

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. II - 2015

Raport științific și tehnic

DIRECTOR: Prof. dr. ing. Traian CICONI

Cuprins

1. Rezumat.....	3
2. Proiectarea si realizarea modelelor experimentale pentru "celula de amortizare" (SAC)	5
2.1. Cerințe impuse celulelor de amortizare.....	5
2.2. Soluții constructive pentru celulele de amortizare	5
2.2.1 Configurații geometrice si dimensiuni	6
2.2.2 Cupluri de material poros și fluid încapsulate.....	7
2.3. Tehnologii de fabricație a celulelor de amortizare (îmbibare și încapsulare).....	8
2.3.1 Materiale de încapsulare.....	8
2.3.2 Tehnici de îmbibare.....	8
2.3.3 Tehnici de încapsulare.....	9
3. Evaluarea experimentală a celulelor de amortizare.....	10
3.1. Teste pe standul pendular de impact (evaluarea impactului prin forța și accelerația corpului impactat)	10
3.1.1 Rezultate obținute.....	10
3.1.2 Concluzii	12
3.2. Teste pe standul cu cădere liberă /"drop-test"/ (evaluarea impactului prin amprentare) .	13
3.2.1 Configurații experimentale și elemente constructive	13
3.2.1.1 Amprentare pe plastilină de modelaj	13
3.2.1.2 Amprentare pe plastilină balistică.....	15
3.2.2 Metode de evaluarea a amprentei.....	16
3.2.3 Rezultate obținute.....	17
3.2.4 Concluzii	18
4. Concluzii generale.....	19
5. Bibliografie.....	20

1. Rezumat

În faza precedentă a Contractului (2014) au fost analizate multiple combinații de materiale poroase și fluide de îmbibare, analizând compatibilitatea la aplicațiile urmărite (în special efectele la contactul cu corpul uman) precum și capacitatea de amortizare în condiții de impact cu viteze mici ($<2\text{m/s}$). Toate aceste studii au fost realizate pe **modele deschise**, adică pentru impactul unui corp rigid direct pe materialele poroase îmbibate, o soluție utilă pentru studiile urmărite dar fără interes pronunțat.

Faza a doua a Contractului (2015) a avut ca obiectiv **încapsularea** cuplului material poros + fluid de îmbibare pentru realizarea componentei de bază a sistemului de amortizare produs, respectiv **celula de amortizare a șocului (SAC)**. Studiile au urmărit, pe de o parte, analiza materialelor de capsulare posibile de utilizat, a soluțiilor constructiv-funcționale, a tehnologiilor de încapsulare, iar în paralel, a fost analizată comportarea **modelelor închise** (pachetul material poros + fluid de îmbibare, încapsulat) la impactul cu viteze reduse.

Conform Planului de realizare al Proiectului, activitățile din acest an au fost dedicate obiectivului: **Proiectarea și execuția modelului funcțional uni-celular (Celula de amortizare a șocului-SAC)**. Activitățile prevăzute au fost împărțite în trei categorii:

- (a) Concepția și proiectarea modulului de capsulare a unei Celule de amortizare (SAC);
- (b) Fabricarea modelelor experimentale ale celulei de amortizare (SAC) în diferite configurații;
- (c) Investigarea capacității de amortizare la impact a Celulei de amortizare (SAC) pe standuri de laborator.

Primele două activități, au fost realizate în mare măsură de către cei doi parteneri asociați P1 (ACTTM) și P2 (STIMPEX), în timp ce activitatea de testare experimentală (c) a fost realizată de către coordonatorul proiectului CO (UPB).

Activitățile de realizare a modelelor închise au urmărit încercarea a mai multor soluții de încapsulare, a mai multor materiale plastice de încapsulare și a soluțiilor de lipire a acestora. Concepția soluțiilor de fabricație a avut ca obiectiv două variante fundamentale de construcție a celulei definite în etapa anterioară: celulă cu material poros complet îmbibat și celulă cu material poros parțial îmbibat. Etanșarea celulei s-a făcut prin lipire la cald sau cu ultrasunete și a permis doar utilizarea membranelor subțiri termoplastice.

