

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



TEZĂ DE DOCTORAT

Rezumat

STUDIU NUMERIC ȘI EXPERIMENTAL PENTRU
SISTEME DE PROTECȚIE BALISTICĂ
CU ȚESĂTURI DIN FIBRE ARAMIDICE

Doctorand
ing. Larisa CHIPER (TITIRE)

Coordonator științific
prof. dr. ing. Lorena DELEANU

Seria I6: Inginerie Mecanică nr. 72

Galați
2023

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



TEZĂ DE DOCTORAT

Rezumat

STUDIU NUMERIC ȘI EXPERIMENTAL PENTRU SISTEME DE PROTECȚIE BALISTICĂ CU ȚESĂTURI DIN FIBRE ARAMIDICE

Doctorand
ing. Larisa CHIPER (TITIRE)

Președinte	Prof. univ. dr. ing. Cătălin FETECĂU Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați
Conducător științific	Prof. univ. dr. ing. Lorena DELEANU Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați
Referent Oficial	Prof. univ. dr. ing. Eugen TRANĂ Academia Tehnică Militară „Ferdinand I”, București
Referent Oficial	Prof. univ. dr. ing. Sorin CĂNĂNĂU Universitatea Națională de Știință și Tehnologie „Politehnica”, București
Referent Oficial	Prof. univ. dr. ing. Mihaela BUCIUMEANU Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Seria I 6: Inginerie Mecanică nr. 72
Galați
2023

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**

Cuprins

	Teză	Rezumat
<i>Mulțumiri</i>	3	3
Cuprins	5	5
Summary	8	-
Introducere	11	9
Introduction	13	-
Notății și abrevieri	15	-
Lista figurilor. Lista tabelor	16	-
Capitolul 1. Stadiul actual privind materialele și soluțiile vestelor de protecție balistică.....	31	11
1.1. Introducere	31	11
1.2. Amenințări individuale. Sisteme de protecție individuală	32	11
1.3. Fibre folosite în sistemul de protecție la impact balistic.....	34	12
1.3.1. Introducere	34	12
1.3.2. Tipuri de fibre	36	12
1.4. Țesături pentru protecție balistică	39	12
1.4.1. Introducere	39	12
1.4.2. Țesături balistice utilizate în sistemele de protecție	40	13
1.5. Compozite întărite cu fibre	43	13
1.6. Metode de cercetare a mecanismelor de impact balistic.....	50	14
1.6.1. Introducere.....	50	14
1.6.2. Metoda analitică.....	50	14
1.6.3. Metoda numerică pentru rezolvarea impactului balistic.....	53	15
1.6.4. Metoda experimentală.....	55	15
1.6.5. Metoda empirică.....	59	16
1.6.6. Combinații de două sau mai multe metode.....	60	16
1.7. Concluzii.....	62	16
1.8. Tendințe moderne în proiectarea sistemelor de protecție individual.....	63	17
1.9. Direcții de cercetare	64	17
Capitolul 2. Organizarea tezei	66	18
2.1. Importanța temei și obiective principale	66	-
2.2. Organizarea tezei	67	-
Capitolul 3. Simulări ale impactului proiectil - țintă.....	69	19
3.1. Introducere	69	19
3.2. Propagarea undelor de tensiune în fire și țesături	73	19
3.2.1. Propagarea tensiunilor într-un fir sub impact balistic.	74	20

3.2.2. Propagarea tensiunilor într-o țesătură sub impact balistic	76	20
3.3. Influența modelului constitutiv de material pentru firele aramidice	82	20
3.3.1. Introducere	82	20
3.3.2. Metodologia simulărilor numerice pentru analiza influenței modelului constitutiv de material pentru firele aramidice	83	20
3.3.3. Analiza rezultatelor simulărilor pentru modele constitutive de material diferite	89	24
3.3.4. Concluzii privind influența modelului constitutiv de material pentru firele aramidice	119	29
3.4. Influența introducerii frecării în modelul de impact	120	30
3.4.1. Introducere.....	120	30
3.4.2. Metodologia simulării influenței introducerii frecării în modelul de impact.....	123	31
3.4.3. Analiza rezultatelor privind influența introducerii frecării în modelul de impact.....	125	33
3.4.4. Concluzii privind influența introducerii frecării în modelul de impact.....	132	38
3.5. Influență dimensiunii eșantionului în simularea numerică	134	40
3.5.1. Introducere	135	40
3.5.2. Metodologia simulării influenței dimensiunii eșantionului în simularea numerică	135	40
3.5.3. Analiza rezultatelor privind influența dimensiunii eșantionului în simularea numerică.....	136	42
3.6. Validarea modelului	148	46
3.7. Concluzii finale	150	48
Capitolul 4. Țesături selectate pentru sisteme de protecție balistică și campania de testare	153	50
4.1. Introducere	153	50
4.2. Proceduri de montare a probelor pentru testarea balistică: perspectiva standardelor de la National Institute of Justice (NIJ).....	157	50
4.3. Metodologia experimentelor de impact balistic.....	160	52
4.4. Modul de prindere a pachetelor balistice.....	161	52
4.5. Țesăturile utilizate pentru realizarea probelor sistemelor de protecție	162	52
4.6. Procesul de realizare a probelor de armura individual de protecție balistică	164	53
Capitolul 5. Date experimentale pentru panouri frontale ale unei veste cu nivel de protecție IIA.....	169	58
5.1. Analiza adâncimii urmei și evaluarea panourilor de protecție de a	169	58

opri un proiectil ..		
5.1.1. Introducere ..	169	58
5.1.2. Analiza adâncimii urmei în materialul suport (BFS).....	170	58
5.1.3. Analiza adâncimii urmei prin scanarea 3D.....	174	59
5.2. Factori care influențează performanța materialului balistic în scenariile cu impact ridicat ..	186	62
5.2.1. Introducere ..	186	62
5.2.2. Analiza fotografiilor macro a panourilor testate, pe fiecare panou testat.....	190	63
5.2.2.1. Analiza celor trei focuri pe panouri din țesătură Twaron CT736.....	190	63
5.2.2.2. Analiza celor trei focuri pe panouri combinate, cu țesătură Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT 736	218	68
5.2.3. Analiza mecanismului de distrugere a panourilor la impact prin intermediul imaginilor SEM.....	244	73
5.2.3.1. Introducere ..	244	73
5.2.3.2. Analiza la scară multiplă a materialelor pentru sistemele de protecție.....	244	73
5.2.3.3. Structura și morfologia fibrei aramidice	245	74
5.2.3.4. Analiza modului de distrugere ale panoului țesut pe baza fotografiilor SEM	250	75
5.3. Concluzii finale asupra campaniei de testare	257	80
Capitolul 6. Concluzii finale asupra rezultatelor numerice și experimentale.....	265	84
6.1. Importanța temei de cercetare	265	84
6.2. Concluzii finale ale tezei.....	266	85
6.3. Contribuții personale	271	89
6.4. Perspective de cercetare deschise de această lucrare	273	90
<i>Lista lucrărilor științifice ale autorului</i>	274	92
<i>Bibliografie</i>	276	94
<i>Anexe</i>	292	-

Introducere

De-a lungul istoriei globale, au existat conflicte și bătălii militare. Gradul de apărare împotriva amenințărilor la adresa vieții oamenilor în timpul revoltelor și pe câmpul de luptă a avansat în tandem cu dezvoltarea unui armament mai puternic. În funcție de tipul de armă, diferite materiale au fost utilizate pentru protecția împotriva atacurilor în diferite momente ale istoriei. Printre multe alte materiale, lemnul, metalul, pielea și textilele au fost toate esențiale pentru protecția oamenilor și a bunurilor lor. În plus, aceste materiale au fost fabricate în diferite forme cu structuri specifice pentru a maximiza funcția de protecție. De exemplu, zalele au fost folosite pentru a spori flexibilitatea armurii, iar metalul a fost folosit ca înveliș pentru a proteja trunchiul.

După dezvoltarea armei de foc, soldații s-au confruntat cu mai multe pericole balistice în comparație cu armele anterioare (Tam și Bhatnagar, 2006). S-a căutat o nouă generație de materiale balistice, cu accent pe materiale ușoare și rezistente. Rezistența îmbunătățită la arme, greutatea redusă și flexibilitatea au fost aduse de această tehnologie de dezvoltare a protecției individuale (Dunn, 2008). De atunci, ingineria echipamentelor de protecție personală a fost dominată de materiale pe bază de fibre. Pe măsură ce compozitele armate cu textile avansează, compozitele pe bază de fibre capătă mai multă importanță ca materiale pentru caroserii vehiculelor de aviație și militare. Când au fost dezvoltate mai multe materiale fibroase de ultimă oră în vremurile moderne, cum ar fi fibrele aramid (cum ar fi Kevlar și Twaron), fibrele de polietilenă cu greutate moleculară ultra-înaltă (UHMWPE) (cum ar fi Dyneema și Spectra), fibrele PBO (polibenzoxazol, cunoscute și ca Zylon) și fibrele PIPD (polihidrochinonă-diimidazopiridină, cunoscute și sub denumirea M5), această abordare pentru inginerie materiale balistice a atras multă atenție. Cu toate acestea, Zylon nu este recomandat pentru utilizarea în protecția balistică, deoarece se pare că este predispus la degradare hidrolitică și fotolitică (Departamentul de Justiție al SUA, 2005). Deoarece acesta este cazul, fibrele de aramidă și UHMWPE sunt cele mai des folosite pentru protecția balistică.

Armura pentru corp este echipament esențial de apărare care ajută corpul uman să evite multe tipuri de atacuri. Impactul balistic al proiectilului este una dintre cele mai frecvente cauze de atac printre multe altele [Hani, 2012]. Impactul balistic legat de armura corporală este un eveniment cu mișcare rapidă care are loc în 50-200 μs. Prin urmare, construcțiile blindate trebuie să reacționeze și să reziste cu succes la lovituri de mare viteză în această perioadă [Crouch, 2019]. Mobilitatea și performanța sunt factori critici atunci când vine vorba de armătură. În mod tradițional, materialele primare folosite pentru fabricarea armurii au fost oțelul și ceramica, ceea ce le-a conferit un aspect puternic și dur. În plus, articulațiile, umerii și gâturile corpului uman nu puteau fi protejate de aceste armuri inflexibile. Cercetătorii și-au îndreptat atenția către armurile de corp din materiale textile pentru a ocoli aceste restricții [Abteu, 2019]. Standardul Institutului Național de Justiție (NIJ) împarte armura corporală în două categorii: armura moale, care este clasificată la nivelurile de protecție I, IIA, II și IIIA, și armura dur, care este evaluată la nivelurile de protecție III și IV. [standard NIJ 0101-06]. În funcție de modul în care sunt fabricate, armura pentru corp din

materiale textile poate fi fie moale, fie rigidă. Armura moale pentru corp este creată prin coaserea mai multor straturi de textile de înaltă performanță într-o armătură pe bază de material textil. În schimb, crearea armurii dure implică întărirea diferitelor straturi de țesătură de înaltă performanță din interiorul matricei polimerice. Deoarece sunt inflexibile, armurile dure limitează aria de mișcare a purtătorului. Armura moale, pe de altă parte, este mai flexibilă și mai ușoară decât aceasta.

Scopul acestei lucrări a fost de a cerceta materiale pentru sistemele de protecție individuală pentru a crește rezistența la penetrare prin realizarea unei documentații de dată recentă pentru sistemele de protecție individuală, realizarea de panouri cu țesătură Twaron CT 736 și panouri cu țesătură Twaron CT 736 și țesătură Twaron SRM 509 pentru sisteme de protecție, aplicarea unei metodologii de testare de laborator bazată pe NIJ, utilizarea metodei elementelor finite pentru simularea impactului proiectil – panou și analiza mecanismelor de deteriorare/cedare a panourilor balistice.

Capitolul 1 cuprinde o prezentare a sistemelor de protecție individuală, arhitectura sistemelor de veste balistice, tehnologia de dezvoltare a vestelor balistice, fibre folosite ca protecție la impact balistic, o descriere a țesăturilor utilizate în sistemele de protecție, precum și o documentație de dată recentă în ceea ce privește sistemele de protecție și impactul balistic prin gruparea acestora pe metode de cercetare. Aceste metode de cercetare sunt: metoda analitică, metoda numerică, metoda experimentală, metoda empirică și combinații de două sau mai multe metode.

Capitolul 2 descrie modul de organizare al tezei, importanța temei și obiectivele principale ale tezei.

Capitolul 3 prezintă simulări ale impactului cu proiectilului privind influența mai multor criterii care influențează mecanismul de impact balistic. Acest capitol începe cu un studiu teoretic în ceea ce privește mecanismul de impact balistic dintr-un proiectil și o țintă balistică și continuă cu trei subcapitole care au ca scop analiza parametrilor care influențează mecanismul de impact balistic. În acest capitol se face validarea modelelor simulate cu modelele experimentale.

Capitolul 4 prezintă o descriere a materialelor testate, două materiale balistice, modul de realizare a eșantioanelor testate, modul de compunere a panourilor, dimensiunea panourilor, modul de prindere a straturilor, grosimea panourilor și vitezele proiectilelor.

Capitolul 5 prezintă rezultatele testelor experimentale prin analiza fotografiilor macro, analiza fiecărei strat în parte pentru a determina numărul de fire rupte, modul de rupere a firelor, comportamentul firelor care nu au fost rupte și analiza substratului de polimer și substratului de carbură de siliciu. Se analizează modul de distrugere a firelor și prin fotografii SEM. Analiza adâncimii urmei în materialul suport pentru probele realizate se realizează conform standardului NIJ [Standard 0101-06], dar se analizează adâncimea urmei și cu ajutorul scanărilor de mare precizie.

Capitolul 6 cuprinde concluziile finale și contribuțiile personale, esențiale pentru evaluarea impactului cercetării și pentru înțelegerea importanței descoperirilor în ceea ce privește protecția balistică.

Capitolul 1. Stadiul actual privind materialele și soluțiile vestelor de protecție balistică

1.1. Introducere

Din cauza existenței războiului, omul a fost preocupat pentru a se proteja de diverse amenințări, precum proiectilele și obiecte ascuțite. Pentru a se proteja de numeroasele amenințări, oamenii purtau îmbrăcăminte din mai multe tipuri de materiale: piele de animale, lemn, cupru și oțel. Numeroase materiale textile și laminate din fibre convenționale precum în, bumbac, mătase și nailon au fost folosite ca materiale de protecție împotriva diferitelor pericole, inclusiv a celor balistice [Scott, 2005], [Saxtorph, 1972], [Sun, 2016], [Abtnew, 2019].

După invenția prafului de pușcă și a armelor de foc, armura de corp s-a dezvoltat continuu cu un nou concept, de a fi mai ușoară și mai rezistentă pentru a proteja de pătrunderea diferitelor proiectile. În timpul Primului Război Mondial, armura nu a fost folosită, experimentele au început pe unele modele mai târziu. O versiune îmbunătățită a fost raportată în 1916 pentru a proteja pieptul purtătorului, dar era grea din cauza utilizării plăcilor de oțel. Oficiul american de brevete și mărci comerciale enumeră înregistrări care datează din 1919, pentru diferite modele de veste antiglonț și articole de îmbrăcăminte de tip armură.

Dezvoltarea sistemelor de protecție a trecut de la metodele tradiționale la analize de inginerie asistate de calculator, datorită avantajelor economice și de economisire a timpului. Cu toate acestea, rămân provocări în modelarea cu acuratețe a comportamentului materialelor în condiții extreme, iar una dintre problemele cheie este lipsa unor modele cuprinzătoare ale materialelor care să ia în considerare fenomenele la scară multiplă din materiale, în special în cazul materialelor compozite, de calitate superioară. Abordarea acestor provocări este importantă pentru îmbunătățirea performanței sistemelor de protecție individuală.

1.2. Amenințări individuale. Sisteme de protecție individuală

Protecția individuală constă din veste, armuri și căști. Materialele utilizate pentru sistemele de protecție individuală sunt materiale țesute, tricotate sau nețesute, laminate și compozite [Îșmal, 2018], [Hu, 2022].

Armura de protecție individuală poate fi clasificată în funcție de textile în două categorii: armură moale și armură rigidă [Îșmal, 2019], [Tahir, 2022].

Armura de protecție individuală mai poate fi clasificată în funcție de flexibilitate, modul în care este purtată (sub sau peste haine) și în ce situații este purtată. Armura de protecție individuală purtată sub haine este subțire și poate fi denumită armură de corp ascunsă.

Armura de corp ascunsă este utilizată pentru un nivel de protecție nu foarte ridicat. Armura de protecție purtată peste haine este formată din panouri dure

Sistemul de vestă balistică este format dintr-o armură moale, care are rolul de a disipa forța generată în timpul impactului, și dintr-o componentă întărită care are rolul de a disipa în continuare forța generată în timpul impactului, componenta care este poziționată în spate [Beck, 2016].

1.3. Fibre folosite în sistemul de protecție la impact balistic

1.3.1. Introducere

Fibrele sunt elementele principale ale unui material compozit întărit cu fibre. Fibrele ocupă cea mai mare parte din volumul unui compozit și împart sarcina care acționează asupra structurii compozite. Caracteristicile unui compozit stratificat sunt influențate de selectarea adecvată a tipului de fibră, a fracției volumului fibrei, a lungimii fibrei și orientării acesteia [Mallick, 2007]. Caracteristicile unui laminat compozit sunt:

- densitatea,
- rezistența la tracțiune,
- rezistența la compresiune,
- rezistența la oboseală, precum și mecanismele de rupere la oboseală,
- rezistența la impact,
- costul.

1.3.2. Tipuri de fibre

Cele două fibre bine cunoscute de performanță ridicată, care produc material textil de protecție datorită rezistenței lor ridicate la impact [Yavaş, 2015], [Zhang, 2006] sunt:

- fibrele aramidice,
- fibrele din polietilena cu greutate moleculară foarte ridicată.

Alte mărci de fibre de înaltă performanță utilizate în mod obișnuit sunt: Zylon (Toyobo), Spectra (Allied Signal), M5 Vectran (Hoechst Calanese), Technora (Teijin), Nextel (3 M Ceramic Fiber Products).

1.4. Țesături pentru protecție balistică

1.4.1. Introducere

Țesăturile sunt materialele utilizate sub două forme, flexibilă sau rigidă, pentru sistemele de protecție împotriva diferitelor tipuri de amenințări balistice și de impact [Abtew, 2019].

Cerințele esențiale pentru selectarea țesăturilor pentru protecție balistică sau la impact sunt:

- densitate mică prin caracteristici mecanice și termice,
- performanța ridicată de protecție,
- preț redus,
- confort [Lane, 2005].

Tipuri de arhitecturi pentru țesături balistice cuprind:

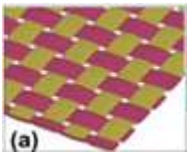
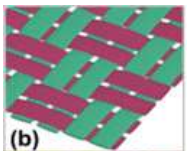
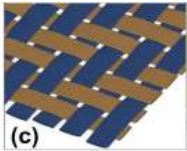
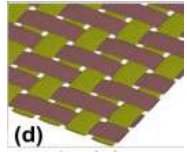

- țesături textile,

- țesături unidirecționale sau multiaxiale,
- țesături 3D.

1.4.2. Țesături balistice utilizate în sistemele de protecție

Tipurile de bază ale țesăturii 2D sunt țesăturile simple, țesăturile pe diagonală, țesăturile satin și țesăturile leno (Tabelul 1.1).

Tabelul 1.1. Tipuri de țesături balistice [Bilisik, 2017], [Yang, 2015]

Tipul de țesătură	Construcție	Proprietăți	Imagini
Țesătură simplă	Fiecare fir de urzeală trece alternativ sub și peste fiecare fir de bățatură	- simetrică, - stabilitate direcțională, - încrețire ridicată, - dificil de modelat.	
Țesătură basket	Este un derivat al țesăturii simple, care are două sau mai multe fire de urzeală care se întrepătrund alternativ cu două sau mai multe fire de bățatură	- mai puțin încrețită/ondulată, - flexibilitate, - ușor de perforat prin umplerea laterală a firelor, - instabilă.	
Țesătură diagonală	unul sau mai multe fire de urzeală trec alternativ peste și sub două sau mai multe fire de bățatură, într-o manieră repetată în mod regulat.	- suprafață mai netedă, - ondulare redusă, - umectabilitate bună, - drapabilitate bună, - stabilitate scăzută în comparație cu țesătura simplă.	
Țesătură satin	unul sau mai multe fire de urzeală trec alternativ peste și sub două sau mai multe fire de bățatură pentru a face mai puține intersecții/ondulare	- suprafață netedă, - bună umectabilitate, - ondulare scăzută - stabilitate scăzută - structură asimetrică.	
Țesătură leno	fire de urzeală adiacente sunt răsucite în jurul firelor de bățatură consecutive	suprafață groasă și rugoasă cu porozitate ridicată.	

1.5. Compozite întărite cu fibre

Materialele compozite întărite cu fibre sunt obținute din fibre și o matrice, matricea care acționează ca un liant pentru fibre. În materialele compozite pot fi utilizate și agenți de cuplare, straturi de alt material (acoperiri) și materiale de umplutură. Agenții de cuplare și straturile de material sunt aplicate pe fibre pentru a îmbunătăți conexiunea acestora cu matricea (adeziunea fibră-matrice) [Mallick, 2007a].

În timpul impactului balistic cu proiectil, pe materialele compozite pentru sistemele de protecție, se urmărește:

- încetinirea proiectilului,
- deformarea proiectilului pe măsură ce trece prin panou sau straturi,
- oprirea proiectilului,
- deformarea deformării feței din spate [Bhatnagar, 2006].

1.6. Metode de cercetare a mecanismelor de impact balistic

1.6.1. Introducere

Rezistența la impactul cu viteză mare este o cerință de o importanță majoră și în impactul balistic. Pentru o înțelegere mai bună a mecanismelor de impact balistic ale diferitelor materiale cu diverși parametri s-au făcut cercetări ample. Diverși parametri ai proiectilului și proprietățile fibrei influențează performanțele finale de rezistență balistică ale materialului țintă [Abtew, 2009].

Parametrii externi și interni care influențează performanțele finale de rezistență balistică ale materialului țintă sunt caracteristicile sistemului format, în ceea ce privește:

- proprietățile firului,
- tipul de țesătură,
- densitatea specifică a sistemului,
- numărul de straturi sau grosimea,
- parametrii de impact, cum ar fi:
 - viteza de impact,
 - unghiul de impact,
 - geometria și materialul proiectilului,
- condițiile de mediu (umiditatea, temperatura, presiunea etc.).

1.6.2. Metoda analitică

O tehnică folosită pentru a analiza, examina și înțelege procesele distincte de impact balistic pe diferitele materiale este metoda analitică [Mohammed, 2021].

Metoda analitică are ca obiective să cuantifice următoarele [Naik, 2023]:

- energia absorbită prin diferite mecanisme,
- forța de contact,
- viteza proiectilului în țintă și viteza reziduală,
- legea de deplasare a vârfului proiectilului.

Zhang et al. [Zhang, 2022] au studiat un model analitic al laminatelor UHMWPE, sub impact balistic, cu scopul de a determina modul de deformare/ruptură a straturilor UHMWPE. Modelul analitic propus de aceștia indică viteza reziduală a proiectilului și limita balistică.

Dogan et al. [Dogan, 2023] prezintă o nouă formulare analitică pentru reducerea vitezei impactului proiectilelor, bazată pe energia cinetică de rupere la tracțiune în plan, inclusiv o nouă abordare, reprezentând absorbția de energie datorată frecării între componentele participante la impact.

Liu et al. [Liu, 2023] au dezvoltat un model analitic pentru a prezice BFD pentru un panou hibrid, compus din țesături aramidice modificate și folii unidirecționale din polietilenă cu greutate moleculară ultra-înaltă (UHMWPE), care se bazează pe evoluția distrugerilor în două etape: blocarea prin forfecare și deformarea la tracțiune.

Choudhury et al. [Choudhury, 2023] au dezvoltat un model analitic pentru compozitul GFRP care ia în considerare dependența procesului de impact de viteza de deformare a țintei și proiectilului și efectele temperaturii materialului matricei.

1.6.3. Metoda numerică pentru rezolvarea impactului balistic

Pentru a stabili modelele proiectil-sistem de protecție și pentru a obține performanțe la impact balistic pentru materialele utilizate, mulți cercetători au folosit o abordare de modelare numerică care se bazează pe metode, cum ar fi metodele cu elemente finite și cu diferențe finite, cu ajutorul pachetelor comerciale, cum ar fi Abaqus, Dyna3D, LSDyna, ANSYS etc. [Zochowski, 2022], [Yuan, 2021], [Hazzard, 2018], [Nilakantan, 2018] [Zhu, 2014] [Tarfaoui, 2001], [Kumar, 2010], [D'Amato, 2001], [Lim, 2003], [D'Amato, 2005], [Royslance, 1995], [Tarfaoui, 2001], [Ghazlan, 2023], [Xie, 2023], [Wu, 2022], [Rezasefat, 2023], [Vescovini, 2021], [Fuqiang, 2023]. Datorită faptului că reduce munca necesară pentru testarea probelor, această metodă este de obicei utilă pentru a economisi timp și resurse financiare, propunând un interval mai restrâns de soluții care să fie apoi testate pentru confirmare.

Marques et al. [Marques, 2021] au studiat trei materiale diferite de, cum ar fi polimerul armat cu fibră de carbon (CFRP), Kevlar și oțelul, prin modelare numerică folosind software-ul ANSYS, luând în considerare glonțul cu carcasă de alamă.

Caçoilo et al. [Caçoilo, 2021] au utilizat simularea numerică (analiza cu elemente finite) pentru a prezice consecințele impactului gloanțelor asupra căștilor militare, și asupra rănilor umane.

1.6.4. Metoda experimentală

Una dintre cele mai folosite tehnici de examinare a performanțelor de impact balistic ale diferitelor materiale este utilizarea metodelor experimentale, care pot caracteriza și aduna date concrete pentru a îmbunătăți aplicațiile materialului sau sistemului balistic [Cunniff, 1992], [Karahan, 2015], [Song, 2011], [Hassanpour, 2019], [Mudric, 2016]. Când se utilizează metode experimentale, este posibil să se studieze modul în care diferitele configurații ale țintei și calitățile mecanice afectează performanța balistică a materialului atunci când este impactat de diferite gloanțe convenționale sau proiectile de simulare a fragmentelor (FSP) la viteze diferite [Almohandes, 1996].

Bajya et al. [Bajya, 2021] au studiat performanța în protecția balistică și modurile de distrugere ale panourilor de armură flexibilă, fabricate din diferite structuri, inclusiv țesături țesute și laminate unidirecționale (UD).

Pinkos et al. [Pinkos, 2023] realizează o cercetare experimentală a leziunilor corpului uman, protejat de pachete balistice din țesături biaxiale și triaxiale, în timpul unui impact

nepenetrant, de la un glonț Parabellum 9 mm Full Metal Jacket (FMJ), la o viteză de 406 ± 5 m/s.

1.6.5. Metoda empirică

O metodă empirică sau semi-empirică este una dintre cele mai simple și importante metode de investigare a performanțelor balistice ale materialului, care se concentrează în principal pe datele din lucrările experimentale pentru a investiga răspunsurile la impactul materialului balistic și diferite mecanisme de rupere/cedare [Cunniff, 1996]; [Bohong, 2004]; [Shim, 2001].

1.6.6. Combinații de două sau mai multe metode

Utilizând doar una dintre metode (experimentală, empirică, numerică sau analitică) este foarte dificil să se înțeleagă și să se descrie pe deplin procesul impactului balistic. Pentru o mai bună înțelegere, a mecanismelor de impact balistic se utilizează combinații de metode (experimentale, empirice, numerice și analitice) [Signetti, 2022], [Gilson, 2021], [Gregori, 2020], [Asemani, 2021], [Shim, 1995], [Chen, 2013], [D'Amato, 2001], [Chandekar, 2014], [Soydan, 2018], [Chen, 2014], [Sikarwar, 2012], [Mohamadipoor, 2018], [Shaktivesh, 2015], [Lee, 2001], [Tabiei, 2002].

Jafari et al. [Jafari, 2023] au investigat performanța balistică a armurilor compozite compuse din straturi ceramică-poliuree-aluminiu. Pentru a valida rezultatele simulării, au folosit două sisteme de referință în care au fost investigate ținte acoperite cu straturi de ceramică-aluminiu și poliuree-aluminiu.

Hakan et al. [Hakan, 2023] investighează experimental și numeric răspunsul dinamic al plăcilor gradate funcțional, supuse impactului balistic normal și oblic. A fost dezvoltată o configurație experimentală în care proiectilele impactează plăci gradate funcțional, cu trei compoziții diferite, la unghiuri de impact de 0° , 15° , 30° , 45° și 60° .

1.7. Concluzii

Sistemele de protecție flexibile sunt de preferat pentru performanța lor și pentru avantajele față de cele dure, având în vedere greutatea redusă, confortul și mobilitatea purtătorului. Designul optim al unui sistem de armură ar trebui să echilibreze trei caracteristici conflictuale: protecție eficientă, mobilitate și confort. Confortul armurii este afectat de toți parametrii care influențează atât performanța de protecție, cât și mobilitatea. Mecanismul de defectare a armurii sub impactul glonțului sau schijelor a fost investigat luând în considerare teoriile de propagare a deformării sub impactul glonțului și efectul structurii de țesătură în cazul structurilor de protecție cu un singur strat și multistrat. Sunt prezentate efectul unor parametri asupra vitezei proiectilului pe durata impactului. În unele modele de armură, plăcile dure sunt folosite ca inserție în sau pe armura flexibilă pentru a crește capacitatea de protecție.

1.8. Tendințe moderne în proiectarea sistemelor de protecție individuale

Una dintre tendințele cheie în proiectarea sistemelor de protecție individuală a fost utilizarea materialelor ușoare. Progresele în știința materialelor au condus la dezvoltarea sistemelor de protecție realizate din materiale precum fibrele aramidice și din polietilenă cu greutate moleculară ultra-înaltă (UHMWPE). Aceste materiale oferă protecție în timp ce reduc greutatea totală a sistemului de protecție, făcând-o mai confortabilă pentru purtători.

O altă tendință este proiectarea de sisteme de protecție care să permită mobilitatea și confortul mult mai mare pentru purtător.

Sistemele de blindaje modulare au devenit mai utilizate, permițând utilizatorilor să-și personalizeze protecția în funcție de misiunea sau nivelul de amenințare.

Pe lângă protecția balistică, modelele de sisteme de protecție individuală s-au concentrat pe atenuarea efectelor exploziilor și fragmentării de la dispozitivele explozive. Aceasta include dezvoltarea de materiale și modele rezistente la explozie pentru a reduce riscul de leziuni cerebrale traumatice.

1.9. Direcții de cercetare

Această teză de doctorat are ca obiectiv studiul unor panouri balistice pe bază de țesătură din fibre aramidice, stratificate, și să analizeze comportarea la impact prin simulare cu ajutorul metodei elementelor finite și prin testare cu un singur tip de proiectil (proiectil de 9 mm FMJ).

Pentru această teză direcțiile de cercetare sunt avute în vedere următoarele:

- studiul influenței numărului de straturi asupra răspunsului la impact balistic cu glonț de 9 mm FMJ,
- modelarea numerică pentru a evalua comportarea unui panou la nivel mezo (la nivel de fir, considerat izotrop și omogen), pentru a reduce semnificativ experimentele și costurile de proiectare,
- testarea în condiții de laborator de tragere a panourilor realizate pentru acest studiu,
- studiul proceselor de cedare la diferite niveluri (macro, mezo și micro) a panourilor și straturilor componente,
- s-au realizat pe baza unui semifabricat de ultima generație de la firma Teijin Aramid Olanda (acesta având încă foarte puține raportări experimentale privind protecția balistică de diferite tipuri).

În condițiile actuale, din lume și din țară, protecția personalului din armată și din instituțiile statului din domeniul poliției, justiției, jandarmeriei, serviciilor de informații, este importantă, iar rezultatele cercetărilor sunt necesare pentru omologarea produselor, pentru soluții novatoare care să includă ultimele realizări în domeniu.

Capitolul 2. Organizarea tezei

Figura de mai jos arată sintetic activitățile realizate pentru această temă de cercetare.

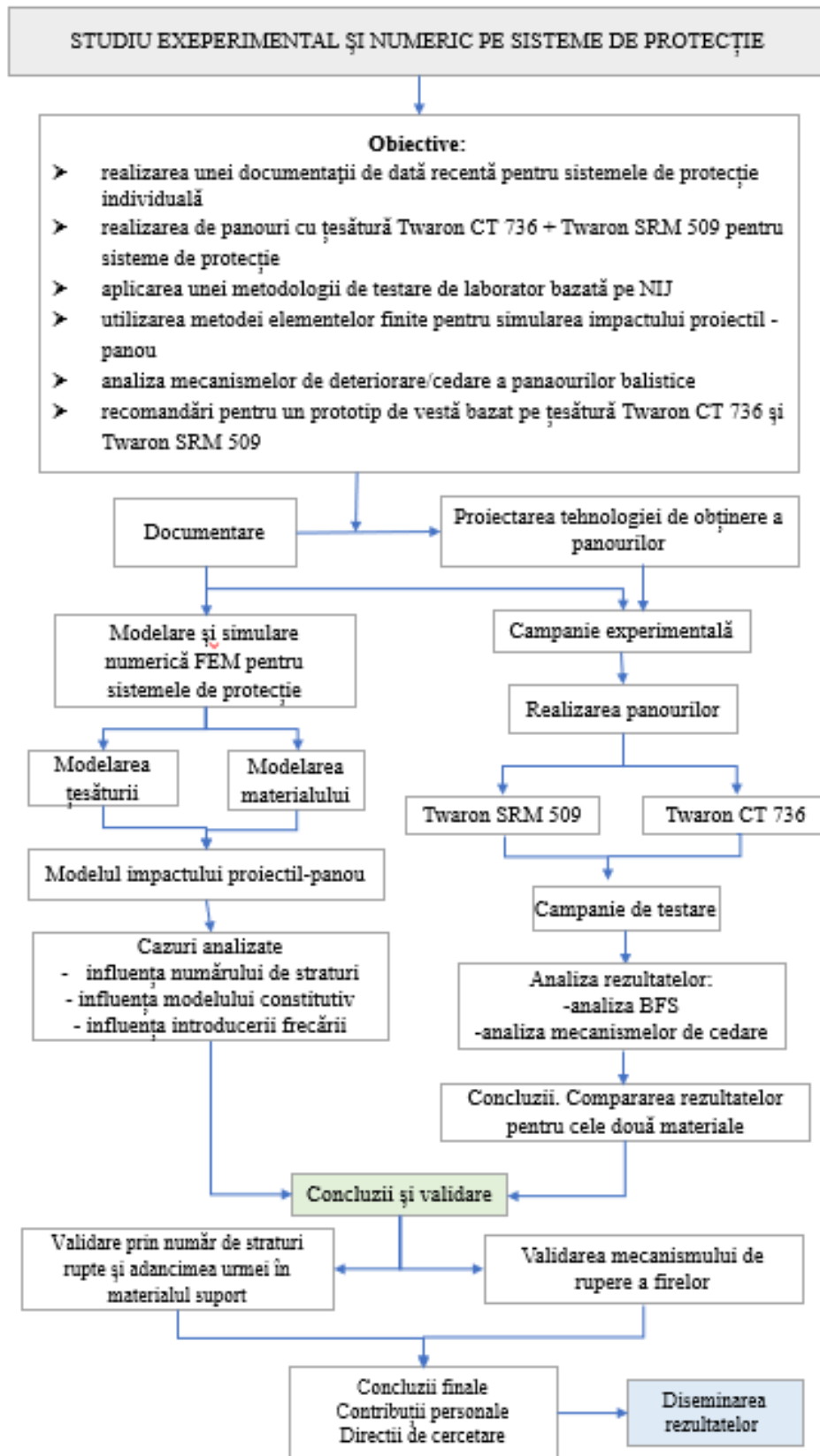


Fig. 2.1. Diagrama tezei

Capitolul 3. Simulări ale impactului proiectil - țintă

3.1. Introducere

Proiectarea și realizarea sistemelor de materiale de protecție poate fi accelerată și făcută mai rentabilă prin utilizarea diagramei de dezvoltare a materialelor de protecție ușoare care este dată în Figura 3.1. Procesul de proiectare și testare este înlocuită cu iterații rapide de modelare și simulare, cu evaluarea balistică utilizată selectiv pentru a verifica proiectele satisfăcătoare. Prin această diagramă se urmărește proiectarea de materiale de protecție superioare și de a accelera implementarea lor în sistemele de blindaj. Acest proces de proiectare pentru armură oferă o legătură îmbunătățită și mai strânsă dintre partea de cercetare și dezvoltare a materialelor și partea de modelare și simulare, ceea ce are ca rezultat o reducere semnificativă a timpului pentru dezvoltarea de noi sisteme de protecție.

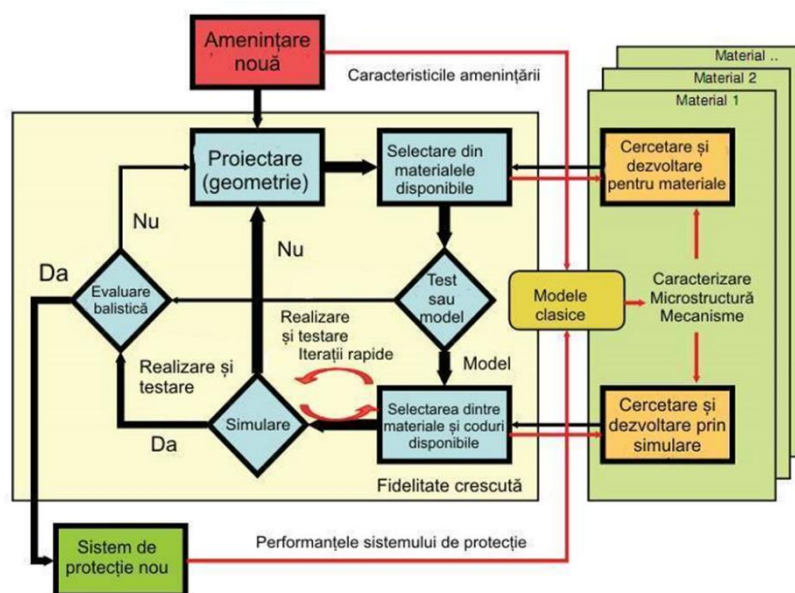


Figura 3.1. Diagrama de proiectare, simulare, testare și realizare a unui sistem de protecție [National Research Council. Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications; The National Academies Press: Washington, DC, USA, 2011. <https://doi.org/10.17226/13157>, <http://nap.edu/13157>]

3.2. Propagarea undelor de tensiune în fire și țesături

În timpul impactului, proiectilul creează o deviere transversală în firele primare, în timp ce undele de solicitare longitudinală se propagă de la punctul de impact de-a lungul axelor firelor principale la viteza sunetului. Numărul firelor de urzeală /bătătură lovite de proiectil face procesul de absorbție a energiei țesăturii foarte complicat deoarece proiectilul poate să lovească pe fire, întrețeseri sau pe spațiul dintre fire. Când proiectilul lovește doar câteva fire pe zona afectată, rezultatele vor fi foarte complicate.

3.2.1. Propagarea tensiunilor într-un fir sub impact balistic

Investigația asupra comportamentului de impact transversal al unei singure fibre se face pentru a înțelege diferitele comportamente de impact ale țesăturilor. Atunci când un singur fir este supus impactului proiectilului, în fire s-a format o deviere transversală în formă conică cu timpul. Acest lucru se datorează faptului că firul este forțat să avanseze împreună cu proiectilul, în timp ce în același timp o undă longitudinală se acumulează treptat în fir și se propagă rapid de centrul de impact, la viteza sunetului, din material, călătorind în direcția axei firului. În fața undei longitudinale, materialul firului este pus în mișcare spre interior spre centrul impactului datorită întinderii. Materialul care curge în interior continuă să alimenteze devierea transversală în avans până când deformarea firului atinge limita sa de rupere.

3.2.2. Propagarea tensiunilor într-o țesătură sub impact balistic.

Când proiectilul lovește un singur strat de țesătură, aproape instantaneu, tensiunea este transferată într-o zonă circulară a țesăturii în zona de contact direct. Aceasta este urmată imediat de începutul unei unde longitudinale care crește radial și de o undă transversală mai lentă care crește pentru a forma un con în creștere care are proiectilul în vârf.

Energia pierdută de proiectil și absorbită de panoul de țesătură depinde de diverse mecanisme de deteriorare și absorbție a energiei:

- extragerea firului,
- deformarea plastică a fibrelor, ruperea fibrelor [David,2009], [Sadegh,2012],
- tipul de fibră,
- densitatea liniară a firului,
- tipul țesăturii,
- finisarea suprafeței țesăturii,
- dimensiunile eșantionului țesăturii,
- numărul de straturi de țesătură,
- dispunerea straturilor [Zhang, 2014], [Tabiei, 2008], [Hasanzadeh, 2014].

3.3. Influența modelului constitutiv de material pentru firele aramidice

3.3.1. Introducere

Înțelegerea modului în care variația limitei de curgere a fibrelor aramidice influențează modul de deformare în cadrul unui panou de protecție balistică este importantă pentru optimizarea designului acestuia pentru sistemele de protecție individuală.

