

Universitatea POLITEHNICA din BUCUREȘTI  
Agenția de Cercetare pentru Tehnica și Tehnologii Militare  
(ACTTM)  
STIMPEX S.A.

**SISTEME DE PROTECTIE IMPOTRIVA IMPACTURILOR  
DE ENERGIE MARE SI A EXPLOZIILOR FOLOSIND  
MATERIALE POROASE IMBIBATE CU LICHIDE**

**Contract PN-II- Nr. 287**

Faza Nr. IV - 2017

**Raport științific și tehnic**

DIRECTOR: Prof. dr. ing. Traian CICONE

---

## REZUMAT

Prezentul proiect are ca obiect de studiu dezvoltarea unei soluții originale, brevetabilă, bazată pe utilizarea materialelor poroase îmbibate cu fluide ca soluție de amortizare suplimentară a impactului de mare energie (impactului balistic sau undă de șoc). Elementul de bază al unui astfel de sistem de amortizare îl constituie celula de amortizare (SAC) care este o structură compozită adaptabilă la diferite aplicații, creată prin încapsularea unei structuri poroase extrem de deformabile, îmbibată total sau parțial cu un lichid. Amortizarea se obține prin rezistența la curgerea fluidului generată de structura poroasă supusă comprimării prin impact. Această rezistență la curgere este cu atât mai mare cu cât comprimarea este mai accentuată.

În fazele precedente ale Contractului (2014, 2015 și 2016) studiile s-au concentrat pe componenta de bază, celula de amortizare. Au fost analizate multiple combinații de materiale poroase și fluide de îmbibare, cu atenție spre compatibilitatea la aplicațiile urmărite (în special efectele la contactul cu corpul uman) precum și capacitatea de amortizare în condiții de impact cu viteze reduse (<10m/s) sau medii (<30m/s). Studiile au fost realizate inițial pe **modele deschise**, adică pentru impactul unui corp rigid direct pe materialele poroase îmbibate, respectiv pe **modele închise** (capsulate). S-au analizat compatibilitatea materialului structurii poroase cu fluidele candidate, influența materialului de protecție a SAC (de încapsulare), influența gradului de umplere a unei celule SAC cu fluid, influența vitezei de impact și a formei impactorului (plan sau sferic).

Studii adiacente au fost realizate pentru definirea unor tehnologiilor de realizare a SAC care includ operațiile de umplere și încapsulare, precum și a tehnologiilor de realizare a modelelor multicelulare matricea de celule (M-SAC).

Activitățile prevăzute pentru faza din 2017 pot fi încadrate în următoarele trei categorii:

- (a) Proiectarea, realizarea și testarea de modelele experimentale ale structurii multi-celulare (matricea M-SAC). În acest cadru a fost inclusă și o nouă serie de teste la energii mari efectuate pe tunul Taylor, necesare luării unei decizii finale privind tipul de celule SAC înglobate în modelul experimental.
- (b) Evaluarea rezultatelor experimentale și corelarea acestora cu modele teoretice. Aceste activități au avut ca scop prelucrarea într-o formă unitară a datelor experimentale primare, analiza corelației acestor rezultate, analize comparative de evaluare a efectelor de amortizare precum și comparația cu modele teoretice (analitice sau numerice) dezvoltate anterior în cadrul echipei.
- (c) Identificarea elementelor brevetabile și protejarea lor.

Ca un corolar al celor patru Rapoarte de cercetare, se poate spune că activitățile desfășurate au urmărit planul de realizare propus în urmă cu peste 3 ani și au condus la rezultate extrem de promițătoare pentru dezvoltarea ulterioară a soluției de amortizare propusă.

Activitatea de realizare a modelului funcțional, prezentată în acest raport este o continuare a celei similare, desfășurată în etapa anterioară (2016). Pe baza rezultatelor preliminarilor obținute în etapa din 2016, au fost rafinate soluțiile constructive atât pentru celulele de amortizare (SAC), ale căror performanțe pozitive a fost dovedite experimental, cât și pentru structura multi-celulară M-SAC.

Reamintim că modelul funcțional multicelular (M-SAC) este o structură compozită adaptabilă la diferite sisteme de protecție, obținută prin reunirea mai multor celule de amortizare (SAC) într-o aranjament geometric și structural impus de aplicația urmărită.

Rezultatele experimentale obținute în faza precedentă au impus ca aplicație de prim interes **vestele antiglonț**. Această decizie a rezultat în primul rând din analiza rezultatelor experimentale obținute în condiții de impact cu viteze medii, pe tunul Taylor. Aceste teste cu rezultate mai mult decât satisfăcătoare obținute în faza din 2016, au fost extinse și în faza precedentă (2017) pentru a acoperi o plajă mai mare de viteze de impact dar și pentru a verifica eficacitatea sistemului propus prin teste comparative multiple.

Pe baza acestor ultime rezultate, dar și a testelor exploratorii efectuate în poligon la acțiunea undei de șoc, s-a decis continuarea cu un model funcțional multicelular adaptabil vestelor anti-glonț. Această decizie a fost luată și în concordanță cu posibilitățile tehnologice de realizare, dar și cu capacitățile de testare disponibile. Astfel, testele la undă de șoc în poligon deschis, chiar dacă fezabile, ar fi fost mai puțin relevante din punct de vedere a performanțelor și mult mai greu de evaluat cu modelele teoretice dezvoltate în cadrul echipei.

Este cunoscut faptul că pe lângă efectul distructiv al suprapresiunii există și alte efecte distructive secundare ale undei de soc generată de o explozie, care sunt letale pentru corpul uman: propulsarea de schije și lovirea prin propulsare a corpului uman. Teste de poligon anterior efectuate în etapa din 2016 au demonstrat că matricea M-SAC nu influențează suprapresiunea în frontul undei de șoc. În urma performanțelor nerelevante obținute experimental în poligon, în condițiile în care acestea sunt mari consumatoare de timp și resurse, s-a luat decizia de continuare a investigațiilor în direcția studierii efectelor secundare mai sus menționate. Analiza acestora este compatibilă cu încercările pe tunul Taylor și cu testele de poligon la impactul cu glonț. Suplimentar, testele pe tunul Taylor efectuate în 2016 au evidențiat capacitatea de amortizare la impact și au adus suficiente argumente în defavoarea continuării investigării capacității de atenuare a suprapresiunii. Justețea alegerii a fost confirmată de rezultatele excelente obținute în teste suplimentare efectuate în 2017 pe tunul Taylor și în poligon cu muniția de pistol calibru 9mm și 7,622mm.

În această ultimă etapă a Proiectului studiile s-au focalizat pe evaluarea capacității de protecție la glonț a unui sistem de protecție echipat cu o matrice multi-celulară M-SAC.

## CAP. 1. PROIECTAREA, REALIZAREA ȘI TESTAREA MODELULUI FUNCȚIONAL MULTI-CELULAR (M-SAC) ÎN DIFERITE VARIANTE STRUCTURALE

### 1.1. Testarea modelelor experimentale pe tunul Taylor

După analizarea rezultatelor obținute pe tunul Taylor în etapa precedentă (2016) s-a relevat necesitatea unei noi serii de experimente care să aducă dovezi mai concludente și să permită o mai exactă evaluare cantitativă a parametrilor impactului. În acest sens au fost aduse ameliorări standului experimental prin (Fig. 1.1):

- plasarea de markeri atât pe piston cât și pe stand, care au permis o evaluare mai exactă a vitezei precum și a compactării celulei SAC
- realizarea un sistem de protecție transparent pentru a evita stropirea cu fluidul expulzat; astfel s-a evitat afectarea înregistrărilor cu camera video rapidă.

(S3D) cu grosimea de 6,5mm îmbibate cu un amestec de glicerină cu 7,5%-10% zeosil, acestea au fost singurele materiale folosite pentru fabricarea celulelor SAC în actuala etapă. Capsularea s-a realizat cu **membrană multistrat polietilenă-poliamidă-polietilenă (PE/PA/PE)**, cu grosimea de 100 μm care s-a dovedit că asigură o rezistență mecanică acceptabilă și impermeabilitate totală. Materialul poros a fost complet îmbibat și apoi introdus în celule din membrană pentru încapsulare. Etanșeitatea celulei s-a realizat prin lipire cu ultrasunete pe contur sau în linie dreaptă folosind mașina PFAFF 8310. Pentru a asigura o rezistență suficient de mare pe timpul manipulării s-a utilizat o lipitură de 5 mm lățime. Etanșeitatea celulei se realizează prin lipire cu ultrasunete, dar și la cald, la o temperatură de aprox. 110°C. Lipitura cu ultrasunete se realizează pe o mașină PFAFF 8310 în linie dreaptă sau pe un contur; lățimea lipiturii poate fi de 3 mm sau de 5 mm.



Fig. 1.1. Detaliu al standului, după impact



Fig. 1.2. Detaliu al modelului experimental de vestă

De asemenea, s-au confecționat modele simplificate, de dimensiuni reduse, ale unei veste (Fig. 1.2.) precum și celule SAC ne-îmbibate.

Testele efectuate s-au realizat doar pe o celulă SAC (având în vedere aportul redus a unei a doua celule suprapuse) în două variante de îmbibare (îmbibare completă, respectiv parțială - 75%) și au urmărit:

- evaluarea repetabilității rezultatelor obținute în condiții similare
- evaluarea efectului de amortizare la viteze mai mari decât cele anterioare (până la 30m/s)
- evaluarea efectului de amortizare prin comparația celulă îmbibată-celulă ne-îmbibată (la viteze de impact mai reduse).