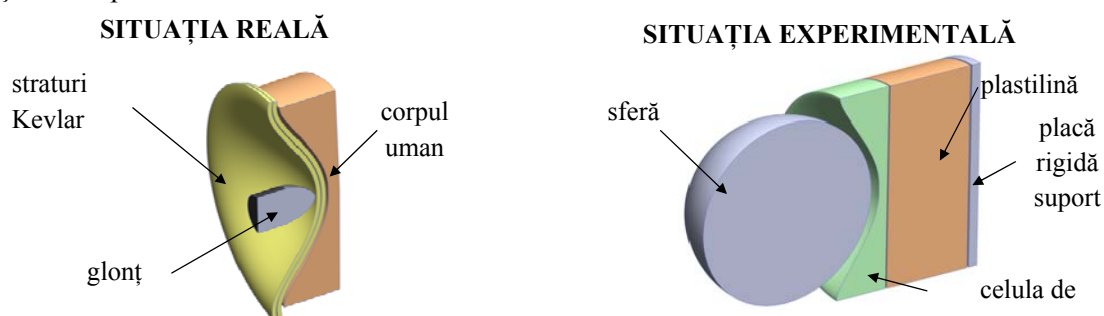


Fig. 1.1 Analogia dintre impactul glonțului cu vesta antiglonț și testele experimentale

Testarea experimentală la impact a vestelor antiglonț cu stratul suplimentar de amortizare este un procedeu costisitor și ce necesită mult timp de lucru. De aceea, pentru analizarea comportamentului celulei de amortizare, a fost considerată forma straturilor de Kevlar ale vestei deformată în urma impactului cu un glonț, care poate fi asemănată cu contactul unei bile de dimensiuni relativ mari cu un plan (Fig. 1.1). Pentru a simula efectul asupra corpului uman, a fost plasată un strat relativ gros de

plastilină ce are un comportament plastic, similar cu corpul uman. Dacă celula de amortizare nu poate absorbi întreaga energie de impact, aceasta va deforma plastilina. Menționăm că, până în prezent, unica metodă de evaluare a efectului balistic se bazează pe adâncimea amprente, fără a exista o argumentare științifică fundamentată. Doar recent (2014) au apărut primele studii științifice dedicate modelării comportării la impact a plastilinei balistice [1].

Testele de amortizare au fost realizate în două configurații, după cum urmează:

- (a) **teste pe standul pendular**, în condiții similare celor realizate în prima fază a Contractului (2014): teste de impact sferă-plan rigid acoperit cu celula de amortizare realizate la viteze reduse (1-2m/s). Acestea au avut ca obiectiv determinarea efectului materialului de încapsulare și a diferitelor soluții constructive de încapsulare, influența gradului de îmbibare și influența prezenței straturilor de kevlar. Evaluarea efectului de amortizare s-a realizat pe baza forței maxime și a accelerației maxime înregistrate pe corpul impactat. Rezultatele au evidențiat comportarea diferită a materialului poros îmbibat și încapsulat față de cel necapsulat, testat anterior (2014). Din analizele comparative a rezultat că utilizarea glicerinei sau a pastelor conduce la rezultatele cele mai bune. De asemenea, a rezultat clar că, în cazul impactului concentrat (pe suprafețe reduse) îmbibarea totală reprezintă soluția mai eficientă.

Tot pe standul pendular s-a analizat influența dimensiunilor plastilinei asupra efectului de amortizare suplimentar al acesteia. Rezultatele au arătat că dimensiunea radială a plastilinei nu influențează rezultatele, însă grosimea acesteia modifică sensibil parametrii de impact măsurați.

- (b) **teste "drop ball"**: teste de impact realizate cu bile în cădere liberă, care au permis creșterea vitezei de impact până la 10m/s. Toate aceste teste au fost realizate într-o configurație în care materialul de suport a fost plastilina, în două variante. Un prim set de teste cu caracter preliminar au fost realizate pe plastilină de modelaj pe bază de apă, care se întărește la câteva ore după utilizare și care permit o manipulare ușoară pentru evaluarea amprente și conservarea ei. Înălțimea de lansare a bilei ($\phi 30\text{mm}$, $M=0.11\text{kg}$.) de aproximativ 5m a permis o viteză la impact de aproape 10m/s. Aceste teste au avut ca rol analiza exploratorie a procesului de impact și evaluarea amprente prin scanare 3D. Această tehnică avansată de analiză a amprente s-a dovedit totuși scumpă și dificil de utilizat pe scară largă. Lansarea liberă a bilei a generat dificultăți de centrare a traiectoriei pe forma din plastilină și a condus la trecerea la setul al doilea de teste.