3.3.2. Metodologia simulărilor numerice pentru analiza influenței modelului constitutiv de material pentru firele aramidice

O clasare foarte utilă a modelelor utilizate în simularea impactului este dată în [Grujicic, 2016], autorul subliniind avantajele și limitările fiecărui nivel.

În ultimii ani, s-a pus un accent din ce în ce mai accentuat pentru a studia comportamentul țesăturilor aramidice la scara filamentului pentru a investiga diferitele

mecanisme de deformare și disipare a energiei, la scară micro [Sockalingam, 2017]. Încă mai există un decalaj mare între filament-fir și solzi de țesături.

Pe baza imaginii din Figura 3.2 secțiunea transversală a firului poate fi reprezentată realist prin model lenticular și calea undei poate fi considerată ca fiind construită din două arce lenticulare.

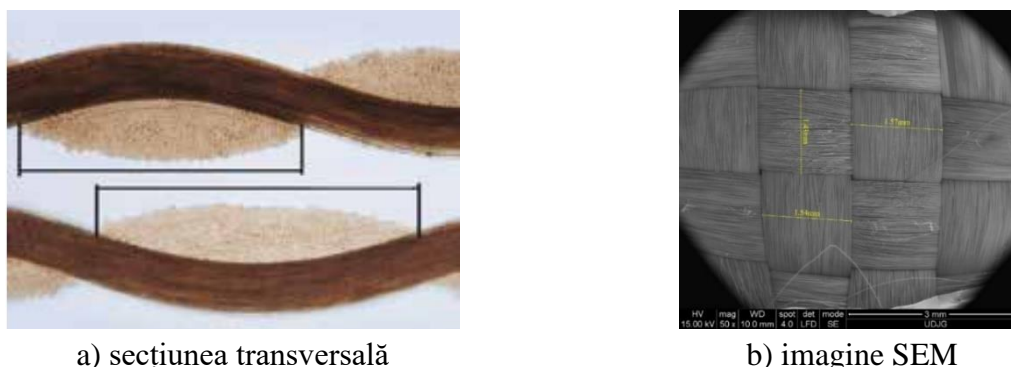
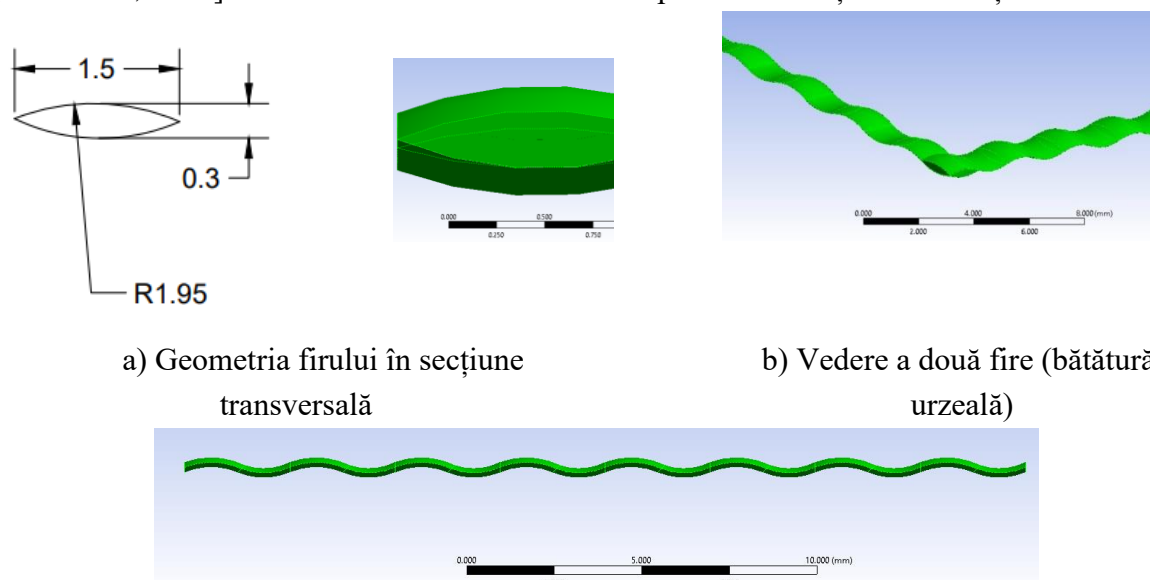


Figura 3.2. Secțiunea transversală și longitudinală a firului de țesătură Twaron [Catalog Teijin Ballistics Material Handbook QMB1.1-20181001EN]

Geometria modelului include dimensiunile proiectilului și ale țesăturii (Figura 3.4). Deoarece nivelul modelului este mezo, geometria firelor este dată în Figura 3.3 foarte aproape de firul real. Secțiunea transversală a firului are forma unei lentile duble convexe, cu coarde de $R=1,95$ mm și o lungime de 1,5 mm. Grosimea firului este de 0,3 mm. Secțiunile transversale ale firelor de urzeală și bătătură au aceeași secțiune. Această formă este apropiată de forma lenticulară obținută prin utilizarea elipsei de putere generalizate, cu exponent $n=2$ [Endruweit, 2018] modelarea formei firului fiind importantă în obținerea unei țesături realiste.



a) Geometria firului în secțiune transversală

b) Vedere a două fire (bătătură și urzeală)

c) vedere 3D în secțiune longitudinală

Figura 3.3. Geometria firului

Modelul de lentilă a fost propus tot de [Grujicic, 2009], dar cu celule-unitate, care pot fi modificate în funcție de arhitectura firelor în țesătură.

Condițiile inițiale utilizate sunt:

➤ $v_0 = 420$ m/s, acesta este un nivel care caracterizează viteza FB2 [EN 1063:1999], [EN 1522:2004], [EN 1523:2004],

➤ distanța dintre vârful proiectilului și primul fir este de 0,03 mm.

Condițiile la limită implică faptul că fiecare fir are secțiuni transversale laterale fixe.

Condițiile de contact iau în considerare frecarea sunt:

➤ pentru contactul fir-fir, coeficientul de frecare $COF = 0,25$ și se considera constant,

➤ pentru contact fir-proiectil, $COF = 0,25$.

Modelul folosește formula Lagrangian pentru a simula comportamentul atât al proiectilului, cât și al panoului țesut 1/1. Ecuația liniară de stare (EOS) este aplicată pentru a descrie răspunsul materialului în diferite stări sau condiții.

Modelul încorporează atât geometria proiectilului, cât și geometria panoului țesut 1/1.

Comportamentul materialului firului este descris folosind un model biliniar.

Criteriul de cedare pentru fir este EPS. Criteriul de cedare pentru cămașa proiectilului este Johnson Cook și pentru miezul proiectilului este EPS.

Valorile parametrilor din ecuațiile componentelor proiectilului sunt prezentate în Tabelul 3.2 și Tabelul 3.3. În Tabelul 3.1 sunt date valorile parametrilor firului.

În Figura 3.5 este dată zona de impact, firele principale și firele secundare.

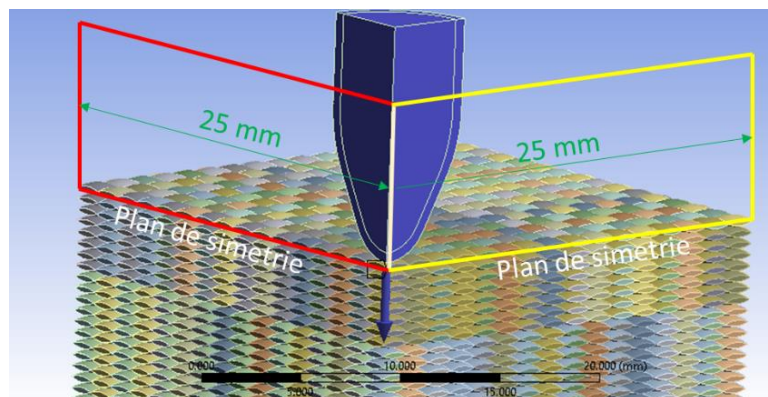


Figura 3.4. Dimensiunea panoului cu două plane de simetrie

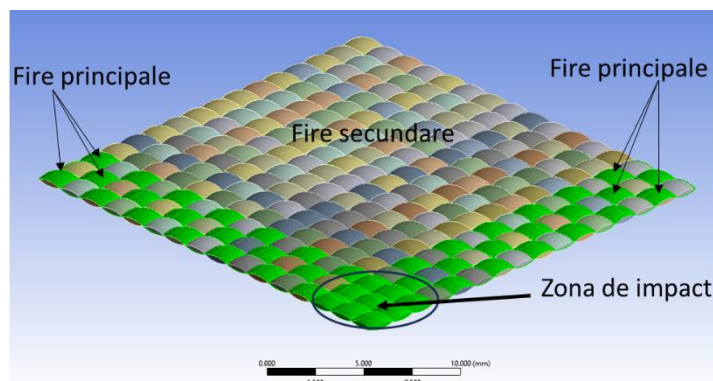


Figura 3.5. Firele principale, firele secundare și zona de impact

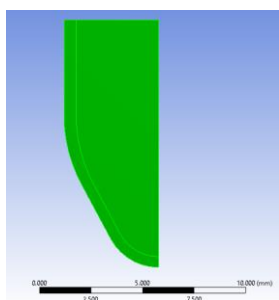


Figura 3.6. Geometria proiectilului

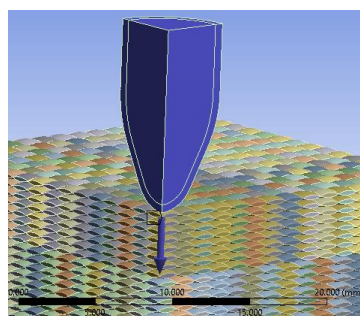


Figura 3.7. Geometria firelor și a proiectilului

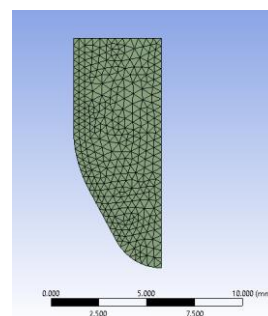


Figura 3.8. Discretizarea proiectilului

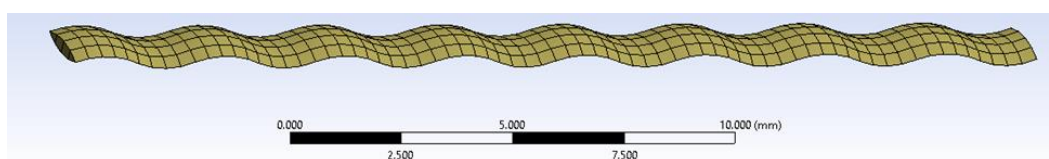


Figura 3.9. Discretizarea firului

Tabelul 3.1. Proprietățile firului [Pirvu, 2018], [Yang, 2019] [Pirvu, 2014], [Titire, 2023].

Proprietate	Valuare				Unitate de măsură
	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4	
Densitate	1440				$kg\ m^{-3}$
Modulul lui Young	90000				MPa
Coeficientul Poisson	0,35				-
Modulul în volum	1×10^{11}				Pa
Modulul la forfecare	$3,33333 \times 10^{10}$				Pa
Temperatură	22				$^{\circ}C$
Model cu întărire biliniar izotropă					
Limita de curgere inițială	2000	2500	3000	3600	MPa
Modulul tangent	1000				MPa
Temperatura	22				$^{\circ}C$
Deformația plastică la rupere	0,04				-

Tabelul 3.2. Proprietățile de material pentru cămașă proiectilului [Pirvu, 2014], [Ojoc, 2020], [Peroni, 2012]

Proprietate	Valuare				Unitate de măsură
	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4	
Densitate	8300				$kg\ m^{-3}$
Modulul lui Young	$1,17 \times 10^5$				MPa
Coeficientul Poisson	0,34				-
Modulul în volum	$1,2188 \times 10^{11}$				Pa
Modulul la forfecare	$4,3657 \times 10^{10}$				Pa
Temperatură	22				$^{\circ}C$
Model cu biliniar izotropă, cu durificare					
Limita de curgere inițială	70				MPa
Modulul tangent	1150				MPa
Temperatura	22				$^{\circ}C$
Deformația plastică la rupere	1				-

Tabelul 3.2. Proprietățile de material pentru miezul proiectilului
[López, 2016], [Peroni, 2012], [Mohotti, 2015].

Proprietate	Valoare				Unitate de măsură
	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4	
Densitate	11340				$kg\ m^{-3}$
Modulul lui Young	16000				MPa
Coeficientul Poisson	0,44				-
Modulul în volum	$4,4444 \times 10^{10}$				Pa
Modulul la forfecare	$5,5556 \times 10^{10}$				Pa
Temperatură	22				°C
Constante - modelul Johnson_Cook					
Limita de curgere inițială	24				MPa
Constantă de întărire	300				MPa
Exponent pentru întărire	1				°C
Constanta vitezei de deformare	0,1				-
Exponentul înmuierii termice	1				
Temperatura de topire	760				K
Viteza de deformare plastică (/sec)	1				
Deformația plastică la rupere	0,75				

3.3.3. Analiza rezultatelor privind analiza influența modelului constitutiv de material pentru firele aramidice

Pentru a obține o imagine clară asupra impactului variațiilor limitelor de curgere ale firului aramidic asupra comportamentului panoului de țesătură în timpul impactului cu un proiectil (9 mm FMJ), am efectuat simulări numerice pentru patru valori diferite ale acestei limite de curgere. Aceste valori au fost considerate pentru a reprezenta patru variante distincte de testare, astfel:

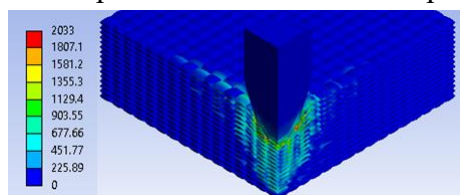
- **Varianta 1:** am considerat o limită de curgere a firului aramidic de 2000 MPa,
- **Varianta 2:** am considerat o limită de curgere a firului aramidic de 2500 MPa,
- **Varianta 3:** am considerat o limită de curgere a firului aramidic de 3000 MPa,
- **Varianta 4:** am considerat o limită de curgere a firului aramidic de 2000 MPa.

Următoarele imagini din simulări au, fiecare, scara lor de culoare pentru evidențierea distribuției tensiunii echivalente.

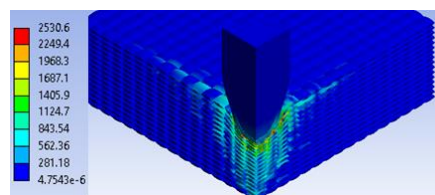
În Figura 3.10 este dată distribuția tensiunii von Mises pentru panoului format din 16 straturi de țesătură, varianta 1 simulată, cu limita de curgere 2000 MPa, la momentul de timp, $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s (Figura 3.10a), și pentru momentul de timp $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s (Figura 3.25b). Primul moment al impactului, $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s, înregistrează o distribuția a tensiunii von Mises sub proiectil, în zona de impact, cu o propagare a undelor de tensiune von Mises prin grosime, până la ultimul strat (Figura 3.10a). Ultimul strat la acest moment de timp, $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s, nu este solicitat. La momentul, $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s, se înregistrează o valoare a tensiunii von Mises de 1577 MPa. La momentul de timp, $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s, toate straturile sunt rupte (Figura 3.10b).

În Figura 3.11 este dată distribuția tensiunii von Mises pentru panoului format din 16 straturi de țesătură, varianta 2, simulată cu limita de curgere 2500 MPa, la momentul de timp, $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s, și pentru momentul de timp $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s. Primul moment al

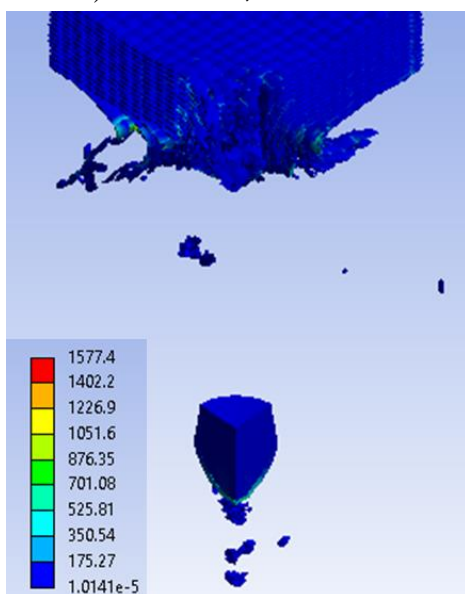
impactului, $t = 7,5 \times 10^{-6} s$, înregistrează o distribuția a tensiunii von Mises sub proiectil, în zona de impact, cu o propagare a undelor de tensiune pe jumătate din lungimea unui fir principal, pe primele două straturi și prin grosime, până la ultimul strat (Figura 3.26a). Ultimul strat la acest moment de timp, $t = 7,5 \times 10^{-6} s$, nu este solicitat. Ultimul moment al simulării înregistrează o valoare a tensiunii von Mises de 2229 MPa, La acest moment de timp, $t = 1,5 \times 10^{-4} s$, toate straturile sunt rupte (Figura 3.26b) și firele distruse ale acestor straturi prezintă o încovoieră puternică datorată vitezei de penetrare a proiectilului. Proiectilul în acest caz prezintă o deformare mai puternică.



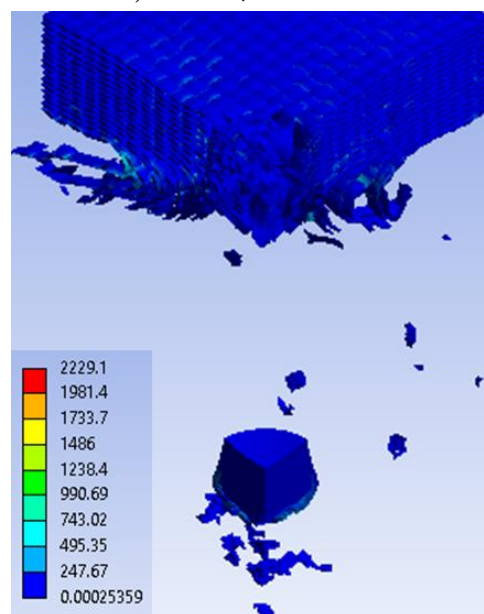
a) $t = 7,5 \times 10^{-6} s$



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



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



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

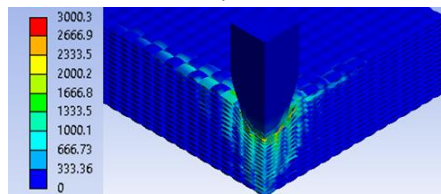
Figura 3.10. Distribuția de tensiunii von Mises (în MPa) pentru panoul cu 16 straturi de țesătura, varianta 1, limita de curgere 2000 MPa

Figura 3.11. Distribuția de tensiunii von Mises (în MPa) pentru panoul cu 16 straturi de țesătura, varianta 2, limita de curgere 2500 MPa

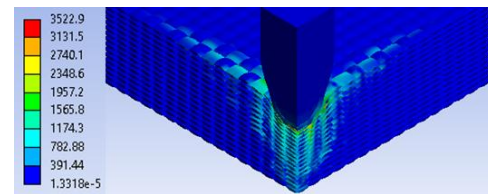
În Figura 3.12 este dată distribuția tensiunii von Mises pentru panoul format din 16 straturi de țesătură, varianta 3, cu limita de curgere 3000 MPa la momentul de timp, $t = 7,5 \times 10^{-6} s$ și pentru momentul de timp $t = 1,5 \times 10^{-4} s$, care reprezintă ultimul moment al simulării. Durata simulării impactului dintre proiectilul de 9 mm FMJ și ținta formată din 16 straturi de țesătură este de $t = 1,5 \times 10^{-4} s$. Primul moment al impactului, $t = 7,5 \times 10^{-6} s$, înregistrează o distribuție a tensiunii von Mises sub proiectil, în zona de impact, cu o propagare a undelor de tensiune prin grosime, până la stratul 15 (Figura 3.12a). Ultimul strat la acest moment de timp, $t = 7,5 \times 10^{-6} s$, nu este solicitat. Ultimul moment al simulării

înregistrează o valoare a tensiunii echivalente de 1854 MPa, valoare înregistrată în zona unde firele distruse sunt încovoiate puternic. La acest moment de timp, $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s, toate straturile sunt rupte (Figura 3.12b).

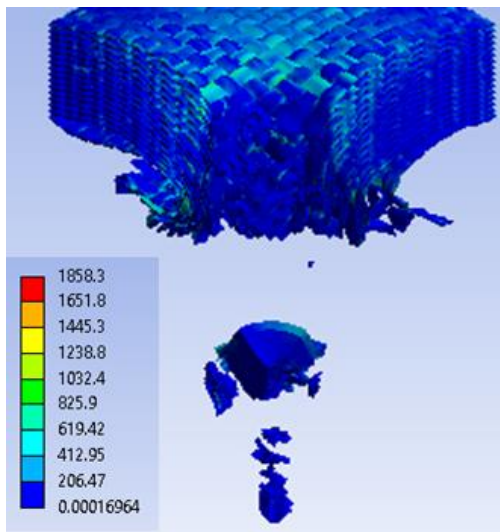
În Figura 3.13 este dată distribuția tensiunii von Mises pentru panoul cu 16 straturi de țesătură, varianta 4, cu limita de curgere 3600 MPa la momentul de timp, $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s, și pentru momentul de timp $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s. Durata simulării impactului dintre proiectilul de 9 mm FMJ și ținta formată din 16 straturi de țesătură, varianta 4, este de $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s. Primul moment al impactului, $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s, înregistrează o distribuția a tensiunii von Mises sub proiectil, în zona de impact, cu o propagare a undelor de prin grosime, până la stratul 14-15 și o propagare a tensiunii von Mises pe direcția longitudinală a firelor principale pe primele două straturi (Figura 3.28a). Ultimul strat, la acest moment de timp, $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s, nu este solicitat. La acest moment de timp, $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s, proiectilul rămâne blocat în straturile de țesătură (Figura 3.28b).



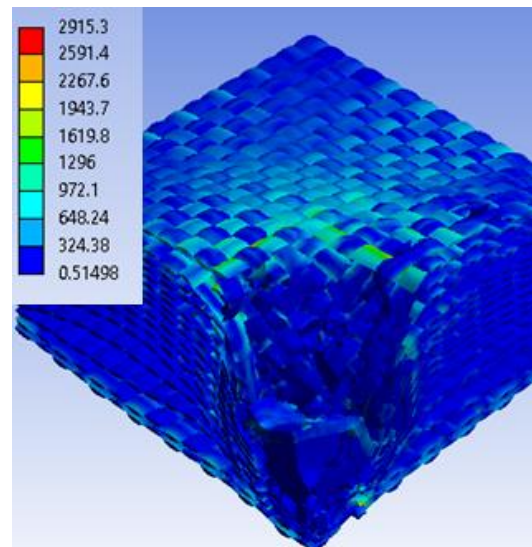
a) $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s



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



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



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

Figura 3.12. Distribuția de tensiunii von Mises (în MPa) pentru panoul cu 16 straturi de țesătura, varianta 3, limita de curgere 3000 MPa

Figura 3.13. Distribuția de tensiunii von Mises (în MPa) pentru panoul cu 16 straturi de țesătura, varianta 4, limita de curgere 3600 MPa

În Figura 3.14. este dată distribuția tensiunii von Mises panoului format din 32 straturi de țesătură, varianta 1, limita de curgere 2000 MPa la momentul de timp, $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s, care reprezintă primul moment al simulării și pentru momentul de timp $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s, care reprezintă ultimul moment al simulării. Durata simulării impactului dintre proiectilul de 9 mm

FMJ și ținta formată din 32 straturi de țesătură Twaron CT736 este de $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s. Primul moment al impactului, $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s, înregistrează o distribuția a tensiunii von Mises sub proiectil, în zona de impact, cu o propagare a undelor de prin grosime, pe primele 15 straturi (Figura 3.29a). Ultimile 17 straturi, la acest moment de timp, $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s, nu sunt sollicitate. Ultimul moment al simulării înregistrează o valoare a tensiunii echivalente de 1957 MPa. Ultimul moment de timp, $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s, înregistrează ruperea celor 32 de straturi ale panoului (Figura 3.29b).

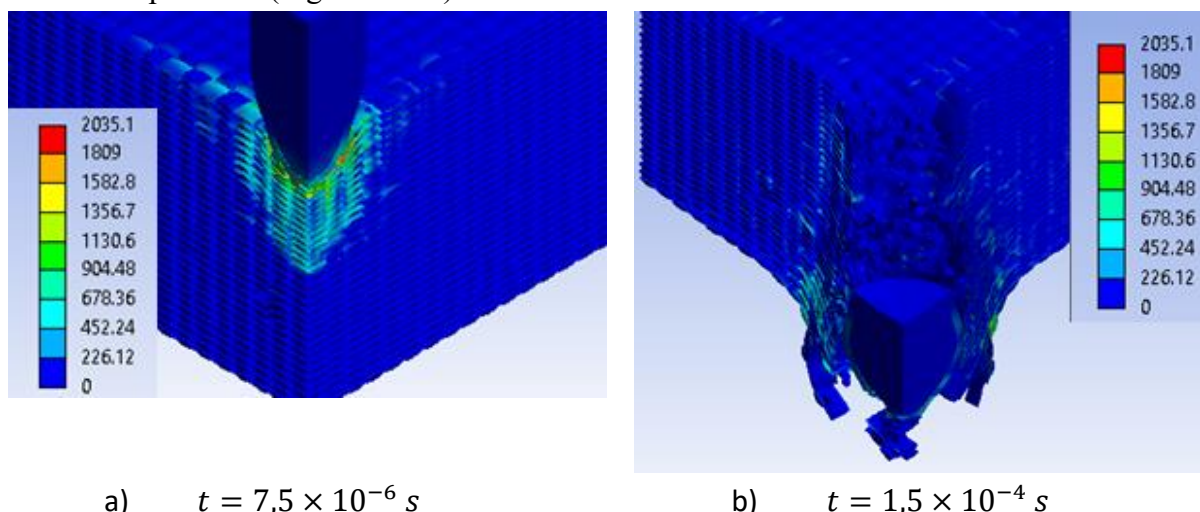


Figura 3.14. Distribuția de tensiunii von Mises (în MPa) pentru panoul cu 32 straturi de țesătura, varianta 1, limita de curgere 2000 MPa

În Figura 3.15 este dată distribuția tensiunii von Mises pentru panoul format din 32 straturi de țesătură, varianta 2, la momentul de timp, $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s și pentru momentul de timp $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s. Durata simulării impactului dintre proiectilul de 9 mm FMJ și ținta formată din 32 straturi de țesătură este de $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s. Primul moment al impactului, $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s, înregistrează o distribuția a tensiunii von Mises sub proiectil, în zona de impact, cu o propagare a undelor de tensiune prin grosime, pe primele 16 straturi (Figura 3.15a). Ultimile 16 straturi, la acest moment de timp, $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s, nu sunt sollicitate. Proiectilul pentru această variantă testată nu penetrează țesătura, prezintă o penetrare parțială (Figura 3.15b).

Proiectilul prezintă deformări semnificative în cazul variantei 2 simulate a panoului cu 32 straturi de țesătură, care prezintă o penetrare parțială. Acest lucru include schimbări în forma și dimensiunile sale, împingerea/îndoirea fragmentelor proiectilului și chiar ruperea acestuia în bucăți mai mici. Această deformare afectă în mod semnificativ capacitatea proiectilului de a pătrunde în adâncime în materialul țintă și de a provoca deteriorarea acestuia.

După ce proiectilul a pătruns parțial și a rămas prins în materialul țintă, o parte din energia cinetică a proiectilului rămâne. Această energie cinetică reziduală contribuie la deformarea și deteriorarea ulterioară a materialului țintă și provoacă fragmentarea materialului în jurul proiectilului.

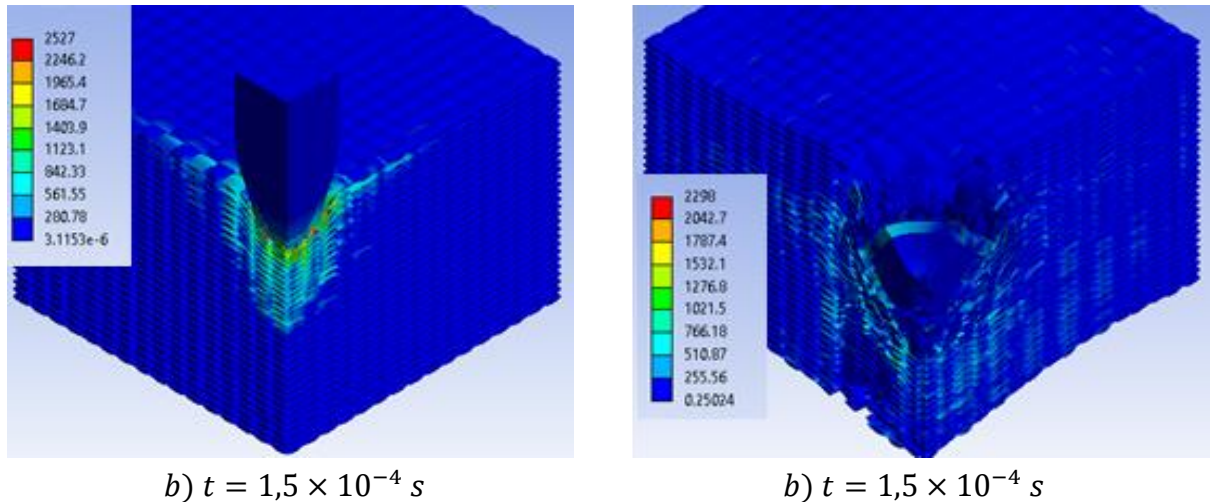


Figura 3.15. Distribuția de tensiunii von Mises (în MPa) pentru panoul cu 32 straturi de țesătura, varianta 2, limita de curgere 2500 MPa

În Figura 3.16 este dată distribuția tensiunii von Mises a panoului format din 32 straturi de țesătură, varianta 3, la momentul de timp, $t = 7,5 \times 10^{-6} \text{ s}$, care reprezintă primul moment al simulării și pentru momentul de timp $t = 1,5 \times 10^{-4} \text{ s}$, care reprezintă ultimul moment al simulării. Durata simulării impactului dintre proiectilul de 9 mm FMJ și ținta formată din 32 straturi de țesătură este de $t = 1,5 \times 10^{-4} \text{ s}$. Primul moment al impactului, $t = 7,5 \times 10^{-6} \text{ s}$, înregistrează o distribuția a tensiunii sub proiectil, în zona de impact, cu o propagare a undelor de prin grosime, pe primele 17 straturi (Figura 3.31a). Ultimile 15 straturi, la acest moment de timp, $t = 7,5 \times 10^{-6} \text{ s}$, nu sunt solicitate. Ultimul moment al simulării înregistrează o valoare a tensiunii de 1640 MPa. Proiectilul, pentru această variantă simulată, nu penetrează țesătura, prezintă o penetrare parțială (Figura 3.16b).

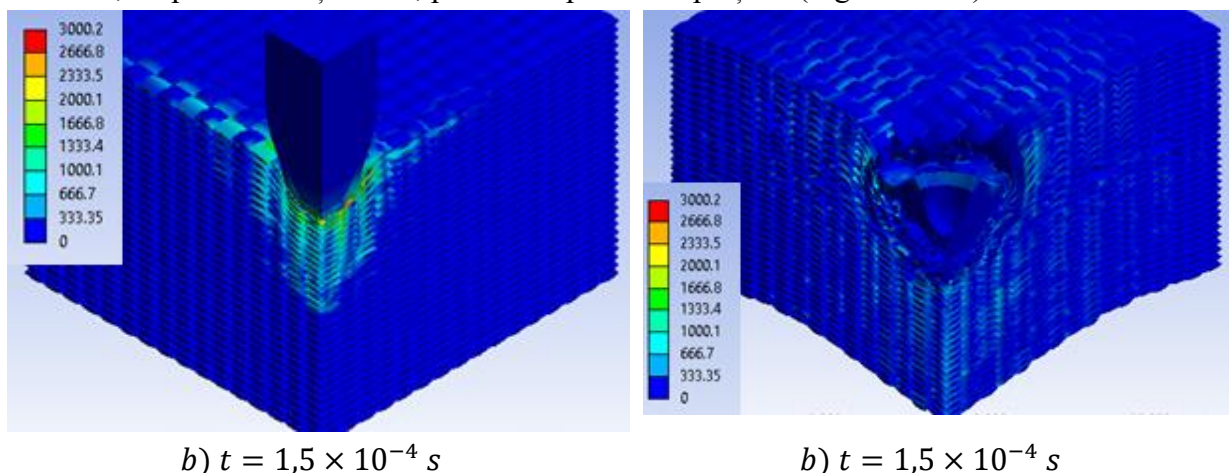


Figura 3.16. Distribuția de tensiunii von Mises (în MPa) pentru panoul cu 32 straturi de țesătura, varianta 3, limita de curgere 3000 MPa

În Figura 3.17 este dată distribuția tensiunii von Mises a panoului format din 32 straturi de țesătură, varianta 4, la momentul de timp, $t = 7,5 \times 10^{-6} \text{ s}$, care reprezintă primul moment al simulării și pentru momentul de timp $t = 1,5 \times 10^{-4} \text{ s}$, care reprezintă ultimul

moment al simulării. Durata simulării impactului dintre proiectilul de 9 mm FMJ și ținta formată din 32 straturi de țesătură este de $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s. Primul moment al impactului, $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s, înregistrează o distribuția a tensiunii sub proiectil, în zona de impact, cu o propagare a undelor de prin grosime, pe primele 16 straturi (Figura 3.17a). Ultimile 16 straturi, la acest moment de timp, $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s, nu sunt solicitate. Ultimul moment al simulării înregistrează o valoare a tensiunii de 2720 MPa. Proiectilul, pentru această variantă simulată, nu penetrează țesătura, prezintă o penetrare parțială (Figura 3.17b).

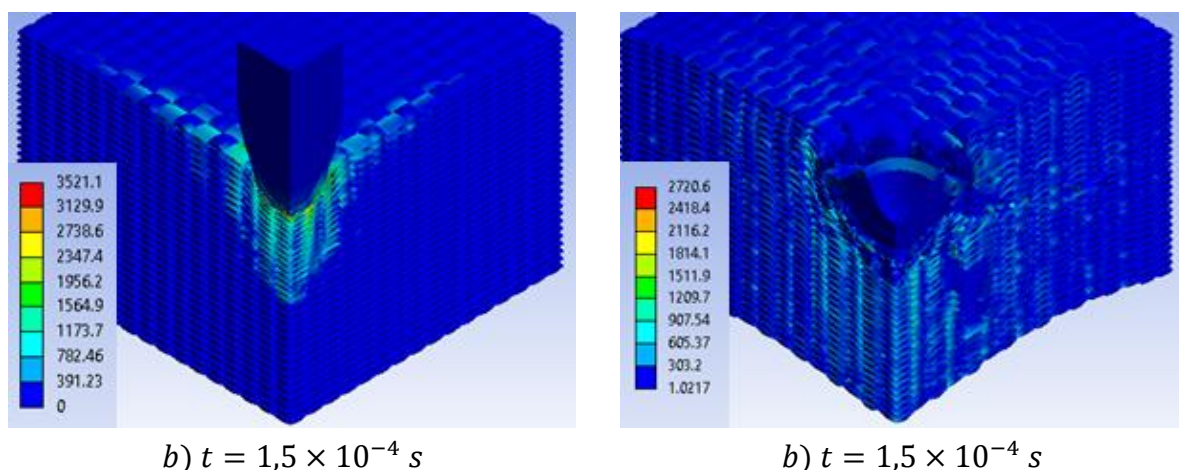


Figura 3.17. Distribuția de tensiunii von Mises (în MPa) pentru panoul cu 32 straturi de țesătură, varianta 4, limita de curgere 3600 MPa

3.3.4. Concluzii privind analiza influența modelului constitutiv de material pentru firele aramidice

Această analiză a avut ca scop evaluarea influenței limitelor de curgere ale materialului asupra simulărilor balistice pentru diferite probe stratificate, păstrând celelalte proprietăți ale materialelor constante.

Panourile formate din 16 straturi de țesătură, modelate în următoarele variante pot fi discutate astfel:

- Varianta 1 (limita de curgere 2000 MPa a firului) a rulat o simulare corectă matematic, dar nu este realistă pentru că nu a reușit să satisfacă criteriile de validare (numărul de straturi rupte și aspectul comparativ cu cel real, obținut din testare în laborator),
- Varianta 2 (limita de curgere 2500 MPa a firului) a rulat o simulare corectă matematic, realistă pentru că a reușit să satisfacă criteriile de validare (numărul de straturi rupte și aspectul comparativ cu cel real, obținut din testare în laborator),
- Varianta 3 (limita de curgere 3000 MPa a firului) a rulat o simulare corectă matematic, realistă pentru că a reușit să satisfacă criteriile de validare (numărul de straturi rupte și aspectul comparativ cu cel real, obținut din testare în laborator),

➤ Varianta 4 (limita de curgere 3600 MPa a firului) a rulat o simulare corectă matematic, dar nu este realistă pentru că nu a reușit să satisfacă criteriile de validare (numărul de straturi rupte și aspectul comparativ cu cel real, obținut din testare în laborator).

Panourile formate din 32 straturi de țesătură, modelate în următoarele variante pot fi discutate astfel:

Varianta 1 (limita de curgere 2000 MPa): Simularea este corectă, dar nu este realistă.

➤ Varianta 1 (limita de curgere 2000 MPa a firului) a rulat o simulare corectă matematic, dar nu este realistă pentru că nu a reușit să satisfacă criteriile de validare (numărul de straturi rupte și aspectul comparativ cu cel real, obținut din testare în laborator),

➤ Varianta 2 (limita de curgere 2500 MPa a firului) a rulat o simulare corectă matematic, realistă pentru că a reușit să satisfacă criteriile de validare (numărul de straturi rupte și aspectul comparativ cu cel real, obținut din testare în laborator),

➤ Varianta 3 (limita de curgere 3000 MPa a firului) a rulat o simulare corectă matematic, realistă pentru că a reușit să satisfacă criteriile de validare (numărul de straturi rupte și aspectul comparativ cu cel real, obținut din testare în laborator)

➤ Varianta 4 (limita de curgere 3600 MPa a firului) a rulat o simulare corectă matematic, dar nu este realistă pentru că nu a reușit să satisfacă criteriile de validare (numărul de straturi rupte și aspectul comparativ cu cel real, obținut din testare în laborator).

Rezultatele obținute indică faptul că alegerea limitei de curgere a materialului firului este esențială în simulările balistice. O limită de curgere prea scăzută sau prea mare poate compromite rezultatele realiste ale simulărilor. Variantele cu limite de curgere de 2500 MPa și 3000 MPa s-au dovedit a oferi simulări corecte și realiste, potrivite pentru aplicațiile sistemelor de protecție balistică. Această analiză oferă îndrumări valoroase pentru dezvoltarea ulterioară a simulărilor balistice cu materialul specific al țesăturii aramidice.

3.4. Influența introducerii frecării în modelul de impact proiectil - țintă

3.4.1. Introducere

Frecarea dintre material și proiectil poate „opri” sau încetini în mod eficient proiectilul. Acesta este unul dintre mecanismele prin care sistemul de protecție rezistă la penetrare. Combinația dintre rezistența țesăturii, capacitatea sa de a se deforma sau întinde și forțele de frecare care acționează asupra proiectilului contribuie colectiv la oprirea proiectilului.

Frecarea s-a dovedit a avea un efect semnificativ în determinarea performanței la impact balistic a țesăturilor. Au fost depuse multe eforturi pentru a investiga modul în care frecarea dintre fire afectează răspunsul la impact balistic al țesăturilor în ultimele decenii [Briscoe, 1992], [Chu, 2014], [Ha-Minh, 2012], [López-Gálvez, 2016], [Zhou, 2022]. Cu toate acestea, înțelegerea fundamentală a mecanismelor mecanice a modului în care funcționează frecarea între fire în panourile de țesături țesute încă trebuie stabilită și îmbunătățită. Este extrem de important să înțelegem modul în care frecarea afectează distribuția tensiunii și amplitudinea tensiunii în fire. Acest lucru este necesar în determinarea distrugerii firelor și a absorbției de energie într-un eveniment balistic.

3.4.2. Metodologia simulării privind influența introducerii frecării în modelul de impact

Pentru a studia influența frecării între fire în ceea ce privește performanța balistică a unui sistem de protecție, am utilizat simularea numerică a impactului dintre un proiectil de 9 mm FMJ și o țesătură stratificată din 24 straturi (țesătură cu dimensiunea de 50×25 mm), simulând două variante cu valori diferite ale coeficientului de frecare și o simularea fără frecare între fire și fără frecare între proiectil și fire.

În această analiză materialul este modelat la scară mezo în Ansys [Ansys], software-ul folosit pentru modelarea FE. Modelul folosește formula Lagrangian pentru a simula comportamentul atât al proiectilului, cât și al panoului țesut 1/1. Se folosește ecuația liniară de stare (EOS) este aplicată pentru a descrie răspunsul materialului în diferite stări sau condiții.

Modelul integrează atât geometria proiectilului, cât și cea a panoului de țesut 1/1.

Comportamentul materialului firului este descris folosind un model biliniar. Criteriul de cedare pentru fir este EPS. Criteriul de cedare pentru cămașa proiectilului este Johnson Cook și pentru miezul proiectilului este EPS.