Principalele rezultate sunt prezentate sintetic în Fig. 1.3÷1.7. Din analiza acestor figuri s-au relevat următoarele concluzii importante (majoritatea relevate și în seria precedentă de teste):

- **Repetabilitatea rezultatelor este excelentă** (Fig. 1.3÷1.6). Diferențele dintre teste aparent identice sunt justificate de imposibilitatea tehnică de a reproduce perfect viteza de impact la acest tip de stand (tun Taylor) precum și prin diferențele inerente dintre celulele (SAC) testate (masa acestora a variat între 14.75gr la celula P22 și 16.20gr la celula P14).
- **Efectul de amortizare a celulelor SAC este evident și extrem de important.** Din Fig. 1.4. rezultă o reducere a forței maxime de impact de la aproximativ 100 kN până la circa 37kN, adică **de aproape 3 ori**.

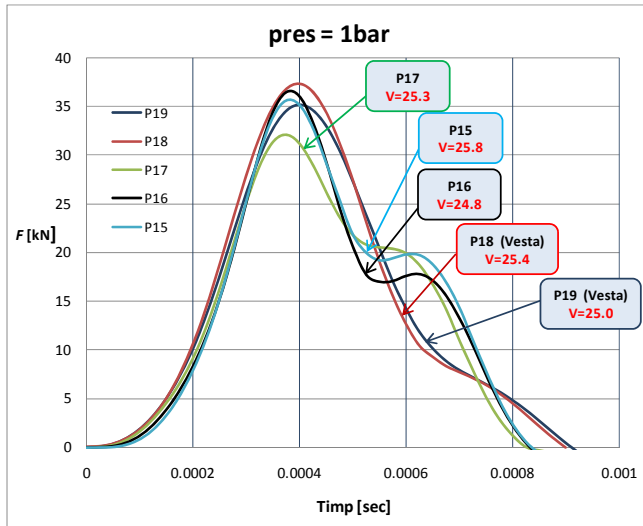


Fig. 1.3. Variația forței la aceeași viteză de impact ( $V \approx 25 \text{m/s}$ ) pentru celulele îmbibate

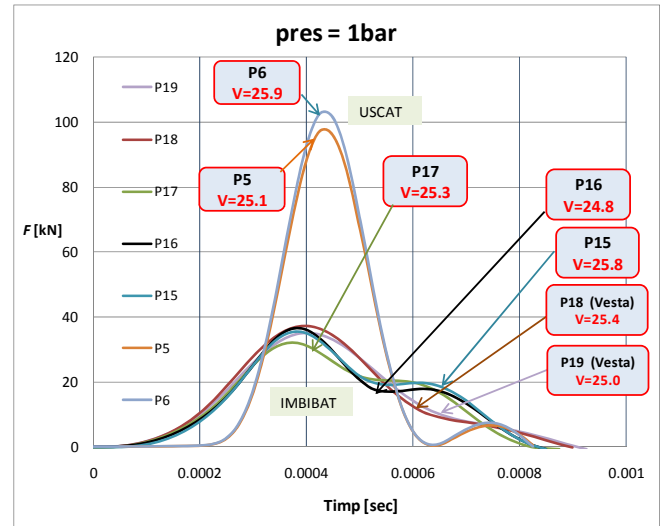


Fig. 1.4. Variația forței la aceeași viteză de impact ( $V \approx 25 \text{m/s}$ ) pentru celulele uscate și îmbibate

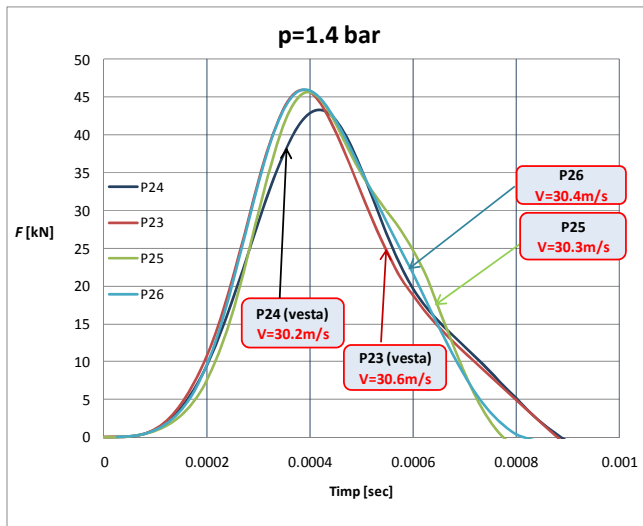


Fig. 1.5. Variația forței la aceeași viteză de impact ( $V \approx 30 \text{m/s}$ ) pentru celulele îmbibate

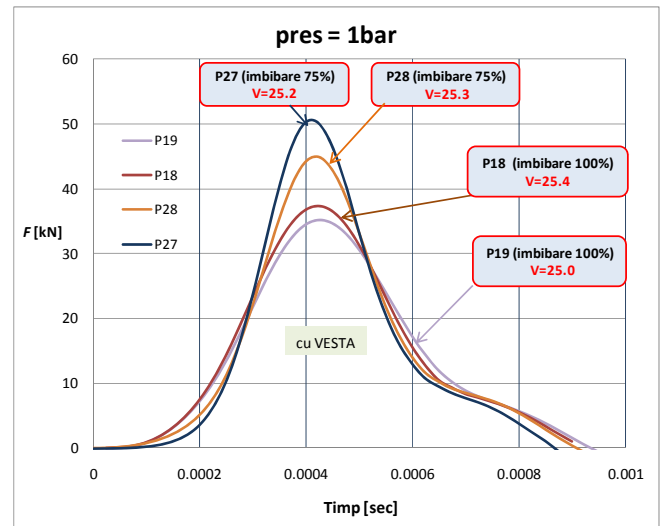


Fig. 1.6. Variația forței pentru celulele îmbibate complet, respectiv parțial (75%).

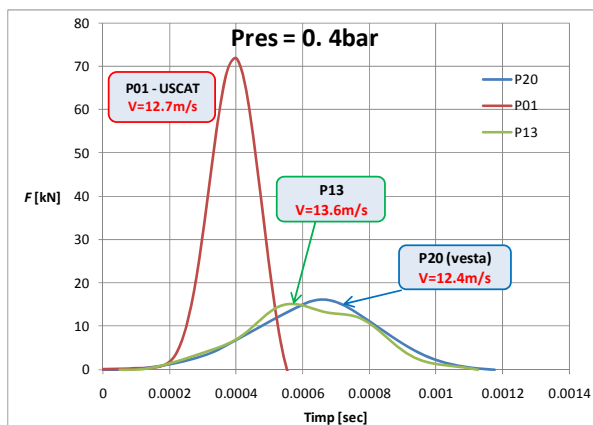


Fig. 1.7. Variația forței la aceeași viteză de impact ( $V \approx 13 \text{m/s}$ ) pentru celulele uscate și îmbibate

- Aceeași concluzie rezultă indirect și din Fig. 1.5 unde valorile maxime ale forței sunt de ordinul 45kN, iar cele corespunzătoare celulei ne-îmbibate au depășit cu mult limita de măsurare a senzorului de forță (120kN).
- Efectul de amortizare scade cu creșterea vitezei de impact, dar nu dispăre nici la viteze mari, (așa cum a rezultat din impactul cu glonț); la viteza de impact de 13m/s (Fig. 1.7) reducerea forței maxime este de mai bine de 4 ori !

- **Straturile de kevlar (vesta) nu produc efecte sensibile de amortizare** (Fig. 1.3÷1.5, 1.7); se remarcă o modificare minoră a variației forței în timpul impactului între cele două cazuri (cu și fără vestă) explicabilă prin modificarea modului de expulzare a fluidului din celula SAC în cele două cazuri (vesta are un rol de împiedicare a curgerii în plan normal).
- **Celulele îmbibate total asigură o amortizare superioară celor cu îmbibare parțială (75%)**-Fig. 1.6.

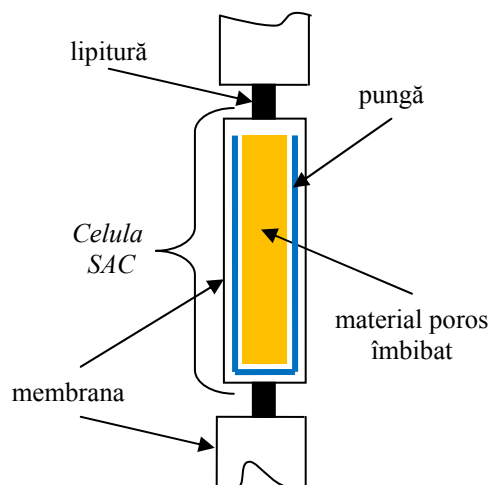
## 1.2. Modele funcționale M-SAC

Fabricația matricelor M-SAC care au fost utilizate la construcția modelelor experimentale s-a bazat pe noi procedee de fabricație care nu au fost utilizate în etapa anterioară. Soluțiile de fabricație bazate pe asamblarea de celule cu material poros îmbibat și încapsulate au fost abandonate. S-a concluzionat că acest procedeu influențează decisiv parametrii matricei M-SAC precum masa, flexibilitatea și performanța.

