următoarele direcții:

- proiectarea și încercarea unor soluții pentru panouri de protecție, hibride sau care să utilizeze materiale mai ușoare decât cele obținute de cele cu fibre de sticlă,

- proiectarea și încercarea unor panouri din țesături din fibre de sticlă, pentru alte aplicații decât cele balistice, în special pentru infrastructura rezistentă la impact, de tip panou de protecție, confecționate din țesături de fibre de performanță,

- realizare și testarea produselor de tip panou de protecție, confecționate din țesături de fibre de performanță, în condițiile respectării standardelor în vigoare; această lucrare are rezultate experimentale pentru panouri de 8 straturi, 16 straturi și 24 straturi, dar realizarea și încercarea panourilor cu straturi intermediare, între 10 și 16 straturi, poate conduce la reducerea densității specifice (de suprafață), fără a afecta siguranța în utilizare;

- extinderea utilizării țesăturilor cu fibre de sticlă și în diverse combinații cu alte materiale, în alte domenii în care există riscul unui impact (aeronautică, sisteme tehnologice caracterizate prin valori mari ale parametrilor de lucru, în special viteză și sarcină),

- îmbunătățirea tehnologiei de laborator în sensul reducerii pierderilor de rășină și de uniformizare a caracteristicilor plăcilor obținute,

- proiectarea unor simulări cu modele constitutive de material mai apropiate de răspunsul real al acestuia,

- proiectarea unei game de panouri pentru nivele superioare de protecție balistică.



## Listă lucrări științifice

### Articole publicate în reviste cotate ISI Thomson

1. Chiper Titire L., A. E. Musteata, A. Cioromila (Cantaragiu), G. C. Cristea, **Ojoc G. G.**, Deleanu L. (2021). Characterization of Blend PA6 +EPDM (60/40) by Tensile Tests. *Materiale Plastice*, 58(3), 51-63, WOS:000756838300001, <https://doi.org/10.37358/MP.21.3.5503>
2. Musteata, A. E., Petrescu, H., Cantaragiu Cioromila, A., **Ojoc, G. G.**, Deleanu, L. (2021). Influence of Composition on Energy at Break of Blends PP + PA6, *U.P.B. Scientific Bulletin., Series B*, 83(3). WOS:000692192600012, [https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/fulla95\\_317555.pdf](https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/fulla95_317555.pdf)
3. Pîrvu, C., Musteată, A.E.; **Ojoc G.G.**; Deleanu, L. (2020). Numerical and Experimental Results on Charpy Tests for Blends Polypropylene + Polyamide + Ethylene Propylene Diene Monomer (PP + PA + EPDM). *Materials*, 13, 5837. WOS:000602840500001, <https://doi.org/10.3390/ma13245837>
4. Pîrvu C., Musteata A. E., **Ojoc G. G.**, Sandu S., Deleanu L. (2019). A meso level FE model for the impact bullet – yarn. *Materiale Plastice*, 56(1), 22-31. WOS: 000464604100005, <https://revmaterialeplastice.ro/pdf/5%20PARVU%201%2019.pdf>

### Articole publicate în Proceedings ISI

1. **Ojoc G. G.**, Pîrvu C., Sandu S., Deleanu L., Glass fibers for impact protection systems. A review, the 8 th edition of International Conference on Material Science & Engineering, UgalMat 2018, October 11-13, 2018, Galati, Romania, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/485/1/012019>
2. **Ojoc G. G.**, Pîrvu C., Sandu S., Deleanu L., Standardization in testing ballistic protection systems, RoTrib 2019, the 14th International Conference on Tribology, 19-21 September 2019, Cluj-Napoca, Romania, WOS:000619349400049, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/724/1/012049>