Al doilea set de teste au fost realizate pe plastilină pe bază de ulei (plastilină balistică echivalentă plastilinei Roma No. 1) – material standard utilizat pentru testele balistice, fiind considerat a avea o comportare similară corpului uman. În aceste teste, viteza la impact a fost de 6,5m/s, corespunzătoare înălțimii de cădere de 2.15m, însă pentru creșterea energiei de impact s-a utilizat o bilă mult mai mare ($\phi 63\text{mm}$, $M=1.028\text{kg}$.). Pe baza acestor teste s-a evidențiat efectul foarte favorabil al materialului tip spacer-3D îmbibat cu pastă sau cu glicerină. Evaluarea comparativă a adâncimii, respectiv a volumului amprente a arătat o reducere a acestora cu până la 17% în cazul glicerinei și cu 25% în cazul pastei.

O parte importantă a activităților experimentale a fost focalizată pe evaluarea efectului impactului prin amprentare, prin măsurarea atât a adâncimii amprente cât și a volumului acesteia. În acest sens, au fost imaginate diferite metode de măsurare și evaluate prin prisma complexității și a preciziei acestora.

În concluzie, rezultatele obținute au demonstrat capacitatea de amortizare a soluției inovative care stă la baza proiectului, evidențiindu-se structuri și configurații de celule de amortizare care vor face obiectul testelor ulterioare realizate la viteze medii și mari. Activitățile desfășurate au urmărit întocmai planul de realizare propus și au condus la rezultate promițătoare pentru dezvoltarea ulterioară a soluției de amortizare propusă.

2. Proiectarea si realizarea modelelor experimentale pentru "celula de amortizare" (SAC)

2.1. Cerințe impuse celulelor de amortizare

Structura elementară de amortizare, denumită Celulă de amortizare a șocului (SAC), este o structură flexibilă compusă din materialul poros, fluidul de îmbibare și membrana de etanșare (încapsulare) care funcționează autonom atunci când este supusă la sarcini de impact sau sub acțiunea unei unde de șoc. Celula de amortizare trebuie să permită încorporarea celulei în sisteme de protecție individuală (scuturi, veste de protecție balistică, căști de protecție balistică, panouri de protecție trăgător etc.).

Pentru utilizarea în sistemele de protecție balistică, celula de amortizare trebuie să îndeplinească cerințele specifice echipamentelor militare care intră în dotarea luptătorilor sau a membrilor echipelor de dezamorsare bombe. Pentru a asigura mobilitate crescută luptătorului/vehiculului membrana nu trebuie să aducă limitări datorită comportamentului mecano-elastic sau a masei (cerința este valabilă și pentru celelalte componente ale celulei). Rezistența la condițiile de mediu este definită conform STANAG 4370/AECTP 200 și STANAG 4370/AECTP 300 pentru condițiile climatice A3 și C1 și prin rezistența la acțiunea radiației ultraviolete. Solicitățile mecanice sunt derivate din standardul de protecție balistică NIJ 0101.06 [2] la care se adaugă rezistența la deformarea produsă de fluidul expulzat. Presiunea hidraulică exercitată de fluidul expulzat va acționa atât asupra membranei cât și asupra îmbinărilor de etanșare.

Celula trebuie să reprezinte o barieră de protecție în fața acțiunii substanțelor chimice care pot afecta performanțele celulei sau pot răni corpul uman. Toate materialele utilizate în construcția sa nu trebuie să fie nocive pentru corpul uman sau mediu, chiar dacă sunt arse sau încălzite.

2.2. Soluții constructive pentru celulele de amortizare

Celula de amortizare (SAC) este definită prin încapsularea unei structuri poroase extrem de deformabile și a unui lichid, astfel creându-se o structură compozită adaptabilă la diferite sisteme de protecție. Compatibilitatea cu sistemele de protecție existente cărora le este destinată, este asigurată prin configurarea SAC în matrice (M-SAC). Definirea soluțiilor constructive a ținut cont de două variante constructive principal diferite:

Soluția V1: SAC cu structură omogenă în care materialul poros este complet îmbibat cu lichid. Comprimarea structurii poroase în timpul impactului presupune expulzarea fluidului îmbibat în interiorul sau exteriorul structurii poroase. În cazul expulzării în interiorul structurii poroase, dacă membrana de protecție nu este distrusă, fluidul va reîmbiba stratul poros și celula poate amortiza un alt impact. Cazul expulzării în exteriorul structurii poroase presupune fie distrugerea membranei de protecție (învelișului) și pierderea capacității de amortizare fie colectarea fluidului într-o zonă tampon, care va permite reîmbibarea ulterioară. Această din urmă soluție, este foarte dificilă din punct de vedere tehnologic.