Testele în condiții reale în poligon au necesitat construcția unui lot de 10 matrici M-SAC într-un timp foarte scurt. Încadrarea în termen a impus schimbarea procedeei de fabricație utilizat. S-a renunțat la îmbibarea prealabilă a materialului poros prin scufundare, procedeu consumator de timp, și a fost înlocuit cu introducerea într-o ”pungă” pătrată deschisă a materialului poros și a unei cantități măsurate de glicerină care să asigure o îmbibare de 100% (Fig.1.9 detaliu). Dimensiunea materialului poros a fost de 40x40 mm. Masa de glicerină pentru îmbibare a fost de aproximativ 12g. Fiecare pungă a fost introdusă într-un buzunar și capsulată. Încapsularea s-a făcut pe un contur pătrat cu latura de 50mm. Produsul final, matricea, este prezentat în Fig. 1.9. și Fig. 1.10



**Fig. 1.8 Matricea M-SAC (2017), detaliu S3D  
îmbibat și capsulat (în ”pungă”)**



**Fig. 1.10 Schema capsulei în versiunea 2017**

La realizarea matricei de celule s-a optat pentru configurația aliniată tip ”tablă de sah”, într-un singur strat (Fig. 1). Dimensiunile unei celule sunt de 40x40 mm. Spațiile dintre celule au lățimea medie de 10mm.

Modelele funcționale, reprezentate de vestele prevăzute cu o matrice M-SAC, testate în poligon, au fost realizate conform cu standardele de realizare a vestelor clasice, cu următoarele două configurații:

**C1** - 20 straturi Kevlar730 + 1 strat Adflex + 2 straturi Kevlar 730 + matrice M-SAC - 4 veste (V3-V6).

**C2** - 20 straturi Kevlar 730 + 1 strat Adflex + matrice M-SAC+ 2 straturi Kevlar 730 - 4 veste (V7-V10).

În afara acestora, au fost executate două veste etalon, care nu conțin strat de amortizare (M-SAC), având configurația:

**C3** - 20 str. K730 + 1 str. Adflex + SAC+ 2 str. K730- 2 veste simbolizate V1 respectiv V2. Structura vestei testate (fără strat de amortizare) a fost identică cu cea a unei veste reale.

Pentru simplificarea terminologiei, în cele ce urmează vor fi folosite următoarele denumiri:

**C1** - soluție de amortizare *clasică*    **C2** - soluție de amortizare *sandwich*    **C3** - vestă fără amortizare *uscată*

Fiecare vestă (panou) a fost cântărită după realizare, masele corespunzătoare fiind incluse în tabelele 1.1 și 1.2.

În acest context se menționează că execuția unui sistem M-SAC doar pentru o vestă implică o durată relativ mare de execuție (cu o componentă manuală de amplasare în condiții de prototip).

### 1.3. Testarea modelelor experimentale în poligon

#### 1.3.1. Descrierea procedurii experimentale

Experimentele au realizate în poligonul laboratorului de încercări pentru protecție balistică și pirotehnice, a Centrului de cercetare științifică pentru apărare CBRN și ecologie, din cadrul ACTTM. Procedura experimentală corespunde cu normele NIJ-0101.04/2000, NIJ-0106.01/1981, STPM 40202-99.

Au fost realizate două serii de teste (trageri) cu muniția de pistol și anume

- (i) glonț calibrul 9×19 mm,
- (ii) glonț calibrul 7,62×25mm trageri realizate manual.

La fiecare tip de glonț au fost folosite câte o vestă fără strat suplimentar de amortizare (vestă ”martor”) și câte trei dintre vestele prevăzute cu strat amortizor M-SAC:

Pentru fiecare vestă (panou) testată sau tras serii de câte 6 proiectile. proiectilele au fost direcționate astfel încât să lovească zone diferite ale vestei: centrul celulelor de amortizare, intersecția a 2 sau 4 celule. Au fost excluse din analize tragerile la care gloanțele au nimerit aproape de margine, la o distanță mai mică de 30mm (teste neconforme precum testul pe vesta V2-glonț 3).

De asemenea nu au fost evaluate tragerile efectuate asupra vestei V9, cu glonț calibrul 7.6mm deoarece soluția de fixare a matricei M-SAC de straturile de kevlar utilizată în acest caz s-a dovedit fi nefiabilă ceea ce a făcut ca după primul glonț matricea să se desprindă și să se plieze în partea de jos a vestei.

Schema sistemului de testare este prezentată în Fig. 1.10. Este vorba de tragere prin vizare directă de la distanța de 5m. Vesta este aplicată peste cutia cu plastilină balistică martor. După fiecare tragere, suprafața acesteia a fost planată.

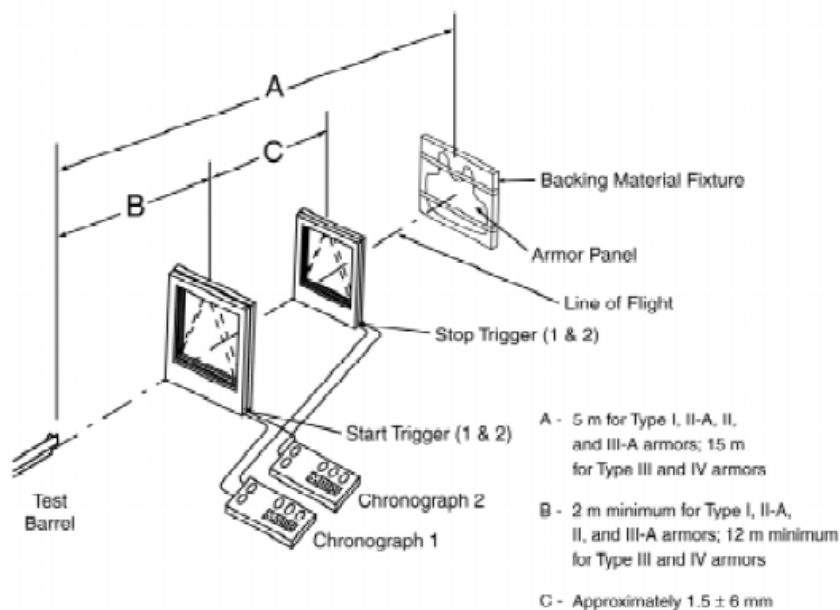


Fig. 1.10 Configurația dispozitivelor de testare

Pentru fiecare tragere s-a înregistrat viteza proiectilului,  $v$  iar după efectuarea tragerii s-a măsurat adâncimea amprentei,  $h$ . După efectuarea tragerilor au fost marcate pe vestă punctele de impact și elemente de identificare a tragerii (numărul de ordine al glonțului).

La sfârșitul testelor s-a furnizat un Buletin de încercări care stă la baza analizei datelor experimentale. Sinteza acestor informații este prezentată în tabelul 1.1 pentru glonțul de calibrul 9mm respectiv tabelul 1.2 pentru glonțul calibrul 7,62mm.

#### 1.2.2 Rezultate experimentale

Prelucrarea datelor post tragere a cuprins două etape distincte.

1. S-au fotografiat vestele pe ambele fețe și s-au identificat urmele gloanțelor în ordinea de tragere.
  2. S-au fost desfăcute vestele, pentru recuperarea și repertorierea gloanțelor. S-a înregistrat numărul de straturi de Kevlar penetrate, locul de penetrare în raport cu matrice M-SAC respectiv cu vesta și s-au cântărit și măsurat gloanțele. Atât vestele cât și fiecare element în parte au fost fotografiate și repertoriate. Rezultatele sunt sintetizate în tabelele 1.1 și 1.2. Pentru fiecare vestă au fost calculate medii ale valorilor măsurate, și înscrise în tabele.
  3. Au fost recuperate celulelor lovite din diferite veste, evaluarea lor vizuală, fotografierea, spălarea și analiza stării post-impact a materialelor (material poros și membrană) celulelor SAC impactate; această etapă a fost denumită generic *Disecție*.
- Din rezultatele sintetizate în tabelele 1.1 și 1.2 precum și în graficele din figura 1.13 rezultă următoarele concluzii evidente.