### Articole indexate BDI

1. Chiper L., **Ojoc G. G.**, Pîrvu C., Deleanu L., Simulation of projectile impact on layered package made of unidirectional glass fibers, *U.P.B. Sci. Bull., Series D*, Vol. 83, Iss. 4, 2021, ISSN 1454-2358, pp. 253-266. [https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/rezeb0\\_352712.pdf](https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rezeb0_352712.pdf)
2. **Ojoc G. G.**, Totolici Rusu V., Pîrvu C., Deleanu L., How Friction Could Influence the Shape and Failure Mechanism in Impact, With the Help of a Finite Element Model, *U.P.B. Sci. Bull., Series D*, Vol. 83, Iss. 3, 2021, ISSN 1454-2358, [https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/reza6a\\_789278.pdf](https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/reza6a_789278.pdf)
3. **Ojoc G. G.**, Băbuț C., Ungureanu N., Deleanu L., FEM analysis of Storz coupling, *Journal of Engineering Sciences and Innovation*, 6(3), 2021, pp. 249–258, [https://jesi.astr.ro/wp-content/uploads/2021/09/3\\_Ojoc-George-Ghiocel.pdf](https://jesi.astr.ro/wp-content/uploads/2021/09/3_Ojoc-George-Ghiocel.pdf)
4. **Ojoc G.-G.**, Rus V. T., Popescu C., Pîrvu C., Deleanu L., Influence of friction in a case of impact simulation, *INCAS Bulletin*, Volume 12, Issue 4, 2020, pp. 145-154, DOI: 10.13111/2066-8201.2020.12.4.13; <https://doi.org/10.13111/2066-8201.2020.12.4.13>
5. **Ojoc G. G.**, Deleanu L., Georgescu C., Iorga D., Popescu M. V., Pîrvu C., Sandu S., Ballistic panel made of glass fiber fabrics + resin matrix for levels FB3 and FB5, *Academia Forțelor Terestre „Nicolae Bălcescu” din Sibiu, Buletin științific supliment, Catalogul oficial al salonului „Cadet INOVA”® Nr. 5/2020, Cercetări și inovații în viziunea tinerilor cercetători*, pp. 336- 340, [http://37.251.175.30/documente/Supliment\\_Inova\\_20.pdf](http://37.251.175.30/documente/Supliment_Inova_20.pdf)
6. Totolici Rusu V., **Ojoc G. G.**, Pîrvu C., Deleanu L., (2021). Influence of element size in a case of impact simulation. *Mechanical Testing and Diagnosis*, 10(4), 24-29. <https://www.gup.ugal.ro/ugaljournals/index.php/mtd/article/view/4068>
7. **Ojoc G.**, Oancea L., Pîrvu C., Sandu S., Deleanu, L. (2019). Modeling of impact on multiple layers with unidirectional yarns. *Mechanical Testing and Diagnosis*, 8(4), pp. 5-15. <https://doi.org/10.35219/mtd.2018.4.01>
8. **Ojoc G. G.**, Pîrvu C., Sandu S., Deleanu L., Friction Modeling in Simulating Ballistic Impact. A Review, *SERBIATRIB '19, 16th International Conference on, Tribology, Kragujevac, Serbia, 15 – 17 May 2019*, <http://pesjournal.net/journal/v1-n1/21.pdf>
9. Guglea D., Ionescu T. F., Georgescu C., Dima D., **Ojoc G. G.**, Deleanu L., Boron Nitride as Additive in Rapeseed Oil, Tested on Four Ball Tester, *SERBIATRIB '19, 16th International Conference on, Tribology, Kragujevac, Serbia, 15 – 17 May 2019*, <http://pesjournal.net/journal/v1-n1/76.pdf>
10. Chiper L., **Ojoc G. G.**, Deleanu L., Pîrvu C. (2020). Simulation of impact behavior of a glass yarn. *Mechanical Testing and Diagnosis*, 10(1), 10-17, <https://www.gup.ugal.ro/ugaljournals/index.php/mtd/article/view/4061>