Secțiunea transversală a firului poate fi reprezentată realist prin model lenticular și calea unde poate fi considerată ca fiind construită din două arce lenticulare. Lățimea medie a secțiunii transversale a firului din model este de 1,5 mm. Grosimea țesăturii este de 0,32 mm conform Catalogului producătorului [CT]. Proiectilul este 9 mm FMJ cu diametrul de 9 mm. Masa proiectilului 9 mm FMJ este de 8,00 g.

În Figura 3.18 este dat modelul geometric utilizat pentru analiza influenței valori coeficientului de frecare și în Figura 3.20 este dată discretizarea firului și în Figura 3.19 discretizarea panoului și a proiectilului.

Condițiile inițiale sunt:

- $v_0 = 420$ m/s, aceasta viteză caracterizează un nivel FB2 [EN 1063], [EN 1522:2004], [EN 1523:2004],

- distanța dintre vârful proiectilului și primul fir este de 0,03 mm.

Condițiile la limită implică faptul că fiecare fir are secțiuni transversale laterale fixe.

Condițiile de contact iau în considerare frecarea și s-au rulat următoarele variante:

- Varianta 1:
 - contact cu frecare:
 - pentru contactul fir-fir, coeficientul de frecare $COF=0,25$ și se consideră constant,
 - pentru contact fir-proiectil, $COF=0,25$,
- Varianta 2:
 - contact cu frecare:
 - pentru contactul fir-fir, coeficientul de frecare $COF=0,1$ și se consideră constant,
 - pentru contact fir-proiectil, $COF=0,1$
- Varianta 3:
 - contact fără frecare.

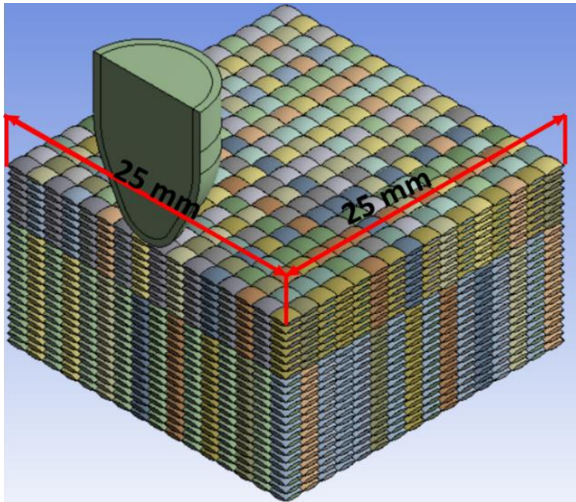


Figura 3.18. Modelul geometric utilizat pentru analiza influenței valorii coeficientului de frecare - vedere laterală

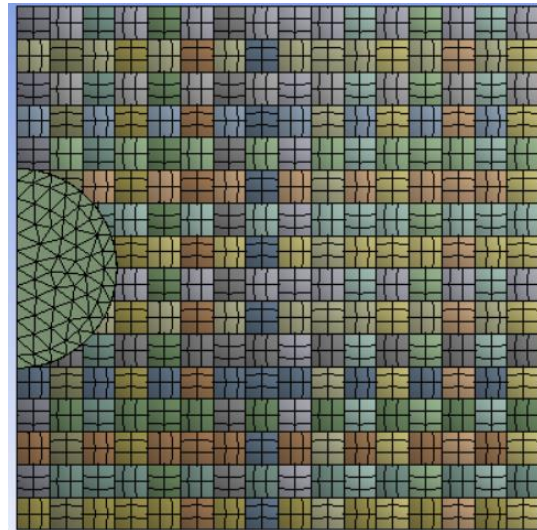


Figura 3.19. Discretizarea panoului și a proiectilului

Tabelul 3.4. Proprietățile de material ale firului (pentru analiza influenței valorii coeficientului de frecare) [Pirvu, 2018], [Yang, 2019]

Proprietate	Valoare	Unitate de măsură
Densitate	1440	$kg\ m^{-3}$
Modulul lui Young	90000	MPa
Coeficientul Poisson	0,35	-
Modulul în volum	1×10^{11}	Pa
Modulul la forfecare	$3,33333 \times 10^{10}$	Pa
Temperatură	22	$^{\circ}C$
Model cu întărire biliniară izotropă		
Limita de curgere inițială	3000	MPa
Modulul tangent	1000	MPa
Temperatura	22	$^{\circ}C$
Deformația plastică la rupere	0,04	-

Tabelul 3.5. Proprietățile de material pentru cămașa proiectilului (pentru analiza influenței valorii coeficientului de frecare) [Peroni, 2012]

Proprietate	Valoare	Unitate de măsură
Densitate	8300	$kg\ m^{-3}$
Modulul lui Young	$1,17 \times 10^5$	MPa
Coeficientul Poisson	0,34	-
Modulul în volum	$1,2188 \times 10^{11}$	Pa
Modulul la forfecare	$4,3657 \times 10^{10}$	Pa
Temperatură	22	$^{\circ}C$
Model cu întărire biliniară izotropă		
Limita de curgere inițială	70	MPa
Modulul tangent	1150	MPa
Temperatura	22	$^{\circ}C$
Deformația plastică la rupere	1	-

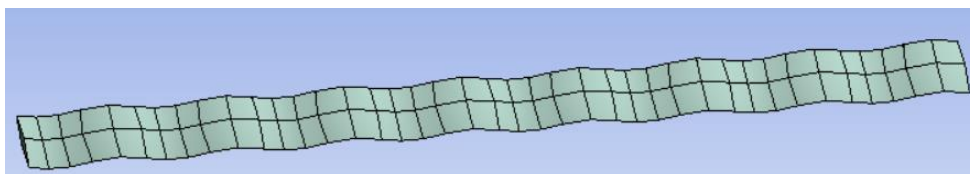


Figura 3.20. Discretizarea firului

Tabelul 3.6. Proprietățile de material pentru miezul proiectilului (pentru analiza influenței valori coeficientului de frecare) [López, 2016], [Peroni, 2012], [Mohotti, 2015].

Proprietate	Valoare	Unitate de măsură
Densitate	11340	$kg\ m^{-3}$
Modulul lui Young	16000	MPa
Coeficientul Poisson	0,44	-
Modulul în volum	$4,4444 \times 10^{10}$	Pa
Modulul la forfecare	$5,5556 \times 10^{10}$	Pa
Temperatură	22	$^{\circ}C$
Constante - modelul Johnson_Cook		
Limita de curgere inițială	24	MPa
Constantă de întărire	300	MPa
Exponent pentru întărire	1	$^{\circ}C$
Constanta vitezei de deformare	0,1	-
Exponentul înmuierii termice	1	
Temperatura de topire	760	K
Viteza de deformare plastică (/sec)	1	
Deformația plastică la rupere	0,75	

3.4.3. Analiza rezultatelor simulării privind influența introducerii frecării în modelul de impact balistic

Când un proiectil lovește o țesătură, acesta produce o deviere transversală în firele primare și generează unde de tensiune longitudinale care se propagă în material în jos pe axa firelor. Deviația transversală continuă până când solicitarea în punctul de impact atinge limita de rupere.

În Figura 3.21. este dată distribuția tensiunii von Mises a primului strat pentru patru momente de timp din timpul simulării a variantei simulată cu valoarea coeficientului de frecare de 0,25. Primul moment al impactului, $t = 7,5 \times 10^{-6} s$, înregistrează două fire rupte, unul în direcția urzelii și unul în direcția bătăturii, tensiunea von Mises este înregistrată pe firul principal central nerupt, din direcția urzelii (Figura 3.71). La acest prim moment, firele de sub proiectil sunt comprimate.

La momentul, $t = 1,5 \times 10^{-5} s$, sunt înregistrate 6 fire principale rupte, deci între primul moment al simulării și cel de-al doilea moment au fost rupte patru fire principale. Valoarea tensiunii von Mises este de 3016 MPa (Figura 3.21). Momentul de timp, $t = 2,25 \times 10^{-5} s$, arată o distrugere mai pronunțată a firelor din zona de impact, mai multe fragmente din fire au fost rupte (Figura 3.69). Ultimul moment al simulării, $t = 1,5 \times 10^{-4} s$, arată o revenire a țesăturii după ricoșarea proiectilului (Figura 3.21).

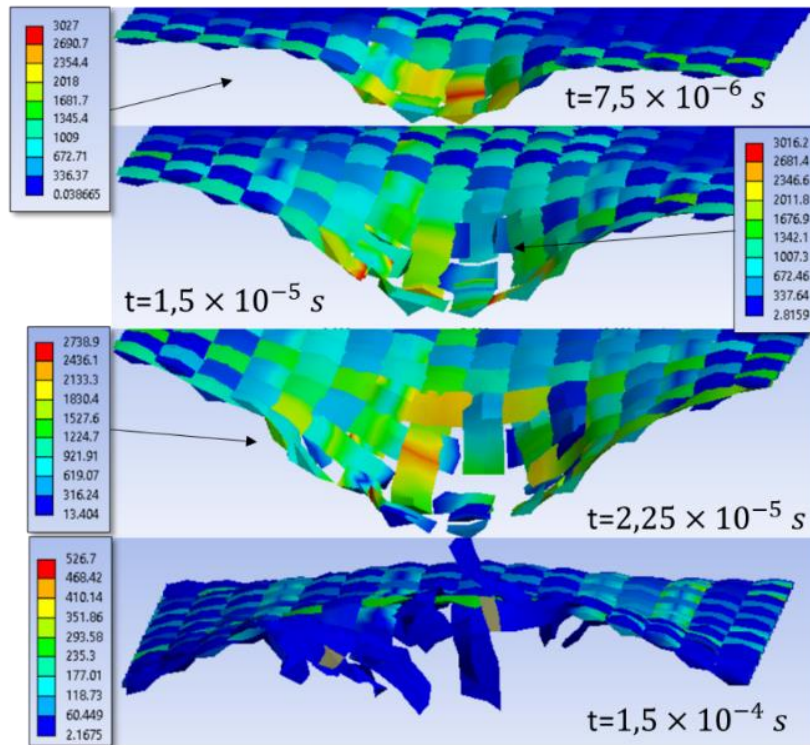


Figura 3.21. Distribuția de tensiuni von Mises pe stratul 1, la patru momente de timp.
Eșantion de 25 mm × 25 mm, $v_0 = 420 \text{ m/s}$, COF = 0,25

În Figura 3.22. este dată distribuția tensiunii von Mises a primului strat pentru trei momente de timp din timpul simulării, a variantei simulată cu valoarea coeficientului de frecare de 0,1. Moment de impact, $t = 7,5 \times 10^{-6} \text{ s}$, înregistrează două fire rupte, unul în direcția urzelii și unul în direcția bătăturii. La acest prim moment, firele de sub proiectil sunt comprimate.

Momentul de timp, $t = 3 \times 10^{-5} \text{ s}$, arată că firele principale au fost rupte. La acest moment se poate vedea cum proiectilul rotește primele firele secundare de lângă firele principale (Figura 3.22). La acest moment de timp firul secundar din direcția bătăturii prezintă o zonă cu concentratori de tensiune în zona unde este rotit de pătrunderea proiectilului în țesătură, ceea ce indică că urmează în acea zonă să fie rupt.

Ultimul moment al simulării, $t = 1,5 \times 10^{-4} \text{ s}$, arată o revenire a stratului, chiar dacă proiectilul distruge toate straturile țesăturii (Figura 3.22).

În Figura 3.23. este dată distribuția tensiunii von Mises a primului strat pentru trei momente de timp din timpul simulării a variantei simulată fără contact între fire (fără frecare). Primul moment al impactului, $t = 7,5 \times 10^{-6} \text{ s}$, înregistrează trei fire rupte, unul în direcția urzelii și două în direcția bătăturii, tensiunea von Mises este înregistrată pe firul principal central nerupt, din direcția urzelii (Figura 3.23). La acest prim moment, firele de sub proiectil sunt comprimate. Momentul de timp, $t = 3 \times 10^{-5} \text{ s}$, prezintă o distrugere mai pronunțată a firelor principale, precum și distrugerea firelor secundare de lângă firele principale (Figura 3.23). Zonele cu concentratori de tensiune sunt prezente pe firele din direcția bătăturii.

Ultimul moment al simulării, $t = 1,5 \times 10^{-4} s$, prezintă o revenire a stratului după ce proiectilul a fost oprit și ricoșat (Figura 3.23).

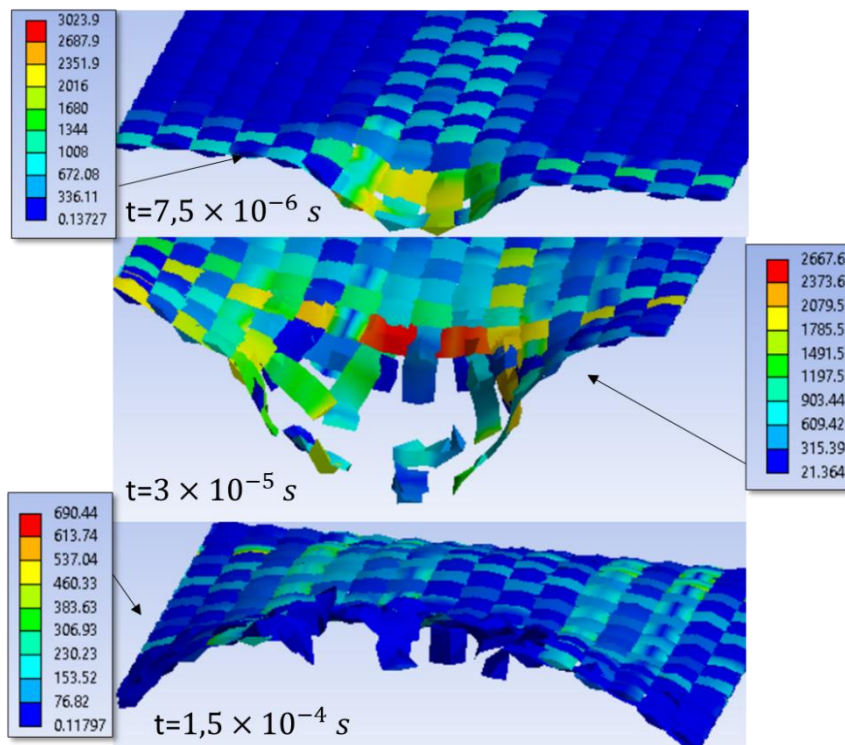


Figura 3.22. Distribuția de tensiuni von Mises (în MPa) pe stratul 1, la patru momente de timp. Eșantion de $50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, $v_0 = 420 \text{ m/s}$, $\text{COF} = 0,1$

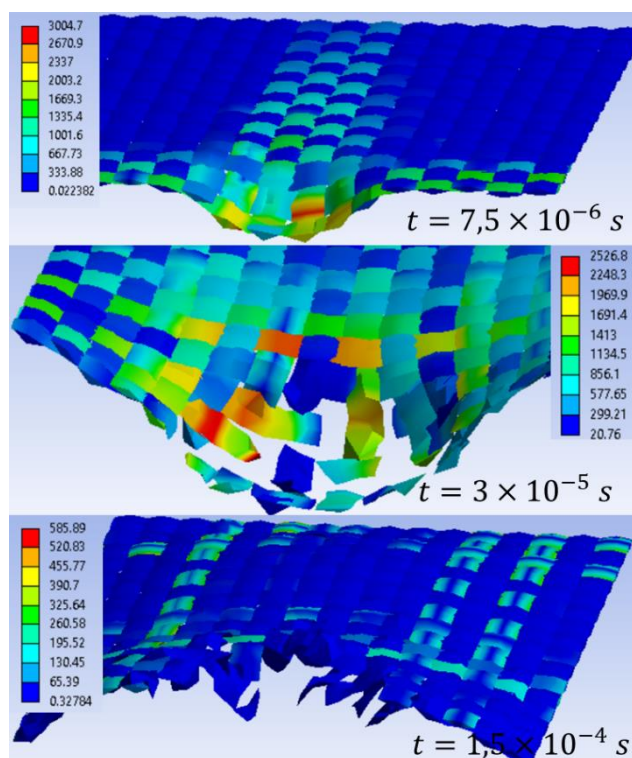


Figura 3.23. Distribuția de tensiuni von Mises (în MPa) pe stratul 1, la patru momente de timp. Eșantion de $50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, $v_0=420 \text{ m/s}$, fără frecare

În Figura 3.24. este dată distribuția tensiunii von Mises a ultimului strat pentru patru momente de timp din timpul simulării a variantei simulată cu valoarea coeficientului de frecare de 0,25. Primul moment al impactului, $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s, arată că firele acestui strat nu sunt sollicitate, valoarea tensiunii von Mises este de 54 MPa (Figura 3.24).

La momentul de timp, $t = 2,25 \times 10^{-5}$ s, valoarea tensiunii von Mises crește la 734 MPa, firele secundare din direcția bătăturii sunt sollicitate până în zona de încastrare (Figura 3.24). Firele din direcția urzelii care sunt sollicitate sunt și fire principale și fire secundar și nu sunt sollicitate până în zona de încastrare. Momentul de timp, $t = 7,5 \times 10^{-5}$ s, înregistrează o valoare a tensiunii von Mises de 2786 MPa, valoare înregistrată pe un fir secundar din direcția bătăturii. Ruperea firelor la acest nu este în zona de impact și sunt rupte firele principale din direcția bătăturii. Ultimul moment al simulării, $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s, arată cum stratul a început să-și revină după ricoșarea proiectilului, chiar dacă sunt rupte fire principale din direcția bătăturii (Figura 3.24).

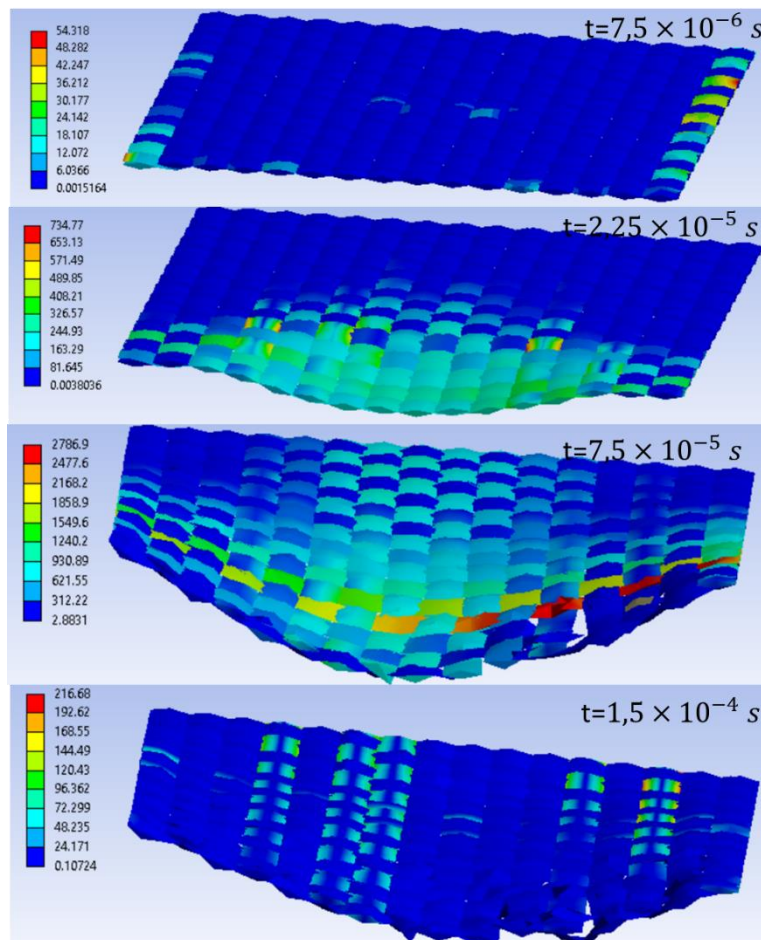


Figura 3.24. Distribuția de tensiuni von Mises (în MPa) pe stratul 24, la patru momente de timp. Eșantion de $50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, $v_0 = 420 \text{ m/s}$, $\text{COF} = 0,25$

În Figura 3.25. este dată distribuția tensiunii von Mises a ultimului strat pentru trei momente de timp din timpul simulării a variantei simulată cu valoarea coeficientului de frecare

de 0,1. Primul moment al impactului, $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s, arată că firele acestui strat nu sunt sollicitate, valoarea tensiunii von Mises este de 9,5 MPa (Figura 3.25).

Momentul de timp, $t = 7,5 \times 10^{-5}$ s, înregistrează ruperea firelor principale din direcția bătăturii și ruperea firului secundar de lângă aceste fire (Figura 3.25). Al doilea fir secundar din direcția bătăturii prezintă zone cu concentratori de tensiune în partea stângă a zonei de impact. Firele rupte nu sunt rupte în zona de impact, ruperea este în stânga zonei de impact (sunt rupte firele principale și un fir secundar) și în dreapta zonei de impact (sunt rupte firele principale din direcția bătăturii). Ultimul moment al simulării, $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s, al acestui strat, arată încovoierea puternică a firelor datorată penetrării totale a țesăturii.

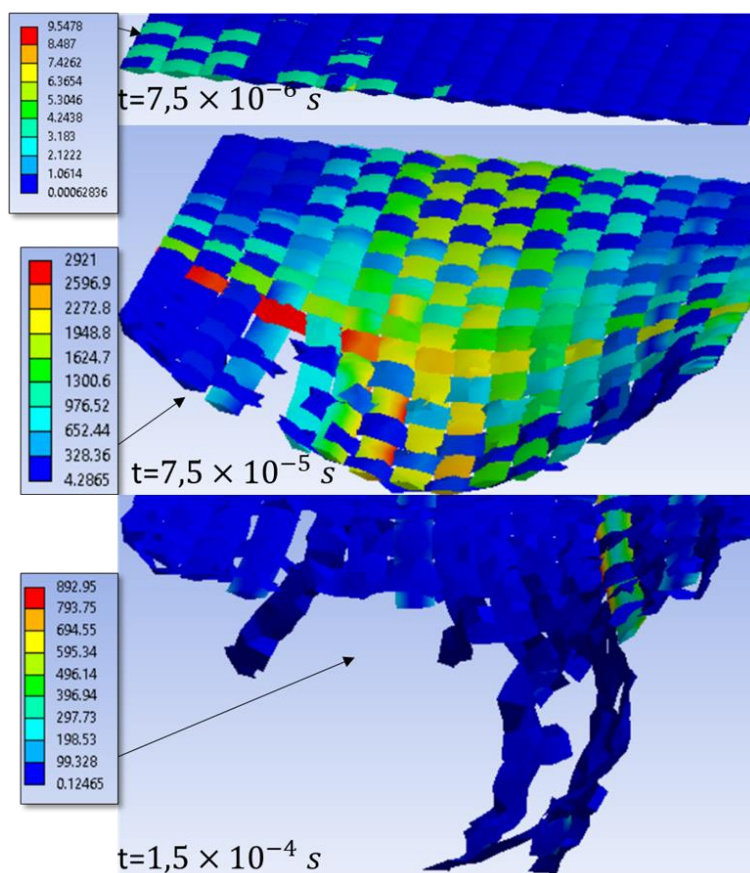


Figura 3.25. Distribuția de tensiuni von Mises (în MPa) pe stratul 24, la patru momente de timp. Eșantion de $50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, $v_0 = 420 \text{ m/s}$, $\text{COF} = 0,25$

În Figura 3.26. este dată distribuția tensiunii von Mises a ultimului strat pentru trei momente de timp din timpul simulării a variantei simulată fără contact între fore (fără frecare).

Primul moment al impactului, $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s, arată că firele acestui strat nu sunt sollicitate, valoarea tensiunii von Mises este de 49,314 MPa (Figura 3.26). Momentul de timp, $t = 8,25 \times 10^{-5}$ s, prezintă ruperea a două fire principale din direcția bătăturii, al treilea fir fiind sollicitat la maxim, indicând că urmează să se rupă (Figura 3.26). Ultimul moment al simulării, înregistrează o valoare a tensiunii de 346 MPa, tensiune care arată că nu se vor mai rupe fire (Figura 3.26). Chiar dacă proiectilul a fost oprit, acest strat prezintă fire rupte.

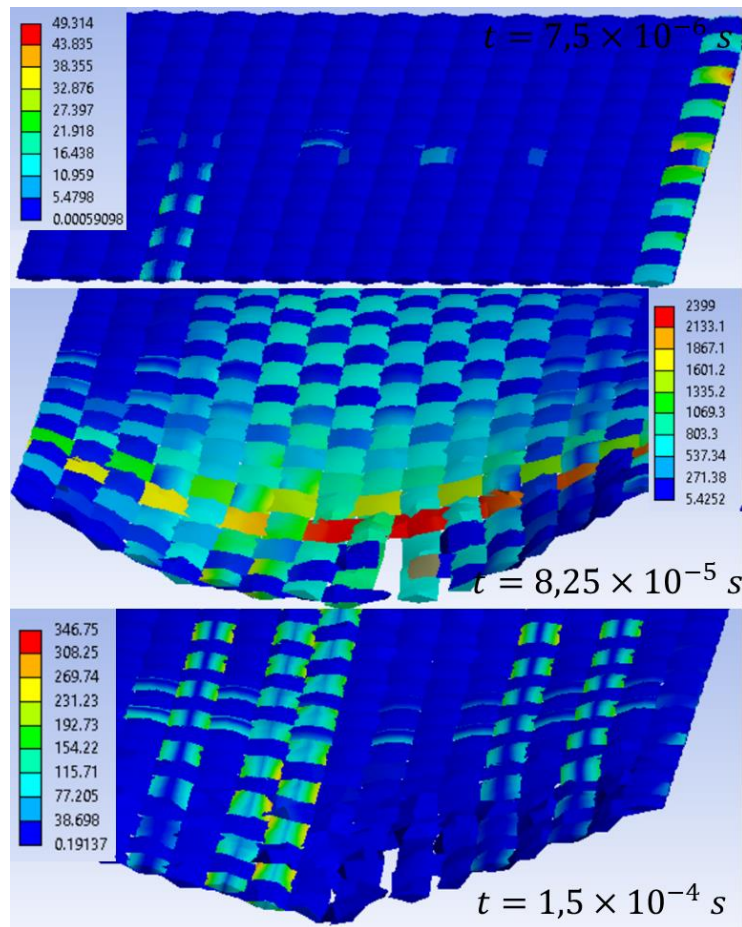


Figura 3.26. Distribuția de tensiuni von Mises (în MPa) pe stratul 24, la patru momente de timp. Eșantion de 50 mm × 25 mm, $v_0 = 420 \text{ m/s}$, fără frecare

3.4.4.. Concluzii privind influența introducerii frecării în modelul de impact

Analizând distribuția tensiunilor von Mises pe întreg panoul pentru cele trei cazuri analizate, observăm că varianta simulată cu valoarea coeficientului de frecare 0,1 prezintă o distrugere/rupere a celor 24 de straturi pe o zona mai mare, ducând la penetrarea totală a panoului (Figura 3.27).

Varianta simulată cu valoarea coeficientului de frecare 0,25, oprește proiectilul și îl ricoșează, dar straturile de sub proiectil sunt comprimate și prezintă fire rupte, chiar dacă proiectilul a fost oprit (Figura 3.28).

Varianta simulată fără coeficient de frecare, arată o penetrare parțială a panoului, dar și în acest caz firele sunt distruse sub proiectil (Figura 3.29).

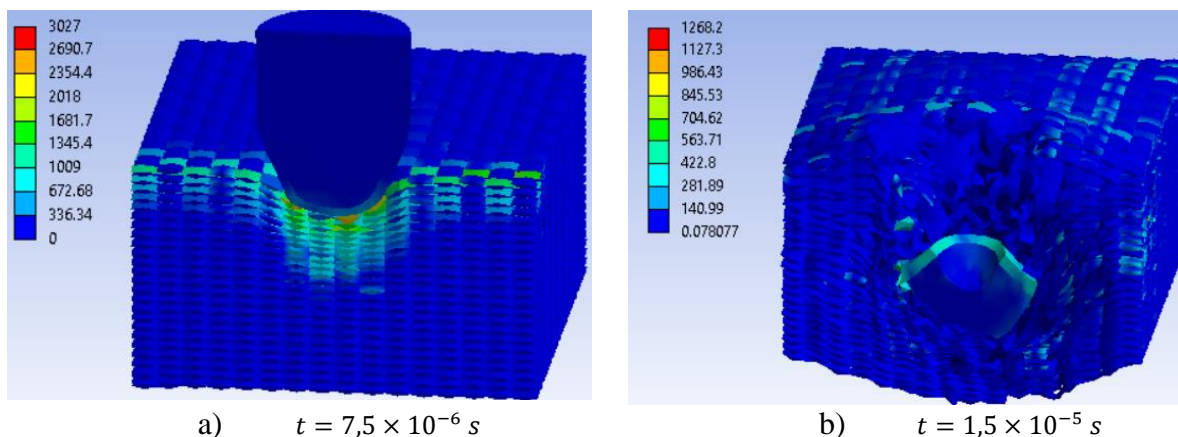


Figura 3.27. Distribuția de tensiuni von Mises (în MPa) ale panoului format din 24 straturi la două momente de timp. Eșantion de 25 mm × 25 mm, $v_0 = 420 \text{ m/s}$, COF = 0,25

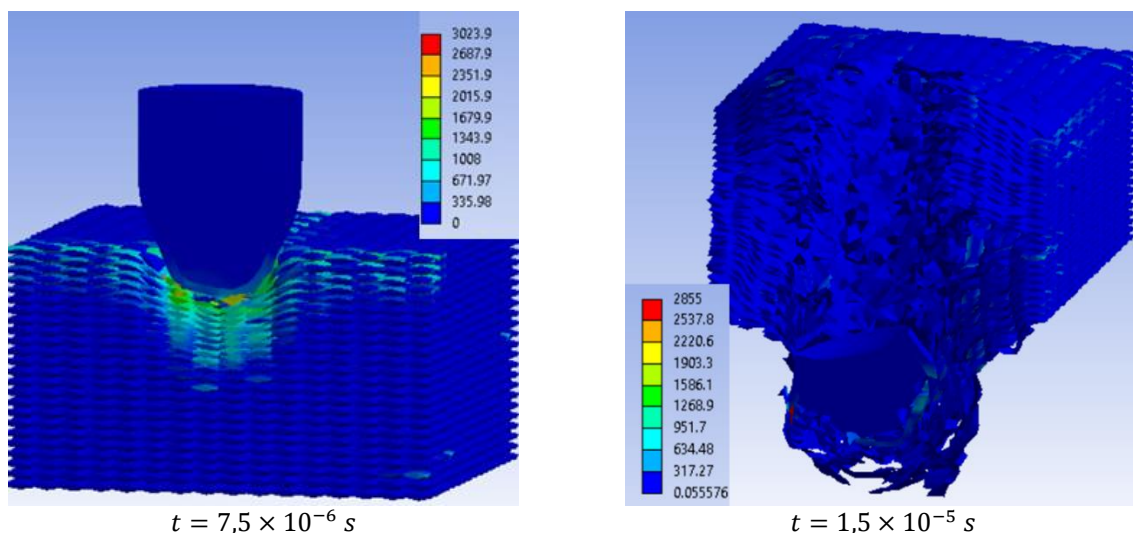


Figura 3.28. Distribuția de tensiuni von Mises (în MPa) ale panoului format din 24 straturi la două momente de timp. Eșantion de 25 mm × 25 mm, $v_0 = 420 \text{ m/s}$, COF = 0,10

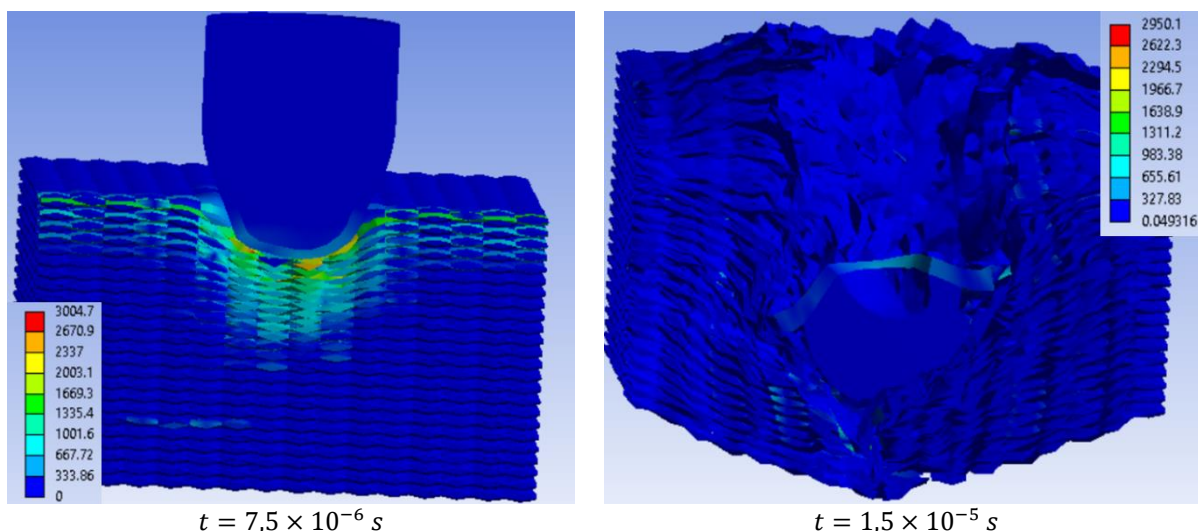


Figura 3.29. Distribuția de tensiuni von Mises (în MPa) ale panoului format din 24 straturi Twaron CT736 la două momente de timp. Eșantion de 25 mm × 25 mm, $v_0 = 420 \text{ m/s}$, fără frecare

3.5. Influență dimensiunii eșantionului în simularea numerică

3.5.1. Introducere

Scopul acestei analize constă în evaluarea comportamentului unui panou de țesătură cu coeficient de frecare de 0,25 în timpul impactului cu un proiectil și în înțelegerea modului în care dimensiunea eșantionului simulat (50 mm x 50 mm și 50 mm x 25 mm) influențează rezultatele și comportamentul panoului în timpul impactului:

- evaluarea rezistenței panoului de țesătură la impactul unui proiectil (scopul este de a înțelege modul în care panoul reacționează la forța externă și dacă poate opri sau reduce efectele impactului în această configurație specifică),
- analiza include observarea distribuției tensiunilor von Mises în diferite straturi ale panoului în timpul impactului și evaluarea deteriorării materialelor, inclusiv numărul de fire rupte și modul în care acestea evoluează în timp,
- analiza poate identifica zonele din panou care sunt mai susceptibile la deteriorare sau ruptură în timpul impactului.

3.5.2. Metodologia simulării influenței dimensiunii eșantionului în simularea numerică

Condițiile inițiale utilizate sunt:

- $v_0 = 420$ m/s, acesta este viteza care caracterizează nivelul FB3 [EN 1063:1999], [EN 1522:2004], [EN 1523:2004],
- distanța dintre vârful proiectilului și primul fir este de 0,03 mm.

Condițiile la limită implică faptul că fiecare fir are secțiuni transversale laterale fixe.

Condițiile de contact iau în considerare frecarea:

- contact cu frecare:
- pentru contactul fir-fir, coeficientul de frecare $COF=0,25$ și se consideră constant,
- pentru contact fir-proiectil, $COF=0,25$

Modelul folosește formula Lagrangian pentru a simula comportamentul atât al proiectilului, cât și al panoului țesut 1/1.

Ecuția liniară de stare (EOS) este aplicată pentru a descrie răspunsul materialului în diferite stări sau condiții. EOS liniar implică o relație liniară între presiune, densitate și alte variabile din model.

Modelul încorporează atât geometria proiectilului, cât și geometria panoului țesut 1/1. Geometria joacă un rol important în determinarea modului în care proiectilul interacționează cu panoul și este un aspect cheie al simulărilor numerice.

Comportamentul materialului firului este descris folosind un model biliniar, care sugerează un răspuns material caracterizat prin două regiuni liniare distincte. Criteriul de cedare pentru fir este EPS. Criteriul de cedare pentru cămașa proiectilului este Johnson Cook și pentru miezul proiectilului este EPS. Modelul Johnson-Cook este utilizat în mod special pentru comportamentul materialului proiectilului. Condițiile la limită au fost stabilite în așa fel încât modelul numeric să reflecte caracteristicile sistemului experimental actual.

Ca și în cazul modelării firelor simple, în simulările a fost utilizată o metodă de modelare care reproduce răspunsul straturilor țesute la sarcinile aplicate.

Proiectilului i s-a atribuit o viteză liniară inițială de $v_0 = 420$ m/s. Modelul numeric al proiectilului FMJ de 9×19 mm a fost prezentat în Figura 3.6 . Deoarece au fost utilizat un plane de simetrie în modele (Figura 3.30 și 3.31), viteza unghiulară a proiectilului a fost neglijată. În Figurile 3.32-3.35 sunt date discretizările celor două modele.

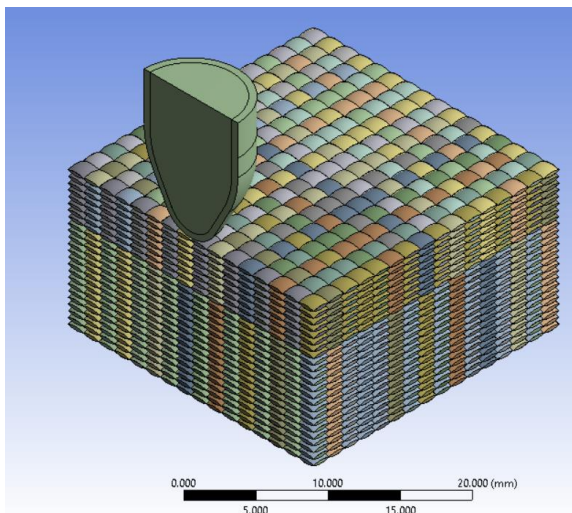


Figura 3.30. Geometria eșantionului cu dimensiunea 50 mm × 25 mm

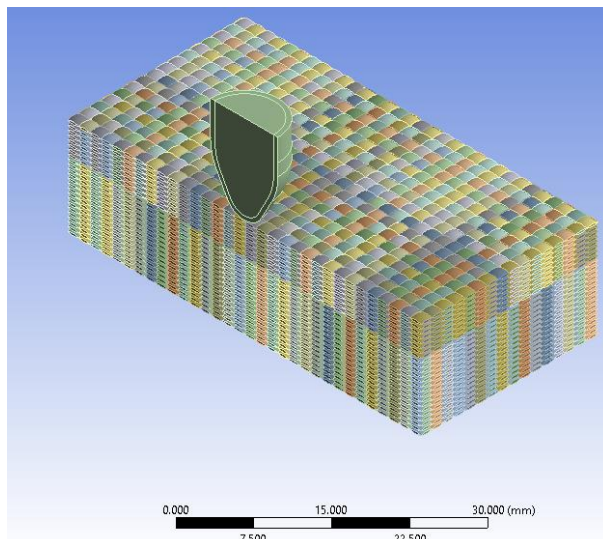


Figura 3.31. Geometria eșantionului cu dimensiunea 50 mm × 50 mm

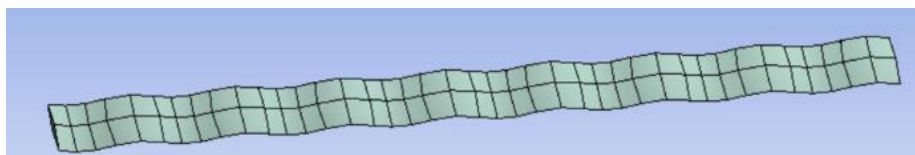


Figura 3.32. Discretizarea firului pentru eșantionul cu dimensiunea 50 mm × 25 mm

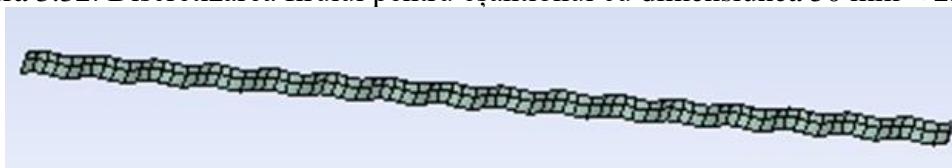


Figura 3.33. Discretizarea firului pentru eșantionul cu dimensiunea 50 mm × 50 mm

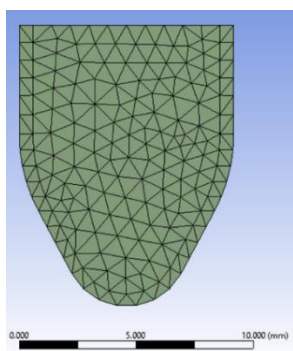


Figura 3.34. Discretizarea proiectilului pentru eșantionul cu dimensiunea 50 mm × 25 mm

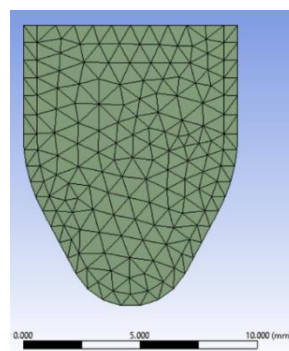


Figura 3.35. Discretizarea proiectilului pentru eșantionul cu dimensiunea 50 mm × 50 mm

Valorile parametrilor din ecuațiile componentelor proiectilului sunt prezentate în Tabelul 3.4 și Tabelul 3.5. În Tabelul 3.6 sunt date valorile parametrilor firului.