Fig. 1.11. Vedere a glonțului de 9mm după impact

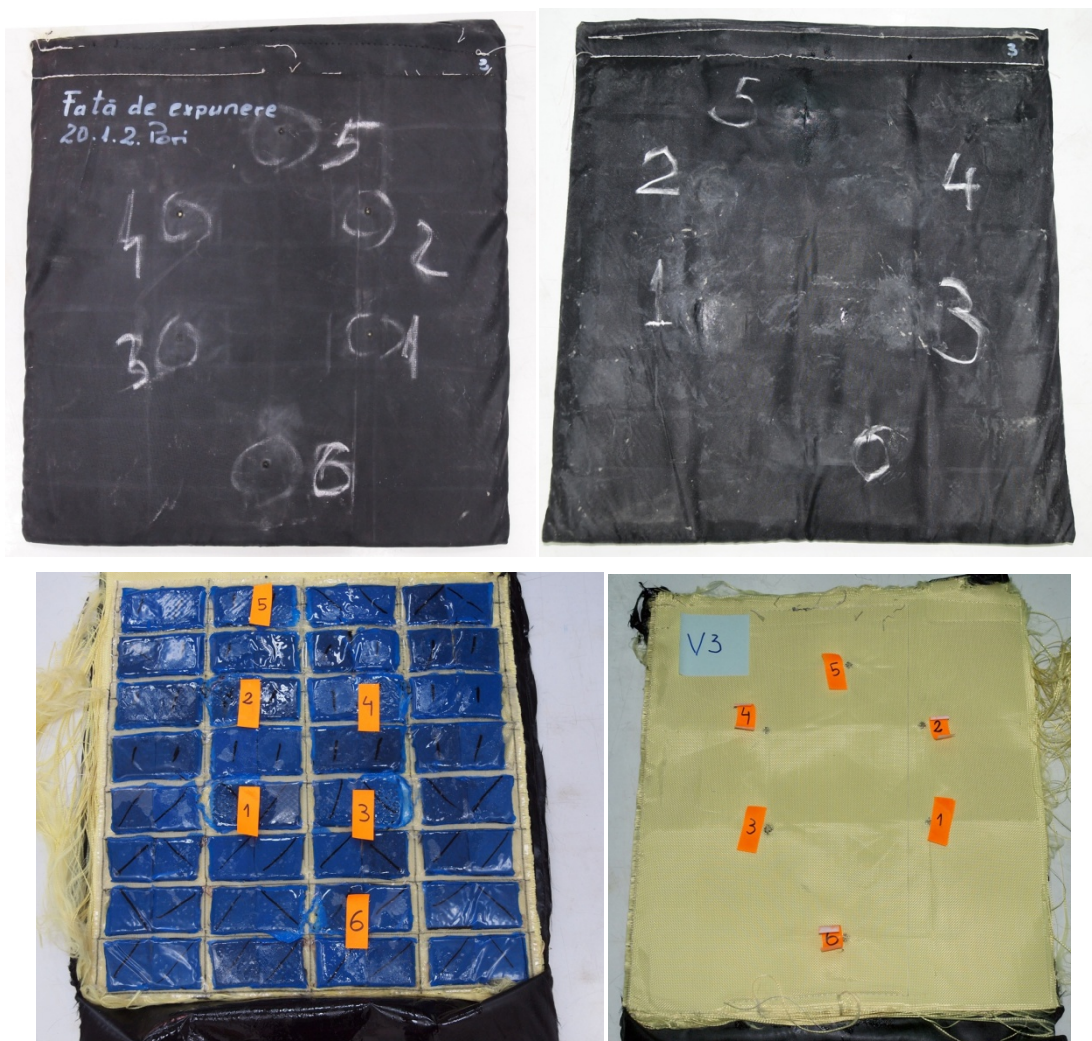


Fig. 1.12. Vederi ale modelului experimental la analiza de după testare

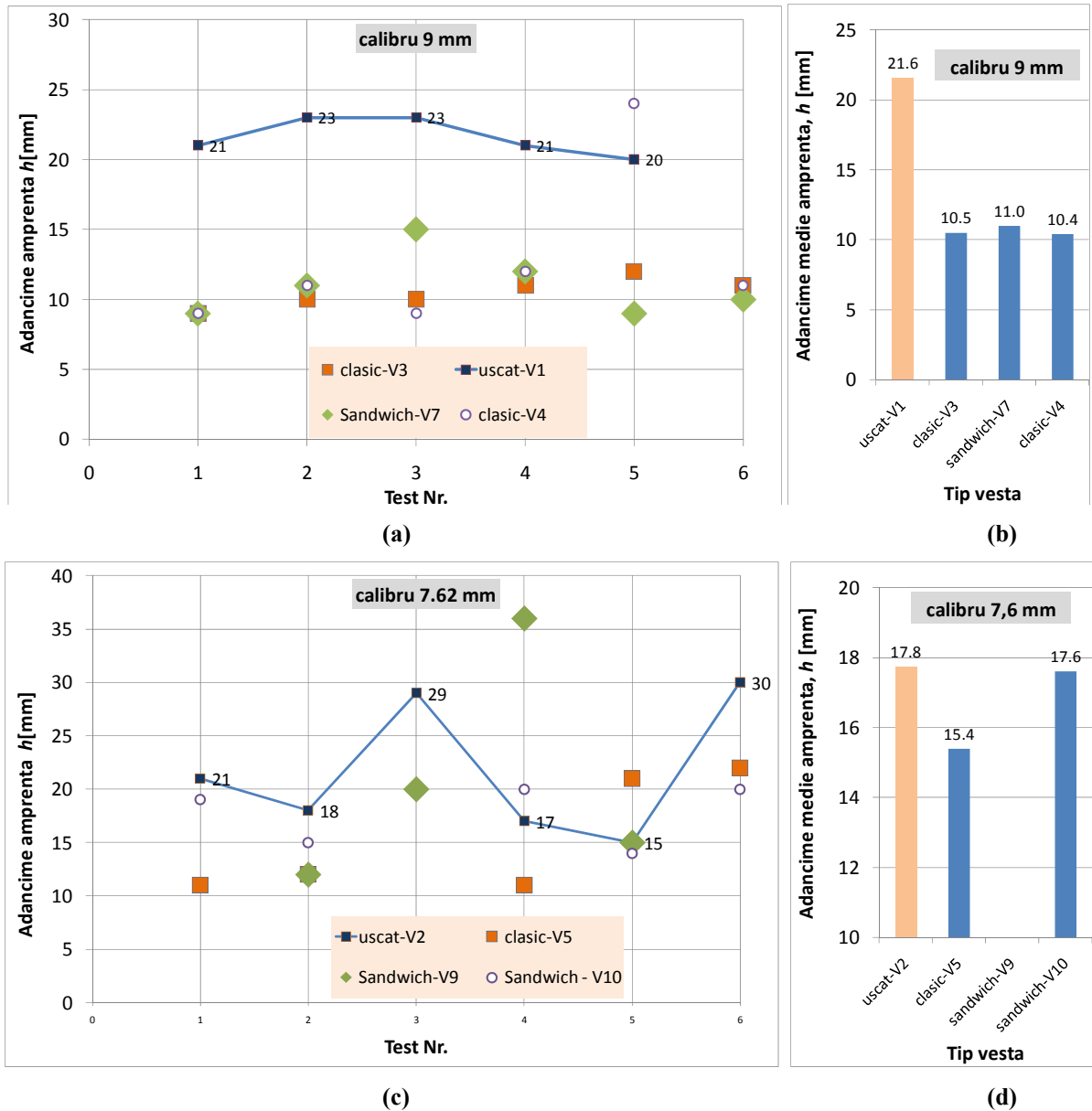


Fig. 1.13. Rezultate sintetizate ale adâncimii de penetrare în plastilina balistică la tragerea cu glonț

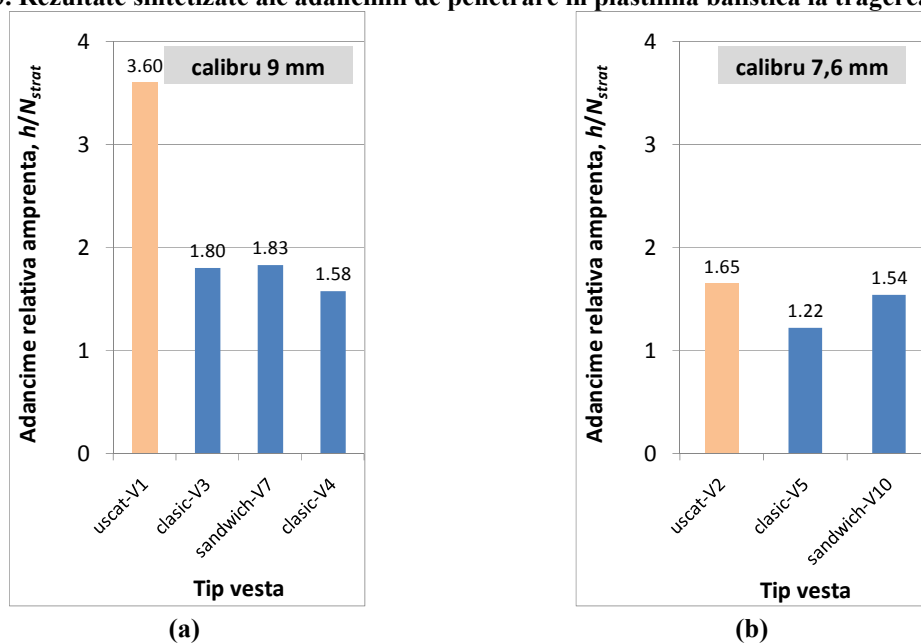


Fig. 1.14. Adâncimea relativă de penetrare în plastilina balistică la tragerea cu glonț

Rezultatele numerice obținute în cazul tragerii cu gloanțele de calibru 7,62mm au fost mult mai dispersate decât cele obținute în cazul tragerii cu gloanțele de calibru 9mm (tragere automată cu vizare laser, gloanțe de proveniență străină). Astfel dacă analizăm un aspect independent de modelul experimental, respectiv numărul straturilor penetrate observăm variații extrem de reduse la gloanțele de 9mm (valori medii aproape identice indiferent de vestă și cu o singură excepție, valori de 5, 6 sau 7 straturi). În contrast, la gloanțele de 7,62mm numărul de straturi penetrate variază extrem de mult la aceeași vestă (deci în condiții aparent identice) și cu valori medii diferite. Aceasta face ca evaluarea efectului de amortizare a soluției propuse să fie mai puțin concludentă, atâta timp cât soluția noastră este eficientă după ce are loc oprirea glonțului în țesătura de Kevlar.