## Bibliografie<sup>1</sup>

- [1] Abteu, M. A., Boussu, F., Bruniaux, P, Loghin, C. & Cristian, I. (2019). Ballistic impact mechanisms – A review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses. *Composites Structures*, 223(2), 110966, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110966>
- [2] Agbossou, A., Cohen, I. & Muller, D. (1995) Effects of interphase and impact strain rates on tensile off-axis behavior of unidirectional glass fiber composite—Experimental results. *Engineering Fracture Mechanics*, 52(5) 923. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(94\)00320-H](https://doi.org/10.1016/0013-7944(94)00320-H)
- [3] Ahmad, S., Rasheed, A., Nawab, Y. (Editors) (2020). *Fibers for Technical Textiles*, Springer, Dordrecht, The Netherlands
- [4] Alekseevskii, V. P. (1966). Penetration of a Rod into a Target at High Velocity, *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2, 63-66, Pleiades Publishing Ltd., Springer Verlag.
- [5] Alil L. C., Arrigoni M., Deleanu L., Istrate M., Assessment of delamination in Tensylon® UHMWPE composites by laser-induced shock, 2018, *Materiale plastice*, 55(3), pp 364-317, <http://www.revmaterialeplastice.ro/pdf/24%20ALIL%20L%203%2018.pdf>
- [6] Alonso, L., Martínez-Herguetac, F., Garcia-Gonzalez, D., Navarro García-Castillo, C. S. K., Teixeira-Dias, F. (2020). A finite element approach to model high-velocity impact on thin woven GFRP plates. *International Journal of Impact Engineering*. 142, 103593, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103593>.
- [7] Anand, S. C. (2016). Technical fabric structures-knitted fabrics. In Horrocks A.R. & Anand S.C. (Eds.), *Handbook of Technical Textiles*. (2nd ed.) (pp. 107-162). Woodhead Publishing Ltd., Cambridge.
- [8] Ansari, M. M., Chakrabarti, A. (2017). Impact behaviour of GFRP and Kevlar/epoxy sandwich composite plate: Experimental and FE analyses, *Journal of Mechanical Science and Technology* 31(2), 771-776, doi 10.1007/s12206-017-0128-y
- [9] Ashby, M. F. (2005). *Materials Selection in Mechanical Design*. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- [10] Barre, S., Chotard, T., & Benzeggagh, M. L. (1996). Comparative study of strain rate effects on mechanical properties of glass fibre-reinforced thermoset matrix composites. *Composites Part A - Applied Science and Manufacturing*. 27(12), 1169–1181.
- [11] Bhatnagar, A. (2006). *Lightweight ballistic composites*. Woodhead Publishing Limited, CRC Press, Boca Raton, New York.
- [12] Boccacinni, A. R. (2005). *Continuous fibre reinforced glass and glass-ceramic matrix composites*. Springer.
- [13] Børvik, T., Dey, S., & Clausen, A.H., (2009) Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles. *International Journal of Impact Engineering*. 36, 948-964. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2008.12.003
- [14] Cavallaro, P. V. (2011). *Soft Body Armor: An overview of materials, manufacturing, testing, and ballistic impact dynamics*, Naval Undersea Warfare Center Division Newport, Rhode Island, USA.
- [15] Chang, A. L., Bodt B. E., (1977). JTCG/AS Interlaboratory Ballistic Test Program — Final Report, Army Research Laboratory - TR-1577 - December 1977, p. 12.
- [16] Chen, X. W., Huang, X.L., Liang, G. J. (2011). Comparative analysis of perforation models of metallic plates by rigid sharp-nosed projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 38(7), 613-621. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.12.005>
- [17] Chowdhury, U., & Wu, X.-F. (2021). Cohesive zone modeling of the elastoplastic and failure behavior of polymer nanoclay composites. *Journal of Composites Science*, 5, 131. <https://doi.org/10.3390/jcs5050131>
- [18] Ciobotaru, T. (2018). *Ingineria autovehiculelor militare cu șenile, Volumul I. Organizarea generală. Capacitatea de supraviețuire*, Academia Tehnică Militară „Ferdinand I”, București.

---

<sup>1</sup> Referințele bibliografice sunt redactate în stil APA (7th edition), Common Reference Examples Guide, <https://apastyle.apa.org/instructional-aids/reference-examples.pdf>