3.5.3. Analiza rezultatelor privind influența dimensiunii eșantionului în simularea numerică

Analizând Figura 3.36 observăm că distribuția tensiunilor sub proiectil, în zona de impact, cu o propagare a undelor de tensiune prin grosime în ambele cazuri analizate. Cazul 2, cu dimensiunile eșantionului de 50 mm × 25 mm, prezintă în plus o propagare a undelor de tensiune de-a lungul lungimii firului, pe primele straturi.

Ultimul moment al simulării, $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s, arată că proiectilul este oprit în ambele variante analizate, doar că straturile care au rămas sub proiectil sunt rupte/distrușe. Cămașa și miezul proiectilului, variantei 2 simulate sunt distruse și deformate, în cazul variantei 1, proiectilul este doar deformat și își modifică în timpul impactului unghiul de impact. Proiectilul în cazul variantei 2 simulate nu își modifică unghiul de impact (Figura 3.38). Proiectilul în cazul variantei 2, cu dimensiunea eșantionului 50 mm × 25 mm prezintă crăparea (fragmentarea) cămășii.

În Figura 3.37 este dată distribuția de tensiuni von Mises pentru un fir principal al stratului 1 la trei momente de timp pentru eșantionul de 50 mm × 50 mm, $v_0 = 420$ m/s, coeficient de frecare = 0,25.

Momentul de timp $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s înregistrează o valoare maximă a tensiunii de 2230 MPa, iar această valoare maximă este reprezentată pe grafic printr-un vârful orientat în sus și indică zona roșie din Figuri 3.37 la acest moment de timp. Acest vârf reprezintă punctul de tensiune maximă înregistrat pe fir în acel moment și servește ca indicator al tensiunii maxime suportat de material în timpul impactului la acest moment de timp. Pentru acest moment de timp, pe grafic mai sunt două zone cu valori maxime, reprezentate cu două salturi (vârfuri) în sus, cu o valoare a tensiunii între 1500-1750 MPa.

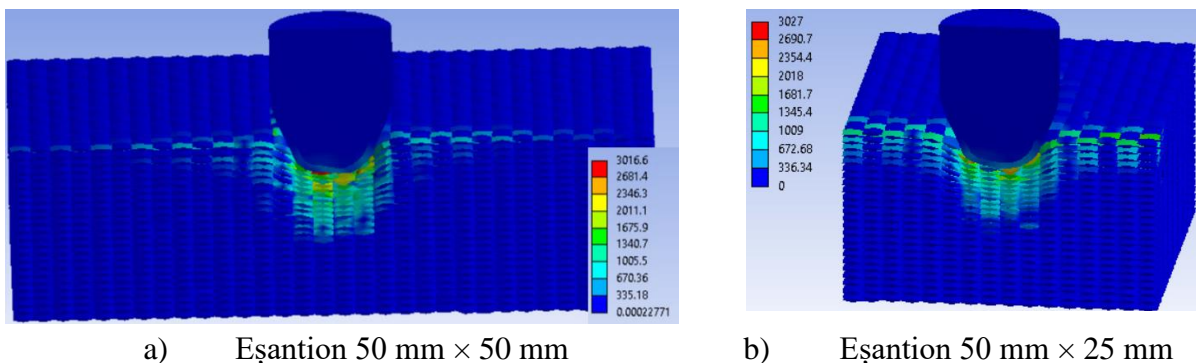


Figura 3.36. Distribuția de tensiuni von Mises (în MPa) ale panoului format din 24 straturi la momentul de timp, $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s, $v_0 = 420$ m/s, COF = 0,25

Momentul de timp, $t = 3 \times 10^{-5}$ s, prezintă o zonă cu concentratori de tensiune în zona periferică a zonei de impact, în partea stângă, reprezentată pe grafic cu un vârful orientat în sus, care atinge o tensiune maximă de 2848 MPa. Observăm că la acest moment de timp graficul înregistrează o tensionare mai mare a firului în partea stângă a zonei centrale cu o

tensiune între 1700-2000 MPa iar în partea dreaptă a zonei centrale, firul nu este așa de tensionat, valorile înregistrate sunt cuprinse între 1000-1300 MPa (Figura 3.37).

Ultimul moment de timp al acestui fir, $t = 1,5 \times 10^{-4} s$, arată că firul nu este tensionat, valoare tensiuni von Mises este de 244 MPa (Figura 3.37).

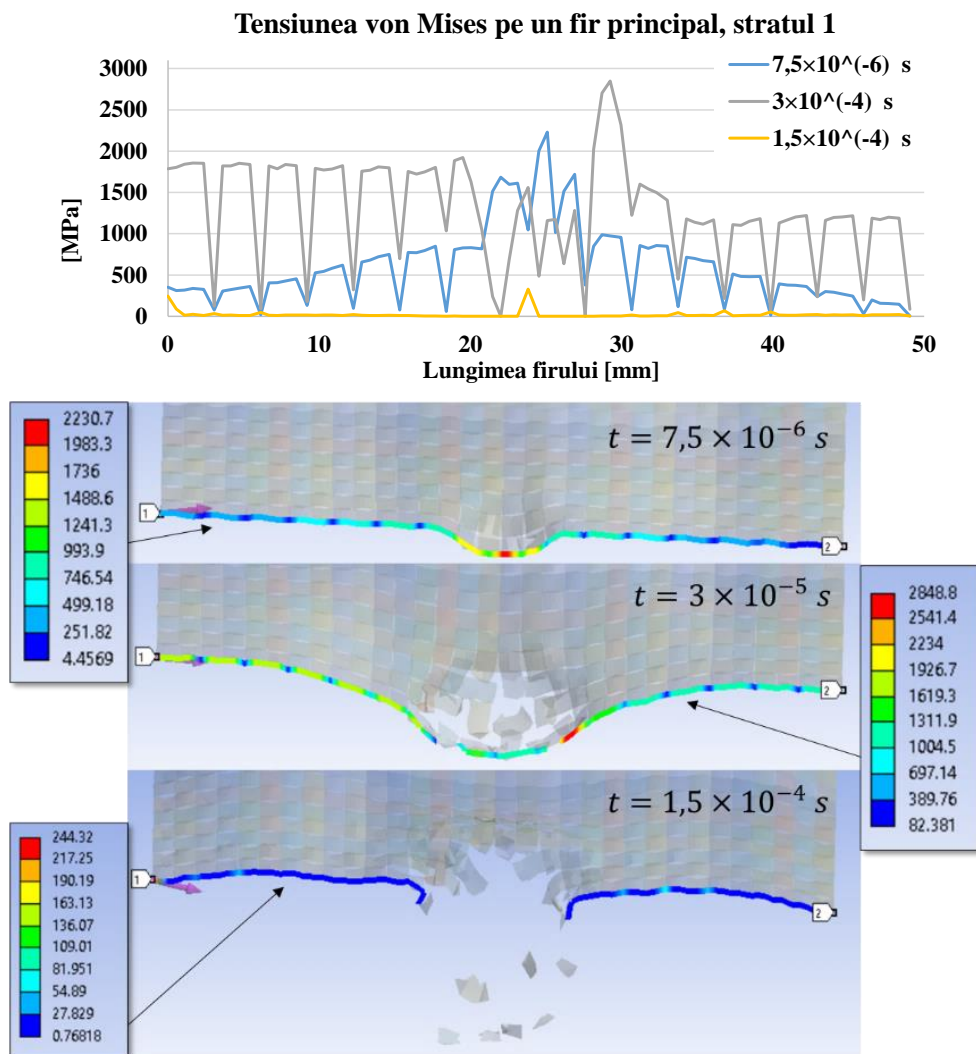
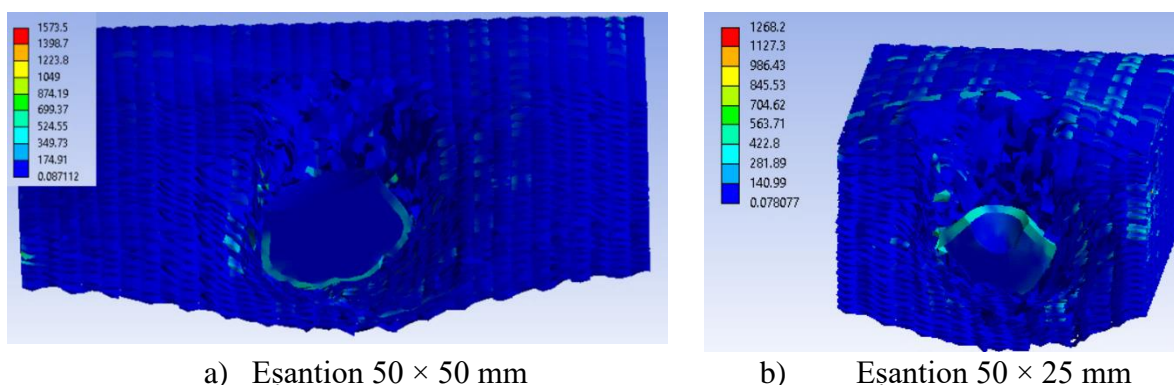


Figura 3.37. Distribuția de tensiuni von Mises (în MPa) pentru un fir principal la trei momente de timp. Eșantion de 50 mm × 50 mm, strat 1, $v_0=420$ m/s



a) Eșantion 50 × 50 mm

b) Eșantion 50 × 25 mm

Figura 3.38. Distribuția de tensiuni von Mises (în MPa) ale panoului format din 24 straturi la momentul de timp, $t = 1,5 \times 10^{-4} s$, $v_0 = 420$ m/s, COF = 0,25

În figura 3.39 Este dată distribuția de tensiuni von Mises pentru un fir principal al stratului 24 la trei momente de timp pentru eșantionul de 50 mm × 50 mm, $v_0 = 420$ m/s, valoarea coeficientului de frecare fiind de 0,25.

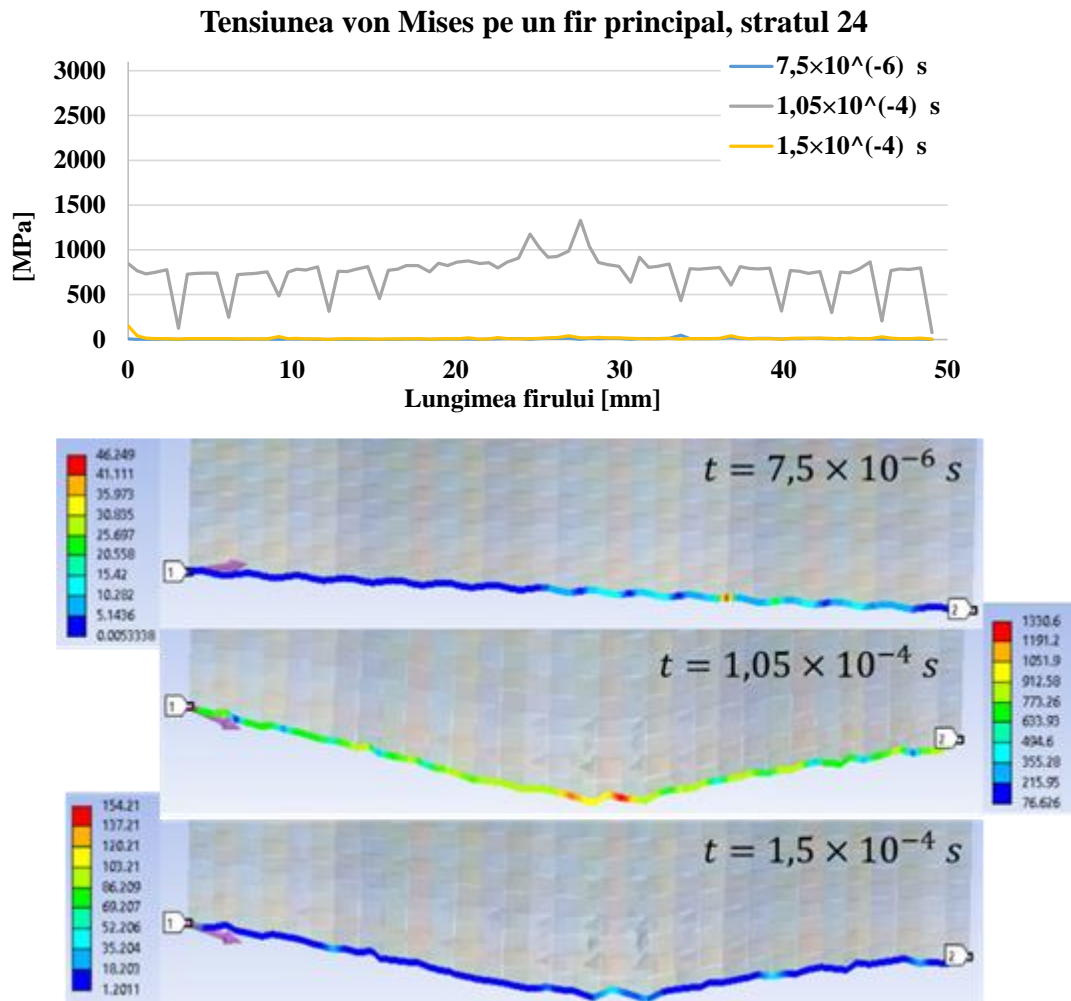


Figura 3.39. Distribuția de tensiuni von Mises (în MPa) pentru un fir principal la trei momente de timp. Stratul 24. Eșantion de 50 mm × 50 mm, $v_0=420$ m/s

Stratul 24, la momentul de timp inițial, $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s, și momentul de timp final, $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s, nu este solicitat. Valoare maximă a tensiunii von Mises înregistrată la primul moment al simulării este de 46 MPa și valoarea maximă înregistrată în ultimul moment al simulării este de 154 MPa. Momentul de timp, $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s, înregistrează o valoare maximă a tensiunii de 1330 MPa, firul principal analizat fiind solicitat în zona centrală (Figura 3.39).

În Figura 3.40 este dată distribuția de tensiuni von Mises pentru un fir principal al stratului 1 la patru momente de timp pentru eșantionul de 50 mm × 25 mm, $v_0 = 420$ m/s, valoarea coeficientului de frecare fiind de 0,25. Tensiunea maximă înregistrată în primul moment al simulării, $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s, pentru acest fir este de 2654 MPa. Valorile maxime înregistrată sunt pe zonele din Figura 3.40 cu roșu și pe grafic cu vârful orientat în sus. Momentul $t = 1,5 \times 10^{-5}$ s, înregistrează cea mai mare valoare a tensiunii von Mises dintre cele

patru momente de timp analizate. Atunci când tensiunea scade la zero, firul este rupt. Valorile înregistrate pe fir în zona periferică sunt între 1000-1500 MPa pentru primele trei momente analizate. Ultimul moment înregistrează o valoare a tensiunii de 102 MPa.

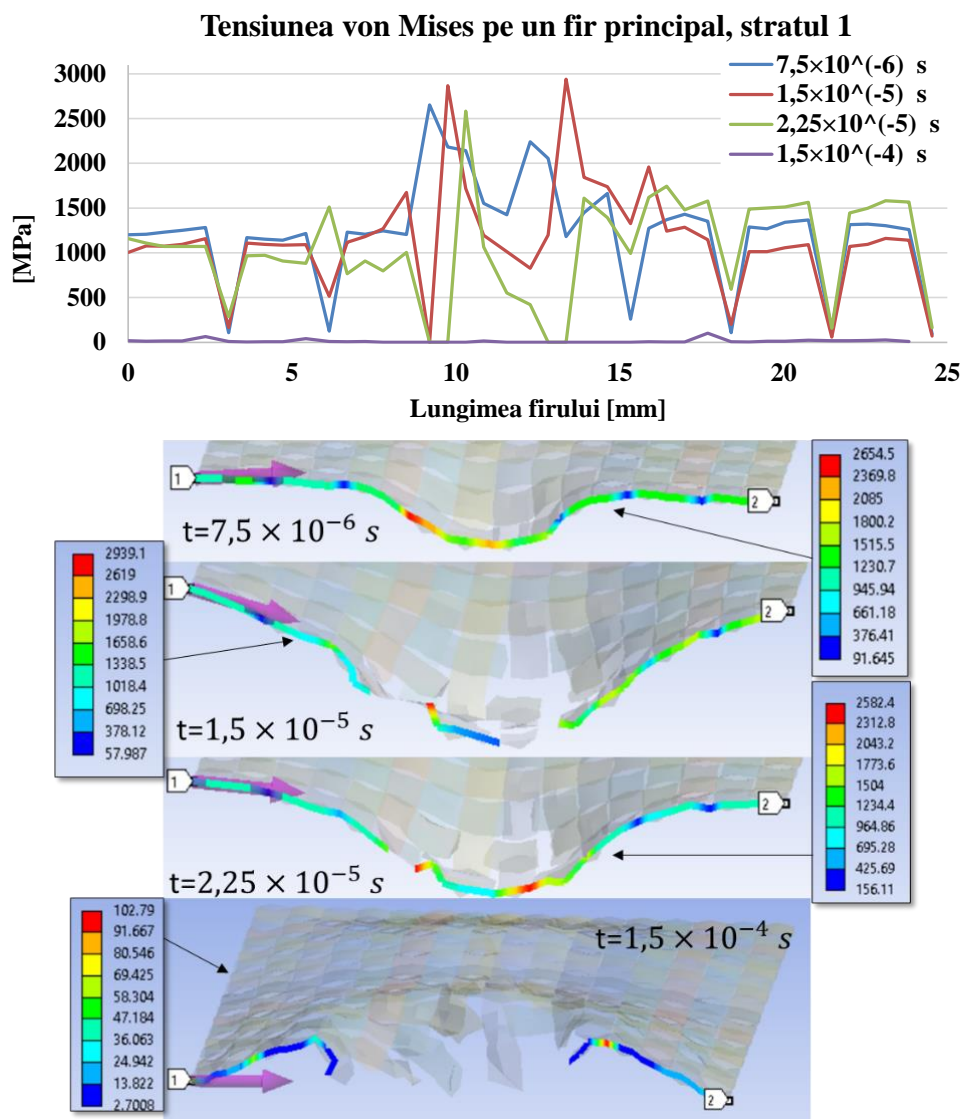


Figura 3.40. Distribuția de tensiuni von Mises (în MPa) pe firul principal de pe stratul 1, la patru momente de timp. Eșantion de 25 mm × 25 mm, $v_0 = 420$ m/s, COF = 0,25

În figura 3.41 este dată distribuția de tensiuni von Mises pentru un fir principal al stratului 24 la patru momente de timp pentru eșantionul de 50 mm × 25 mm, $v_0 = 420$ m/s, valoarea coeficientului de frecare fiind de 0,25. Dintre cele patru momente analizate, tensiunea maximă este înregistrată la momentul de timp $t = 8,25 \times 10^{-5}$ s, cu o valoare de 1573 MPa. Primul moment al simulării, $t = 7,5 \times 10^{-6}$ s înregistrează o valoare a tensiunii de 50 MPa, ceea ce arată că acest strat la primul moment al simulării nu a fost solicitat.

Ultimul moment al simulării, $t = 1,5 \times 10^{-4}$ s, înregistrează o valoare a tensiunii von Mises de 63 MPa, ceea ce arată că acest strat nu mai contribuie în acest moment/ nu mai este solicitat în procesul de impact (Figura 3.41).

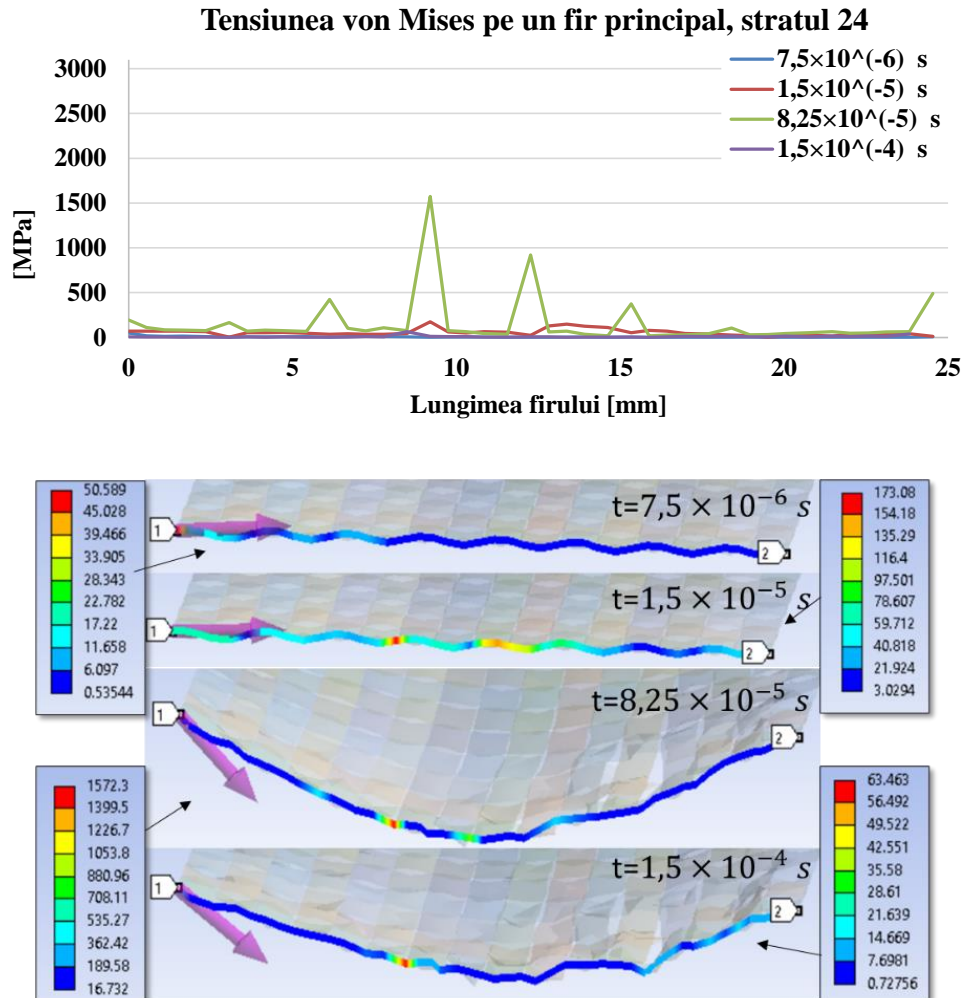


Figura 3.41. Distribuția de tensiuni von Mises (în MPa) pe firul principal de pe stratul 24, la patru momente de timp. Eșantion de 25 mm × 25 mm, $v_0 = 420$ m/s, COF = 0,25

3.6. Validarea modelului

Validarea modelului simulat este un pas important în cercetarea și dezvoltarea balistică a sistemelor de protecție pentru a asigura că simularea oferă rezultate plauzibile și realiste. Validarea modelului simulat se realizează prin două criterii importante:

- numărul de straturi rupte
- aspectul calitativ direcția de impact, și orice alte caracteristici importante.

Aspectul calitativ este important pentru a asigura că simularea reproduce corect fenomenele balistice și că rezultatele sunt plauzibile).

Figura 3.42 prezintă numărul de straturi rupte de eșantionul simulat și de pe un panou real. Pe eșantionul real, focul C a rupt 20 de straturi iar focul B a rupt 15 straturi. Diferența de

straturi rupte în practică este logica pentru că după prima lovitură, materialul din zona apropiată acestei lovituri este slăbit. Din simulările efectuate s-au obținut un rezultat apropiat de cel al focului C (panou simulat tot cu 32 straturi, dar cu limita de curgere 3000 MPa) obținându-se pe simulare 19 straturi rupte (panou virtual) și 20 straturi rupte pe panoul real (simularea putând fi considerată realistă) Pentru focul B de pe proba reală s-au rupt 15 straturi, simularea cea mai apropiată de acea valoare reală fiind pentru limita de curgere 2500 MPa când s-au rupt 14 straturi.

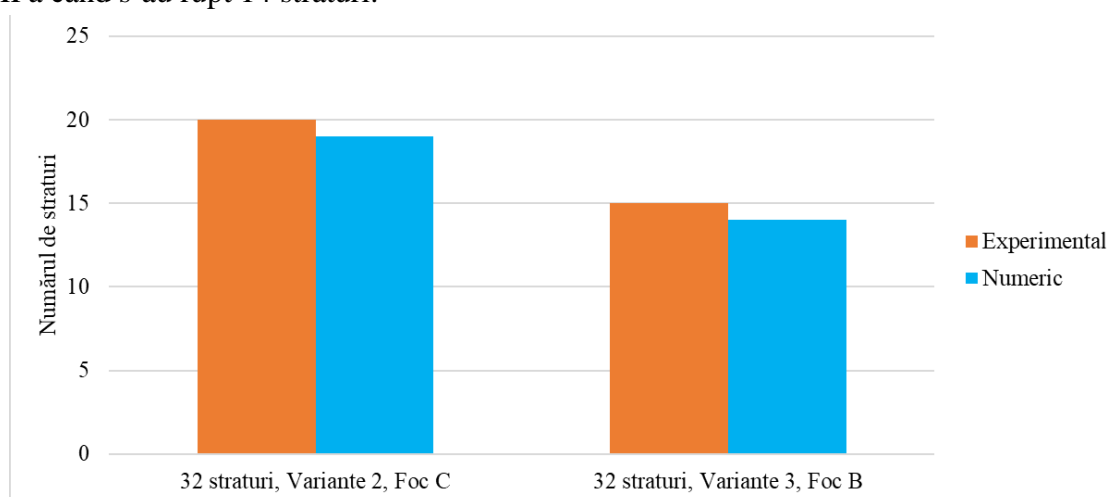


Figura 3.42. Validarea modelului numeric simulat cu 32 straturi prin criteriul numărul de straturi rupte (Varianta 2 – limita de curgere a firului este de 2500 MPa, Varianta 3 – limita de curgere a firului este de 3000 MPa)

Figura 3.43 prezintă comparație între aspectul calitativ al stratului 19 (foc C) al probei experimentale formată din 32 de straturi de țesătură Twaron CT736 și proiectilul 9 mm FMJ după impact, și simularea numerică pentru 32 straturi, varianta 2 simulată, cu limita de curgere 2500 MPa (Figura 3.43b).

Un aspect semnificativ este că simularea numerică reușește să redea cu acuratețe aspectul calitativ al probei experimentale (Figura 3.43a), inclusiv prezența proiectilului. Aceasta indică faptul că modelul simulat are capacitatea de a reproduce corect comportamentul materialului și interacțiunea acestuia cu proiectilul în condiții de impact.

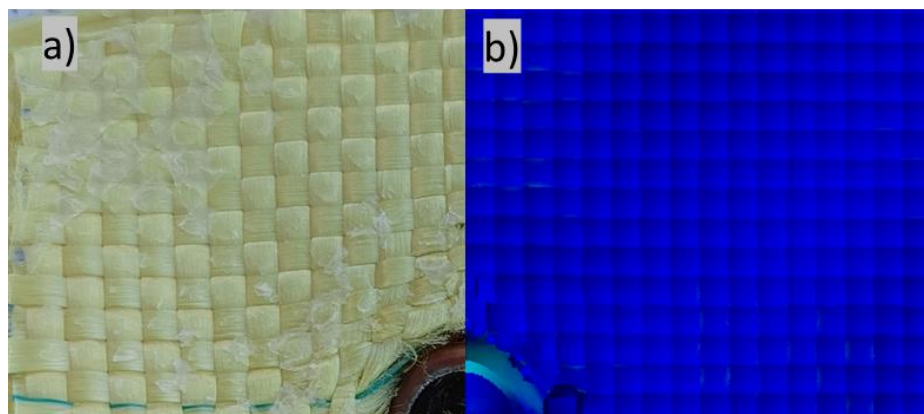


Figura 3.43. Aspectul calitativ, analizat pentru validare: a) stratul 19 (foc C) al probei experimentale formată din 32 straturi Twaron CT, b) simularea numerică, varianta 2 simulată

3.7. Concluzii finale

Concluzii privind analiza influenței modelului constitutiv de material pentru firele aramidice în simulările balistice

Simularea impactului dintre panoul cu 16 straturi cu limita de curgere a firului de 2000 MPa și proiectilul de 9 mm FMJ, precum și simularea impactului dintre panoul cu 16 straturi cu limita de curgere a firului de 3600 MPa și proiectilul de 9 mm FMJ sunt corect din punct de vedere matematic dar acestea nu poate fi considerate realiste din cauza eșecului de a îndeplini criteriile de validare (în ceea ce privește numărul de straturi rupte și aspectul calitativ cu rezultatele obținute din teste de laborator).

Simularea impactului dintre panoul cu 16 straturi cu limita de curgere a firului de 2500 MPa și proiectilul de 9 mm FMJ și simularea impactului dintre panoul cu 16 straturi cu limita de curgere a firului de 3000 MPa și proiectilul de 9 mm FMJ sunt corect din punct de vedere matematic deoarece îndeplinește criteriile de validare (în ceea ce privește numărul de straturi rupte și aspectul calitativ cu rezultatele obținute din teste de laborator).

Simularea impactului dintre panoul cu 32 straturi cu limita de curgere a firului de 2000 MPa și proiectilul de 9 mm FMJ, precum și simularea impactului dintre panoul cu 32 straturi cu limita de curgere a firului de 3600 MPa și proiectilul de 9 mm FMJ sunt corect din punct de vedere matematic dar acestea nu poate fi considerate realiste din cauza eșecului de a îndeplini criteriile de validare (în ceea ce privește numărul de straturi rupte și aspectul calitativ cu rezultatele obținute din teste de laborator).

Simularea impactului dintre panoul cu 32 straturi cu limita de curgere a firului de 2500 MPa și proiectilul de 9 mm FMJ și simularea impactului dintre panoul cu 32 straturi cu limita de curgere a firului de 3000 MPa și proiectilul de 9 mm FMJ sunt corect din punct de vedere matematic deoarece îndeplinește criteriile de validare (în ceea ce privește numărul de straturi rupte și aspectul calitativ cu rezultatele obținute din teste de laborator).

Concluzii privind influența introducerii frecării în modelul de impact

Distribuția tensiunilor von Mises ale ultimului strat arată că firele nu sunt solicitate la momentul de impact inițial, dar devin treptat tensionate și pot suferi rupturi ulterioare în timpul impactului.

În varianta cu coeficientul de frecare de 0,25, ultimul strat începe să-și revină după ricoșarea proiectilului, dar prezintă fire principale rupte din direcția bătăturii.

În varianta cu coeficientul de frecare de 0,1, ultimul strat prezintă o încovoiere puternică datorată penetrării totale a țesăturii, iar firele sunt rupte.

În varianta fără contact între fire (fără frecare), ultimul strat prezintă, de asemenea, fire rupte chiar și după oprirea și ricoșarea proiectilului.

În general, coeficientul de frecare afectează semnificativ comportamentul și integritatea țesăturii în timpul impactului, determinând dacă proiectilul este oprit sau ricoșat, precum și gradul de deteriorare al firelor. Varianta cu un coeficient de frecare mai mare pare

să ofere o mai bună capacitate de oprire a proiectilului, dar poate duce totuși la deteriorarea țesăturii și a firelor secundare.

Concluzii privind influența dimensiunii eșantionului în simularea numerică

Rezultatele simulărilor pot ajuta la proiectarea și dezvoltarea proiectilelor mai eficiente în ceea ce privește performanța. Acest lucru poate fi crucial în domeniul militar pentru a asigura capacitatea de penetrare a țintelor sau pentru a minimiza daunele colaterale în operațiunile militare.

Simulările permit cercetătorilor și inginerilor să înțeleagă mai bine cum se comportă proiectilele în diferite situații și cum pot fi optimizate pentru diverse scenarii de utilizare.

Dimensiunea eșantionului 50 mm × 50 mm este mai relevantă pentru a obține rezultate realiste. Ea furnizează o perspectivă realistă asupra comportamentului proiectilului în condiții de impact și fragmentare, și arată că simulările sunt capabile să redea cu acuratețe efectele asupra structurii proiectilului și a straturilor subiacente.

În varianta 1, dimensiunea eșantionului 50 mm × 50 mm, firele sunt distruse în zona de impact, cu o penetrare parțială și cu straturile nepenetrare distruse. Aici, proiectilul este doar deformat și își schimbă direcția inițială. Aceasta sugerează o deformare mai puțin dramatică a proiectilului și o modificare a traiectoriei sale, dar cu o penetrare parțială a țintei.

În varianta 2, dimensiunea eșantionului 50 mm × 25 mm, firele sunt rupte/distruse în afara zonei de impact, iar cămașa proiectilului se fragmentează. De asemenea, există o penetrare parțială și firele de sub proiectil sunt doar comprimate. Aceasta indică o distrugere și o fragmentare mai semnificativă a proiectilului, precum și o influență mai pronunțată asupra țintei.

Rezultatele indică faptul că varianta 2 prezintă o distrugere și fragmentare mai pronunțată a proiectilului, cu influențe extinse asupra țintei și a straturilor subiacente. Dimensiunea eșantionului pare să fie importantă pentru a obține date semnificative în ceea ce privește comportamentul proiectilului în condiții balistice.

Capitolul 4. Țesături selectate pentru sisteme de protecție balistică și campania de testare

4.1. Introducere

Testarea experimentală este utilizată la sistemele de protecție balistică în fiecare etapă a ciclului de viață al produsului, de la crearea materialelor rezistente la impact balistic până la testarea efectuată la încheierea duratei de viață utilă a sistemului de protecție balistică după ce aceasta a fost implementat. Pentru ca performanța minimă să fie furnizată pe parcursul duratei de utilizare a produsului, sistemele de protecție trebuie construite cu o marjă care să poată acoperi toate cerințele de performanță. Pentru a se asigura că obiectivele de performanță sunt îndeplinite pe durata în care sistemele de protecție sunt utilizate, este necesară validarea adecvată a unui nou sistem de protecție înainte de a fi lansat pe piață, precum și evaluarea continuă a produsului odată ce acesta a fost implementat.

Materialele optime trebuie alese înainte de a putea fi dezvoltat orice sistem de protecție rezistent la impact balistic.

Producătorul și/sau utilizatorul sistemului de protecție poate specifica apoi nivelurile adecvate de performanță balistică, iar testarea de validare a designului este atunci necesară pentru a atinge aceste niveluri. Testarea de validare a designului oferă o bază fiabilă de date care poate fi comparată cu testele efectuate ulterior, cum ar fi testarea calității lotului sau urmărirea deteriorării performanței pentru sistemele de protecție implementate. O gamă largă de teste balistice poate fi incluse în programele de testare de validare a proiectării. Densitatea suprafeței, flexibilitatea, rezistența la umiditate, grosimea, duritatea, și alte teste non-balistice pot fi utilizate în această etapă pentru a se asigura că cerințele sistemului secundar îndeplinesc cerințele specifice ale utilizatorului vizat. Pentru a confirma că sistemul de protecție individuală este rezistent și va funcționa așa cum este prevăzut în standarde pe durata de viață tipică a acestuia, validarea ar trebui să implice și testarea acestuia după expunerea la diferite condiții extreme ale mediului.

4.2. Proceduri de montare a probelor pentru testarea balistică: perspectiva standardelor de la National Institute of Justice (NIJ)

Conform standardelor NIJ [NIJ 0101.04], panoul de armătură trebuie poziționat pe materialul suport într-un mod care să asigure că punctul de impact, proiectat prin armură, este la cel puțin 106 mm distanță de marginea suportului.

Panourile țintă trebuie ținute ferm în contact cu plastilina, care este folosită în mod obișnuit ca material suport în testele balistice. Acest lucru asigură măsurarea consecventă și precisă a impactului.

În Figura 4.1 este dat modul de montare a panourilor testate pentru acest studiu de cercetare. Panourile au dimensiunile de 400 mm x 400 mm și sunt prinse pe materialul suport cu chingi.



Figura 4.1. Procedura de montare a panourilor testate

Condiții de testare care au fost respectate pentru testarea panourilor balistice sunt cele date în standardul american [NIJ 0101.04].

Prin menținerea unor condiții ambientale consistente, rezultatele testelor pot fi comparate și analizate cu precizie. Acestea ajută la asigurarea faptului că orice modificări observate în performanța balistică a sistemului de protecție sunt atribuite în primul rând variabilelor testate, mai degrabă decât factorilor externi de mediu. Aceste condiții standardizate facilitează evaluări corecte și fiabile ale performanței sistemului de protecție în diferite scenarii de testare.

În pregătirea pentru testarea sistemelor de protecție, echipamentul și configurația trebuie să urmeze instrucțiunile specifice pentru a asigura rezultate consistente și precise. Pe baza informațiilor furnizate, punctele cheie pentru configurarea intervalului sunt:

Panoul de protecție balistică trebuie montat la o distanță de $5,0 \text{ m} \pm 1,0 \text{ m}$ de gura țevii de testare (Figura 4.2).

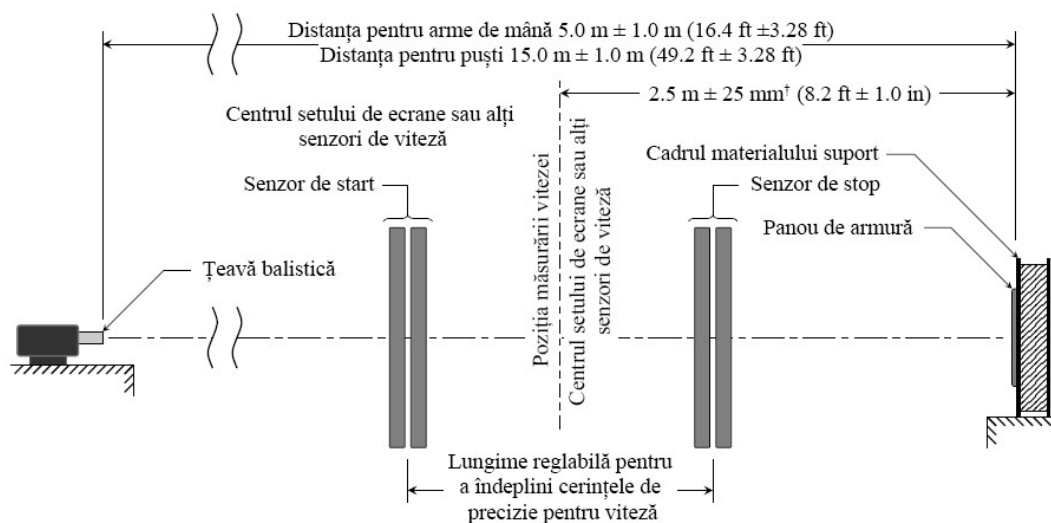


Figura 4.2. Configurația intervalului (distanței) de testare [NIJ 0101.04]

Obiectivul acestui capitol este de testa și examina impactul proiectilului asupra sistemelor de protecție balistică, realizate din două tipuri de țesături de la firma Teijin Limited:

- probe realizate prin stratificarea țesăturii TWARON CT 736,
- probe realizate prin stratificarea țesăturii Twaron SRM509 și țesăturii TWARON CT 736.
-

4.3. Metodologia experimentelor de impact balistic

Au fost testate mai multe probe pentru sisteme de protecție individuală cu un număr diferit de straturi de țesătura Twaron CT 736 CMP și probe de sisteme de protecție realizate cu un număr diferit de straturi din două tipuri de țesături, Twaron SRM509 și Twaron CT 736.

Conform NIJ 0101.04 [standard NIJ 0101.04], STANAG 2920 [STANAG 2920], STP/M 40202-99 și SMT 4003.5-2003 s-a efectuat rezistența balistică a sistemelor de protecție la acțiunea unui proiectil FMJ (Full Metal Jacket) de 9 mm, proiectilul se deplasează cu o viteză de 400 până la 440 m/s.

Campania de testare a avut ca scop determinarea comportamentului eșantioanelor de sisteme de protecție la impactul unui proiectil de 9 mm FMJ. Campania de testare s-a realizat la “Centrul de Cercetare și Inovare pentru Apărare CBRN și Ecologie” București.

Experimentele s-au desfășurat în conformitate cu protocoalele de operare și cu instrucțiunile de lucru autorizate, iar armele și munițiile necesare testării au fost depozitate în depozite special construite și controlate.

Conform [NIJ 0101.04], urma în plastilină utilizată în experimentele balistice a fost măsurată cu o precizie de $\pm 0,1$ mm folosind un șubler de adâncime. Pentru a preveni orice reziduuri de plastilină pe zona de măsurare, șublerul a fost curățat după fiecare măsurătoare.

4.4. Modul de prindere a pachetelor balistice

Pachetele balistice pot fi compuse dintr-un singur tip de material sau din mai multe tipuri de materiale combinate. Modul în care aceste materiale sunt dispuse și câte straturi sunt utilizate din fiecare tip pot afecta semnificativ performanțele balistice ale pachetului respectiv. Uneori, producătorii pot include în structura pachetului balistic un strat suplimentar de material non-balistic, având ca scop exclusiv îmbunătățirea protecției împotriva traumei cauzate de impact. În plus, există și compozite care folosesc două sau mai multe tipuri de materiale sau semifabricate balistice pentru a obține performanțe superioare.

4.5. Țesăturile utilizate pentru realizarea probelor sistemelor de protecție

Firma Teijin Limited ne-a livrat țesătura Twaron CT 736 plain (1/1), cu aceleași caracteristici, 410 g/m^2 ca și țesătura Twaron CT 736 și Twaron SRM 509 cu arhitectura basket sau twill. Aceste două țesături sunt folosite mai mult pentru căști. Ce am folosit eu este o țesătură CT 736 cu o folie de acoperire PVB Phenolic.