Totuși din Fig. 1.13a și 1.13.b rezultă un efect extrem de spectaculos, respectiv o **reducere cu aproximativ 50% a adâncimii amprentei din plastilină în cazul glonțului de 9mm**. Tot o reducere, dar doar de aproximativ 10% se înregistrează și la glonțul de 7,62mm, în cazul vestei cu matrice de amortizare în spate (configurația C1-”clasică”). În ambele situații se observă că **plasarea stratului de amortizare în spatele vestei (configurația C1) conduce la rezultate mai favorabile decât în configurația sandwich (C2)**.

O comparație mult mai concludentă trebuie să țină cont de efectul de amortizare pentru aceeași forță de penetrare a glonțului, adică același număr de straturi penetrate. În aceste condiții, s-a definit un indicator adimensional al adâncimii amprentei raportată la numărul de straturi de Kevlar penetrate. Pentru aceeași valoare a adâncimii amprentei, o valoare mai redusă înseamnă mai multe straturi de Kevlar penetrate și deci o capacitate de penetrare a glonțului mai puternică. Valorile acestui parametru, mediate pentru fiecare vestă în parte se regăsesc în formă grafică în Figura 1.14. Din această figură se observă comportarea extrem de diferită a celor două veste martor (V1 respectiv V2) aparent identice. În cazul glonțului de 7,62mm penetrarea este mult mai accentuată. În același timp, graficul din Fig. 1.14b relevă un **efect pozitiv remarcabil și în cazul glonțului de 7,62mm (reducerea adâncimii amprentei relative cu circa 25%)**.

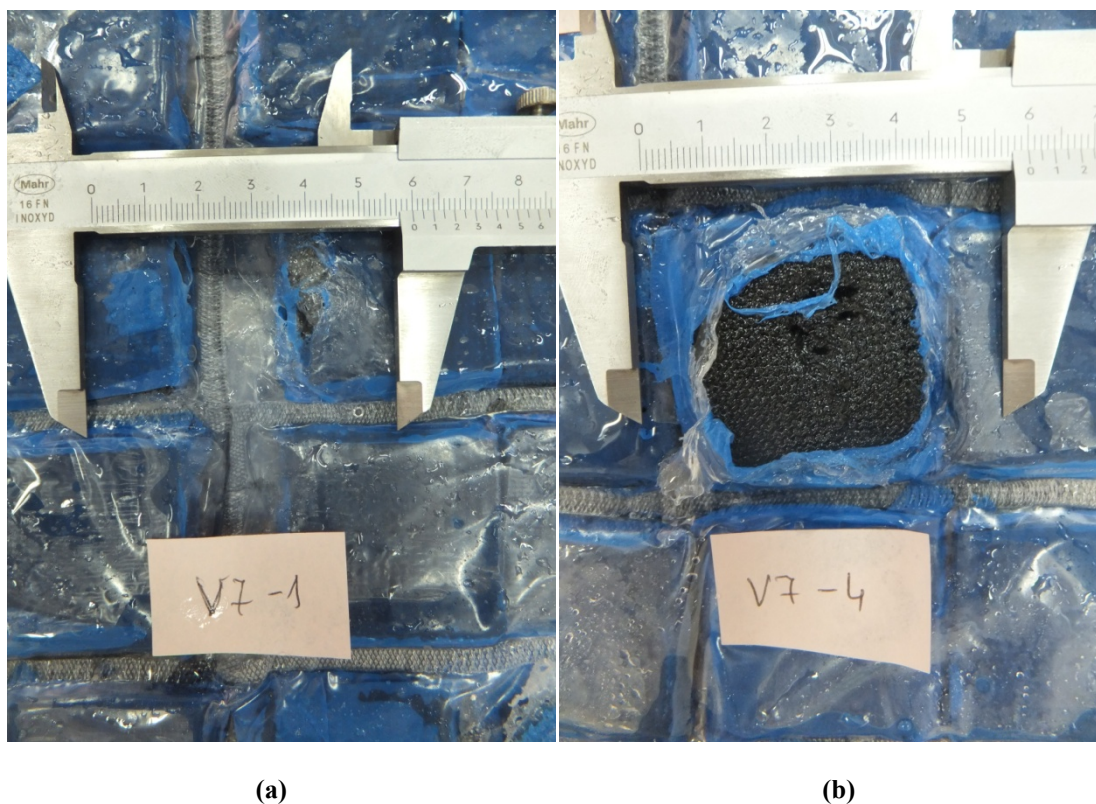


Fig. 1.15. Vedere a celulei SAC (a) impactată în colț respectiv (b) impactată central

Tab. 1.1 Seria I: glonț calibru 9mm (M=8.04gr)

Vesta	Glont nr.	V [m/s]	h [mm]	Masa glont [gr]	Straturi KEVLAR penetrate	$D_{glont}$ [mm]	$d_{glont}$ [mm]	$h_{glont}$ [mm]	Straturi K in calcul	Raza medie [mm]	Raza echivalenta [mm]	OBSERVAȚII
V-1	1	395	21	8.05	6	17.6	15.5	7.3		8.28		
1.168kg	2	393	23	8.04	5	16.7	15.1	6.7		7.95		
	3	400	23	8.04	5	16.7	15.7	6.4		8.10		
	4	399	21	8.06	8	14.3	13.8	5.1		7.03		Glont neplesnit
	5	398	20	8.05	6	15.8	14.5	5.4		7.58		
<b>MEDII</b>		<b>397</b>	<b>21.6</b>	<b>8.05</b>	<b>6.00</b>					<b>7.79</b>		
V-3	1	397	9	8.06	6	16.5	15.9	7.7	16	8.10	14.5	Forma ne-circulara a glonțului
2.246kg	2	399	10	8.04	6	15.5	15	5.6	16	7.63	14.0	
	3	397	10	8.07	7	16.1	15.2	6.3	15	7.83	13.8	
	4	397	11	8.05	6	16	15.3	5.6	16	7.83	14.2	
	5	397	12	8.06	5	16.4	14.8	5.7	17	7.80	14.6	
	6	394	11	8.06	5	16.4	15.2	5.7	17	7.90	14.7	
<b>MEDII</b>		<b>397</b>	<b>10.50</b>	<b>8.06</b>	<b>5.83</b>				<b>16.17</b>	<b>7.85</b>	<b>14.31</b>	
V-7	1	405	9	8.05	5	16.8	15.5	6.3	15	8.08	14.1	
2.066kg	2	395	11	8.04	6	16.6	15.7	7.8	14	8.08	13.7	
	3	398	15	8	6	15.9	15	5.6	14	7.73	13.3	Glont neplesnit
	4	398	12	8.03	7	16.3	15	5.2	13	7.83	13.0	
	5	399	9	8.03	5	17.3	15.9	7.9	15	8.30	14.3	
	6	401	10	8.02	7	16.3	15.1	5.7	15	7.85	13.9	
		<b>399</b>	<b>11.00</b>	<b>8.03</b>	<b>6.00</b>				<b>14.33</b>	<b>7.98</b>	<b>13.71</b>	
V-4	1	395	9	8.04	7	16.6	15.2	5.6	15	7.95	14.0	
2.220kg	2	400	11	8.07	7	17.2	15	7.5	15	8.05	14.1	
	3	400	9	8.02	5	16.2	15	7.0	17	7.80	14.6	
	4	403	12	8.04	7	16.1	14.8	6.0	15	7.73	13.7	
	5	400	24	8.04	7	16.3	14.9	6.1	15	7.80	13.8	adâncime aberanta - glonțul a străpuns vesta și SAC expulzat
	6	398	11	8.05	7	16.4	15.4	5.7	15	7.95	14.0	
<b>MEDII</b>		<b>399</b>	<b>12.67</b>	<b>8.04</b>	<b>6.67</b>				<b>15.33</b>	<b>7.88</b>	<b>14.01</b>	

Tab. 1.2 Seria I: glonț calibru 7,62mm (M=85.5gr)

Vesta	No	V [m/s]	h [mm]	masa glonț [gr]	straturi KEVLAR penetrate	$D_{glonț}$ [mm]	$d_{glonț}$ [mm]	$h_{glonț}$ [mm]	straturi K in calcul	Raza medie [mm]	Raza echivalenta [mm]	OBSERVAȚII
V-2	1	442	21	5.57	10	14.2	13.6	5.3	10	6.95	11.0	
1.166kg	2	440	18	5.55	12	14	13.4	5.5	8	6.85	10.1	Glonț neplesnit
	3	454	29	5.52	29	13.1	11.9	4.8	-9	6.25	2.7	NECONFORM la 1.5cm de margine
	4	455	17	5.49	10	14.3	13.7	5.1	10	7.00	11.0	Glonț neplesnit
	5	454	15	5.55	11	11.8	11.4	4.2	9	5.80	9.4	Glonț neplesnit - forma bizara
	6	454	30	5.51	15	12	10.5	5.0	5	5.63	7.6	la 3.5 cm de margine Glonț neplesnit forma bizară
MEDII		450	21.67	5.53	14.50				5.50	6.41	8.61	
V-5	1	458	11	5.56	13	13.4	13.2	4.8	9	6.65	10.3	
2.28kg	2	440	12	5.58	12	13.6	13	4.7	10	6.65	10.7	Între SAC-uri, la 35mm de margine
	4	462	11	5.54	8	13.9	13	5.6	14	6.73	12.3	
	5	447	21	5.53	13	13.5	13.1	5.3	9	6.65	10.3	
	6	447	22	5.7	17	12.5	12.2	4.3	5	6.18	8.2	În colț la intersecția a 2 lipituri (XPHD imposibil)
MEDII		451	15.40	5.58	12.60				9.40	6.57	10.33	
V-10	1	439	19	5.58	10	12.6	12.3	5.1	10	6.23	10.2	Glonț neplesnit. F. apropiat de V10-3 care nu a fost măsurat
2.118kg	2	449	15	5.53	11	13.1	12.9	5.1	9	6.50	10.1	Glonț neplesnit
	4	439	20	5.57	15	12.3	12	5.0	5	6.08	8.1	Glonț neplesnit - Materialul străpuns
	5	444	14	5.59	11	13.3	13.1	5.1	9	6.60	10.2	Glonț neplesnit
	6	444	20	5.54	10	12.3	11.8	5.1	10	6.03	10.0	In colț la intersecția a 2 lipituri
MEDII		443	17.60	5.56	11.40				8.60	6.29	9.73	Glonț plesnit parțial