- [19] Corona, E., & Reedlunn, B. (2013). A review of macroscopic ductile failure criteria. <https://pdfs.semanticscholar.org/5404/27e7cd18762d80b311adc475825edf148a9b.pdf>
- [20] Cox, B. N., & Flanagan, G. (Editors) (1997). *Handbook of Analytical Methods for Textile Composites*, NASA Center for AeroSpace Information, USA.
- [21] Cunniff, P. M. (1992). An analysis of the system effects in woven fabrics under ballistic impact. *Textile Research Journal*, 62, 9, 495-509, Report AD-A273 891. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA273891.pdf>
- [22] Deleanu, L., Georgescu, C., Pîrvu, C., & Sandu, S. (2017). *Development of protection system*, Research contract 725/2017, “Dunarea de Jos” University of Galati, Romania
- [23] Donea, J., Huerta A., Ponthot, J.-Ph., & Rodriguez-Ferran A. (2004). Chapter 14. Arbitrary Lagrangian–Eulerian Methods. In Stein, E., de Borst R. & Hughes T. J. R. (Eds.), *Encyclopedia of Computational Mechanics*, Volume 1: Fundamentals. John Wiley & Sons, Ltd.
- [24] Eichhorn, S. J., Hearle, J. W. S., Jaffe M., & Kikutani T. (Eds) (2009). *Handbook of textile fibre structure, Vol. 1: Fundamentals and manufactured polymer fibres*, Woodhead publishing limited.
- [25] Fink, B. K. (October 2000). *Performance metrics for composite integral armor*. Technical Report ARL-RP- 8, U. S. Army Research Laboratory (ARL), Department of Chemistry, Oklahoma State University, Stillwater, USA. [file:///C:/Users/Asus/Downloads/Performance\\_Metrics\\_for\\_Composite\\_Integr.pdf](file:///C:/Users/Asus/Downloads/Performance_Metrics_for_Composite_Integr.pdf)
- [26] Giglio, M., Gilioli, A., Manes, A., Peroni L., & Scapin M. (2012). Investigation about the influence of the mechanical properties of lead. *EPJ Web of Conferences* 26, 04010. doi: 10.1051/epjconf/20122604010
- [27] Grujicic, M., Pandurangan, B, Angstadt, D. C., Koudela, K. L., Cheeseman, B. A. (2007) Ballistic-performance optimization of a hybrid carbon-nanotube/E-glass reinforced poly-vinyl-ester-epoxy-matrix composite armor. *Journal of Materials Science*. **42**, 5347–5359.
- [28] Grujicic, M., Snipes, J., Ramaswami, S., Avuthu, V., (2016). Unit-cell-based derivation of the material models for armor-grade composites with different architectures of ultra-high molecular-weight polyethylene fibers. *International Journal of Structural Integrity*. 7(4), 458-489, doi: 10.1108/IJSI-06-2015-0015
- [29] Hamouda, A. M. S., & Risby, M. S., 2006 Modeling ballistic impact. In Bhatnagar A. (ed.), *Lightweight Ballistic Composites. Military and Law-Enforcement Applications* (pp. 101-126), Woodhead Publishing and Maney, CRC Press, Boca Raton, USA.
- [30] Hancox, N. L. (2000). An overview of the impact behaviour of fibre reinforced composites, In Reid S. R., Zhou G. (Editors), *Impact behaviour of fibre-reinforced composite materials and structures* (pp. 1-32), CRC Press, Boca Raton, USA, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England.
- [31] Horrocks, A. R., & Anand, S. C. (Editors) (2000). *Handbook of Technical Textiles*, Woodhead Publishing Limited and The Textile Institute, Cambridge, England.
- [32] Hosford W. F. (2010). *Mechanical Behavior of Materials*, (2<sup>nd</sup> ed.), Cambridge University Press, UK.
- [33] Ingle, S., Yerramalli, C. S., Guh,a A., & Mishra, S. (2021). Effect of material properties on ballistic energy absorption of woven fabrics subjected to different levels of inter-yarn friction. *Composite Structures*, 266, 113824. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113824
- [34] Ionescu, T. F., Pîrvu C., Badea, S, Georgescu, C., & Deleanu, L. (2017). The influence of friction characteristics in simulating the impact bullet – stratified materials. *15th International Conference on Tribology, SerbiaTrib'17*, Kragujevac, Serbia.
- [35] Johnson G. R., Cook W. H. (1985). Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, 21, 31-48.
- [36] Joki, R. K., Grytten, F., Hayman, B., & Sørensen, B. F. (2016). Determination of a cohesive law for delamination modelling - Accounting for variation in crack opening and stress state across the test specimen width. *Composites Science and Technology*, 128, 49-57. 10.1016/j.compscitech.2016.01.026
- [37] Kneubuehl, B. P. (2003). *Ballistic protection*, Hun, Switzerland, English edition,