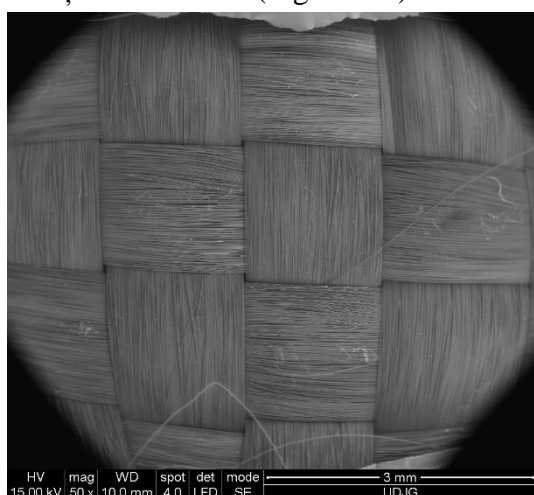
Tabelul 4.1. Caracteristicile țesături Twaron CT736 [catalog teijin]

Densitatea liniară [dte _{xnom}] Urzeală/Bătătură	Twaron-Type Urzeală /Bătătură	Set [pe 10 cm]		Masă pe suprafață [g/m ²]	Grosime [mm]	Rezistența minimă la tracțiune [N/5 cm ×1000]	
		Urzeală	Bătătură			Urzeală	Bătătură
1680f1000	2000	127	127	410	0,62	15,5	16,60

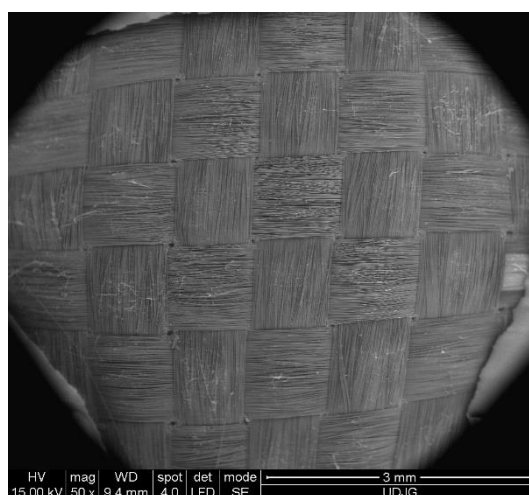
Tabelul 4.2. Caracteristicile țesături Twaron SRM509 [catalog teijin]

Aplicație principală	Densitatea liniară [dte _{xnom}]	Twaron	Masă pe suprafață [g/m ²]	Construcție
Veste anti-înjunghiere	930f1000	2040	430	Țesătură Twaron® CT 709 + acoperire cu carbură de siliciu

Firma Teijin furnizează mai multe materiale țesături destinate pentru sistemele de protecție individuală (Figura 4.3).



Twaron CT 736



Twaron SRM509

Figura 4.3. Tesaturi Teijin

4.6. Procesul de realizare a probelor de armura individual de protecție balistică

Conform standardului NIJ 0101.04 [0101.04] s-a realizat prototipul de vestă balistică cu ajutorul unui șablon creat la scară (Figura 4.4). Aceste straturi au fost tăiate manual cu ajutorul a două foarfece speciale pentru fibre aramidice acest prototip de vestă nu a fost testat.



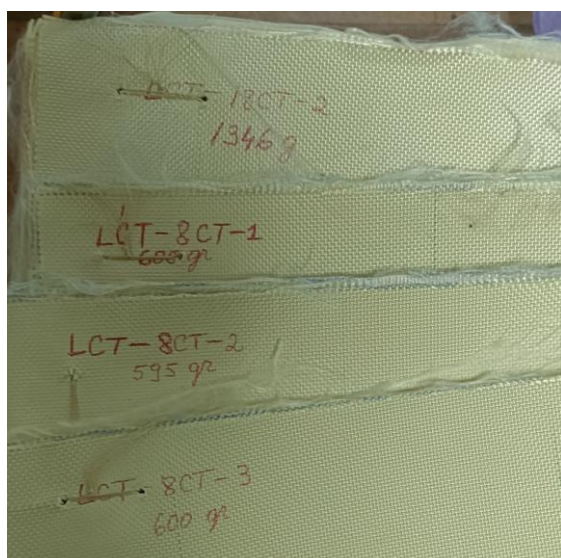
Figura 4.4. Asamblarea prototipului de vestă.

Dimensiunea panoului este de 400×400 mm (Figura 4.5)). Conform Standardului NIJ 0101.04 dimensiunea panoului de testare este de 500×500 mm. S-a ales această dimensiune de $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ din lipsa de resurse necesare.

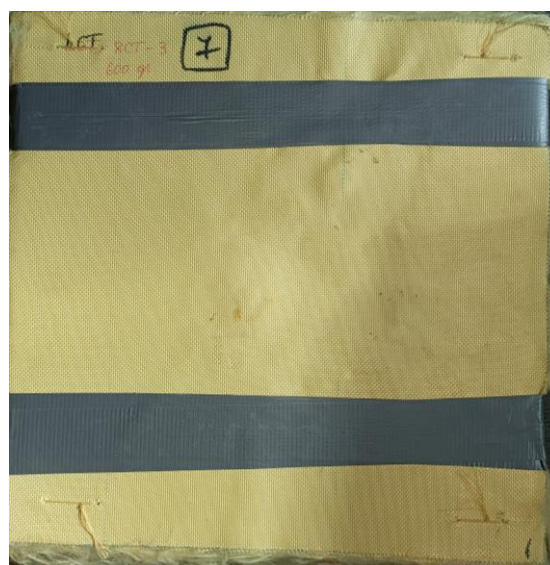


Figura 4.5. Pregătirea probelor

Panoul format din 16 straturi de țesătură Twaron CT736 a fost construit dintr-un singur panou cu straturile cusute în colțuri (Figura 4.6). Panoul format din 24 straturi de țesătură Twaron CT736 a fost construit dintr-un singur panou cu straturile cusute în colțuri. Panoul format din 328 straturi de țesătură Twaron CT736 a fost construit din două panouri cu 14 straturi cusute în colțuri și prinse cu scoci textil. Panoul format din 32 straturi de țesătură Twaron CT736 a fost construit din două panouri cu 16 straturi cusute în colțuri și prinse cu scoci textil. Panoul format din 42 straturi de țesătură Twaron CT736 a fost construit din patru panouri, trei panouri cu 8 straturi și un panou cu 18 straturi care au prinse straturile cusute în colțuri și prinse cu scoci textil (Figura 4.6).



a) panourile cusute care formează panoul cu 42 straturi țesătură Twaron CT736



b) panoul cu 42 de straturi prins cu scoci textil

Figura 4.6. Construcția panoului cu 42 straturi de țesătură Twaron CT 736

Panoul format din 16 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și Twaron CT736 a fost construit dintr-un singur panou cu straturile cusute în colțuri (Figura 4.8), 8 straturi de țesătură Twaron SRM509, care au fost stratificate primele și 8 straturi de țesătură Twaron CT. Panoul format din 24 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și Twaron CT736 a fost construit dintr-un singur panou cu straturile cusute în colțuri, 12 straturi de țesătură Twaron SRM, care au fost stratificate primele și 12 straturi de țesătură Twaron CT.

Panoul format din 28 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și Twaron CT736 a fost construit din două panouri cu straturile cusute în colțuri și prinse cu scoci textil. Primul panou este format din 7 straturi de țesătură Twaron SRM509, care au fost stratificate primele și 7 straturi de țesătură Twaron CT 736. Al doilea panou este format din 7 straturi de țesătură Twaron SRM509, care au fost stratificate primele și 7 straturi de țesătură Twaron CT 736.

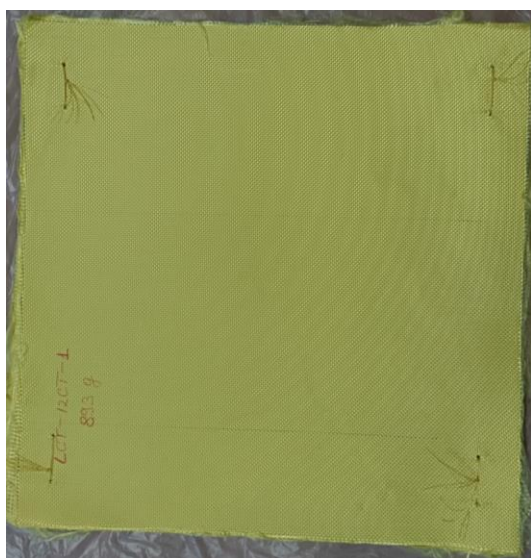


Figura 4.6. Modul de prindere a panoului format din straturi de țesătură Twaron CT736

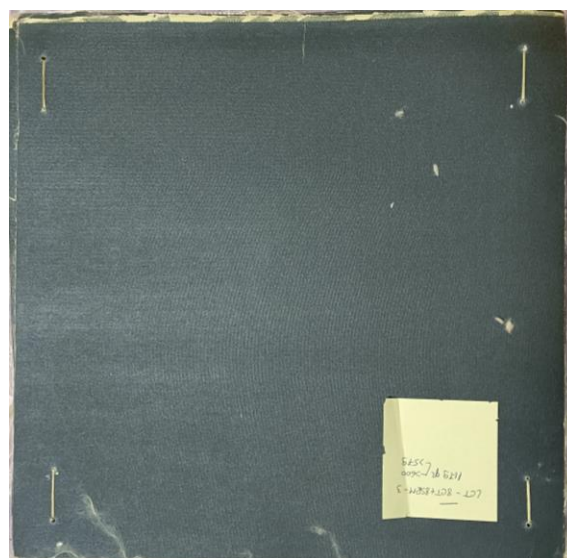


Figura 4.7. Modul de prindere a panoului format din straturi combinate de țesătură Twaron SRM509+ Twaron CT736

Panoul format din 32 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și Twaron CT736 a fost construit din două panouri cu straturile cusute în colțuri și prinse cu scoci textil. Primul panou este format din 8 straturi de țesătură Twaron SRM509, care au fost stratificate primele și 8 straturi de țesătură Twaron CT 736. Al doilea panou este format din 8 straturi de țesătură Twaron SRM509, care au fost stratificate primele și 8 straturi de țesătură Twaron CT 736.

Panoul format din 40 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și Twaron CT736 a fost construit din trei panouri cu straturile cusute în colțuri și prinse cu scoci textil. Primul panou este format din 12 straturi de țesătură Twaron SRM509, care au fost stratificate primele și 12 straturi de țesătură Twaron CT 736. Al doilea panou este format din 4 straturi de țesătură Twaron SRM509, care au fost stratificate primele și 4 straturi de

țesătură Twaron CT 736. Al treilea panoul este format din 4 straturi de țesătură Twaron SRM509, care au fost stratificate primele și 4 straturi de țesătură Twaron CT 736.

Tabelul 4.3. Grosimea panourilor formate din straturi de țesătură Twaron CT736

Panou	Ordinea și numărul de straturilor de material	Grosimea fiecărui grup de straturi [mm]	Grosimea totală [mm]
42 Twaron CT	8 straturi CT736	4,31	22,07
	8 straturi CT736	4,29	
	8 straturi CT736	4,30	
	18 straturi CT736	9,17	
32 Twaron CT	16 straturi CT736	8,61	17,2
	16 straturi CT736	8,59	
28 Twaron CT	14 straturi CT736	7,30	15,24
	14 straturi CT736	7,32	
24 Twaron CT	24 straturi CT736	12,85	12,85
16 Twaron CT	16 straturi CT736	8,60	8,60

Tabelul 4.4. Masa panourilor formate din straturi de țesătură Twaron CT736

Panou	Ordinea și numărul de straturilor de material	Masa straturilor de material [g]	Masa totală [g]
42 Twaron CT	8 straturi CT736	600	3122
	8 straturi CT736	595	
	8 straturi CT736	600	
	18 straturi CT736	1327	
32 Twaron CT	16 straturi CT736	1202	2421
	16 straturi CT736	1219	
28 Twaron CT	14 straturi CT736	1042	2090
	14 straturi CT736	1048	
24 Twaron CT	24 straturi CT736	1780	1780
16 Twaron CT	16 straturi CT736	1205	1205

Tabelul 4.5. Grosimea panourilor formate din straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736

Panou	Ordinea și numărul de straturilor	Grosimea [mm]	Grosimea totală [mm]
40 Twaron SRM509 + Twaron CT736	12 straturi SRM509	4,60	18,29
	12 straturi CT736	6,15	
	4 straturi SRM509	1,70	
	4 straturi CT736	2,08	
	4 straturi SRM509	1,67	
	4 straturi CT736	2,09	
32 Twaron SRM509 + Twaron CT736	8 straturi SRM509	3,14	14,79
	8 straturi CT736	4,1	
	8 straturi SRM509	3,35	
	8 straturi CT736	4,2	
28 Twaron SRM509 + Twaron CT736	7 straturi SRM509	2,74	12,28
	7 straturi CT736	3,15	
	7 straturi SRM509	2,76	
	7 straturi CT736	3,63	
24 Twaron SRM509 + Twaron CT736	12 straturi SRM509	4,85	11,35
	12 straturi CT736	6,5	
16 Twaron SRM509 + Twaron CT736	8 straturi SRM509	3,20	7,35
	8 straturi CT736	4,15	

Tabelul 4.6. Masa panourilor formate din straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și Twaron CT736

Panou	Ordinea și numărul de straturilor	Masa straturilor [g]	Masa totală [g]
40 Twaron SRM509 + Twaron CT736	12 straturi SRM509	863	2936
	12 straturi CT736	883	
	4 straturi SRM509	285	
	4 straturi CT736	303	
	4 straturi SRM509	300	
	4 straturi CT736	302	
32 Twaron SRM509 + Twaron CT736	8 straturi SRM509	576	2363
	8 straturi CT736	603	
	8 straturi SRM509	578	
	8 straturi CT736	606	
28 Twaron SRM509 + Twaron CT736	7 straturi SRM509	500	2026
	7 straturi CT736	515	
	7 straturi SRM509	501	
	7 straturi CT736	510	
24 Twaron SRM509 + Twaron CT736	12 straturi SRM509	857	1747
	12 straturi CT736	890	
16 Twaron SRM509 + Twaron CT736	8 straturi SRM509	579	1179
	8 straturi CT736	600	

Capitolul 5. Date experimentale pentru panourile frontale ale unei veste cu nivel de protecție IIA

5.1. Analiza adâncimii urmei și evaluarea capacității sistemelor de protecție de a opri un proiectil

5.1.1. Introducere

Adâncimea urmei (BFS) este o măsurătoare utilizată în testele sistemelor de protecție balistică pentru a evalua performanța materialelor balistice atunci când sunt supuse la impact balistic [Souza Oliveira, 2019], [Yang, 2019] [Saleem, 2022], [Mudzi, 2022], [Yang, 2017], [Kumar, 2023]. Adâncimea urmei se referă la adâncimea deformării sau a indentării care apare pe partea opusă suprafeței de impact atunci când un proiectil lovește sistemul de protecție. Adâncimea urmei este un indicator al cantității de energie transferată sistemului de protecție și poate ajuta la determinarea capacității sistemului de protecție individuală de a opri sau atenua efectele unui proiectil.

5.1.2. Analiza adâncimii urmei în materialul suport (BFS)

Valorile înregistrate pentru adâncimea urmei pentru probele stratificate cu țesătură simplă Twaron CT736 CMP și Twaron SRM509 sunt date în Tabelul 5.1. Aceste măsurători s-au realizat conform, „Ballistic Resistance of Body Armor”, NIJ Standard-0101.04, U.S. Department of Justice Office of Justice Programs National Institute of Justice, 2008 [NIJ Standard-0101.04].

În Figura 5.1 sunt date imagini cu forma platilinei în urma impactului panoului cu 32 straturi de țesătură CT736 și 16 straturi de țesătură Twaron CT736.

Tabelul 5.1. Valorile obținute pentru adâncimea urmei conform standardului NIJ

Eșantion	Focuri		
	A	B	C
	BFS [mm]		
16 straturi țesătură Twaron CT736	PT	PT	PT
24 straturi țesătură Twaron CT736	PT	PT	23
28 straturi țesătură Twaron CT736	PT	25	28
32 straturi țesătură Twaron CT736	14	17	16
42 straturi țesătură Twaron CT736	9	4	5
16 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509509 și țesătură Twaron CT736	PT	PT	PT
24 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509509 și țesătură Twaron CT736	PT	PT	PT
28 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509509 și țesătură Twaron CT736	PT	PT	PT
32 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509509 și țesătură Twaron CT736	PT	PT	PT
42 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509509 și țesătură Twaron CT736	14	17	PT

PT – penetrare totală

Pentru a stabili dacă sistemul de protecție individuală va oferi suficientă protecție, adâncimea urmei măsurate pe fața din spate dintr-un test BFS pentru sistemul de protecție individuală trebuie examinat. Cerințele standard prezentate în secțiunea 7.8.8 din [NIJ Standard-0101.04] afirmă că fie toate adâncimile măsurate ale BFS rezultate trebuie să fie de maxim 44 mm sau mai puțin, fie trebuie să existe un nivel de încredere de 95% că 80% din toate adâncimile BFS măsurate să fie de 44 mm (sau mai puțin dacă sunt adâncimi BFS care depășesc acest prag).



a) 32 straturi de țesătura Twaron CT736 b) 16 straturi de țesătura Twaron CT736

Figura 5.1. Vederea frontală a materialului suport după impactarea panourilor

5.1.3. Analiza adâncimii urmei prin scanarea 3D

Înregistrarea sau măsurarea 3D a adâncimii urmei în plastilina martor (notată cu BFS în NIJ Standard-0101.04, back face signature) a fost realizată cu scannerului 3D HANDYSCAN (Figura 5.2).



Figura 5.2. Scannerul 3D HANDYSCAN

Acest lucru ajută la o evaluare pe baza a mai mulți parametri și la compararea urmelor rezultate de la mai multe tipuri de panouri și proiectile. Acești parametri suplimentari pot participa la diferențierea răspunsului panoului la lovituri succesive sau la materiale sau proiectile diferite.

În timpul scanării, diferite semne reflectorizante au fost plasate pe suprafața materialului suport deformat pentru detectarea și modelarea ușoară a geometriei urmei (Figura 5.3). Asemenea metode de scanare nu numai că oferă un rezultat precis și o măsurătoare într-un timp scurt, dar facilitează și compararea vizuală a adâncimii pentru diferite ținte ale panoului. Cu ajutorul programului Autodesk Inventor [Autodesk, Inc. (2021)] și importând scanările de înaltă precizie, am reușit să modelez volumul urmei (Tabelul 5.3), măsurarea adâncimii urmei create în materialul suport, precum și volumul găurilor create în urma penetrării totale a panoului.

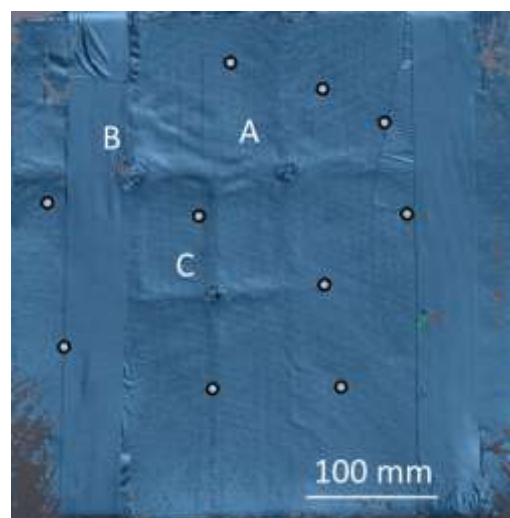
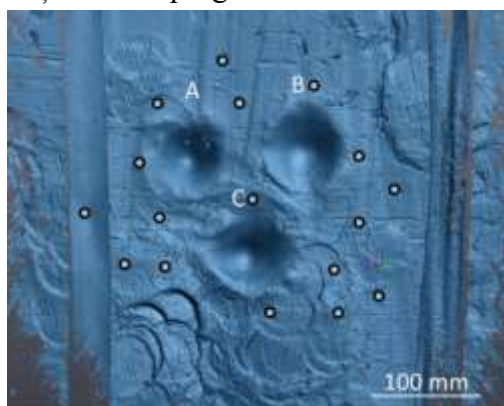
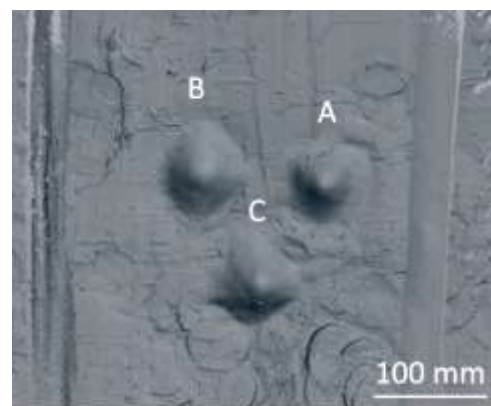


Figura 5.3. Poziționarea semnelor reflectorizante pe un panou

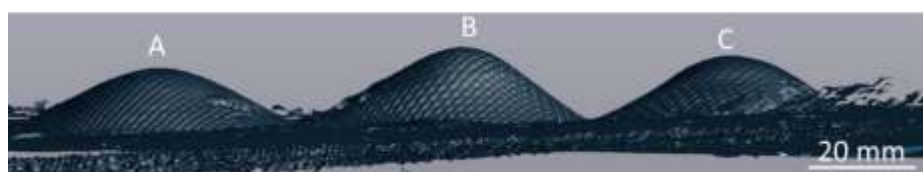
În Figura 5.4 sunt date imagini cu vederea 3D a plastilinei după impactarea panourilor obținute din programul VXelements.



a) vedere frontală a materialului suport după lovirea panoului cu trei proiectile



b) vedere din spate a suprafeței materialului suport (suprafața considerată de grosime zero)



c) detaliul urmei în materialul suport ca suprafață de grosime zero

Figura 5.4. Vedere 3D a plastilinei după impactarea panoului cu 32 straturi Twaron CT736

Tabelul 5.2 prezintă valorile pentru volumul urmei în materialul suport.

Tabelul 5.2. Valorile pentru volumul urmei în materialul suport

Proba	Volum [mm ³]
24 straturi țesătură Twaron CT736	26076
28 straturi țesătură Twaron CT736 - Foc B	23428
28 straturi țesătură Twaron CT736 - Foc C	27459
32 straturi țesătură Twaron CT736 - Foc A	17472
32 straturi țesătură Twaron CT736 – Foc B	19872
32 straturi țesătură Twaron CT736 – Foc C	12134
42 straturi țesătură Twaron CT736 – Foc A	3555
42 straturi țesătură Twaron CT736 – Foc B	10534
42 straturi țesătură Twaron CT736 – Foc C	1554
40 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509509 și țesătură Twaron CT736 – Foc A	9411
40 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509509 și țesătură Twaron CT736 – Foc B	13566

Figurile 5.5 prezintă vederi 3D (vederea frontală, vedere din spate), modul de măsurare a adâncimii urmei și o secțiunea verticală prin materialul suport, într-un plan care conține adâncimea cea mai mare a urmei (și care este denumită și BFS), cu delimitarea suprafeței amprente/urmei printr-un plan care conține suprafața nedeformată a materialului suport/plastilinei pentru panoul cu 24 straturi de țesătură Twaron CT736, Foc A.

Tabelul 5.3. Valorile adâncimii urmei în materialul suport

Proba	Adâncimea urmei – măsurătoare cu șublerul [mm]	Adâncimea urmei – scanare 3D [mm]
24 straturi țesătură Twaron CT736	23	21,051
28 straturi țesătură Twaron CT736 - Foc B	25	24,003
28 straturi țesătură Twaron CT736 - Foc C	18	18,115
32 straturi țesătură Twaron CT736 - Foc A	17	16,000
32 straturi țesătură Twaron CT736 – Foc B	16	14,060
32 straturi țesătură Twaron CT736 – Foc C	14	13,000
42 straturi țesătură Twaron CT736 – Foc A	5	4,669
42 straturi țesătură Twaron CT736 – Foc B	9	8
42 straturi țesătură Twaron CT736 – Foc C	4	3,214
40 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736 – Foc A	14	12,354
40 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736 – Foc B	17	15,394

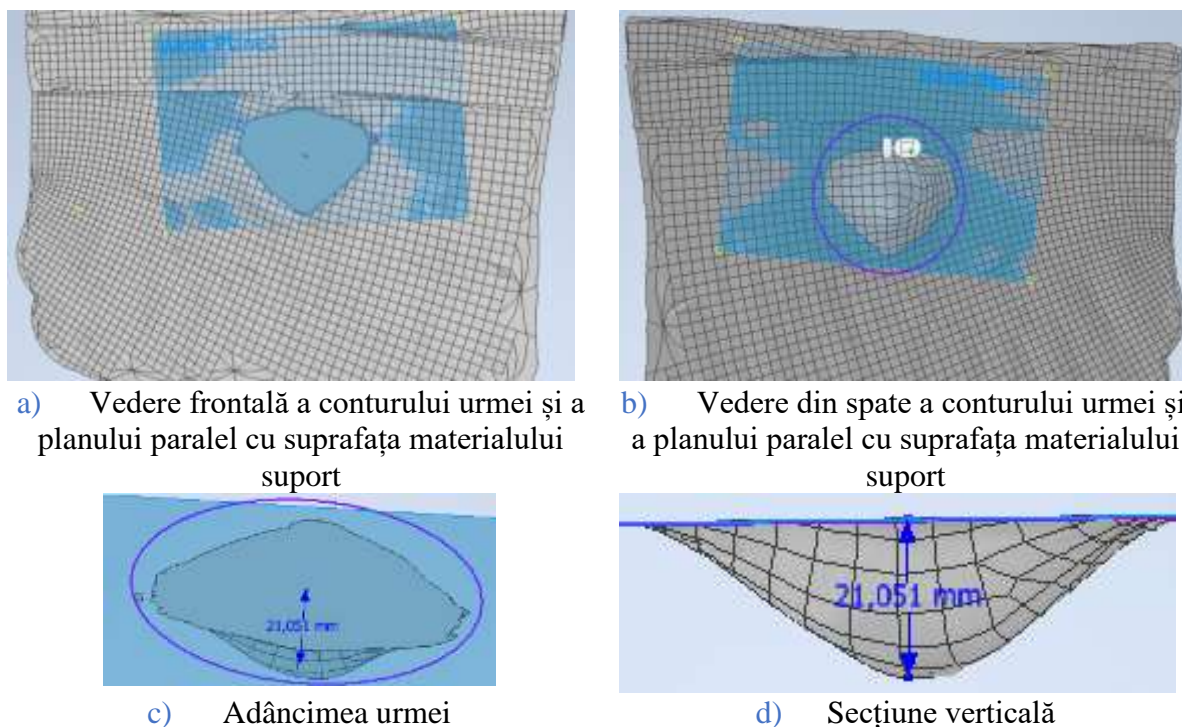


Figura 5.5. Vedere 3D cu delimitarea suprafeței amprente printr-un plan care conține suprafața nedeformată a plastilinei pentru panoul cu 24 Straturi Twaron CT736

5.2. Factori care influențează performanța materialului balistic în scenariile cu impact ridicat

5.2.1. Introducere

Aspectele de care se ține cont pentru îmbunătățire protecției balistice sunt:

- proprietățile materialelor;
- adăugarea unui număr mai mare de straturi în diferite aranjamente în timpul producției de panouri balistice [Obergh, 2015], [Yang, 2017], [Joo, 2008] (care are un efect negativ datorita greutății totale și flexibilității țintei [Karahani, 2008]).

Parametri care influențează performanța impactului balistic [Abteu, 2019] sunt tipul fibrei [Karahani, 2015], proprietățile firului, proprietățile materialului, structura țesăturii, geometria și viteza proiectilului, densitatea suprafață a materialului ballistic, dimensiunea țintei, numărul de straturi, secvența de stratificare a straturilor țintă [Ralph, 2023], [Porwal, 2005], construcțiile textile, cum ar fi țesăturile/nețesuturile și țesăturile 2D/3D [Briscoe, 1992], [Karahani, 2008], [Othman, 2013], [Bajya, 2021], frecarea dintre proiectil-fir, fir-fir și filament-filament [Maithani, 2023], [Zhou, 2022], [Chu, 2014], [Chu, Y., Chen, X., Wang, 2014], [Ha-Minh, 2012]

În timpul evenimentului de impact balistic, ținta oferă rezistență la penetrarea / perforarea proiectilului în sine. Energia cinetică incidentă a proiectilului ar fi absorbită de țintă prin diferite mecanisme de absorbție a deteriorărilor și a energiei (Figura 5.6).

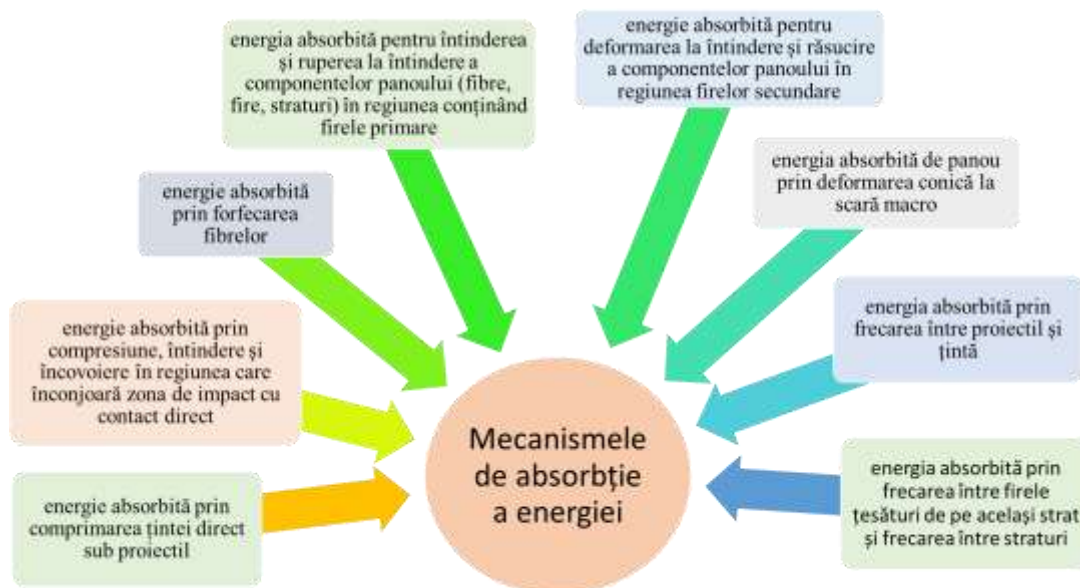


Figura 5.6. Mecanisme de absorbție a energiei, diagramă prelucrată după [Pandya, 2015]

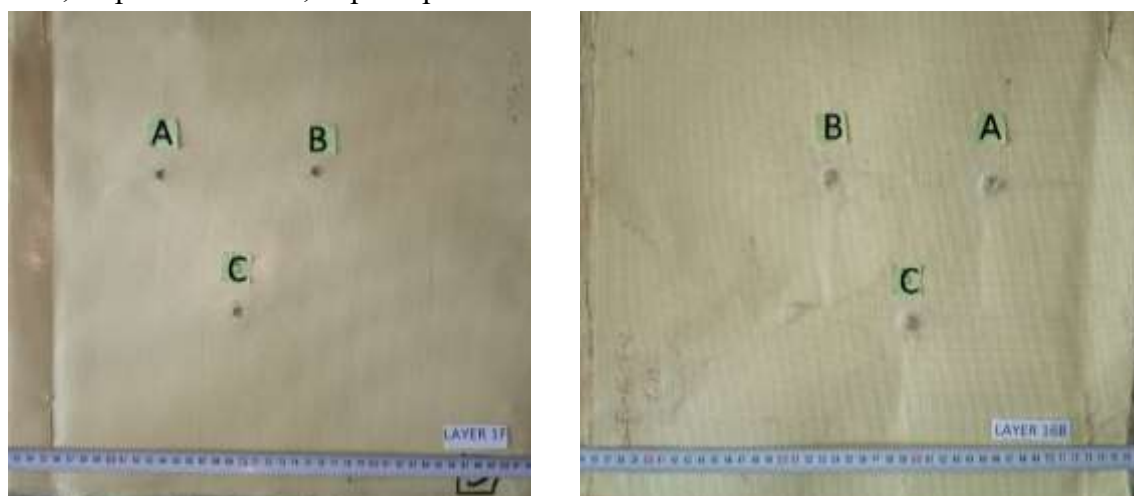
5.2.2. Analiza fotografiilor macro a panourilor testate, pe fiecare panou testat

Analiza fotografiilor macro ale impactului panourilor realizate din țesătură stratificată Twaron CT736 cu un proiectil FMJ de 9 mm și a impactului panourilor din țesătură stratificată Twaron SRM509 și Twaron CT736 implică o examinare detaliată a imaginilor pentru a aduna informații despre dinamica impactului și performanța materialului.

5.2.2.1. Analiza celor trei focuri pe panouri din țesătură Twaron CT736

Analiza celor trei focuri ale panoului realizat din 16 straturi Twaron CT736

În Figura 5.7 sunt date imagini cu panoul format din 16 straturi de țesătură Twaron CT736, dispuse stratificat, după impact.



a) față

b) spate

Figura 5.7. Panoul format din 16 de straturi de țesătură Twaron CT736

Analiza focului A al panoului cu 16 straturi Twaron CT736

Stratul 1 prezintă două fire rupte, unul în direcția bătăturii și unul în direcția urzelii (Figura 5.8) și cinci fire rupte parțial, fibrele care nu au fost rupte sunt împinse în lateral. Se poate observa pe acest start cum proiectilul a împins în lateral firele principale.

Stratul (Figura 5.8) prezintă o rupere similară cu cea a stratului 7, sunt rupte complet doar două fire și substratul de polimer (PVB) crapă și o parte din fragmentele dezlipite de pe substratul de țesătură se lipsesc de zona distrusă a stratului anterior.

Stratul 16 (Figura 5.8) are două fire rupte, unul în direcția urzelii și unul în direcția bătăturii și patru fire care au doar o parte din fibre rupte, fire rupte parțial. Fibrele care nu au fost rupte, de la firele rupte parțial sunt împinse în lateral.

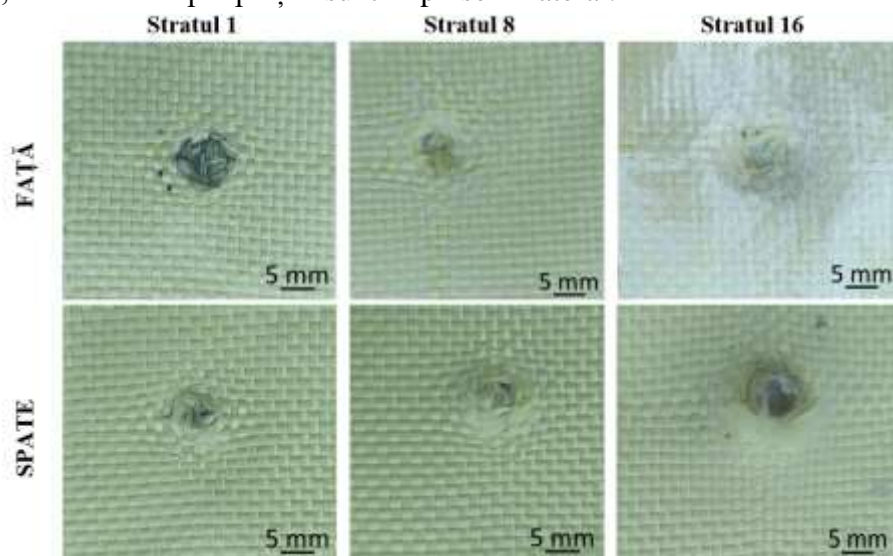


Figura 5.8. Detalii ale focul A al panoului cu 16 straturi de țesătură Twaron CT736

Analiza focului B al panoului cu 16 straturi Twaron CT736

Stratul 1 (Figura 5.9) are un fir rupt complet și patru fire rupte parțial. Fibrele care nu au fost rupte sunt împinse în lateral. Substratul de polimer (PVB) se desprinde și sare în zona de impact și în zona din jurul impactului.

Stratul 8 (Figura 5.9) nu are nici un fir rupt complet, prezintă patru fire rupte parțial, fibrele care nu au fost rupte sunt împinse în lateral.

Stratul 16 (Figura 5.9) are două fire rupte complet și firele care sunt împinse în lateral prezintă fibre rupte.

Analiza focului C al panoului cu 16 straturi Twaron CT736

Stratul 1 (Figura 5.10) prezintă ruperea completă a unui singur fir și cinci fire rupte parțial. Firele principale care nu au fost rupte, sunt împinse în lateral. Substratul de polimer (PVB) se desprinde și sare doar în zona de impact, unde firele sunt distruse.

Stratul 8 (Figura 5.10) are două fire principale rupte complet, rupere prin forfecare și două fire principale rupte parțial. Fibrele firelor rupte parțial, care nu au fost rupte sunt împinse în lateral.

Stratul 16 (Figura 5.10) are două fire rupte complet și un fir două fire rupte parțial, această rupere a firelor este datorată întinderii firelor.

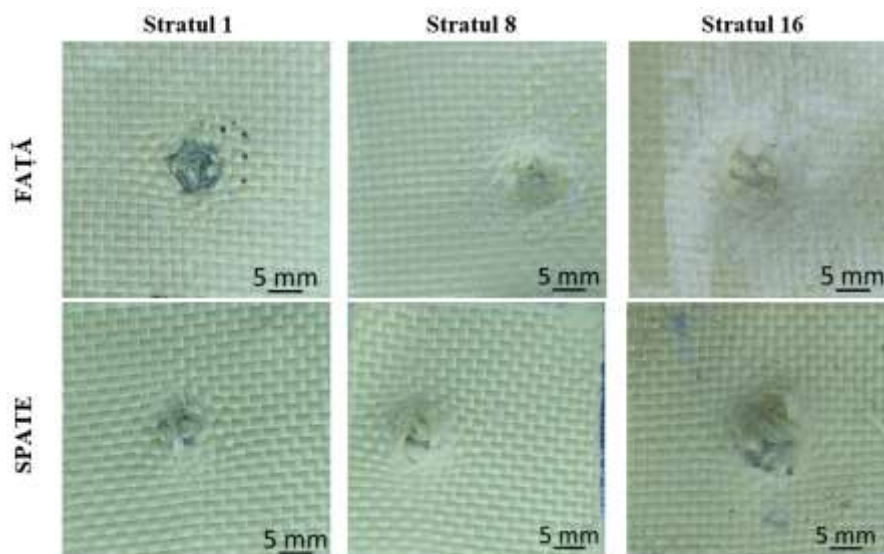


Figura 5.9. Detalii ale focului B al panoului cu 16 straturi de țesătură Twaron CT736

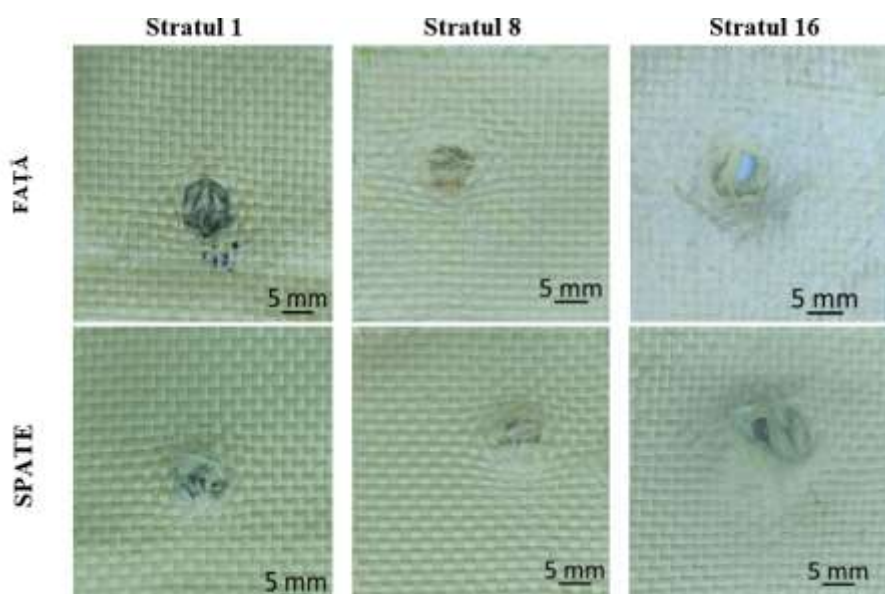
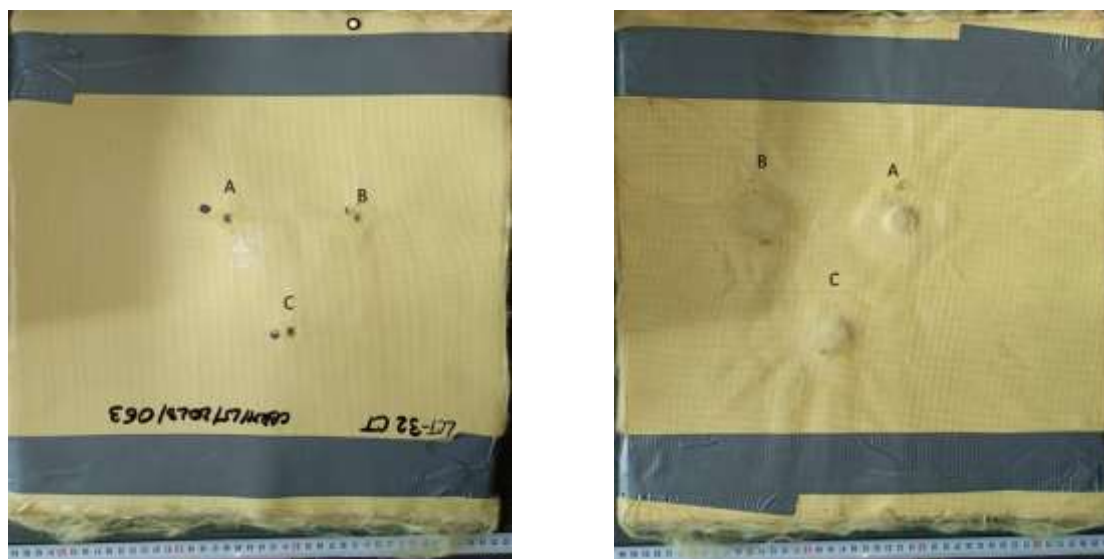


Figura 5.10. Detalii ale focului C al panoului cu 16 straturi de țesătură Twaron CT736

Analiza celor trei focuri ale panoului realizat din 32 straturi Twaron CT736

Impactul proiectilului, 9 mm FMJ, asupra panoului realizat din țesătura Twaron CT736, în cadrul căruia au fost trase trei focuri cu proiectile de viteze diferite, oferă o perspectivă detaliată asupra comportamentului acestui material stratificat (Figura 5.11).