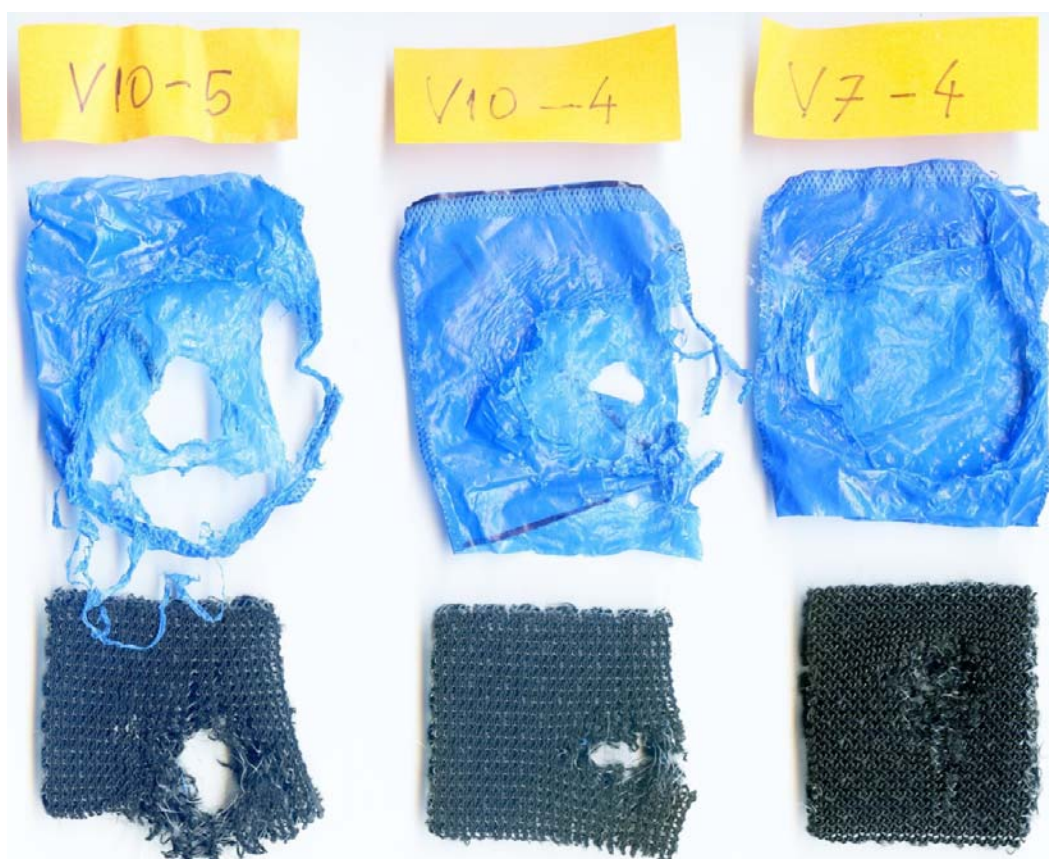


Fig. 1.16. Trei celule SAC după "disecție"

Tab.1.3. Comparația comportării celulelor impactate relativ central

Simbol test	V10-5 (glonț 7.62 mm)	V10-4 (glonț 7.62 mm)	V7-4 (glonț 9 mm)
Greutate vestă [kg]	2.118	2.118	2.066
Viteză impact [m/s]	444	439	398
Masă glonț [gr]	5.54	5.57	8.03
Straturi Kevlar penetrate	11	15	7
Adâncime amprentă în plastilină [mm]	14	20	12
Diametru glonț deformat [mm]	13.1÷13.3	12.0÷12.3	14.9÷16.1
Diametru contact echivalent [mm]	50	40	64
Membrana M-SAC	penetrată	penetrată	penetrată
Membrana celulei (SAC)	Penetrată superior și inferior	Penetrată superior și inferior	Penetrată doar superior
Strat poros S3D	Destrămat	Destrămat	Ne-destrămat

Analiza comparativă a celor două seturi de date din poligon demonstrează că numărul straturilor nepenetrabile este hotărâtor pentru adâncimea amprentei în plastilină. O posibilă explicație poate fi dată de raza sferei echivalente de impact (V. Tab. 1.1. și 1.2.) reprezentată de capul glonțului la care se adaugă straturile de Kevlar nepenetrabile. Cu cât această rază este mai mare, cu atât crește suprafața de contact a impactorului îmbunătățind distribuția forței de impact. Suprafața efectivă de impactare a vizualizată prin fotografierea M-SAC pentru vesta V-7 (Fig. 1.15). Se observă clar că lovitura a fost preluată pe un areal circular cu diametrul de aproximativ 60mm.

Din inspecția vizuală a materialului poros S3D (Fig. 1.16 și Tab. 1.3) este evident că destrămarea (distrugerea) acestuia s-a produs exclusiv din presiunea extrem de mare a fluidului de îmbibare; aceasta este o dovadă indirectă de necontestat a efectului de amortizare XPHD.

Contrar viziunii rezultată din modelele teoretice, impactul în zona ne-acoperită de o celulă SAC (la intersecția liniilor de sudură a "pungilor") oferă o protecție chiar superioară impactului centrat pe celulă; aceasta se datorează efectului combinat al mai multor celule care contribuie la amortizare.

Din Fig. 1.15a rezultă că paradoxal, lovitura centrată la intersecția a patru celule SAC a condus la o deteriorare mai redusă a M-SAC decât în cazul loviturii în centrul unei celule. Prin aceasta, soluția actuală de fabricație a matricei M-SAC a fost validată. Din Fig. 1.16 și Tab. 1.3 rezultă clar rolul diametrului de contact echivalent. Comparația aspectului mat. poros S3D și a membranei celulelor întărește această constatare.

## CAP. 2. CORELAȚIA DINTRE REZULTATELE EXPERIMENTALE ȘI MODELELE TEORETICE

Fenomenele care stau la baza amortizării impactului prin procese de lubrificație XPHD sunt complexe incluzând atât aspecte ale curgerii fluidelor prin medii poroase cât și efectele de deformare elastică a structurii poroase. Subiectul teoretic a fost studiat în mod constant în ultimii 15 ani în colectivul de tribologie din UPB, iar modelele teoretice propuse și publicate au fost validate principial doar pe standuri de laborator, în condiții extrem de simplificate.

Experimentele din actuala fază a Contractului fie cele realizate pe tunul Taylor dar mai ales cele realizate în poligon sunt extrem de complexe greu de controlat în detaliu, cu o mulțime de factori de influență a căror variație are caracter statistic. În aceeași categorie a parametrilor greu de evaluat intră și configurația geometrică a contactului. Totuși prin evaluare aproximativă și mediere a rezultatelor este posibilă o comparație a rezultatelor experimentale cu cele prezise de modelul teoretic.