- <http://www.vpam.eu/fileadmin/Wissenswertes/Ballistic-protection.pdf>
- [38] Laible R. C. (ed.) (1980). *Ballistic Materials and Penetration Mechanics*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands.
- [39] Lee, B. L., Walsh, T. F., Won, S. T., Patts, H. M., Song, J. W., & Mayer, A. H. (2001). Penetration failure mechanisms of armor-grade fiber composites under impact. *Journal of Composite Materials*, 35(18), 1605-1633.
- [40] Lee, H.-H., (2021). *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 2021*. SDC Publications. USA.
- [41] Lombard, D. B. (1961). *The Hugoniot Equation of State of Rocks*, United States, Web.
- [42] Lowenstein, K. L. (1993). *The manufacturing technology of continuous glass fibres* (3rd ed.), Springer, Amsterdam, the Netherlands.
- [43] Ma, D., Manes, A., Campos Amico, S., Giglio, M. (2019). Ballistic strain-rate-dependent material modelling of glass-fibre woven composite based on the prediction of a meso-heterogeneous approach. *Composite Structures*, 216, 187–200.
- [44] Ma, X., Zhang, Q., Zhang, X. & (2022). A model for rigid asymmetric ellipsoidal projectiles penetrating into metal plates, *International Journal of Impact Engineering*. 163, 104140. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.104140>.
- [45] Mallick, P. K. (2007). *Fiber Reinforced Composites Materials, Manufacturing and Design*. (2nd ed.) (pp. 60-116), CRC Press, Florida, USA.
- [46] Meyer, C. S., O'Brien, D. J., (Gama) Haque, B. Z., Gillespie, Jr. J. W. (2022). Mesoscale modeling of ballistic impact experiments on a single layer of plain weave composite. *Composites Part B*, 235, 109753. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109753>
- [47] Meyers, M. A. (1994). *Dynamic Behavior of Materials*. John Wiley & Sons, Inc., USA.
- [48] Múgica, J. I., Aretxabaleta, L., Ulacia, I., & Aurrekoetxea, J. (2016). Rate-dependent phenomenological model for self-reinforced polymers. *Composites: Part A*, 84, 96-102.
- [49] Naik, N. (2004). Composite structures under ballistic impact. *Composite Structures*, 66(1-4), 579-590.
- [50] Naresh K., Shankar K., Rao B.S., Velmurugan R. (2016). Effect of high strain rate on glass fiber reinforced epoxy laminated composites, *Composites Part B*, 100, 125-135, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.007>ss/carbon/hybrid fiber reinforced epoxy laminated composites, *Composites Part B*, 100, 125-135,
- [51] Nilakantan, G, Nutt, S. (2017). Effects of ply orientation and material on the ballistic impact behavior of multilayer plain-weave aramid fabric targets, *Defence Technology*, 1-14.
- [52] Ojoc, G. G., Oancea, L., Pîrvu, C., Sandu, S., & Deleanu, L. (2019). Modeling of impact on multiple layers with unidirectional yarns. *Mechanical Testing and Diagnosis*, 8(4), 5-15, <https://doi.org/10.35219/mtd.2018.4.01>
- [53] Ojoc, G. G., Pîrvu, C., Sandu, S., & Deleanu, L. (2019, 19-21 September). Standardization in testing ballistic protection systems, RoTrib 2019, the 14th International Conference on Tribology, Cluj-Napoca, Romania.
- [54] Park, R, Jang, J. (1998). A study of the impact properties of composites consisting of surface-modified glass fibers in vinyl ester resin. *Composites Science and Technology*, 58(6) 979-985.
- [55] Peroni, L., Scapin, M., Fichera, C., Manes A., & Giglio, M. (2012). Mechanical properties at high strain-rate of lead core and brass jacket of a NATO 7.62 mm ball bullet in numerical simulations of ballistic impacts. in Proceedings of *DYMAT 2012*.
- [56] Potluri, R., Supriya, K., & Vittal, G. V. G. (2018). Effect of boron carbide particles inclusion on the mechanical behaviour of S2-Glass fiber based polyester composites. *Material Today. Proceedings*. 5(9/3), 20257-20267. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.397>
- [57] Rebouillat, S., Steffenino, B., & Miret-Casas, A. (2010). Aramid, steel, and glass: characterization via cut performance testing, of composite knitted fabrics and their constituent yarns, with a review of the art, *Journal of Materials Science*, 45, 5378–5392, doi: 10.1007/s10853-010-4590-5
- [58] Sabet, A., Fagih, N., & Beheshty, M. B. (2011). Effect of reinforcement type on high velocity impact response of GRP plates using a sharp tip projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 38, 715-722.