Focul B, cu o viteză inițială de 413,86 m/s, a produs o penetrare parțială în panoul din țesătura Twaron CT736. Focul A, având o viteză inițială de 428,07 m/s, a generat o penetrare parțială similară în panou. Focul C, cu o viteză inițială de 422,39 m/s, a generat o penetrare parțială în țesătura Twaron CT736.



a) Față b) Spate
Figura 5.11. Panoul cu 32 de straturi țesătură Twaron CT736

Analiza focului A al panoului cu 32 de straturi Twaron CT736

Stratul 1 (Figura 5.12) prezintă patru fire rupte parțial, fibrele care nu au fost rupte sunt împinse în lateral. Substratul de polimer (PVB) se desprinde din zona de impact și din zona din jurul zonei de impact.

Stratul 16 (Figura 5.12) are un fir rupt total și un fir rupt parțial. Celelalte fire principale sunt împinse în lateral și prezintă câteva fibre rupte. Substratul de polimer (PVB) se comportă similar cu cel de la stratul 15.

Pe ultimile straturi, substratul de polimer (PVB), crapă dar nu se desprinde de pe substratul de țesătură.

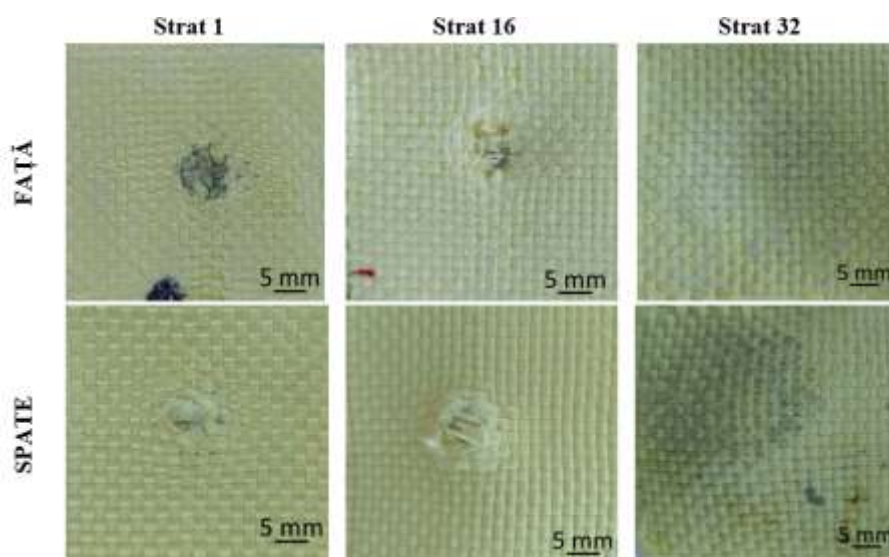


Figura 5.12. Detalii ale focului A al panoului cu 32 straturi de țesătură Twaron CT736

Analiza focului B al panoului cu 32 straturi Twaron CT736

Stratul 1 (și Figura A5.13) are un fir rupt total și trei fire rupte parțial. Celelalte fire principale, prezintă fibre rupte. Substratul de polimer (PVB) se desprinde și sare în zona de impact și în zona din jurul zonei distruse.

Stratul 16 (Figura 5.13) prezintă opt fire întinse și comprimate datorată forței de impact a proiectilului. Acest fenomen de întindere și comprimare a firelor evidențiază complexitatea interacțiunii dintre proiectil și materialul stratificat.

Pe ultimile 2 straturi se observă cum substratul de polimer (PVB) crapă chiar dacă proiectilul a fost oprit pe stratul 15 (Figura 5.13).

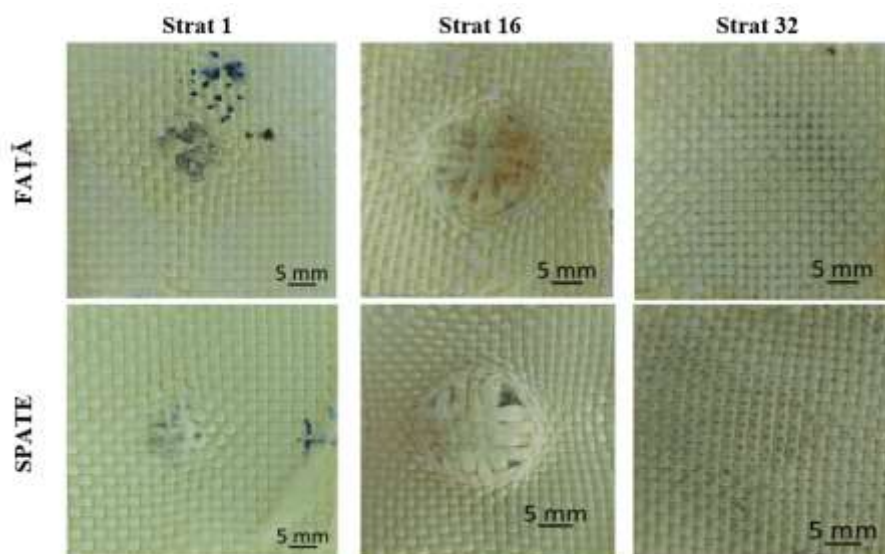


Figura 5.13. Detalii ale focului B al panoului cu 32 straturi de țesătură Twaron CT736

Analiza focului C al panoului cu 32 straturi Twaron CT736

Stratul 1 (Figura 5.14) are dezlipit substratul de polimer (PVB) de substratul de țesătură din zona de impact și din jurul zonei de impact. Acest strat are patru fire rupte parțial și celelalte fire principale sunt împinse în lateral, prezentând fibre rupte.

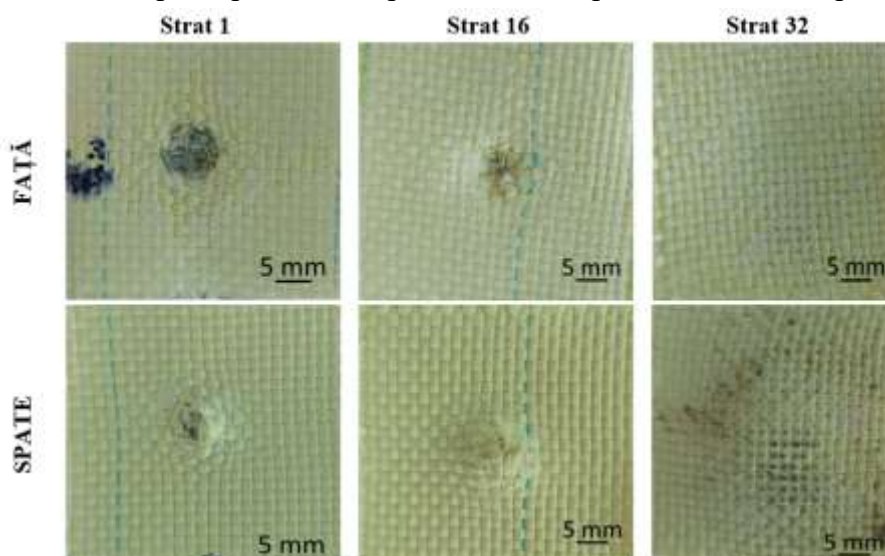


Figura 5.14. Detalii ale focului C al panoului cu 32 straturi de țesătură Twaron CT736

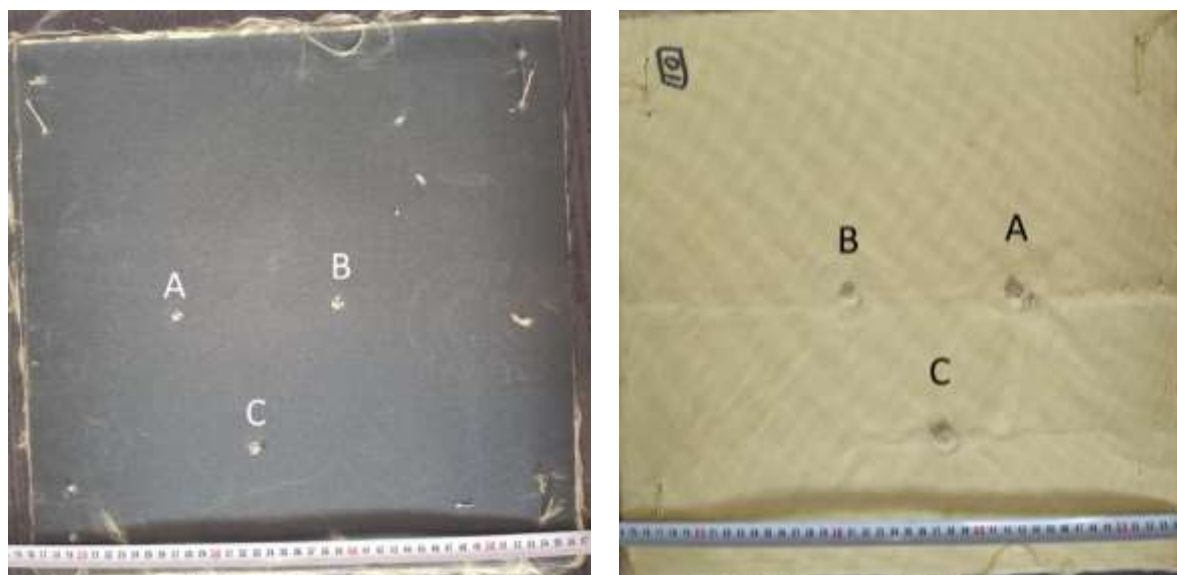
Stratul 16 (Figura 5.14) prezintă două fire rupte total și două fire rupte parțial. Acoperirea de polivinil butiral (PVB) prezintă semne de crăpare și dezlipire în zona de impact și în jurul acesteia. Ultimile straturi, straturi 31 și stratul 32 prezintă crăparea acoperirii de polimer PVB datorită forței de impact a proiectilului chiar dacă proiectilul a fost oprit pe stratul 20.

5.2.2.2. Analiza celor trei focuri pe panouri combinate, cu țesătură Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736

Analiza celor trei focuri ale panoului cu 16 straturi combinate, dcu țesătură Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736

Impactul proiectilului FMJ asupra panoului compozit format din 16 straturi combinate de țesătura Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736, supus celor trei focuri cu viteze diferite, dezvăluie reacții distincte ale materialului în fața diverselor niveluri de energie cinetică (Figura 5.15).

Focul A, cu o viteză inițială de 412,33 m/s, a generat un impact care a dus la penetrarea completă a panoului. Focul B, cu o viteză inițială de 415,67 m/s, a amplificat nivelul de energie cinetică transferat în panou. Acest lucru a condus la o penetrare totală similară cu focul A. Focul C, cu cea mai mare viteză inițială de 427,12 m/s, a exercitat o forță cinetică maximă asupra panoului. Rezultatul a fost o penetrare totală similară cu celelalte două focuri.



a) Față
b) Spate
Figura 5.15. Panoul hibrid, cu 16 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736

Analiza panoului cu 16 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736 - FOC A

Stratul 1 (Figura 5.16) are unsprezece fire rupte, șase într-o direcție și cinci într-o direcție. Acoperirea compozită cu carbură de siliciu se desprinde doar de pe capetele rupte ale firelor și prezintă o ușoară dezlipire în zona de impact.

Stratul 8 (Figura 5.16) prezintă o zonă de distrugere mai mare în comparație cu celelalte straturi, chiar dacă numărul de fire rupte nu a crescut. Stratul de țesătură prezintă doisprezece fire rupte, șase în direcția urzelii și șase în direcția bătăturii. Acoperirea compozită cu carbură de siliciu se desprinde din zona de impact și din zona din jurul impactului, fragmentele rupte au rămas prinse de stratul anterior.

Stratul 16 (Figura 5.16) are patru fire rupte parțial. Celelalte fire principale și fibrele care nu au fost rupte din firele rupte parțial sunt împinse în lateral. Acoperirea de polimer (PVB) crapă și se desprinde din zona de impact și din jurul aceste zonei.

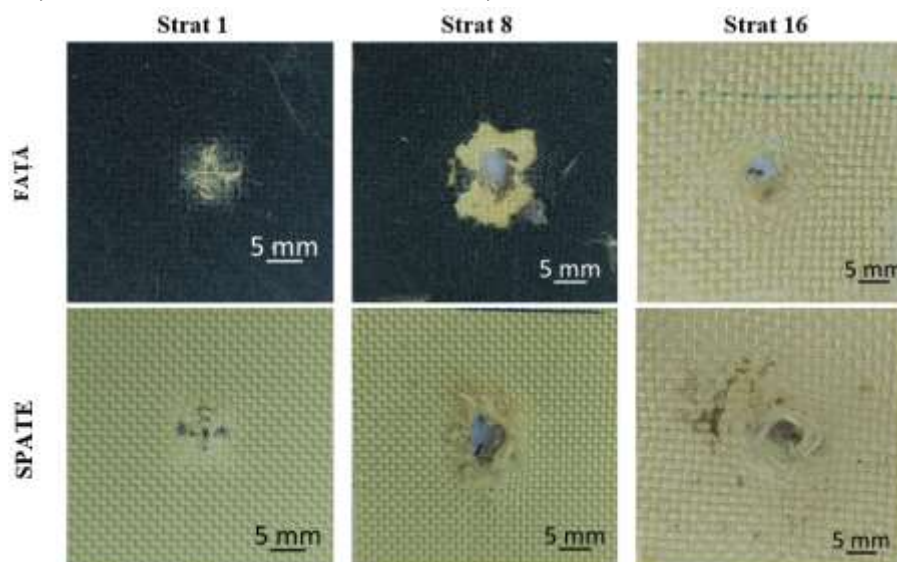


Figura 5.16. Focul A pe panoul cu 16 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736

Analiza panoului cu 16 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736 - Foc B

Stratul 1 (Figura 5.17) are doisprezece fire rupte, șase în direcția urzelii și șase în direcția bătăturii. Acoperirea compozită cu carbură de siliciu se desprinde și sare din zona de impact.

Stratul 8 (Figura 5.17) prezintă o zonă de distrugere mai mare a firelor și o zonă mai mare de dezlipire și rupere a substratului de carbură de siliciu. O parte din fragmente rupte au rămas prinse de stratul anterior. Stratul de țesătură prezintă unsprezece fire rupte, șase într-o direcție și cinci într-o direcție.

Stratul 16, (Figura 5.17) care este ultimul strat, nu prezintă nici un fir rupt total. Acoperirea din PVB crapă și se desprind fragmente din zona de impact și din jurul acestei zone, pe o porțiune mai mare în comparație cu straturile anterioare.

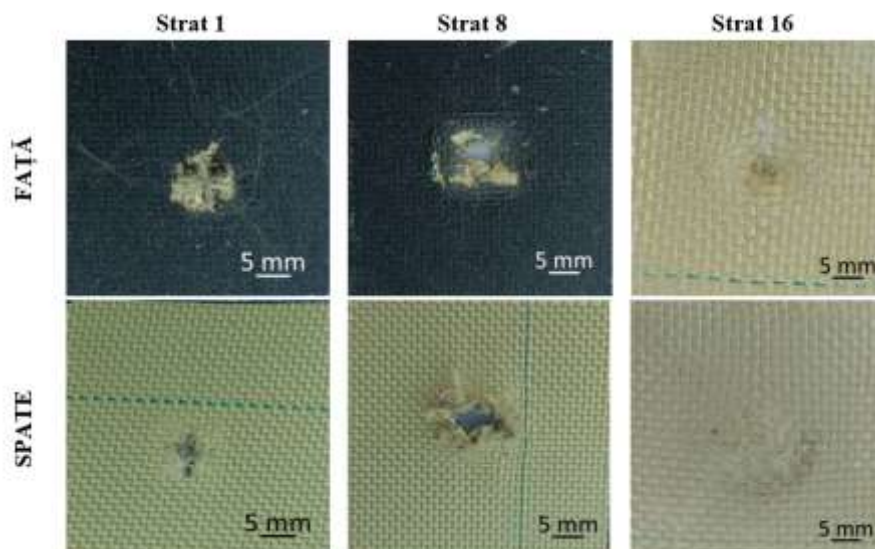


Figura 5.17. Focul B al panoului cu 16 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736

Analiza panoului cu 16 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736 - FOC C

Stratul 1 (Figura 5.18) are treisprezece fire rupte complet, șase într-o direcție și șase într-o direcție. Acoperirea compozită cu carbură de siliciu se desprinde doar de pe capetele rupte ale firelor și prezintă o ușoară dezlipire pe lângă zona de impact direct.

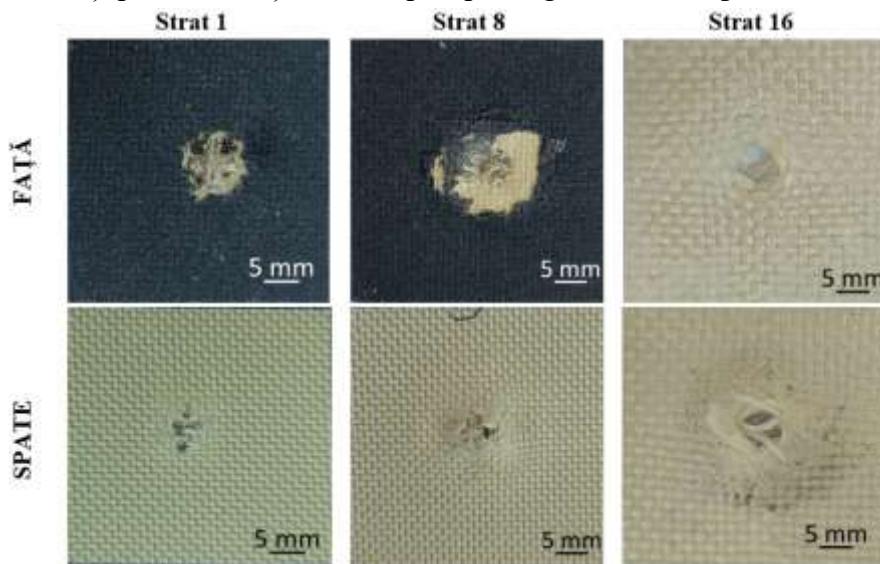


Figura 5.18. Focul C al panoului cu 16 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736

Stratul 8 (Figura 5.18) prezintă nouă fire rupte total, cinci într-o direcție și patru într-o direcție. Se observă și o împingere în lateral a firelor care nu au fost rupte. Acoperirea

compozită cu carbură de siliciu se desprinde de pe substratul de țesătură, fragmentele rupte au rămas prinse de stratul anterior.

Stratul 16 (Figura 5.18) nu prezintă fire rupte total, prezintă fire rupte parțial. Acoperirea de polimer PVB crapă se desprinde de pe capetele rupte ale firelor și sar fragmente din zona din jurul impactului pe o porțiune mai mare în comparație cu stratul anterior.

Analiza panoului cu 40 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736 - Foc A

Stratul 1 (Figura 5.19) are doisprezece fire rupte total. Acoperirea compozită cu carbură de siliciu aplicat pe primul strat al panoului sare în momentul impactului cu proiectilul, atât în zona de impact cât și în jurul acesteia.

Pe stratul 6 al panoului (Figura 5.19), se observă că în zona de impact, acoperirea compozită cu carbură de siliciu se desprinde de țesătură și este încrețit/pliat.

Stratul 23 (Figura 5.19) are patru fire rupte complet și patru fire rupte parțial. Acoperirea sau folia de polimer (PVB) se desprinde din zona distrusă și prezintă crăpături în zona din jurul impactului direct.

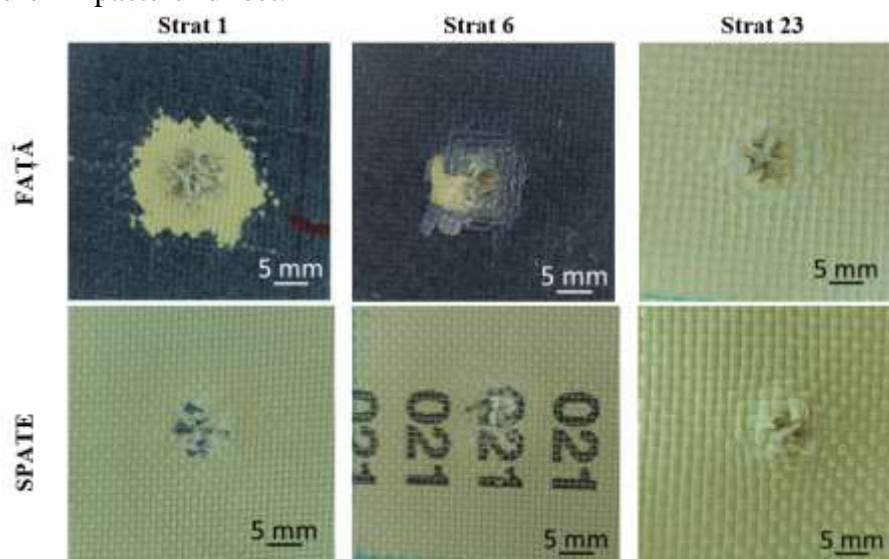


Figura 5.19. Focul A al panoului cu 40 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736

Analiza panoului cu 40 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736 - Foc B

Pe măsură ce proiectilul avansează prin panoul, efectul distructiv se amplifică și afectează într-o măsură mai mare straturile următoare. Datorită energiei cinetice transferate de proiectil materialului, acesta generează o propagare a deteriorării în adâncime și pe lățime a structurii. Acest fenomen poate fi observat prin ruperea, întinderea sau dezlipirea firelor, crăpăturile sau deformările prezente în straturile afectate de impactul inițial.

Proiectilul se oprește pe stratul 29. Stratul 29 și stratul 30 (Figura 5.20) au rămas prinse de proiectil. Acoperirea de polimer (PVB) de pe stratul 29 se desprinde pe o zonă mai mare, au mai rămas doar câteva fragmente. Firele de pe stratul 30 prezintă o alungire datorată forței de impact a proiectilului. Această alungire este rezultatul deformării temporare a firelor sub presiunea proiectilului care se deplasează la viteză mare. Aceste forțe puternice provoca întinderea și îndoirea firelor, fără a le rupe. Alungirea firelor poate indica capacitatea materialului de a absorbi momentane șocurile și tensiunile mari generate în timpul impactului.

Stratul 31 (Figura 5.20) prezintă o alungire a firelor sub proiectil, ceea ce indică că acest strat a contribuit la oprirea proiectilului. Alungirea firelor poate fi interpretată ca o reacție la forțele și presiunile exercitate de proiectil în timpul impactului. Acest fenomen indică faptul că stratul 31 a reușit să absoarbă și să redistribuie energia impactului într-o manieră care a contribuit la încetinirea sau oprirea proiectilului.

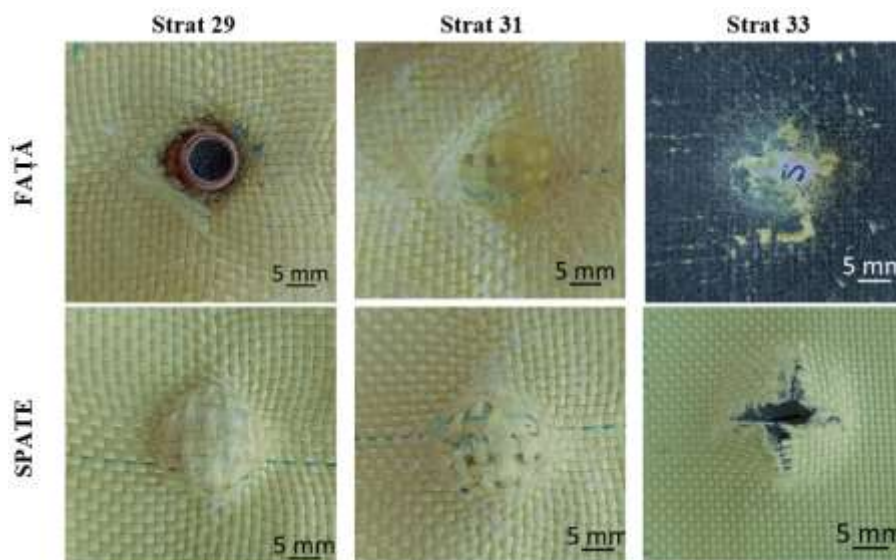


Figura 5.20. Focul B al panoului hibrid, cu 40 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736

Următoarele 4 straturi (stratul 33, stratul 34, stratul 35 și stratul 36) (Figura 5.20) prezintă fire rupte, semnificând că aceste straturi nu au reușit să absoarbă o parte semnificativă din energia de impact exercitată asupra materialului. Această observație indică că aceste straturi nu au avut capacitatea de a disipa sau redistribui eficient energia de impact a proiectilului. Deși straturile anterioare au reușit să oprească sau să încetinească progresul proiectilului, aceste patru straturi ulterioare nu au putut îndeplini aceeași funcție de absorbție a energiei, ceea ce a dus la ruperea firelor.

Analiza panoului cu 40 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736 - Foc C

Stratul 1 prezintă 13 (Figura 5.21) fire rupte complet, șase fire într-o direcție și șapte fire în cealaltă direcție. Acoperirea compozită cu carbură de siliciu aplicat pe acest strat se

desprinde și sare din zona de impact dar și din zona din jurul impactului. Această dezlipire este generată de impactul puternic al proiectilului.

Stratul 16 prezintă două fire rupte total și un fir rupt parțial. Aceste fire sunt rupte prin forfecare. Folia de polimer (PVB) se desprinde din zona de distrugere și se desprind și sar fragmente și din zona din jurului zonei distruse.

Observăm că, distrugerea următoarelor 4 straturi, care sunt din material Twaron CT736, se comportă similar ca la straturile anterioare, pe măsură ce proiectilul avansează și distrugerea straturilor este mai accentuată.

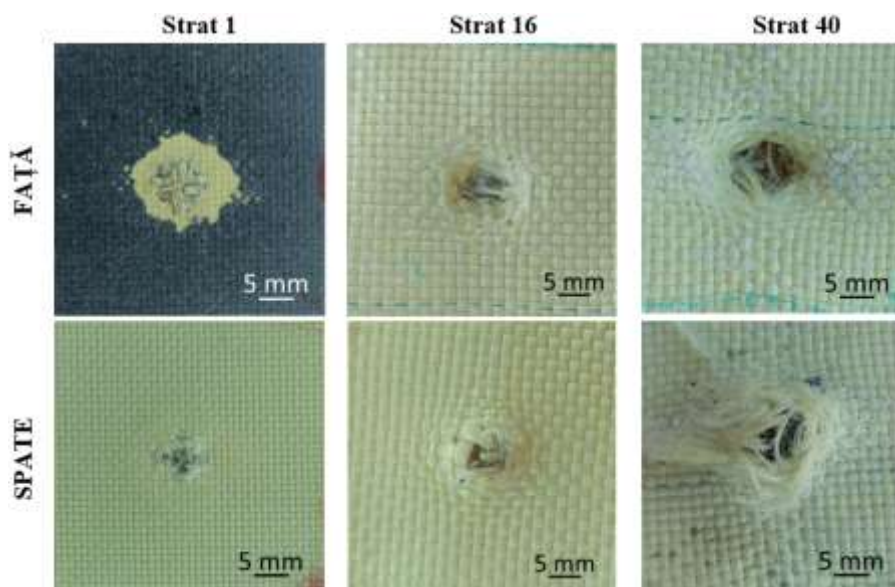


Figura 5.21. Focul C al panoului cu 40 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736

5.2.3. Analiza mecanismului de distrugere a panourilor la impact prin intermediul imaginilor SEM

5.2.3.1. Introducere

În acest subcapitol se analizează și se explică modul de distrugere a țesăturii Twaron la scară multi-lungime. Acest material este utilizat în mod obișnuit în diverse sisteme de protecție a căror principală cerință este un nivel ridicat de rezistență la penetrare împotriva proiectilelor cu energie cinetică mare. Eficiența ridicată a masei (adică, performanța normalizată în masă) a acestor materiale compozite le face deosebit de potrivite pentru utilizare în aplicații cum ar fi îmbrăcăminte de protecție.

5.2.3.2. Analiza la scară multiplă a materialelor pentru sistemele de protecție

Compozitele polimer-matrice armate cu fibre continue aflate în cercetare sunt materiale destul de complexe [Grujicic, 2016]. Această complexitate este dată de:

- microstructură/arhitectură ierarhică/multi lungime;

- răspunsul lor mecanic este adesea destul de neliniar și depinde de viteză/timp/temperatură/presiune;
- sunt asociate cu o multitudine de fenomene/procese complexe (de exemplu, răsucirea/flambajul filamentului, frecarea inter filamentului și alunecarea).

O examinare detaliată a compoziției intrinseci a acestei clase de materiale dezvăluie în mod obișnuit existența a opt scale de lungime microstructurale bine definite [Grujicic și colab., 2011b,c, 2013a,b,c,d, 2014d]. Schemele și explicațiile acestor scale de lungime, pornind de la cea mai fină scară de lungime (adică, la nivel de lanț molecular), sunt furnizate în Figura 5.22.

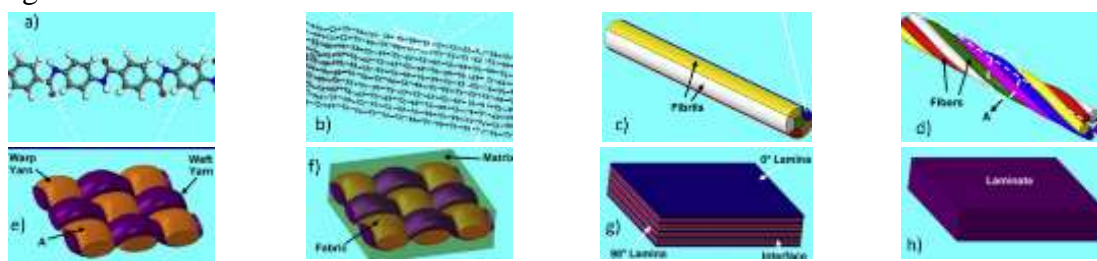


Figura 5.22. Scheme simple ale microstructurii/arhitecturii materialului la diferite scări de lungime [Grujicic, 2016]

5.2.3.3. Structura și morfologia fibrei aramidice

La scara de lungime la nivel de lanț molecular, structura chimică și conformația moleculelor individuale care constituie lanțul sunt analizate folosind instrumente de modelare atomică/moleculară/proceduri [Grujicic et al., 2011b,c]. materialul este modelat ca o colecție de particule constitutive (atomi sau ioni) care interacționează prin intermediul forțelor de valență (chimice) și nelegate (fizice). Scopul principal al modelării materialelor la această scară de lungime este de a identifica cele mai probabile conformații moleculare prezente în fibrile (definite în continuare). Acest lucru reduce foarte mult costul de calcul cheltuit la scara lungimii fibrilei.

Fibrilele sunt mănunchiuri mai mici de lanțuri moleculare în care moleculele de lanț sunt strâns legate într-o fază cristalină perfectă sau aproape perfectă. Materialul la această scară de lungime (precum și scara de lungime a fibrei) poate conține o varietate de defecte microstructurale și topologice și impurități chimice care îi pot modifica în mod semnificativ proprietățile [Grujicic și colab., 2011b,c]. Materialul la această scară de lungime este tratat ca o colecție de particule discrete care interacționează/legate și analizat folosind instrumente/proceduri clasice de modelare atomică/moleculară. Informațiile obținute la această scară de lungime sunt apoi trecute la scara de lungime a fibrei, unde sunt utilizate ca intrare la o procedură de omogenizare pentru determinarea proprietăților mecanice ale materialului la nivelul fibrei.

Pentru obținerea fibrelor de înaltă performanță trebuie luat în vedere următoarele abordări ca să se poată îndeplini cerințele:

- greutate moleculară foarte orientată, dar relativ redusă, cu lanț rigid și polimer asemănător cu tija, cum ar fi un aramid (liotrop) sau lichid cristal (termotrop)

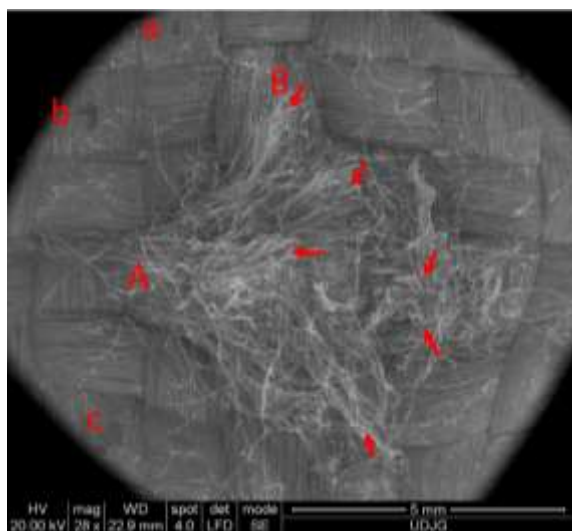
polimer. Acesta poate fi apoi filat în fibră și dat o greutate moleculară ridicată prin tragere și/sau procese de recoacere. Filarea aramidei va fi folosită ca exemplu pentru această abordare.

- un polimer cu lanț lung, cu greutate moleculară foarte mare, flexibil, înfășurat aleatoriu, cum ar fi polietilena cu greutate moleculară foarte mare (HMPE) [Tam, 2016].

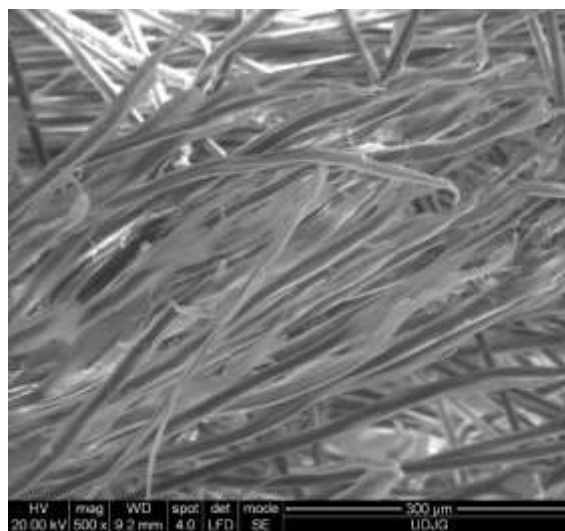
Când fibra de aramidă este supusă testării la tracțiune, modurile sale tipice de rupere sunt în general o rupere de tip fibrilat. Acest mod de rupere reprezintă o structură de fibră laterală foarte ordonată. Fibrele de aramidă se fibrilează ușor la abraziune, în special în direcția perpendiculară pe axa fibrelor [Tam, 2016].

5.2.3.4. Analiza modului de distrugere ale panourilor testate pe baza fotografiilor SEM

Am realizat examinări microscopice ale probelor deteriorate folosind microscopul electronic cu scanare (SEM). Mecanismele de rupere ale țesăturilor după impactul proiectilului au fost examinate cu microscopul electronic. Figura 5.23 a și b prezintă rezultatele penetrării părții frontale a primului strat al panoului format din 32 straturi de țesătură Twaron CT736. S-a notat pe Figura 5.23a cu litera A și litera B firele care sunt rupte complet și cu litera a, b și c bucăți/fragmente de la acoperirea de polimer. În Figura 5.22b este dat un detaliu pentru a se vedea modul de rupere a fibrelor care este de tip fibrilat.



a) Față



b) detaliu față

Figura 5.23. Vedere frontală - Modul de distrugerea a firelor de pe stratul 1 al panoului cu 32 straturi Twaron CT736.

Pentru a explica într-un cadru unitar distrugerile observate la microscopul cu scanare electronică, Figura 5.24 și Figura 5.25 arată sintetic, mecanisme de cedare caracteristice impactului balistic pe panouri din țesături.

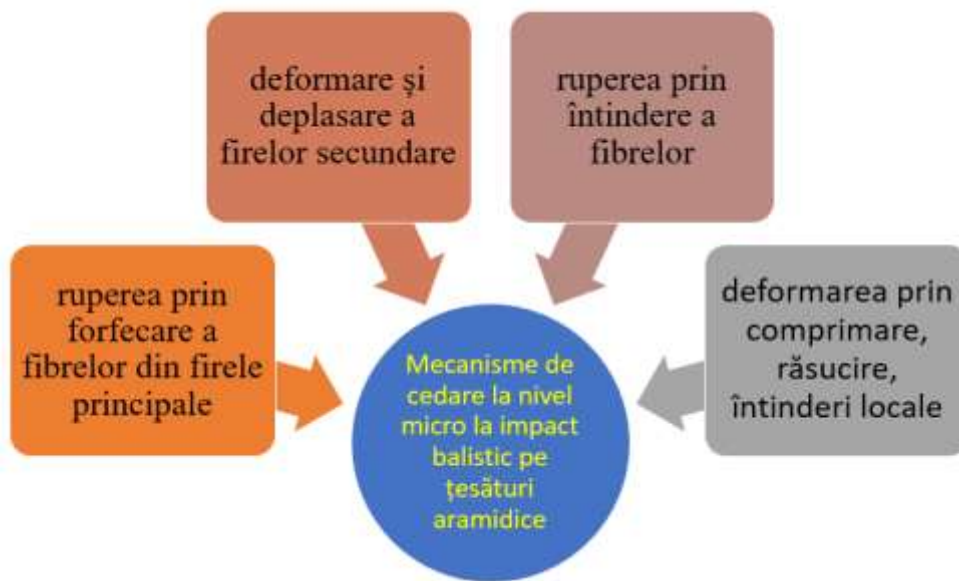


Figura 5.24. Mecanisme de cedare la nivel micro la impact balistic pe țesături aramidice

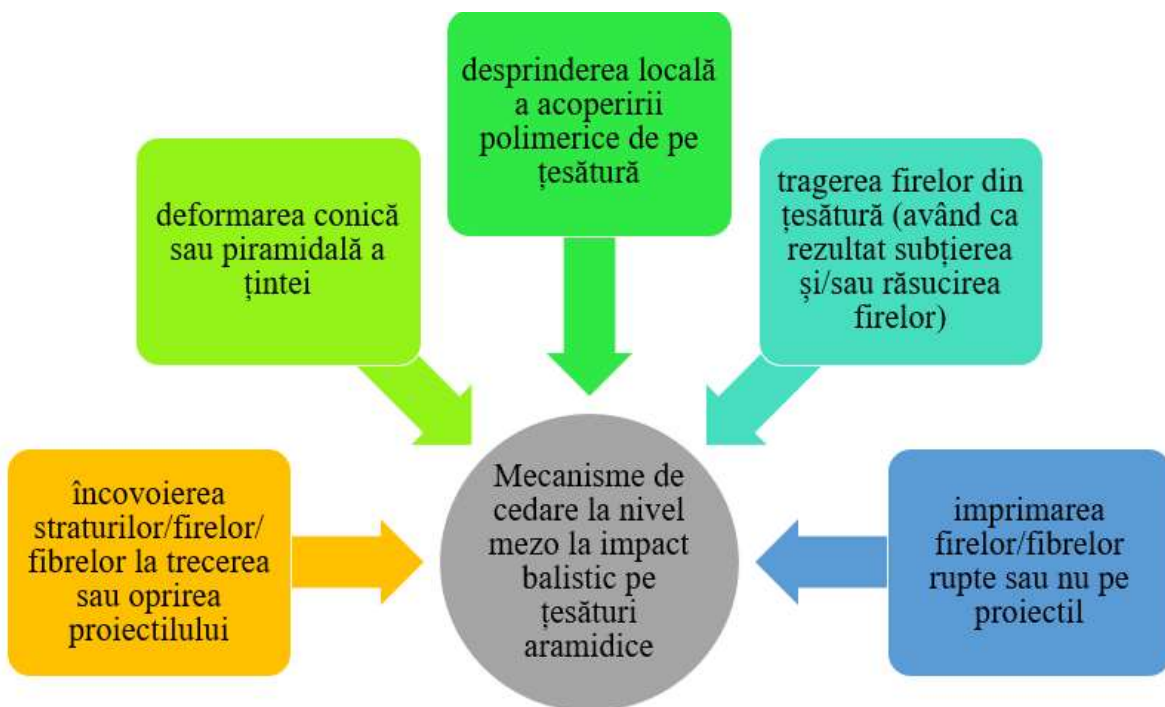
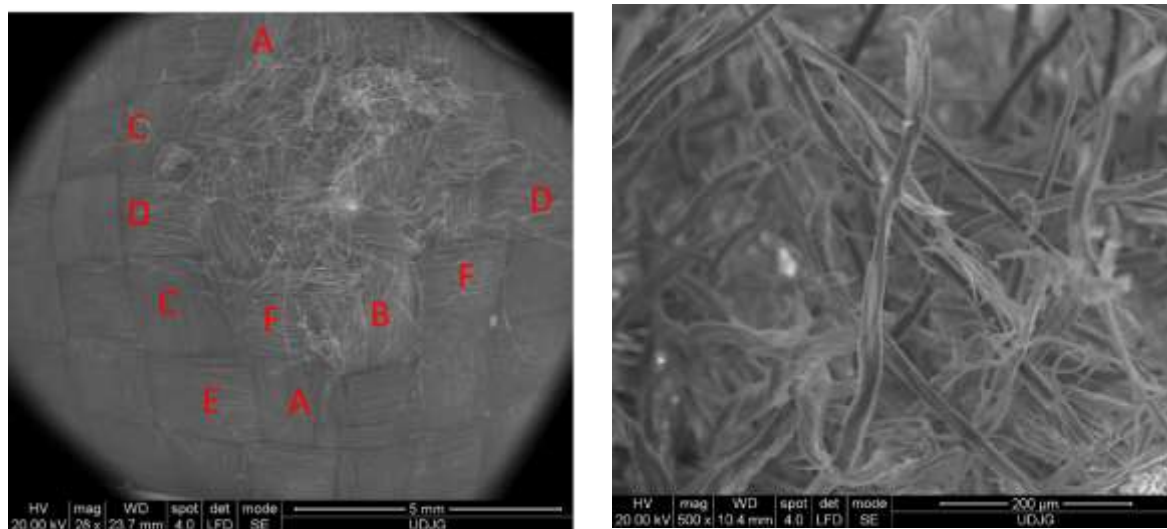


Figura 5.25. Mecanisme de cedare la nivel mezo la impact balistic pe țesături aramidice

Figura. 5.26 a și b prezintă vederea din spate a distrugerii primului strat al panoului format din 32 straturi de țesătură Twaron CT736. S-a notat pe Figura 5.26a cu litera D și litera B firele care au fost rupte complet și cu litera A, și C fire rupte parțial și cu E și F fire împinse în lateral cu prezența a câtorva fibre rupte. În figura 5.26b este dat un detaliu pentru a se vedea modul de rupere a fibrelor care este de tip fibrilat.



a) spate

b) detaliu spate

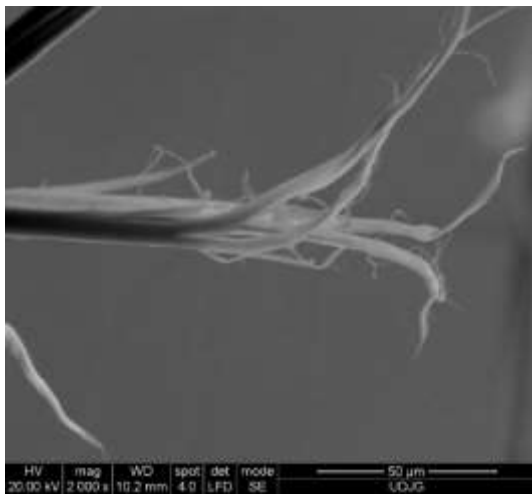
5.26. Vedere din spate - Modul de distrugerea a firelor de pe stratul 1 al panoului cu 32 straturi Twaron CT736.