### 2.1. Analiza rezultatelor experimentale din poligon cu modelul teoretic al impactului de tip sferă/plan

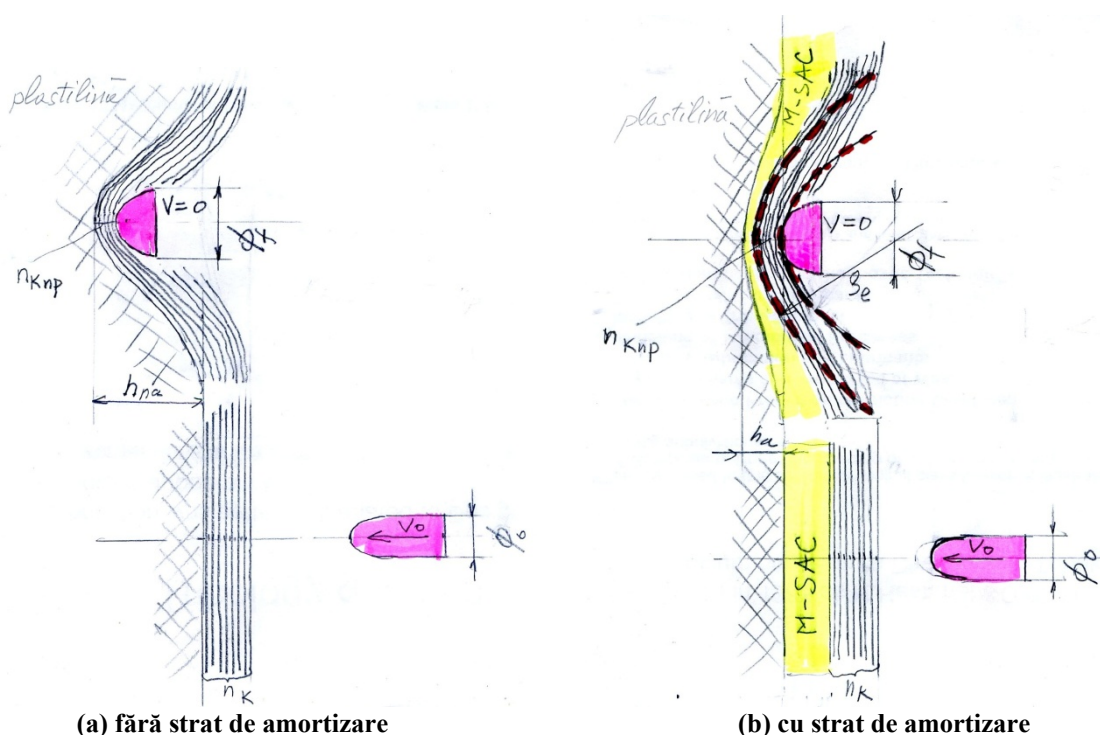


Fig. 2.1. Schema procesului de impactare a vestei

Complexitatea fenomenului analizat rezultă din descrierea grafică a procesului, schematizată în Fig. 21. Glonțul, cu un diametru inițial de  $\phi_0$  intră în contact cu vesta cu viteza  $V_0$ . Datorită rezistenței opuse de straturile de Kevlar glonțul se deformează ajungând la diametrul final  $\phi_f$ , în momentul anulării vitezei ( $V=0$ ).

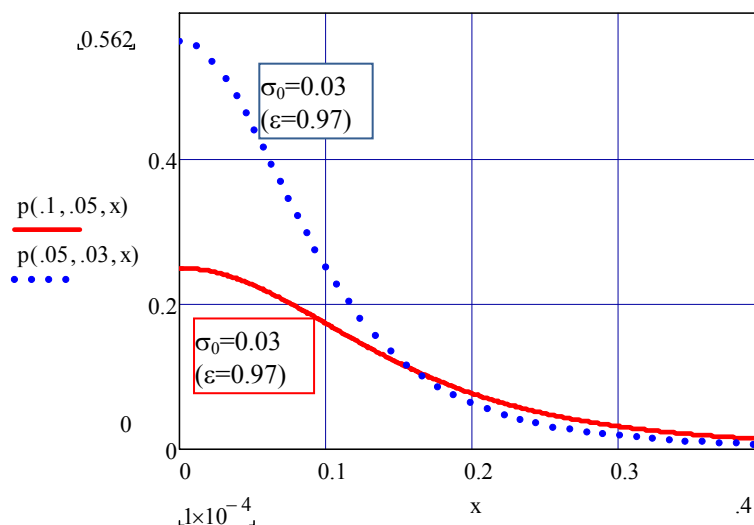
În acest timp raza de curbură a contactului (raza echivalentă) crește atât datorită creșterii diametrului cât și datorită straturilor de Kevlar nepenetrabile cu care "se înfășoară" și a rezistenței opuse de plastilină și matricea

M-SAC. Din Fig. 2.1. se vede că prezența M-SAC conduce la creșterea razei de curbură echivalentă. Acest lucru este dovedit de diferența adâncimii amprentelor în cazul prezenței, respectiv absenței M-SAC.

Pentru a înțelege eficiența amortizării M-SAC dar și motivația distrugerii membranelor și chiar a materialului S3D (Fig. 1.16 și Fig. 1.17) se poate face o analiză analitică aproximativă pe baza modelului teoretic elaborat de colectivul din UPB pentru contactul sferă/plan.

Alura distribuției de presiuni pentru un proces XPHD complet, în coordonate adimensionale este redată în Fig. 2.2., pentru materiale poroase cu caracteristicile similare celui folosit în experimente. Expresia presiunii maxime (din centru contactului -  $x=0$ ) este<sup>1</sup>:

$$p_{max} = \frac{\rho_e \eta V_0 \sigma_0^2}{4D} \left[ \left( \frac{h_m - \sigma_0}{h_0} \right)^{-2} - (1 - \sigma_0)^{-2} \right]$$



**Fig. 2.2. Distribuția presiunii pentru impactul sferă/plan (proces XPHD complet)**

Dacă permeabilitatea (determinată experimental) materialului poros este  $D=10^{-11} \text{ m}^2$ , vîscozitatea fluidului  $\eta=1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , viteza de impact a glonțului  $V_0=400\text{m/s}$ , porozitatea materialului  $\varepsilon=0.95$  (adică o compactitate  $\sigma=0.05$ ), raza echivalentă (estimată geometric din Fig. 1.16 pentru adâncimea amprentei  $h_a=12\text{mm}$ )  $\rho_e=30\text{mm}$ , grosimea inițială a materialului (S3D)  $h_0=6.5\text{mm}$ , grosimea minimă estimată a materialului poros în centrul contactului înainte de distrugerea lui  $h_m=0.625\text{mm}$ , din ecuația (1) se obține presiunea maximă  $p_{max} = 3 \cdot 10^5 \text{MPa}$ .

Este evident că o asemenea valoare (teoretică) a presiunii maxime va conduce atât la o rezistență remarcabilă la pătrunderea glonțului cît și la depășirea rezistenței structurii materialului S3D. Probabil că ruperea se va fi produs înainte de atingerea grosimii minime estimate ( $h_m$ ). Aceasta poate fi o explicație a adâncimii amprentelor de 2-3 ori mai mici în cazul adăugării materialului M-SAC în structura vestei.

## 2.2. Simularea numerică a comportării modelelor experimentale (celula de amortizare SAC)

Majoritatea modelelor numerice pentru curgerea fluidelor prin medii poroase utilizează legi de comportare a materialului determinate euristic.

Profitând de baza materială la dispoziție, și anume softul ANSYS și serverul IBM X3650-7070 cu 2quad-core și 32Gb RAM s-a încercat modelarea numerică tridimensională a curgerii unui fluid printr-un mediu extrem de poros pe timpul comprimării.

Este cunoscut faptul că pentru o structură solidă (mediul poros) este utilizat un model diferit comparativ cu cele pentru un fluid. Totuși pe timpul comprimării, fluidul și faza solidă a mediului poros interacționează continuu (*fluid-structure interaction* - FSI), materialul poros deformat crește rezistența la curgerea fluidului, iar fluid se opune deformării prin câmpul de presiuni creat. Cu ajutorul analizei FSI

<sup>1</sup> M. Radu *Modelarea și simularea procesului de expulzare a fluidelor prin straturi poroase extrem de compresibile, prin impact* - Teza de doctorat, UPB 2015.

bidirecționale, pentru structurile poroase îmbibate cu fluid se poate determina gradul de amortizare asigurat de structura îmbibată la acțiuni exterioare de deformare. Separat pentru calcularea deformării structurii poroase s-a utilizat aplicația Ansys Transient Structural întrucât fenomenul este neliniar și nestaționar cu variații extrem de rapide ale parametrilor de stare. Pentru comportamentul curgerii fluidului în porii structurii s-a folosit aplicația Ansys Fluid Flow (Fluent). Pentru a se obține o analiză FSI bidirecțională cele două aplicații au fost utilizate simultan cu ajutorul modulului System Coupling care coordonează procesul de rezolvare cât și transferul de date dintre cele două sisteme de analiză.

În contextul seriei de materiale poroase candidat anterior definite au fost utilizate mai multe tipuri de modele numerice inspirate din tipul fazei solide a materialului poros: structură bazată pe o țesătură ordonată de fire sau cilindri, structură bazată pe o matrice ordonată de sfere sau un volum din care au fost dislocuite tuburi lungi ordonate (Fig.1X).

În condițiile structurii complexe a mediului poros și implicit a fluidului care îl impregnează, analiza FSI presupune o putere de calcul impresionantă. Indiferent de dimensiunile modelului, datorită acestui fapt o analiză completă necesită sute de noduri de calcul. Acest lucru a făcut practic imposibil realizarea unei astfel de analize. Suplimentar, deformarea structurii poroase este dependentă de timp și de aceea trebuie alese cu atenție timpul total de studiere a fenomenului precum și pașii de timp destul de mici având în vedere rapiditatea fenomenului.

Datorită deformațiilor mari care apar în structura poroasă și în fluid a fost necesară utilizarea unei discretizări fine care a generat un număr foarte mare de elemente atât în mediul solid cât și în cel fluid. A fost înregistrat un succes parțial și anume a fost posibilă studierea a 0,125 s din fenomen la o comprimare a structurii cu o viteză de 2 mm/s.

Ca o concluzie generală a modelării numerice, puterea mare de calcul și facilitățile furnizate de ANSYS nu au fost suficiente pentru construcția unor modele numerice rezolvabile care să caracterizeze fidel interacțiunea dintre faza solidă și poros și care să genereze rezultate comparabile cu cele experimentale.

### CAP. 3. BREVET

Urmare a activităților de cercetare desfășurate a fost depusă cererea de brevet de invenție cu nr. A/00708 din 25.09.2017 cu titlul *"Sistem suplimentar de amortizare pentru echipamente de protecție balistică, procedeu de realizare și integrare"*.

Invenția se referă la o cască de protecție, folosită pentru protecția capului utilizatorului pe timpul desfășurării unor activități care prezintă risc mare de lovire de suprafețe mari sau împotriva impacturilor cu proiectile cu dimensiuni relativ mici și cu viteze de deplasare de până la 750m/s precum și la un procedeu de realizare a acestora.