- [59] Safta I. (2011). *Contribuții la studiul teoretic și experimental al mijloacelor individuale de protecție balistică*. teză de doctorat, Academia Tehnică Militară „Ferdinand I”, București, 2011.
- [60] Sathishkumar, T. P., Satheeshkumar, S., & Naveen, J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites – a review, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(13), 1258–1275.
- [61] Schwer, L. (2007) Optional Strain-Rate Forms for the Johnson Cook constitutive model and the role of the parameter Epsilon\_01, Dynamore GmbH, LS-Dyna, Andwerderforum, Frankenthal, Impact, <https://www.dynamore.de/en/downloads/papers/07-forum/impact/optional-strain-rate-forms-for-the-johnson-cook/view>
- [62] Sockalingam, S. (2016). *Transverse Impact of Ballistic Fibers and Yarns – Fiber Length-Scale Finite Element Modeling and Experiments*, PhD thesis, University of Delaware, USA. <http://udspace.udel.edu/handle/19716/19972>
- [63] Tanoglu, M., McKnight, S., Palmese, G., & Gillespie, Jr J. (2001). The effects of glass-fiber sizings on the strength and energy absorpentruiou of the fiber/matrix interphase under high loading rates, *Composites Science and Technology*, 61(2), pp. 205-220.
- [64] Wallenberger, F.T., Watson, J. C., & Li, H. (2001). *Glass Fibers. ASM Handbook. 21: Composites* (pp. 27-34). American Technical Publishers Ltd., Ohio, USA.
- [65] Walters, W., Williams, C., & Normanidia M., (2006). An Explicit Solution of the Alekseevskii-Tate Penetration Equations, *International Journal of Impact Engineering*, 33, 837-846, Elsevier Ltd.
- [66] Wiśniewski, A. & Gmitrzuk, M. (2013). Validation of numerical model of the Twaron CT709 ballistic fabric. *Proceedings of 27th International Symposium on Ballistics, BALLISTICS 2013*, 2, 1535-1544.
- [67] Xanthos M (2010). *Functional Fillers for Plastics* (2<sup>nd</sup> edition) (pp. 1.1-18), Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
- [68] Zhu, F. (2009). *Advanced Materials for Composite Armour*, PhD thesis, School of Engineering and Materials, „Queen Mary” University of London, UK.
- [69] \*\*\* 2011 *Opportunities in protection materials science and technology for future army applications*, Committee on Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications National Research Council, ISBN 978-0-309-21285-4
- [70] \*\*\* 4.12. Cohesive Zone Material (CZM) Model, Release 18.2 - © ANSYS, Inc. [https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans\\_help\\_v182/ans\\_thry/thy\\_mat11.html](https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_thry/thy_mat11.html)
- [71] \*\*\* ANSYS Explicit Dynamics Analysis Guide (2021). ANSYS, Inc., USA
- [72] \*\*\* Ballistic Materials Handbook, Aramids by Teijin, QMB1.1 20181001EN, 2020
- [73] \*\*\* Ballistic (accesat 11.02.2022). <https://www.protectolite.com/ballistic/industries.html>,
- [74] \*\*\* Biresin® CR82.Composite resin system, (accesat 4.10.2020). <https://industry.sika.com/dms/getdocument.get/93a3a9b1-7291-47ce-8ca7-18ae3f458043/Biresin-CR82-New.pdf>
- [75] \*\*\* Noi soluții de blindaje, proiect Protectcomb, <https://www.rumaniamilitary.ro/noi-solutii-de-blindaje-ieftine-si-la-indemana> (accesat 24.03.2022)
- [76] \*\*\* CEN CENELEC Declaration, Standards build trust, <https://www.cencenelec.eu/news/publications/Publications/CENCENELEC-DECLARATION-Final.pdf>
- [77] \*\*\* EN 1522:2004 Windows, doors, shutters and blinds. Bullet resistance. Requirements and classification
- [78] \*\*\* EN 1523:2004 Windows, doors, shutters and blinds - Bullet resistance - Test method
- [79] \*\*\* Glass (accesat 3.02.20210). <https://www.castrocompositesshop.com/en/63-glass>, (accesat 22.02.2022)
- [80] \*\*\* 1200 g/m<sup>2</sup> Quadriaxial Stitched Glass Fabric (0°/+45°/90°/-45°), 127 cm wide (accesat 12.01.2022). <https://www.castrocompositesshop.com/en/fibre-reinforcements/1204-1200-gm2-quadriaxial-stitched-glass-fabric-0%C2%BA45%C2%BA90%C2%BA-45%C2%BA-127-cm-wide.html>
- [81] \*\*\* NIJ 0108 ± ballistic resistant protective materials National Institute of Justice,
- [82] \*\*\*Sika Group. About us (accesat 3.10.2021), <https://www.sika.com/en/home.html>