Figura 5.23b și Figura 5.26b prezintă o rupere a fibrelor de tip fibrilat, rupere datorată tensiunii de tracțiune, deoarece structura lor de fibră laterală extrem de ordonată duce la un tip de rupere fibrilată, în care fibrele se rup de-a lungul liniilor organizate, dezvăluind structura lor internă de fibrile în strat exterior. Acest comportament unic este rezultatul aranjamentului molecular al materialului și contribuie la proprietățile mecanice excepționale ale fibrelor aramidice.

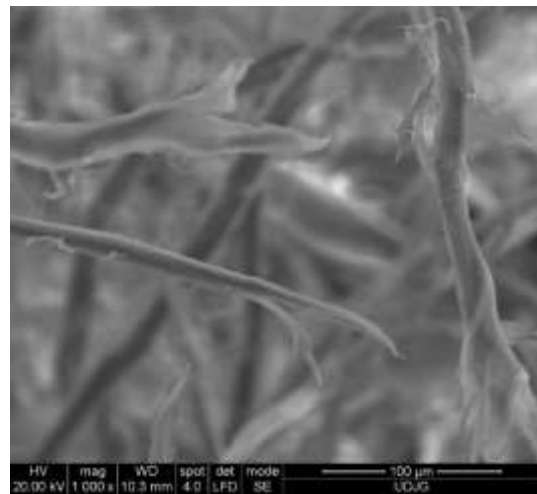
În Figura 5.27a este o fibră dintr-un fir principal (adică dintr-un fir rupt de proiectil se poate observa că solicitarea a determinat detașarea fibrelor unele de altele și ruperea succesivă prin întindere a fiecărei fibrile. Unele capete a fibrelor sunt răsucite și cu întinderi locale mari. Toate acestea indică ruperea prin întindere. În detaliu de pe stratul 1 al panoului cu 32 straturi (Figura 5.27b) se observă trei fibre care au fost distruse prin mecanisme diferite, firul de sus este rupt prin forfecare și strivire, firul din dreapta, aproape vertical, este răsucit, întins, cu câteva fibrile rupte, iar fibra de jos este fibrilată în zona de rupere iar fibrele sunt rupte prin întindere. În partea stângă, dincolo de urma de fibrilație fibra este local gătită tot din cauza solicitării la întindere.

În Figura 5.27c avem fibre rupte la marginea orificiului de pătrundere. Privind la nivel micro este dificil de imaginat ce se întâmplă la o scară mai mare dar studierea mecanismelor de distrugere la nivelul fibrelor face posibilă alegerea fibrelor adecvată pentru o anumită solicitare. A-fibră forfecată (se observă că diametrul fibrei nu este modificat), B câteva fibrile dintr-o fibră au fost întinse foarte mult și care s-au rupt pe rând, C – fibră ruptă prin întindere cu capătul subțiat local, tipic pentru polimeri și puțin mai departe se vede o răsucire locală, D- fibra este ruptă prin forfecare, E – două fibre rupte prin întindere și se observă fibrilația.

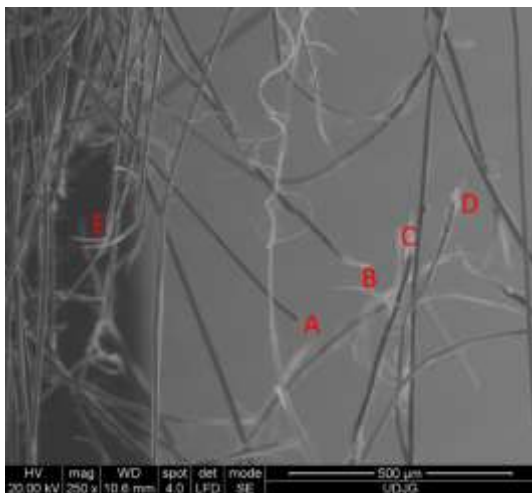
Ce s-a observat pe Figura 5.27c pe stratul 2 se poate observa și pe fibre rupte de pe stratul 13 (Figura 5.27d).



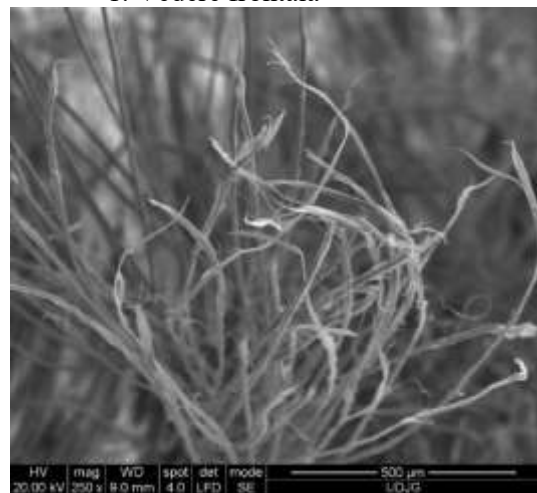
a) 32 straturi Twaron CT736, foc B, strat 2. Vedere frontală



b) 32 straturi Twaron CT736, foc B, strat 1. Vedere frontală



c) 32 straturi Twaron CT736, foc B, strat 2. Vedere frontală

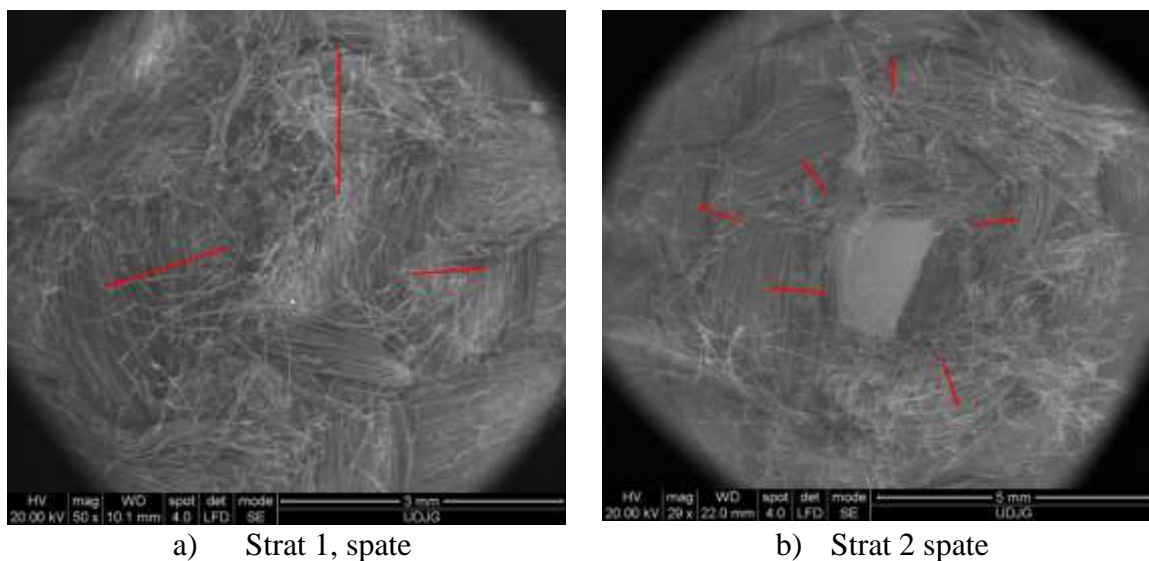


d) 32 straturi Twaron CT736, foc B, strat 13. Vedere frontală

Figura 5.27. Fibrilația fibrelor aramidice după testare la impact ballistic

Figura 5.28 prezintă micrografiile SEM ale suprafeței de rupere a probelor distincte după testul ballistic. Figura 5.28a arată că a existat o deplasare spre partea laterală a fibrelor în timpul impactului. Acest lucru se datorează probabil frecării mai mici dintre proiectil și țintă. Ca urmare, porțiunea de fibre lovită de proiectil a fost mică și, în consecință, a existat o absorbție mai mică de energie de către material.

În Figura 5.28b se observă că a existat fibrilație de-a lungul diametrului fibrelor aramidice datorită existenței unui gradient de proprietăți inerente procesului de fabricație. Acest mecanism datorat procesului de întindere a fibrelor este cunoscut sub numele de „peeling”.



a) Strat 1, spate

b) Strat 2 spate

Figura 5.28. Fotografii SEM ale suprafeței de rupere a stratului 1 și 2 după testul balistic a panoului cu țesătură Twaron CT736

Figura 5.29 și Figura 5.30 arată că unele fibre prezintă striaii longitudinale pe suprafața axială. Acesta este aspectul inițial sub tensiune mare de întindere. Astfel de striaii longitudinale pot fi dezvoltate mai pronunțate pentru a forma fisura axială cu creșterea tensiunii, așa cum se arată în Figura 5.31, Figura 5.32, În unele situații, scindarea axială proliferază în multe fibrile. Astfel de morfologii de distrugere a fost modul de rupere dominant al fibrelor Twaron sub impact, care a fost observat în mod obișnuit în jurul orificiului perforat de pe materialul impactat.

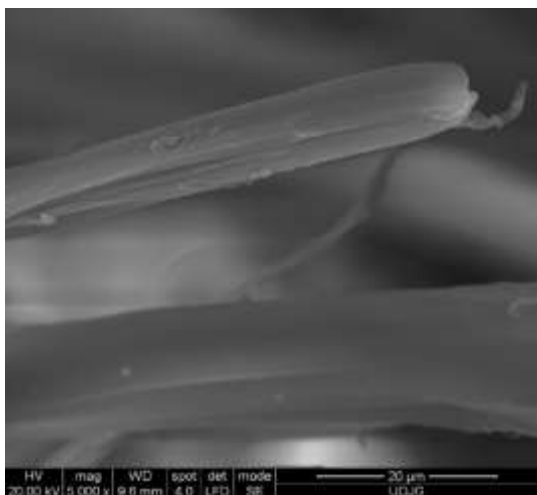


Figura 5.29. Striații longitudinale pe suprafața fibrelor, țesătură Twaron SRM509, strat 2, vedere frontală

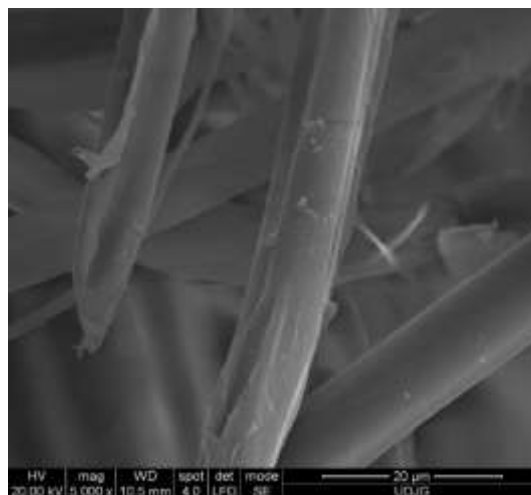


Figura 5.30. Striații longitudinale pe suprafața fibrelor, țesătură Twaron SRM509, strat 2, vedere frontală

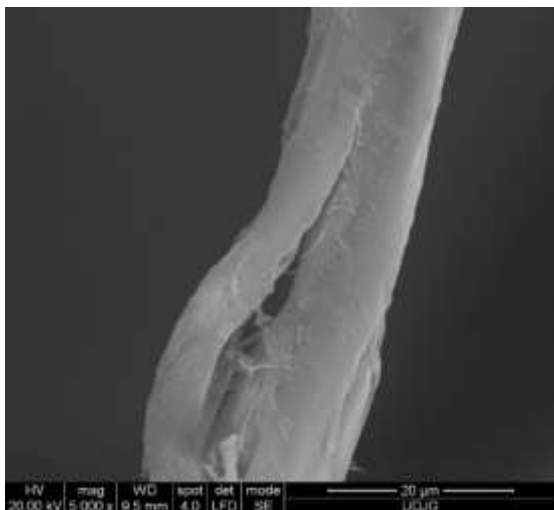


Figura 5.31. Fisură axială, pe o fibră de pe țesătura Twaron CT736, stratul 14, vedere frontală

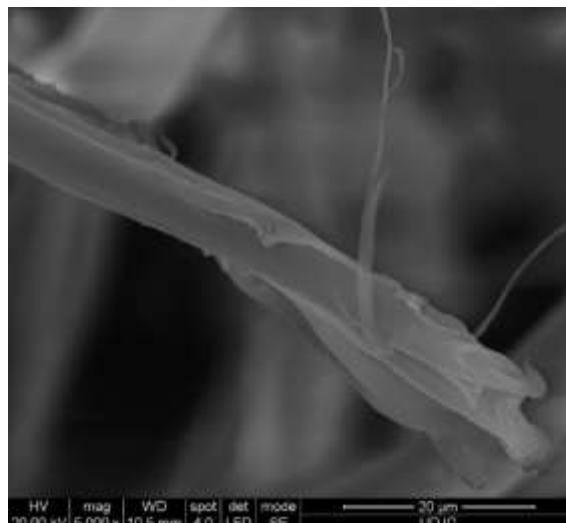


Figura 5.32. Fisură axială, țesătură Twaron SRM509, strat 1, vedere frontală

5.3. Concluzii finale asupra campaniei de testare

Panourile care au prezentat penetrare parțială (toate cele trei focuri au penetrat parțial panoul) sunt:

- panoul format din 32 straturi de straturi de țesătură Twaron CT736,
- panoul format din 42 straturi de straturi de țesătură Twaron CT736.

Diagramele din Figurile 5.33-5.34 indică valori ale BFS care susțin utilizarea materialului CT736 pentru realizarea unor panouri care să fie testate conform standardelor în vigoare pentru nivel IIA. Deci, studiul propus își dovedește utilitatea pentru evaluarea preliminară a acestui tip de semifabricat țesut pentru veste de protecție balistică.



Figura 5.33. Rezultatele adâncimii urmei pentru panoul format din 32 straturi de țesătură Twaron CT736

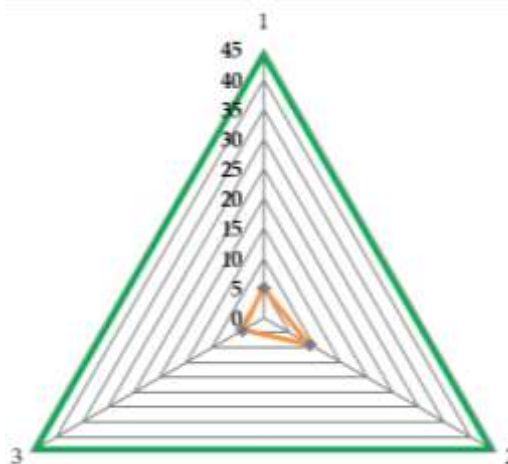


Figura 5.34. Rezultatele adâncimii urmei pentru panoul format din 42 straturi de țesătură Twaron CT736

Panoul format din 16 straturi de țesătură Twaron CT736 prezintă penetrare totală pentru toate cele trei focuri. Panoul format din 16 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736 prezintă penetrare totală pentru toate cele trei focuri. Modul de distrugere a firelor este diferit, firele straturilor de țesătură Twaron CT736 sunt împinse în lateral de proiectil și sunt rupte unul, două, maxim trei fire pe strat (prezintă o rupere prin întindere), țesătura Twaron SRM509 nu prezintă fire împinse în lateral, toate firele sunt rupte total, până la 13, patru fire rupte (Figura 5.35 și Figura 5.36).



Figura 5.35. Detaliu al stratului 1 (țesătură Twaron CT), Foc A, al panoului cu 16 straturi de țesătură Twaron CT736, vedere din spate



Figura 5.36. Detaliu al stratului 1 (țesătură Twaron SRM509), Foc A, al panoului cu 16 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509, vedere din spate

Ultimul strat al panoului hibrid cu 16 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și Twaron CT736, este din material Twaron CT736. Se observă că, în acest caz, ultimul strat al celor două panouri cu 16 straturi de țesătură Twaron CT736 și 16 straturi combinată de țesătură Twaron SRM509 și țesătură CT736 ce comportă similar, sunt trase de proiectil fire principale (Figura 5.37 și Figura 5.38.).

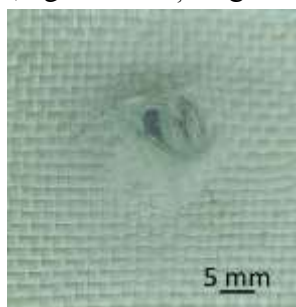


Figura 5.37. Detaliu al stratului 16 (țesătură Twaron CT736), Foc C, al panoului cu 16 straturi de țesătură Twaron CT736, vedere din spate

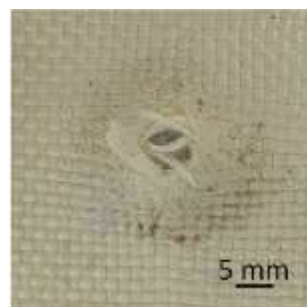


Figura 5.38. Detaliu al stratului 16 (țesătură Twaron CT736), Foc C, al panoului cu 16 straturi hibride, vedere din spate

Panoul format din 32 straturi de țesătură Twaron CT736 prezintă penetrare parțială pentru toate cele trei focuri. Panoul format din 32 straturi de țesătură combinată Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736 prezintă penetrare totală pentru toate cele trei focuri. Numărul de fire ale primului strat al panoului cu țesătură combinată prezintă un număr mult mai mare de fire rupte în comparație cu stratul 1 al panoului cu țesătura Twaron CT736 care are patru fire rupte parțial, fibrele care nu au fost rupte sunt împinse în lateral (Figura 5.39 și Figura 5.40). Stratul 1 al panoului cu țesătură Twaron CT736 prezintă fire împinse în lateral,

ceea ce arată că firele sunt mai flexibile. Stratul 1 al panoului cu țesătură combinată nu prezintă fire împinse în lateral.



Figura 5.39. Detaliu al stratului 1 (țesătură Twaron CT), Foc A, al panoului cu 32 straturi de țesătură Twaron CT736, vedere din spate



Figura 5.40. Detaliu al stratului 1 (țesătură Twaron SRM509), Foc A, al panoului hibrid cu 32 straturi, vedere din spate

Modul de distrugerea a firelor pe ultimul strat al panoului cu 32 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736 este similar, firele principale sunt trase de proiectil, dar cu cât viteza crește zona de deformare este mai mare (Figura 5.40).

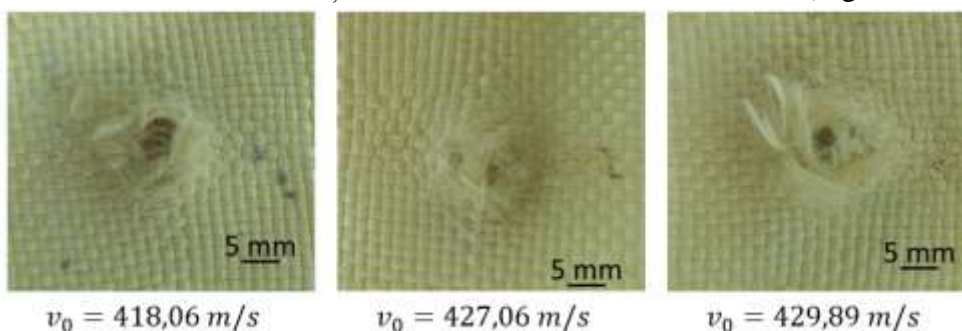
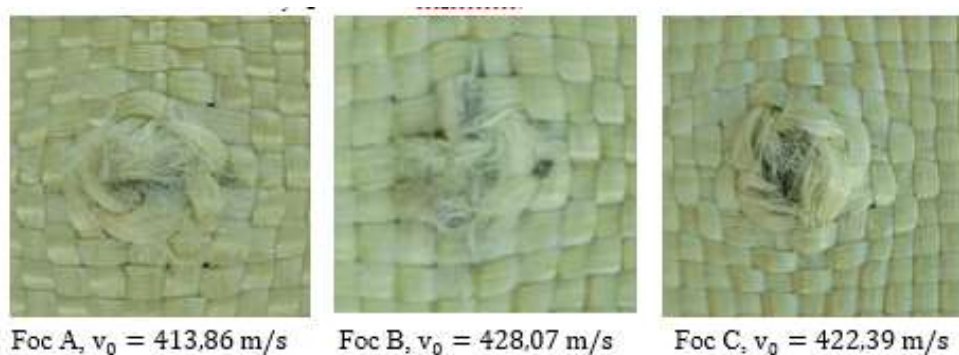


Figura 5.40. Vedere frontală a ultimului strat al panoului cu 32 straturi combinate din țesătură Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736 pentru toate cele trei focuri

Firele sunt împinse în lateral atunci când viteza de impact este mai mică, cu cât viteza crește, firele sunt rupte.

La viteze mai mici de impact, materialul rezista la forțele de impact și firele sunt împinse în lateral, provocând deformări locale, pe măsură ce viteza de impact crește, forțele devin mai intense și pot depăși capacitatea materialului de a rezista (Figura 5.41). Cu cât viteza impactului este mai mare, cu atât nivelurile de tensiune și presiune generate de impact cresc semnificativ. Acest lucru conduce la ruperea firelor în loc să fie doar împinse în lateral sau deformate local. Presiunea generată de impact la o viteză mare cauzează tensiuni mai mari în structura materialului. Datorită acestei presiuni intense și a nivelurilor ridicate de energie cinetică, materialul cedează și permită ruperea firelor.



Foc A, $v_0 = 413,86 \text{ m/s}$ Foc B, $v_0 = 428,07 \text{ m/s}$ Foc C, $v_0 = 422,39 \text{ m/s}$

Figura 5.41. Vedere din spate a primului strat al panoului cu 32 straturi de țesătură Twaron CT736 pentru toate cele trei focuri

Panoul cu 42 straturi combinate de țesătură Twaron SRM509 și țesătură Twaron CT736 se comportă diferit, proiectilul este oprit pe stratul 29 (țesătură Twaron CT736), stratul 29 și stratul 30 au rămas prinse de proiectil (Figura 5.42). Acest lucru sugerează că aceste straturi au fost capabile să absoarbă și să distribuie presiunea impactului, dar au suferit deformări semnificative. Stratul 29 și stratul 30 sunt din țesătură Twaron CT736 și prezintă o comprimare și întindere a firelor principale. Stratul 32 care este tot din țesătură Twaron CT736 este rupt, chiar prezintă o distrugere semnificativă, cu un număr mai mare de fire. Următoarele 4 straturi care sunt din țesătură Twaron SRM509 sunt rupte, prezentând o zona mai mare de distrugere/ruptură a firelor cauzată prin comprimarea straturilor anterioare. Acest lucru indică modul în care straturile anterioare au influențat comportamentul celor ulterioare și au condus la o distribuție a forțelor mecanice. Stratul 37 nu este rupt, acest strat și următoarele trei sunt din țesătură Twaron CT736. Acoperirea compozită cu carbură de siliciu nu a permis întinderea firelor, ceea ce a dus la ruperea straturilor de sub proiectil.

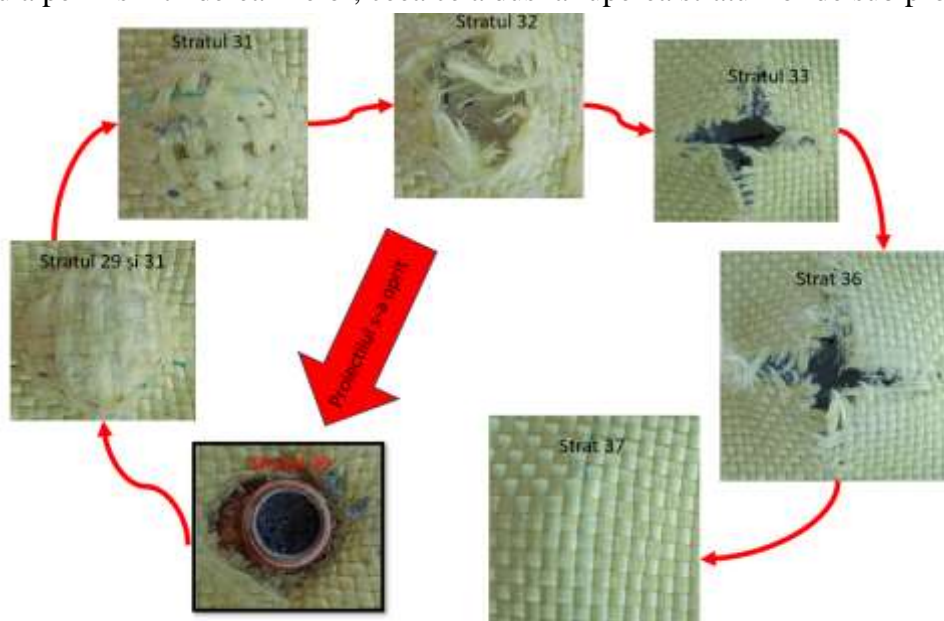


Figura 5.42. Aspectul distrugerii panoului hibrid cu 40 straturi, fotografiile de pe straturile reprezentative

Capitolul 6

CONCLUZII FINALE ASUPRA REZULTATELOR NUMERICE ȘI EXPERIMENTALE

6.1. Importanța temei de cercetare

Protecția împotriva proiectilelor externe de mare viteză este una dintre cerințele critice pentru diferite elemente structurale. Impactul cu viteză mare poate duce la penetrarea/perforarea țintei de către proiectil. Impactul balistic este un impact de mare viteză cauzat de o sursă de propulsie, în general de masă mică și viteză mare. Protecția împotriva încărcărilor de impact balistic este o problemă critică în proiectarea armurilor de grad balistic, a amortizoarelor de șocuri și a impactului și în dezvoltarea structurilor aerospațiale, marine, auto și civile de înaltă calitate. În ultimii ani, au fost efectuate cercetări ample asupra performanței la impact balistic a compozitelor cu matrice polimerică. Diferiți parametri precum masa, forma și dimensiunea și viteza proiectilului și geometria și proprietățile mecanice ale țintei influențează performanța impactului balistic al țintelor compozite.

Pe baza fenomenului de transfer de energie între proiectil și țintă, a disipării energiei și a mecanismelor de distrugere, fenomenul de impact este clasificat în trei categorii: impact cu viteză mică, impact cu viteză mare și impact cu viteză foarte mare.

Motivul acestei clasificări este că transferul de energie între proiectil și țintă, disiparea energiei și mecanismele de distrugere în țintă suferă modificări drastice pe măsură ce viteza proiectilului se modifică. Un eveniment de impact este considerat a fi un impact cu viteză redusă dacă durata de contact a impactului este mai mare decât perioada de timp a celui mai scăzut mod de vibrație al structurii. Pe de altă parte, la impactul de mare viteză sau balistic, durata de contact a impactului este mult mai mică decât perioada de timp a celui mai scăzut mod de vibrație al structurii. Impactul cu viteză foarte mare implică proiectile care se deplasează la viteze extrem de mari, astfel încât materialele țintă locale se comportă ca niște fluide. Impactul balistic este un impact cauzat de o sursă de propulsie, în general de masă mică și viteză mare.

Protecția împotriva proiectilelor de mare viteză este una dintre cerințele critice. Se efectuează cercetări ample asupra comportamentului la impact balistic al compozitelor cu matrice polimerică. În multe aplicații aerospațiale și de apărare, structurile compozite pot fi supuse unui impact localizat cu proiectil. Astfel de impacturi ar putea duce la indentarea, penetrarea parțială sau perforarea țintei compozite, în funcție de masa proiectilului, viteza și forma acestuia. Pentru a asigura siguranța structurilor compozite împotriva penetrării/perforării cu proiectile de mare viteză, este esențială înțelegerea clară și completă a procesului de penetrare și perforare în compozite. Protecția împotriva încărcărilor de impact balistic este o problemă critică în proiectarea blindajelor de calitate balistică, a amortizoarelor de șoc și a impactului și în dezvoltarea structurilor aerospațiale, marine, auto și civile de înaltă calitate. Instanțe de încărcare de impact asupra structurilor aerospațiale și de apărare

includ loviri de păsări, grindină, impactul de resturi fugare, gloanțe de calibru mic și mediu și fragmente de explozie.

Obiectivul principal al acestei teze intitulată ”Studiul numeric și experimental pentru sisteme de protecție balistică cu țesături din fibre aramidice” este de a îmbunătăți rezistența la impact balistic a sistemelor de protecție individuală.

Obiectivele specifice sunt următoarele:

- a) analiza eficacității la impact a unui anumit tip de țesătură de înaltă performanță,
- b) investigarea strategiei de proiectare a armurii hibride, folosind țesături de înaltă performanță acoperite,
- c) utilizarea scanării și măsurării 3D a adâncimii urmei în materialul suport pentru testele efectuate pe panouri de protecție, cu un singur proiectil (nivel IIA),
- d) dezvoltarea unui model numeric la nivel mezo (la nivel de fir) care să valideze testele experimentale și să poată fi util într-un anumit interval al parametrilor variabili: număr de straturi, tip de proiectil și viteză de impact.

6.2. Concluziile finale ale tezei

În Tabelul 6.1 sunt date rezultatele testelor balistice pentru probele de protecție individuală supuse impactului cu proiectilul 9 mm Full Metal Jacket (FMJ), studiate în această lucrare.

Adâncimea amprentei în materialul suport (plastilină balistică) (BFS) este o măsurare a cât de mult se deformează materialul suport, atunci când este panoul este presat pe acesta, lovit de o amenințare balistică (în acest caz un proiectil 9 mm FMJ). Este o măsură esențială în evaluarea siguranței sistemului de protecție, deoarece determină nivelul de traumă sau rănire contondente pe care o poate suferi un purtător, chiar dacă proiectilul este oprit să pătrundă în sistemul de protecție. O adâncime mai mică a feței din spate indică un risc mai scăzut de rănire, deoarece înseamnă că mai puțină forță este transmisă prin armură către corpul purtătorului la impact.

Adâncimea amprentei în materialul suport este, de obicei, măsurată în milimetri și este un parametru esențial în testarea și certificarea armurii corporale. În esență, în timp ce performanța balistică evaluează capacitatea armurii de a opri proiectilele și de a preveni penetrarea, semnătura feței din spate măsoară măsura în care armura reduce impactul asupra corpului purtătorului. Reducerea semnăturii feței din spate este importantă pentru a minimiza trauma sau rănirea chiar și atunci când armura oprește cu succes un proiectil. Ambele aspecte sunt importante în proiectarea și evaluarea panourilor de blindaj moi pentru a se asigura că oferă protecție împotriva amenințărilor balistice, dar oferă și un nivel de confort și siguranță pentru purtător, limitând transferul de energie către corp la impact. Rezultatele obținute pentru adâncimea amprentei în materialul suport (BFS) pentru cele două panouri din țesătură Twaron CT736 sunt date în Tabelul 6.1.

Unul dintre standardele utilizate pe scară largă este cel al Institutului Național de Justiție al SUA (NIJ). De la prima sa introducere în 2000, a fost aplicat de multe țări din întreaga lume. În acest standard, sunt enumerate cerințele de performanță și metoda de testare pentru protecția corpului uman împotriva impactului balistic. Materialul suport utilizat este

plastilina Roma 1, denumită și plastilină balistică. Viteza unui proiectil este determinată de un cronograf.

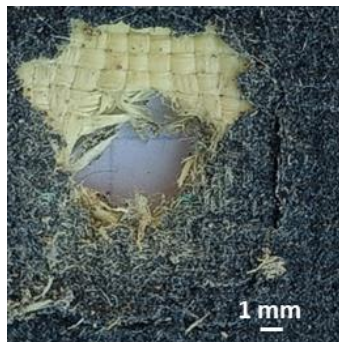
Tabelul 6.1. Sinteza rezultatelor testelor balistice pentru panouri supuse impactului cu proiectilul 9 mm Full Metal Jacket (FMJ)

Panou	Foc	Viteză [m/s]	Amprentă (BFS) [mm]	Volumul urmei [mm ³]
16 straturi țesătură Twaron CT736	A	410,26	PT	-
	B	414,45	PT	-
	C	422,98	PT	-
24 straturi țesătură Twaron CT736	A	422,97	PT	-
	B	424,41	PT	-
	C	415,03	23	26076
28 straturi țesătură Twaron CT736	A	425,55	PT	-
	B	417,46	25	23428
	C	408,51	28	27459
32 straturi țesătură Twaron CT736	A	413,86	14	17472
	B	428,07	17	19872
	C	422,39	16	12134
42 straturi țesătură Twaron CT736	A	426,93	9	3555
	B	410,51	4	10534
	C	417,46	5	1554
16 straturi combinate de țesătură Twaron SRM și țesătură Twaron CT736	A	412,33	PT	-
	B	415,67	PT	-
	C	427,12	PT	-
24 straturi combinate de țesătură Twaron SRM și țesătură Twaron CT736	A	434,07	PT	-
	B	422,78	PT	--
	C	411,01	PT	-
28 straturi combinate de țesătură Twaron SRM și țesătură Twaron CT736	A	429,93	PT	-
	B	417,51	PT	-
	C	413,91	PT	-
32 straturi combinate de țesătură Twaron SRM și țesătură Twaron CT736	A	418,06	PT	-
	B	427,94	PT	-
	C	429,89	PT	-
42 straturi combinate de țesătură Twaron SRM și țesătură Twaron CT736	A	411,45	14	9411
	B	416,08	17	13566
	C	421,76	PT	-

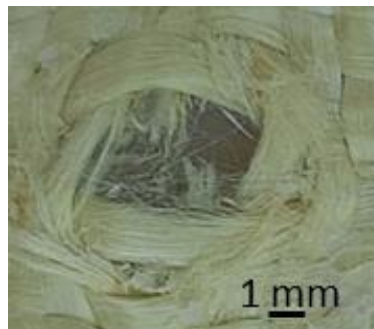
Panourile hibride cu 16 straturi, 24 straturi, 28 straturi și 32 straturi prezintă penetrare totală pentru toate cele trei focuri.

Modul de distrugere al firelor materialului Twaron SRM509 este diferit de cel al firelor materialului Twaron CT736. Firele țesăturii Twaron CT736 în timpul impactului sunt împinse în lateral, nu sunt rupte complet, se rup o parte din fibre, pe când la stratul de material Twaron SRM509, firele sunt rupte complet, nu sunt împinse în lateral în timpul impactului (Figura 6.1).

Distrugerea fibrelor este similară pentru toate testele din material stratificat Twaron CT736 și diferențierea a fost mai utilă folosind fotografiile macro detalii ale focurilor pe fiecare strat, precum și la probele hibride.



Panou hibrid, 24 straturi



24 straturi de țesătură Twaron CT736

Figura 6.1. Diferența de aspect dintre panoul hibrid realizat din țesătura Twaron SRM509 și Twaron CT736 și panoul realizat numai din Twaron CT736

Panoul cu 40 straturi hibride prezintă două focuri cu penetrare parțială, un proiectil s-a oprit pe stratul 29 și un proiectil este prins în stratul 29 și 31 (Figura 6.2). Fire principale au un rol important în prevenirea ruperii sau pătrunderii proiectilului în stratul de material. Ele contribuie la deformarea și absorbția energiei proiectilului, reducând astfel riscul de rănire a putătorului. Calitatea și rezistența firelor principale sunt caracteristici importante pentru performanța materialului în ceea ce privește protecția balistică.

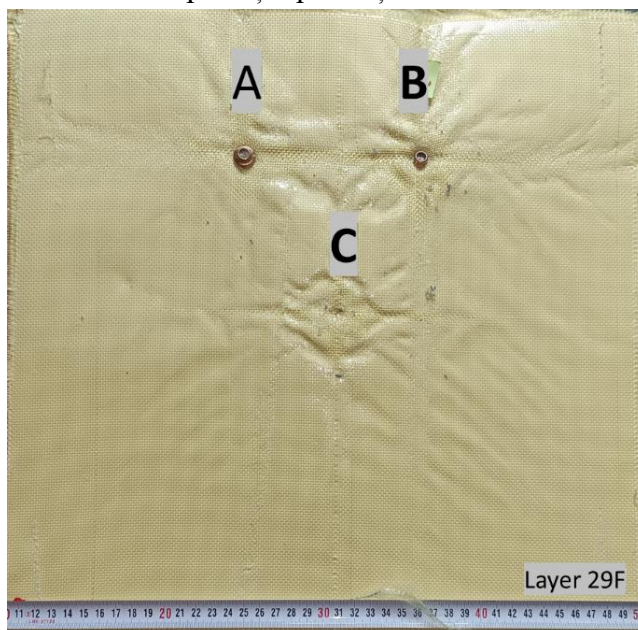


Figura 6.2. Panou hibrid cu 42 straturi, stratul 29, față

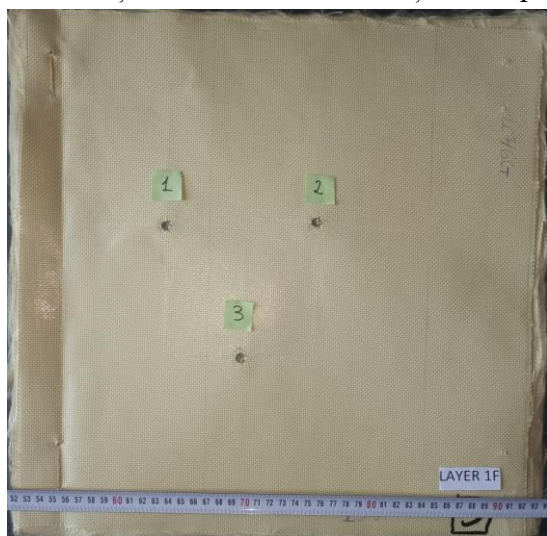
Probele realizate din țesătură stratificată Twaron CT736 a prezentat rezultate diferite. Un panou a avut penetrare totală, panoul cu 16 straturi, un panoul a prezentat 2 focuri cu penetrare totală, panoul cu 24 straturi, un panoul a prezentat un foc cu penetrare totală, panoul cu 28 straturi și două au prezentat penetrare parțială, panoul cu 32 straturi și panoul cu 42 straturi, cu un număr diferit de straturi distruse.