Problema tehnică pe care o rezolvă invenția constă în asigurarea unui sistem mai performant de amortizare a deformării structurii de protecție balistică cu participarea activă la oprirea glonțului prin generarea unei presiuni de rezistență la deformare.

Un astfel de sistem amortizare oferă o capacitate de amortizare mare pentru o greutate și cost redus prin aceea că se bazează pe straturi subțiri de material poros este îmbibat cu lichide. Materialul poros este îmbibat și capsulat într-o membrană de protecție și astfel se formează elementul constituent al sistemului suplimentar de amortizare și anume celula de amortizare. Mai multe celule de amortizare sunt conectate pentru a forma o matrice care poate acoperi diferite suprafețe.

Procedeu de realizare, conform invenției, constă în realizarea celulei de amortizare și a matricei de celule și integrarea într-un amortizor care apoi va echipa o cască de protecție.

Realizarea celulei de amortizare constă în îmbibarea unor petice mici (pătrate, disc sau alte forme plane) de material poros într-un lichid, prin metode specifice funcție de porozitatea materialului și vâscozitatea lichidului. Nivelul de îmbibare poate varia între 50% și 100%. După îmbibare materialul poros îmbibat se capsulează într-o membrană impermeabilă rezistență chimic față de lichid din polietilenă, poliamidă sau altele.

Căștile de protecție de tipul căștilor de protecție balistică și căștilor de motociclist care au integrat sistemul suplimentar de amortizare conform invenției prezintă următoarele avantaje:

- Asigură un nivel de amortizare ridicat al deformației calotei produse la impactul cu fragmente mici care se deplasează cu viteze mari;
- Contribuie activ la stoparea penetrării fragmentului;

- Creșterea performanței permite reducerea numărului de straturi de țesături utilizate și reducerea raportului greutate/performanță;
- Realizarea nu este condiționată de tehnologii speciale de fabricație.

În continuare este exemplificată structura unei căști de protecție cu amortizoare din material poros și procedeul de realizarea a celulei de amortizare, procedeul de construcție a matricei de celule care stă la baza amortizoarelor și procedeul de integrare a acestuia în cască în legătură. Toate acestea sunt prezentate grafic în figurile de mai jos Fig.3.1-3.5.

Casca de protecție conform invenției este formată dintr-o calotă (Fig.3.1 poz. 1) dintr-un material de protecție rezistent la impact, sistem de fixare pe cap (Fig.3.1 poz. 2) și sistem de amortizare (Fig.3.1 poz. 3).

Sistemul de amortizare este alcătuit dintr-o baza (Fig.3.1 poz. 4) din material poros uscat care acoperă întreaga suprafață interioară a căștii și un set de 6 amortizoare: frontal (Fig.3.1.poz. 5), laterale (Fig.3.1.poz. 6,7), cervical (Fig.3.1 poz. 8) și superior (Fig.3.1 poz. 9), care dislocuiește materialul local. Cele laterale sunt dispuse simetric. Amortizoarele protejează o suprafață de minimum 60% din suprafața interioară a căștii și sunt prinse de materialul poros prin metode specifice precum lipire, coasere, introducere în husă. Baza este prinsă de calotă prin intermediul unor nituri sau prin lipire pe întreaga suprafață de contact. Pentru construcția bazei se pot utiliza și alte materiale cu elasticitate ridicată.

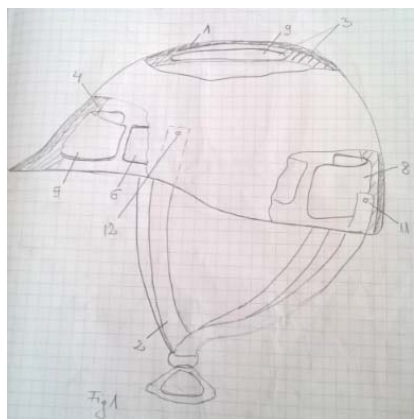


Fig.3.1 Vedere laterală a unei căști cu secțiuni parțiale

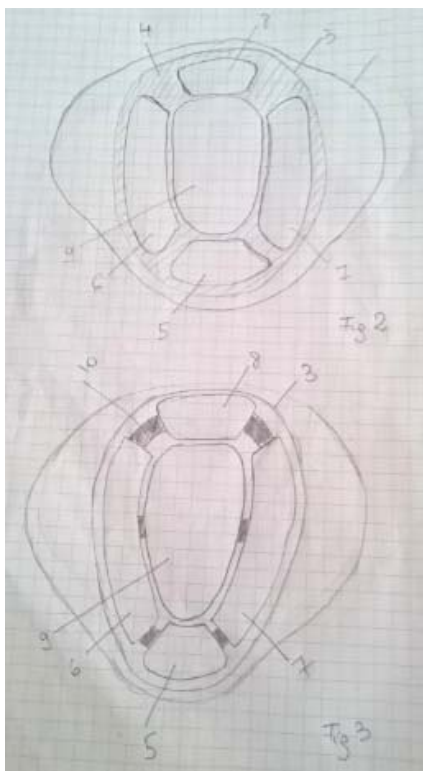


Fig.3.3 Sistemul de amortizare cu curele - vedere în plan;

Fig.3.2 Sistemul de amortizare cu bază - vedere în plan;

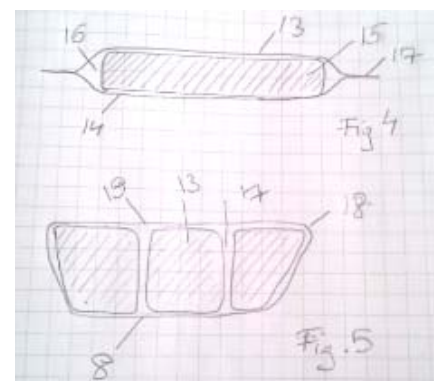


Fig. 3.5 Amortizor cu celule - vedere în secțiune.

Se poate utiliza și un sistem de protecție în care baza (Fig.3.1 poz4) este înlocuită cu un sistem de curele care prind toate amortizoarele și se montează pe cască prin intermediul niturilor (Fig.3.1. poz. 11, 12). Curelele sunt prinse de calotă prin intermediul unor nituri.

Realizarea celulei de amortizare (Fig.3.5. poz.13) constă în capsularea într-o membrană (Fig.3.5.poz. 14) a unui strat de material poros îmbibat cu fluid (Fig.3.5.15). Grosimea stratului de material poros este cuprinsă în intervalul 2-7 mm. Porozitatea materialului poros este mai mare de 0,9 iar toți porii sunt interconectați. Materialele poroase care pot fi utilizate sunt spumele metalice sau nemetalice extrem de compresibile. La încapsulare un rezervor (Fig.3.5 poz. 16) este păstrat pe întreg conturul materialului poros. Membrana de capsulare (este mărginită de o fâșie de îmbinare (Fig.3.5 poz.17) care este folosită pentru conectarea mai multor celule. Membrana de capsulare trebuie să fie impermeabilă la lichidul de îmbibare, să aibă o grosime de maximum 0,5 mm, o rezistență la întindere de minimum 30 N/mm<sup>2</sup>, o alungire relativă de minimum 350%. Se pretează materiale de capsulare din poliamidă sau poliuretano. Fluidul de îmbibare poate fi

glicerină sau alte fluide cu vîscozitate redusă și stabile în condiții de variație de temperatură în intervalul -30-50°C.

Realizarea amortizoarelor constă în asamblarea mai multor celule pentru acoperirea unor suprafețe mai mari de tipul matricilor sau a liniilor. Asamblarea celulelor se poate face pe margine prin lipire, prin prindere pe un suport sau prin prindere în interiorul unei membrane sau a unei huse. Ansamblul de celule este introdus într-o husă (Fig.3.5 poz. 19) și astfel se obține sistemul de protecție.

#### **CAP. 4. CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE**

S-au proiectat, realizat și testat cu acuratețe, la energii mari, pe tunul Taylor celule de amortizare (SAC) de concepție nouă. Rezultatele sunt reproductibile, în deplin acord cu teoria XPHD elaborată în cadrul UPB și conduc la reducerea forței de impact la 30%-50% față de cea măsurată în absența SAC.

S-au proiectat, realizat și testat matrici multi-celulare (m-SAC) utilizând o nouă tehnologie nouă. Încorporate în veste conținând straturi de Kevlar și Adflex au fost testate în poligon cu muniție de 9mm și 7,62mm. Rezultatele au fost extrem de încurajatoare, vestele cu strat suplimentar de protecție conducând la o reducere practic la jumătate a amprentei de după impact față de cazul vestei impactate fără stratul suplimentar.

Analiza minuțioasă a vestelor testate a condus la înțelegerea profundă a procesului extrem de complex de amortizare XPHD în condițiile suprapunerii cu efecte atenuatoare ale straturilor de Kevlar, Adflex și a muniției balistice martor. Pentru a ajunge, pe baza modelelor experimentale elaborate și testate la o vestă utilizabilă, este necesar un proces de dezvoltare de produs bine sprijinit financiar, și acces la materiale poroase noi.

Prin această ultimă etapă au fost finalizate toate obiectivele majore ale proiectului, așa cum au fost ele definite în urmă cu 4 ani, la redactarea propunerii. Soluțiile inovatoare au fost protejate prin brevetare.