Ruperea straturilor de țesătură ale celor două tipuri de panouri testate, hibrid din țesătură combinată Twaron SRM și Twaron CT736 și din straturi de țesătură Twaron CT736 prezintă rezultate diferite în ceea ce privește modul de distrugere a firelor atunci când proiectilul a fost oprit. În cazul panoului hibrid, chiar dacă proiectilul a fost oprit, straturile următoare au fost rupte/distruse. Substratul de carbură de siliciu aplicat pe substratul de țesătură nu permite firelor să fie elastice, să se întindă, cum se întâmplă la panourile cu țesătură Twaron CT736.

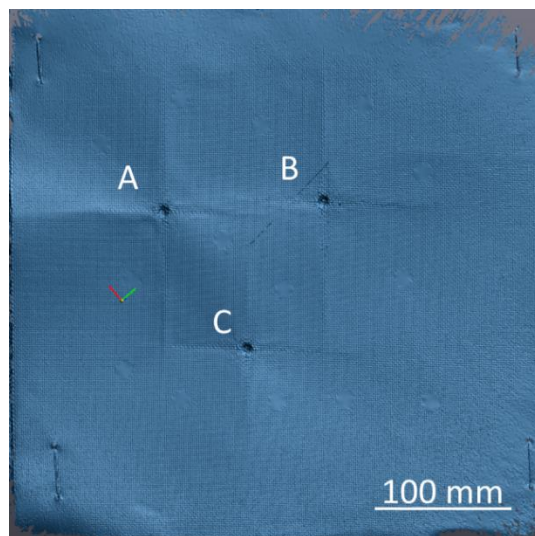
Energia disipată și absorbită în timpul impactului balistic sunt factori cheie în evaluarea eficacității unui material de protecție. Firele principale din țesătură joacă un rol important în distribuirea și absorbția acestei energii, contribuind la prevenirea pătrunderii proiectilului și protejarea persoanelor sau obiectelor aflate în spatele materialului de protecție (cu ajutorul scărilor 3D am scos în evidență rolul firelor principale în absorbția energiei cinetice a proiectilului. În Figura 6.3 se vede cum firele principale au fost solicitate pentru a preveni ruperea straturilor de material.

Prin deformare și întindere, firele principale transformă energia cinetică a proiectilului în energie mecanică și căldură, reducând astfel puterea și viteza proiectilului.

Modelele de rupere prin forfecare și întindere demonstrează importanța înțelegerii modului în care tensiunile acționează asupra materialelor compozite. Dezvoltarea de tehnici de fabricație și design care iau în considerare aceste modele poate contribui la creșterea performanței materialelor în situații de impact.



a) vedere din față a panoului testat



b) scanare 3D, vedere din spate

Figura 6.3. Rolul firelor principale în procesul de impact balistic al panoului cu 16 straturi cu trei proiectile de 9 mm FMJ

Reacțiile și răspunsurile diferite în funcție de adâncimea stratificării subliniază importanța configurării straturilor în designul compozitului. Acesta poate afecta modul în care energiile de impact sunt dispersate și absorbite, influențând în cele din urmă performanța materialului.

Viteza proiectilului de 9 mm FMJ influențează modul în care firele, substratul de polimer (PVB) și substratul de carbură de siliciu sunt distruse. În funcție de viteza impactului,

unele fire pot fi rupte complet sau parțial, în timp ce altele pot suferi deformări semnificative sau pot fi împinse în lateral. Substraturile de carbură de siliciu și rășină PVB prezintă dezlipire de pe țesătura compozită în zona de impact. Aderența slabă între substraturi și țesătura compozită poate duce la dezlipirea lor și la formarea de fragmente care pot afecta structura materialului.

Această observație subliniază faptul că alegerea materialelor adecvate în construcția panourilor balistice joacă un rol esențial în obținerea performanțelor dorite în protecția împotriva impactului. Țesătura Twaron CT736 a demonstrat că are proprietăți excelente în ceea ce privește rezistența și capacitatea de a absorbi energia de impact, ceea ce a permis acestei porțiuni a panoului să rămână intactă și să prevină ruperea firelor. Acest lucru este deosebit de important în contextul protecției împotriva amenințărilor balistice, unde fiecare componentă a panoului contribuie la eficacitatea generală a protecției oferite.

De asemenea, trebuie subliniat că acest rezultat reflectă nu doar calitățile materialelor utilizate, ci și proiectarea și structura panoului balistic. Combinația optimă dintre straturi diferite, în funcție de proprietățile lor individuale, poate asigura o protecție eficientă împotriva diverselor tipuri de amenințări.

Concluzia aici este că fără testare în laborator nu se poate estima calitatea și protecția unui panou, oricât de bune ar fi materialele pentru alte protecții. Asta este foarte important.

O concluzie este că hibridizarea nu a dat rezultate scontate, deși materialul cu acoperire abrazivă dă rezultate bune la înjunghiere și înțepare, ținând cont de rezultatele obținute de colegul... în teste de înjunghiere și înțepare.

O alta concluzie este că modelul mai realist cu țesătură ajută mai mult la elaborarea unor soluții virtuale, mai puțin numeroase, care, după aceea pot fi transpuse în practică cu costuri mai reduse și, foarte probabil, rezultate mai bune.

6.3. Contribuții personale

Prin investigațiile pe care le-am desfășurat și prezentat în această lucrare, și prin utilizarea unei abordări sinergice a problemei, care se concentrează pe analiza comparativă a datelor obținute din simulare și cele din experimentele reale, am generat multiple contribuții originale în sfera de interes.

Contribuțiile principale ale acestei teze pot fi rezumate astfel:

1. analiza sistematică și critică a unei documentații relevante pentru investigația teoretică și experimentală,
2. sistematizarea unui bogat material bibliografic care se concentrează pe caracteristicile materialelor balistice și performanțele acestora (acest material bibliografic acoperă o gamă largă de informații privind utilizarea materialelor balistice de-a lungul timpului în producția de echipamente de protecție balistică individuală, metodele de cercetare balistică),
3. realizarea unui model numeric la nivel mezo (din fire țesute exact ca în țesătura reală) și analiza simulărilor din perspectiva influenței unor parametri importanți pentru o simulare realistă, validare și utilizarea modelului pentru limitarea campaniei de testare, care este foarte costisitoare:

- influența unor parametri ai modelului constitutiv de material, limita de rupere,
- influența introducerii frecării în modelul de impact proiectil – țintă,
- influența dimensiunii eșantionului în simularea numerică,

4. validarea modelului din punct de vedere calitativ și având drept criteriu de validare numărul de straturi distruse; Figura 6.8 și Figura 6.9 dau exemple de validare a numărului de straturi distruse și din punct de vedere calitativ pentru panoul realizat din 32 straturi Twaron CT736, foc C,

5. proiectarea unei metodologii de analiză 3D a ampretei în materialul suport și introducerea a doi alți parametri care refelectă comportarea panoului proiectat: volumul urmei în materialul suport și aria urmei față de suprafața inițială a materialului suport; acestea pot fi utile în evaluarea și ierarhizarea unor materiale destinate panourilor de protecție balistică,

6. analizarea și interpretarea datelor experimentale, referitoare la urma lăsată în materialul suport (Back Face Signature - BFS). Alți cercetători care au investigat influența numărului de straturi, s-a observat că o creștere a numărului de straturi conduce la o absorbție mai mare de energie, într-o anumită măsură, chiar până la oprirea proiectilului. Cu toate acestea, atunci când numărul de straturi depășește un anumit punct, adăugarea suplimentară a acestora conduce doar la creșterea masei sistemului de protecție, compromițând raportul dintre rezistența la impact și masa sistemului de protecție,

7. un studiu detaliat la scară macro și micro al proceselor distructive din panourile balistice testate (deoarece au o utilitate în comparația răspunsului la impact cu panourile deja existente sau datele prezentate în literatura de specialitate). Aceasta contribuie la îmbunătățirea performanțelor sistemelor de protecție balistică. La partea de studiu al mecanismelor de cedare trebuie spus că la nivel micro, distrugerea fibrelor este similară pentru toate testele și că diferențierea a fost mai utilă folosind fotografiile macro detalii ale focurilor pe fiecare strat.

Data fiind restricția de timp și resursele financiare limitate pe care le-am avut la dispoziție pentru acest studiu, am ales să efectuez cercetarea pe un număr limitat de probe, încercând totuși să conturez posibilitățile de optimizare viitoare în ceea ce privește numărul de straturi necesar în funcție de nivelul specific de protecție vizat.

6.4. Perspective de cercetare deschise de această lucrare

În sfera sistemelor de protecție individuală împotriva impactului balistic, există o competiție continuă și dinamică între penetrator și mijloacele de protecție balistică. Scopul acestei competiții este dezvoltarea de sisteme de protecție individuală cât mai versatile și capabile să facă față amenințărilor multiple. Domeniile de cercetare în această sferă includ:

- dezvoltarea și evaluarea materialelor compozite și/sau hibride noi pe baza fibrelor cu rezistență înaltă,
- evaluarea soluțiilor obținute pe baza criteriilor legate de flexibilitatea echipamentelor de protecție mobile, masa specifică și manevrabilitate.
- simularea fenomenelor de impact la diferite niveluri, de la nivel micro la nivel mezo, pentru a valorifica în mod eficient proprietățile materialelor și arhitectura acestora,

➤ extinderea aplicării soluțiilor de protecție balistică în industriile civile care prezintă riscuri de impact, cum ar fi industria aerospațială, industria energetică, industria grea, industria auto și altele.

Această lucrare poate evolua în următoarele direcții:

Elaborarea și testarea sistemelor de protecție rigide destinate pentru echipamentul personalului militar, cum ar fi sistemele de protecție ale elicopterelor sau sistemele de protecție ale vehiculelor blindate ușoare. Aceste sisteme de protecție ar putea fi realizate din semifabricate care conțin fibre aramidice sau combinații cu plăci metalice sau ceramice, cu avantajul unei mase specifice mai reduse a semifabricatelor din fibre aramidice.

Realizarea și testarea eșantioanelor de tip vestă de protecție individuală fabricate din materialul Twaron CT736, respectând toate normele în vigoare. Această lucrare furnizează rezultate experimentale pentru panouri de 16, 24, 28, 38 și 42 straturi de țesătură Twaron CT736 și panouri hibride de 16, 24, 28, 38 și 42 straturi de țesătură Twaron SRM și țesătură Twaron CT736, dar investigația panourilor cu un număr intermediar de straturi între 28 și 32 poate contribui la reducerea masei produsului fără a compromite siguranța în utilizare a sistemului de protecție.

Extinderea aplicării semifabricatelor bazate pe fibre aramidice și a combinațiilor acestora cu alte materiale în alte domenii în care există risc de impact, cum ar fi industria aeronautică sau sistemele tehnologice caracterizate prin parametri de lucru înalți, în special viteză și sarcină

Lucrări științifice ale autoarei

Articole în reviste indexate/cotate sau volume ale unor conferințe indexate Web of Science (WoS), vizibile în baza de date

1. Ojoc, G.G.; **Chiper Titire, L.**; Munteniță, C.; Pîrvu, C.; Sandu, S.; Deleanu, L. (2023) Ballistic Response of a Glass Fiber Composite for Two Levels of Threat. *Polymers*, 15, 1039. <https://doi.org/10.3390/polym15041039>, (IF=5,0)
2. Totolici Rusu V., Ojoc G. G., Cristea G. C., **Titire Chiper L.**, Botan M., Muntenita C., Deleanu L. (2022) Characteristics of Stab-resistance Panels Made of Twaron Aramid Fabrics, *Materiale Plastice (Mater. Plast.)*, Volume 59/4, 144-154, <https://doi.org/10.37358/MP.22.4.5633>, (IF=0,782)
3. **Titire, L. C.**, Musteata, A. E., CIOROMILA, A., Cristea, G. C., Ojoc, G. G., & Deleanu, L. (2021). Characterization of Blend PA6+ EPDM (60/40) by Tensile Tests. *Materiale Plastice*, 58(3), 51-63, <https://doi.org/10.37358/MP.21.3.5503>, WOS:000756838300001, (IF=0,782)
4. Georgescu, C.; Deleanu, L., **Chiper Titire, L.**, Ceoromila, A.C. (2021) Tribology of Polymer Blends PBT + PTFE. *Materials*, 14, 997. <https://doi.org/10.3390/ma14040997C>, WOS:000624122100001, (IF=3,4)

Articole în reviste indexate sau conferințe internaționale în BDI acceptate de comisia de specialitate CNATDCU

1. **Chiper Titire, L.**, Ojoc, G., Popescu, C. & Deleanu, L. (3923). Simulation of an Impact on an Aramid Fabric Panel by A .357 Projectile. International conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION, 29(3) 1-9. <https://doi.org/10.2478/kbo-2023-0068>
2. Ojoc, G. G., Deleanu, L., **Titire, L. C.**, Munteniță, C., & Pîrvu, C. (2022). Simulation of impact on fiberglass laminated packages. International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM, 22(6.2), 23-30, <https://doi.org/10.5593/sgem2022V/6.2/s24.04>
3. **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

Articole în reviste de specialitate indexate in baze de date internaționale și conferințe internaționale

1. **Chiper Titire, L.**, Ojoc G. G., Chiracu I. G., Deleanu L., The influence of introducing the cohesive zone model in simulating the impact of stratified composites, *Journal of Engineering Sciences and Innovation*, 8(1), 2023, pp. 1–16

2. **Chiper Titire L.**, Ojoc G. G., Munteniță C., Deleanu L. (2022) The Influence of Bonding Type of Two Target Models, Mechanical Testing and Diagnosis, Volume 1, pp. 12-19, https://www.mtd.ugal.ro/download/2022-1/2_MTD-Volume-1-2022-Chiper-pp-12-19.pdf
3. Ojoc G. G., **Chiper Titire L.**, Pirvu C. and Popescu C., A ballistic impact model for evaluating a preliminary higher level from simulation and tests on a glass fiber composite, The 10th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering (ACME 2022) 09/06/2022 - 10/06/2022 Online, 2022 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1262 012057, doi:10.1088/1757-899X/1262/1/012057.
4. **Chiper-Titire L.**, Totolici-Rusu V., Ojoc G. G., Influence of material characteristics on impact response for fabrics made of glass and aramid fibers, The 10th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering – ACME 2022, „Gheorghe Asachi” Technical University of Iasi, Romania, June 09 – 10, 2022 ACME, doi:10.1088/1757-899X/1262/1/012045
5. Ojoc G. G., **Chiper Titire L.**, Deleanu L., Muntenita C., Pirvu C., Simulation of the Behavior of 32-Layer Composite Plate for Ballistic Protection, INCAS Bulletin, Volume 14, Issue 4/ 2022, pp. 95 – 109, <https://doi.org/10.13111/2066-8201.2022.14.4.8>
6. Ojoc G. G., **Titire Chiper L.**, Deleanu L., Failure simulation of stratified panel under ballistic impact, Journal of Engineering Sciences and Innovation Volume 7(2), 2022, pp. 143-158, <https://doi.org/10.56958/jesi.2022.7.2.143>
7. Ojoc G. G., **Chiper Titire L.**, Deleanu L., Simulation and analysis of the mechanical behaviour of a gas storage tanks, Mechanical Testing and Diagnosis, 11, (4), 2021, pp. 15-19

Cărți publicate

1. Deleanu L., Pîrvu C., Georgescu C., Ojoc G.G., **Titire Chiper L.**, Proiectarea reductoarelor cu roți dințate, Editura GUP, ISBN 978-606-696-222-3, 224 pagini, Galați, 2021
2. **Titire (Chiper) L.**, Munteniță C., G. G. Ojoc, Deleanu L., Aplicații pentru Elemente de Inginerie Mecanică, Galati University Press (GUP), ISBN978-606-696-260-5, 164 pagini,

Bibliografie

- [1] Abtew, M. A., Boussu, F., Bruniaux, P., Loghin, C., & Cristian, I. (2019). Ballistic impact mechanisms—a review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses. *Composite structures*, 223, 110966.
- [2] Almohandes, A. A., Abdel-Kader, M. S., & Eleiche, A. M. (1996). Experimental investigation of the ballistic resistance of steel-fiberglass reinforced polyester laminated plates. *Composites Part B: Engineering*, 27(5), 447-458.
- [3] Asemani, S. S., Liaghat, G., Ahmadi, H., Anani, Y., Khodadadi, A., & Charandabi, S. C. (2021). The experimental and numerical analysis of the ballistic performance of elastomer matrix Kevlarcomposites. *Polymer Testing*, 102, 107311.
- [4] Bajya, M., Majumdar, A., Butola, B. S., Arora, S., & Bhattacharjee, D. (2021). Ballistic performance and failure modes of woven and unidirectional fabric based soft armour panels. *Composite Structures*, 255, 112941.
- [5] Beck, J. (2016). U.S. Patent No. 9,435,614. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [6] Bhatnagar, A., Arvidson, B., & Pataki, W. (2006). Prepreg ballistic composites. In *Lightweight ballistic composites* (pp. 272-304). Woodhead Publishing.
- [7] Bilisik, K. (2017). Two-dimensional (2D) fabrics and three-dimensional (3D) preforms for ballistic and stabbing protection: A review. *Textile Research Journal*, 87(18), 2275-2304.
- [8] Briscoe, B. J., & Motamedi, F. (1992). The ballistic impact characteristics of aramid fabrics: the influence of interface friction. *Wear*, 158(1-2), 229-247.
- [9] Caçoilo, A., Mourão, R., Teixeira-Dias, F., Azevedo, A., Coghe, F., & Valente, R. A. F. (2021). Modelling ballistic impact on military helmets: The relevance of projectile plasticity. *Defence Technology*, 17(5), 1699-1711.
- [10] Chandekar, G. S., & Kelkar, A. D. (2014). Experimental and numerical investigations of textile hybrid composites subjected to low velocity impact loadings. *The Scientific World Journal*, 2356-6140, <https://doi.org/10.1155/2014/325783>
- [11] Chen, X., Zhou, Y., & Wells, G. (2014). Numerical and experimental investigations into ballistic performance of hybrid fabric panels. *Composites Part B: Engineering*, 58, 35-42.
- [12] Chen, X., Zhu, F. și Wells, G. (2013). Un model analitic pentru impactul balistic asupra armurii textile pe bază de material. *Compozite Partea B: Inginerie*, 45 (1), 1508-1514.
- [13] Choudhury, S., Yerramalli, C. S., & Guha, A. (2023). Analytical modeling of the ballistic impact performance of glass fabric-epoxy composites at low temperatures. *International Journal of Impact Engineering*, 176, 104565.
- [14] Chu, Y., Chen, X., Sheel, D. W., & Hodgkinson, J. L. (2014). Surface modification of aramid fibers by atmospheric pressure plasma-enhanced vapor deposition. *Textile research journal*, 84(12), 1288-1297.
- [15] Chu, Y., Chen, X., Wang, Q., & Cui, S. (2014). An investigation on sol-gel treatment to aramid yarn to increase inter-yarn friction. *Applied surface science*, 320, 710-717.
- [16] Cunniff, P. M. (1992). An analysis of the system effects in woven fabrics under ballistic impact. *Textile Research Journal*, 62(9), 495-509.
- [17] D'Amato, E. (2005). Nonlinearities in mechanical behavior of textile composites. *Composite structures*, 71(1), 61-67.
- [18] D'Amato, E. (2001). Finite element modeling of textile composites. *Composite structures*, 54(4), 467-475

- [19] David, N. V., Gao, X. L., & Zheng, J. Q. (2009). Ballistic resistant body armor: contemporary and prospective materials and related protection mechanisms, *Applied Mechanics Reviews*, 62(5), 050802, doi: 10.1115/1.3124644
- [20] Dogan, U., & Sunbuloglu, E. (2023). A novel simplified ballistic impact theory for woven composites. *International Journal of Impact Engineering*, 177, 104530.
- [21] Endruweit, A., Zeng, X., Matveev, M., & Long, A. C. (2018). Effect of yarn cross-sectional shape on resin flow through inter-yarn gaps in textile reinforcements. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 104, 139-150
- [22] Fuqiang, L., Jingru, H., Runhua, L., Liang, Z., & Zheng, W. (2023, June). Numerical Simulation of Anti-penetration Performance of Ceramic/Aramid Fiber/PE-UHMW Composite Armor. In *Journal of Physics: Conference Series*, 2478(7), 072034., IOP Publishing.
- [23] Ghazlan, A., Ngo, T., Tan, P., Tran, P., & Xie, Y. M. (2023). A Numerical Modelling Framework for Investigating the Ballistic Performance of Bio-Inspired Body Armours. *Biomimetics*, 8(2), 195.
- [24] Gilson, L., Rabet, L., Imad, A., & Coghe, F. (2020). Experimental and numerical characterisation of rheological properties of a drop test response of a ballistic plastilina. *Forensic science international*, 310, 110238.
- [25] Gregori, D., Scazzosi, R., Nunes, S. G., Amico, S. C., Giglio, M., & Manes, A. (2020). Analytical and numerical modelling of high-velocity impact on multilayer alumina/aramid fiber composite ballistic shields: Improvement in modelling approaches. *Composites Part B: Engineering*, 187, 107830.
- [26] Grujicic, M. (2016). Multiscale modeling of polymeric composite materials for ballistic protection. In *Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection* (pp. 323-361). Woodhead Publishing.
- [27] Grujicic, M., Bell, W. C., Arakere, G., He, T., & Cheeseman, B. A. (2009). A meso-scale unit-cell based material model for the single-ply flexible-fabric armor. *Materials & Design*, 30(9), 3690-3704.
- [28] Grujicic, M., Bell, W.C., Glomski, P.S., Pandurangan, B., Yen, C.-F., Cheeseman, B.A., 2011b. Filament-level modeling of aramid-based high performance structural materials. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 20, 1401-1413.
- [29] Grujicic, M., Bell, W.C., Glomski, P.S., Pandurangan, B., Yen, C.-F., Cheeseman, B.A., 2011c. Multi-length scale computational derivation of Kevlar® yarn-level material model. *Journal of Materials Science*, 46, 4787-4802.
- [30] Grujicic, M., Pandurangan, B., Snipes, J.S., Yen, C.-F., Cheeseman, B.A., 2013a. Multi-length scale enriched continuum-level material model for Kevlar®-fiber reinforced polymer-matrix composites. *Journal of Materials Engineering and Performance* 22, 681-695.
- [31] Grujicic, M., Ramaswami, S., Snipes, J.S., Yavari, R., Lickfield, G.C., Yen, C.-F., Cheeseman, B.A., 2013b. Molecular-level computational investigation of mechanical transverse behavior of p-phenylene terephthalamide (PPTA) fibers. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 9, 462-498.
- [32] Grujicic, M., Ramaswami, S., Snipes, J.S., Yavari, R., Yen, C.-F., Cheeseman, B.A., 2013d. Axial-compressive behavior, including kink-band formation and propagation, of single p-phenylene terephthalamide (PPTA) fibers. *Advances in Materials Science and Engineering* 2013. Article ID 329549. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/329549>.
- [33] Grujicic, M., Yavari, R., Ramaswami, S., Snipes, J. S., Yen, C. F., & Cheeseman, B. A. (2013). Molecular-level study of the effect of prior axial compression/torsion on the axial-

- tensile strength of PPTA fibers. *Journal of materials engineering and performance*, 22, 3269-3287.
- [34] Grujicic, M., Yavari, R., Snipes, J. S., Ramaswami, S., Yen, C. F., & Cheeseman, B. A. (2014). The effect of plain-weaving on the mechanical properties of warp and weft p-phenylene terephthalamide (PPTA) fibers/yarns. *Journal of materials science*, 49, 8272-8293.
- [35] Gu, B. (2004). Ballistic penetration of conically cylindrical steel projectile into plain-woven fabric target—a finite element simulation. *Journal of composite materials*, 38(22), 2049-2074.
- [36] Hakan, M., Gunes, R., Apalak, M. K., & Reddy, J. N. (2023). Normal and oblique ballistic impact damage behaviour of functionally graded plates: Experimental and numerical. *International Journal of Impact Engineering*, 181, 104756.
- [37] Ha-Minh, C., Boussu, F., Kanit, T., Crépin, D., & Imad, A. (2012). Effect of frictions on the ballistic performance of a 3D warp interlock fabric: numerical analysis. *Applied composite materials*, 19, 333-347.
- [38] Hasanzadeh, M., & Mottaghitalab, V. (2014). The role of shear-thickening fluids (STFs) in ballistic and stab-resistance improvement of flexible armor. *Journal of materials engineering and performance*, 23, 1182-1196.
- [39] Hassanpour Roudbeneh, F., Liaghat, G., Sabouri, H., & Hadavinia, H. (2019). Experimental investigation of impact loading on honeycomb sandwich panels filled with foam. *International Journal of Crashworthiness*, 24(2), 199-210.
- [40] Hazzard, M. K., Trask, R. S., Heisserer, U., Van Der Kamp, M., & Hallett, S. R. (2018). Finite element modelling of Dyneema® composites: from quasi-static rates to ballistic impact. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 115, 31-45.
- [41] Hu, Q. R., Shen, X. Y., Qian, X. M., Huang, G. Y., & Yuan, M. Q. (2022). The personal protective equipment (PPE) based on individual combat: A systematic review and trend analysis. *Defence Technology*.
- [42] İşmal, Ö. E., & Paul, R. (2018). Composite textiles in high-performance apparel. In *High-performance apparel* (pp. 377-420). Woodhead Publishing.
- [43] Jafari, S., & Nia, A. A. (2023). Numerical and analytical investigation of ballistic performance of composite targets with ceramic-polyurea-metal layers and optimization of the layer thicknesses. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 59(1), 231-244.
- [44] Joo, K., & Kang, T. J. (2008). Numerical analysis of energy absorption mechanism in multiply fabric impacts. *Textile Research Journal*, 78(7), 561-576.
- [45] Karahan, M. (2008). Comparison of ballistic performance and energy absorption capabilities of woven and unidirectional aramid fabrics. *Textile Research Journal*, 78(8), 718-730.
- [46] Karahan, M., Jabbar, A., & Karahan, N. (2015). Ballistic impact behavior of the aramid and ultra- high molecular weight polyethylene composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34(1), 37-48.
- [47] Karahan, M., Kuş, A., & Eren, R. (2008). An investigation into ballistic performance and energy absorption capabilities of woven aramid fabrics. *International Journal of Impact Engineering*, 35(6), 499-510.
- [48] Kumar, S., Gupta, D. S., Singh, I., & Sharma, A. (2010). Behavior of kevlar/epoxy composite plates under ballistic impact. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(13), 2048-2064.
- [49] Kumar, V., Bajya, M., Majumdar, A., & Dubey, D. K. (2023). Design of Cost-Effective Hybrid Soft Armour Panels Using Strategic Replacement of Backing layers with non-Ballistic Materials: A Parametric Study. *International Journal of Impact Engineering*, 104678.

- [50] Lane, R. A. (2005). High performance fibers for personnel and vehicle armor systems. *Amptiac Quarterly*, 9(2), 3-9.
- [51] 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.
- [52] Lim, C. T., Shim, V. P. W., & Ng, Y. H. (2003). Finite-element modeling of the ballistic impact of fabric armor. *International Journal of Impact Engineering*, 28(1), 13-31.
- [53] Liu, P., Wang, Z., Zhou, H., Zhang, H., & Huang, G. (2023). An analytical model to predict backface deformation of hybrid soft body armors under ballistic impact. *International Journal of Impact Engineering*, 180, 104723.
- [54] López-Gálvez, H., Rodriguez-Millán, M., Feito, N., & Miguelez, H. (2016). A method for inter-yarn friction coefficient calculation for plain wave of aramid fibers. *Mechanics Research Communications*, 74, 52-56.
- [55] Mallick, P.K., 2007a., in: *Fiber-Reinforced Composites*. CRC Press.
- [56] Marques, C. L. M., Kumar, S. R., Goswami, C., & Verma, R. (2021). Numerical simulation of armor materials and optimization using gray relational analysis. *Materials Today: Proceedings*, 44, 4717-4730.
- [57] Mohamadipoor, R., Zamani, E., & Pol, M. H. (2018). Analytical and experimental investigation of ballistic impact on thin laminated composite plate. *International Journal of Applied Mechanics*, 10(02), 1850020.
- [58] Mohammed, M. N., Al-Zubaidi, S., Bahrain, S. H. K., & Sapuan, S. M. (2021). State-of-the-art review on recent advances and perspectives of ballistic composite materials. *Composite Solutions for Ballistics*, 3-54.
- [59] Mohotti, D., Raman, S. N., Ngo, T., & Mendis, P. (2015). Use of coupled smooth-particle hydrodynamics/lagrangian method in the simulation of deformable projectile penetration. *International Journal of Protective Structures*, 6(3), 419-437.
- [60] Mudric, T., Giacomuzzo, C., Francesconi, A., & Galvanetto, U. (2016). Experimental investigation of the ballistic response of composite panels coupled with a self-healing polymer layer. *Journal of Aerospace Engineering*, 29(6), 04016047.
- [61] Mudzi, P., Wu, R., Firouzi, D., Ching, C. Y., Farncombe, T. H., & Selvaganapathy, P. R. (2022). Use of patterned thermoplastic hot film to create flexible ballistic composite laminates from UHMWPE fabric. *Materials & Design*, 214, 110403.
- [62] Naik, N. K., Shirao, P., & Reddy, B. C. K. (2006). Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Formulation. *International journal of impact engineering*, 32(9), 1521-1552.
- [63] Nilakantan, G., Horner, S., Halls, V., & Zheng, J. (2018). Virtual ballistic impact testing of Kevlar soft armor: Predictive and validated finite element modeling of the V0-V100 probabilistic penetration response. *Defence technology*, 14(3), 213-225.
- [64] Öberg, E. K., Dean, J., & Clyne, T. W. (2015). Effect of inter-layer toughness in ballistic protection systems on absorption of projectile energy. *International Journal of Impact Engineering*, 76, 75-82.
- [65] Oliveira, M. S., da Costa Garcia Filho, F., Pereira, A. C., Nunes, L. F., da Luz, F. S., de Oliveira Braga, F., & Monteiro, S. N. (2019). Ballistic performance and statistical evaluation of multilayered armor with epoxy-fibre fabric composites using the Weibull analysis. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 5899-5908.
- [66] Othman, A. R., & Hassan, M. H. (2013). Effect of different construction designs of aramid fabric on the ballistic performances. *Materials & Design*, 44, 407-413.

- [67] Pandya, K. S., Kumar, C. V. S., Nair, N. S., Patil, P. S., & Naik, N. K. (2015). Analytical and experimental studies on ballistic impact behavior of 2D woven fabric composites. *International Journal of Damage Mechanics*, 24(4), 471-511.
- [68] Peroni, L., Scapin, M., Fichera, C., Manes, A. N. D. R. E. A., & Giglio, M. A. R. C. O. (2012). Mechanical properties at high strain-rate of lead core and brass jacket of a NATO 7.62 mm ball bullet. In *EPJ Web of Conferences* (Vol. 26, p. 01060). EDP Sciences.
- [69] Pinkos, J., Stempien, Z., & Smędra, A. (2023). Experimental analysis of ballistic trauma in a human body protected with 30 layer packages made of biaxial and triaxial Kevlar® 29 fabrics. *Defence technology*, 21, 73-87.
- [70] Pirvu, C., & Deleanu, L. (2018). Ballistic testing of armor panels based on aramid. In *Ballistics.IntechOpen*.
- [71] Pirvu, C., Badea, S., & Deleanu, L. (2014). Influence of several parameters on simulating the ballistic impact on a homogenous plate. *Applied Mechanics and Materials*, 658, 201-206.
- [72] Porwal, P. K., & Phoenix, S. L. (2005). Modeling system effects in ballistic impact into multi-layered fibrous materials for soft body armor. *International journal of fracture*, 135, 217-249.
- [73] Ralph, C., Baker, L., Archer, E., & McIlhagger, A. (2023). Optimization of soft armor: the response of homogenous and hybrid multi-ply para-aramid and ultra-high molecular weight polyethylene fabrics under ballistic impact. *Textile Research Journal*, 00405175231194365.
- [74] Rezasefat, M., Ma, D., da Silva, A. A., Colombo, C., Amico, S. C., Giglio, M., & Manes, A. (2023). Multi-criteria decision-making analysis and numerical simulation of the low-velocity impact response of inter-ply S2-glass/aramid woven fabric hybrid laminates. *Composite Structures*, 312, 116867.
- [75] Roylance, D., Hammas, P., Ting, J., Chi, H., & Scott, B. (1995). Numerical modeling of fabric impact. *ASME-Publications-AD*, 48, 155-160.
- [76] Sadegh, A. M., & Cavallaro, P. V. (2012). Mechanics of energy absorbability in plain-woven fabrics: an analytical approach. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 7(1), 155892501200700102.
- [77] Saleem, I. A., Ahmed, P. S., & Abed, M. S. (2022). Experimental and numerical investigation of Kevlar and UHMWPE multi-layered armors against ballistic impact. *Materials Today: Proceedings*, 56, 2516-2524.
- [78] Saxtorph, N. M., Gosney, B., & GOSNEY, I. (1972). *Krigsfolk Gennem Tiden. Warriors and Weapons of Early Times in Colour... Illustrated by Stig Bramsen.*(Translated... by Bob and IngeGosney). Blandford Press.
- [79] Scott, R. A. (Ed.). (2005). *Textiles for protection*. Elsevier, p 229
- [80] Shaktivesh, Nair, N. S., & Naik, N. K. (2015). Ballistic impact behavior of 2D plain weave fabric targets with multiple layers: Analytical formulation. *International Journal of Damage Mechanics*, 24(1), 116-150.
- [81] Shim, V. P. W., Lim, C. T., & Foo, K. J. (2001). Dynamic mechanical properties of fabric armour. *International Journal of Impact Engineering*, 25(1), 1-15.
- [82] Shim, V. P. W., Tan, V. B. C., & Tay, T. E. (1995). Modelling deformation and damage characteristics of woven fabric under small projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*, 16(4), 585-605.
- [83] Signetti, S., Ryu, S., & Pugno, N. M. (2022). Impact mechanics of multilayer composite armors: Analytical modeling, FEM numerical simulation, and ballistic experiments. *Composite Structures*, 297, 115916.

- [84] Sikarwar, R. S., Velmurugan, R., & Madhu, V. (2012). Experimental and analytical study of high velocity impact on Kevlar/Epoxy composite plates. *Central European Journal of Engineering*, 2,638-649.
- [85] Sockalingam, S., Gillespie Jr, J. W., & Keefe, M. (2017). Role of inelastic transverse compressive behavior and multiaxial loading on the transverse impact of Kevlar KM2 single fiber. *Fibers*, 5(1), 9
- [86] Song, B., Park, H., Lu, W., and Chen, W. (2011). Transverse Impact Response of a Linear Elastic Ballistic Fiber Yarn. *ASME. J. Appl. Mech.* September 2011; 78(5): 051023. <https://doi.org/10.1115/1.4004310>
- [87] Soydan, A. M., Tunaboylu, B., Elsabagh, A. G., Sari, A. K., & Akdeniz, R. (2018). Simulation and experimental tests of ballistic impact on composite laminate armor. *Advances in materials science and engineering*, 2018, 1-12
- [88] Sun, D. (2016). Ballistic performance evaluation of woven fabrics based on experimental and numerical approaches. In *Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection* (pp. 409-435). Woodhead Publishing
- [89] Tabiei, A., & Ivanov, I. (2002). Computational micro-mechanical model of flexible woven fabric for finite element impact simulation. *International journal for numerical methods in engineering*,53(6), 1259-1276
- [90] Tabiei, A., & Nilakantan, G. (2008). Ballistic Impact of Dry Woven Fabric Composites: A Review. *ASME. Appl. Mech. Rev.* January 2008; 61(1): 010801.
- [91] Tahir, D., Zhang, M., & Hu, H. (2022). Auxetic materials for personal protection: a review. *physica status solidi (b)*, 259(12), 2200324
- [92] Tam, T., & Bhatnagar, A. (2016), 1 - High-performance ballistic fibers and tapes, Editor(s): Ashok Bhatnagar, In *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Lightweight Ballistic Composites (Second Edition)*, Woodhead Publishing, 2016, pp. 1-39
- [93] Tarfaoui, M., & Akesbi, S. (2001). A finite element model of mechanical properties of plain weave. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 187, 439-448
- [94] Tarfaoui, M., & Akesbi, S. (2001). Numerical study of the mechanical behaviour of textile structures. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 13(3/4), 166-175.
- [95] Vescovini, A., Balen, L., Scazzosi, R., da Silva, A. A. X., Amico, S. C., Giglio, M., & Manes, A.(2021). Numerical investigation on the hybridization effect in inter-ply S2-glass and aramid woven composites subjected to ballistic impacts. *Composite Structures*, 276, 114506.
- [96] Wu, S., Xu, Z., Hu, C., Zou, X., & He, X. (2022). Numerical simulation study of ballistic performance of Al₂O₃/aramid-carbon hybrid FRP laminate composite structures subject to impact loading. *Ceramics International*, 48(5), 6423-6435.
- [97] Xie, Z., Chen, W., Liu, Y., Liu, L., Zhao, Z., & Luo, G. (2023). Design of the ballistic performance of shear thickening fluid (STF) impregnated Kevlar fabric via numerical simulation. *Materials & Design*, 226, 111599.
- [98] Yang, C. C., Ngo, T., & Tran, P. (2015). Influences of weaving architectures on the impact resistance of multi-layer fabrics. *Materials & Design*, 85, 282-295.
- [99] Yang, Y., & Chen, X. (2017). Investigation of failure modes and influence on ballistic performance of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) uni-directional laminate for hybrid design. *Composite Structures*, 174, 233-243.
- [100] Yang, Y., & Chen, X. (2019). Influence of fabric architecture on energy absorption efficiency of soft armour panel under ballistic impact. *Composite Structures*, 224, 111015.
- [101] Yavaş, M. O., Ahmet, A. V. C. I., Şimşir, M., & Akdemir, A. (2015). Ballistic performance of

- Kevlar49/UHMW-PEHB26 hybrid layered-composite. *International Journal of Engineering Research and Development*, 7(4), 21-27.
- [102] Yuan, Z., Zeng, H., Xu, W., Qiu, J., Xu, Y., & Chen, X. (2021). Reverse engineering for estimation of shear modulus for yarn models in finite element modelling for ballistic impact. *Composite Structures*, 274, 114371.
- [103] Zhang, D., Sun, Y., Chen, L., Zhang, S., & Pan, N. (2014). Influence of fabric structure and thickness on the ballistic impact behavior of Ultrahigh molecular weight polyethylene compositelaminate. *Materials & Design (1980-2015)*, 54, 315-322.
- [104] Zhang, R., Han, B., Zhong, J. Y., Qiang, L. S., Ni, C. Y., Zhang, Q., & Lu, T. J. (2022). Enhanced ballistic resistance of multilayered cross-ply UHMWPE laminated plates. *International Journal of Impact Engineering*, 159, 104035.
- [105] Zhang, Y. D., Wang, Y. L., Huang, Y., & Wan, Y. Z. (2006). Preparation and properties of three-dimensional braided UHMWPE fiber reinforced PMMA composites. *Journal of reinforced plastics and composites*, 25(15), 1601-1609. Yang, H. H. (1989). Aromatic high-strength fibers. (No Title).
- [106] Zhou, Y., Ding, S., Zhang, Z., Li, H., Lin, Y., Sun, M., & Wang, M. (2022). The Ballistic responses of thread-quilted plain weaves with increased yarn–yarn friction. *Thin-Walled Structures*, 171, 108762.
- [107] Zhu, D., Vaidya, A., Mobasher, B., & Rajan, S. D. (2014). Finite element modeling of ballistic impact on multi-layer Kevlar 49 fabrics. *Composites Part B: Engineering*, 56, 254-262.
- [108] Zochowski, P., Bajkowski, M., Grygoruk, R., Magier, M., Burian, W., Pyka, D., ... & Jamroziak, K. (2022). Finite element modeling of ballistic inserts containing aramid fabrics under projectile impact conditions—comparison of methods. *Composite Structures*, 294,
- [109] *** ANSYS Explicit Dynamics Analysis Guide (2021). ANSYS, Inc., USA
- [110] *** Ballistic Resistance of Personal Body Armor NIJ Standard–0101.04, U.S. Department of Justice Office of Justice Programs National Institute of Justice, 2004, accesibil la adresa: <https://ojp.gov/pdffiles1/nij/183651.pdf>
- [111] *** Catalog Teijin Ballistics Material Handbook QMB1.1-20181001EN
- [112] *** Catalog Teijin Ballistics Material Handbook, 38-14-05/2012
- [113] *** STANAG 2920 PPS (edition 2) - Ballistic Test method for Personal Armour Materials and combat clothing, NATO, 2003.
- [114] *** 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
- [115] *** Autodesk, Inc. (2021). Autodesk Inventor (Versiunea 2022). <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview>
- [116] *** EN 1063:1999 Glass in building. Security glazing. Testing and classification of resistance against bullet attack (under revision)
- [117] *** EN 1522:2004 Windows, doors, shutters and blinds. Bullet resistance. Requirements and classification
- [118] *** EN 1523:2004 Windows, doors, shutters and blinds - Bullet resistance - Test method