- **Soluția V2:** SAC cu structură formată din materialul poros parțial îmbibat într-o zonă centrală numita rezervor de fluid. În această variantă de structură, fluidul folosit trebuie să-și mențină poziția centrală până în momentul impactului, cerință dificil de realizat.

2.2.1 Configurații geometrice și dimensiuni

Pe timpul comprimării, pentru expulzarea fluidului la exteriorul materialului poros îmbibat, au fost imaginate mai multe mecanisme și prin urmare mai multe variante de construcție:

a. Expulzarea fluidului se face în exterior printr-o serie de micro-supape prevăzute pe suprafața membranei (Fig. 2.1) – *Soluția VI*. Această soluție se bazează în principiu pe utilizarea unei membrane cu pori sau micro-supape suficient de mari cât să asigure expulzarea eficientă a fluidului în exterior. Pentru păstrarea unui efect de amortizare ridicat pot fi utilizate două straturi subțiri, impermeabile și cu o rigiditate mai mare decât a membranei al căror scop este de direcționare a curgerii fluidului în planul median (Fig. 2.2).

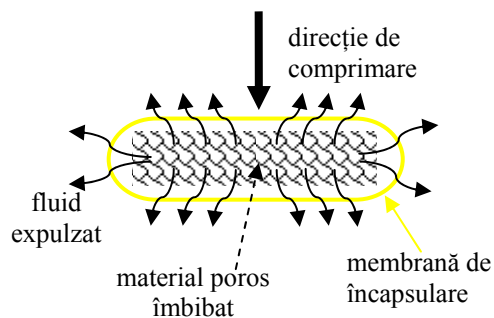


Fig. 2.1 SAC cu membrana de încapsulare cu micro-supape (în secțiune)

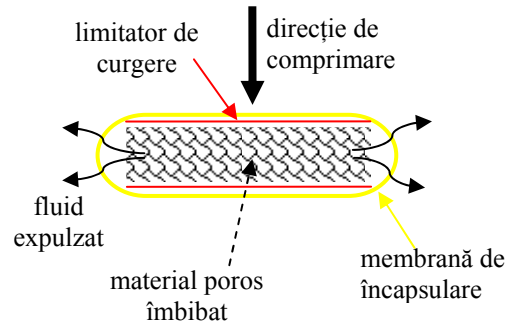


Fig. 2.2 SAC cu membrana de încapsulare cu micro-supape și limitator de curgere (în secțiune)

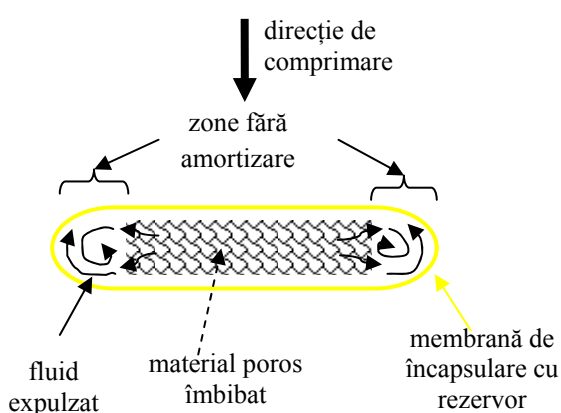


Fig. 2.3 SAC cu membrana cu rezervor (în secțiune)

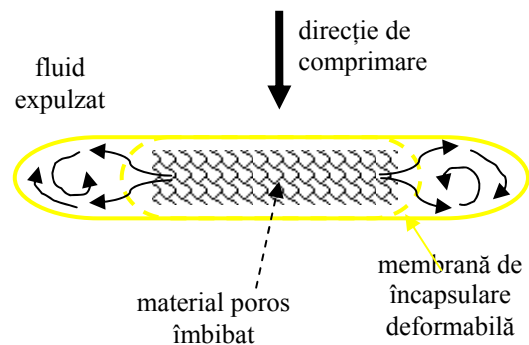


Fig. 2.4 SAC cu membrana deformabilă (în secțiune)

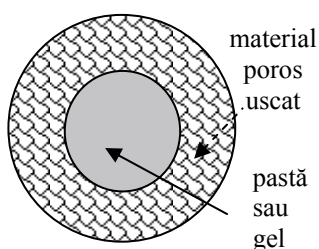


Fig. 2.5 SAC cu rezervor de gel sau pastă (vedere de sus)

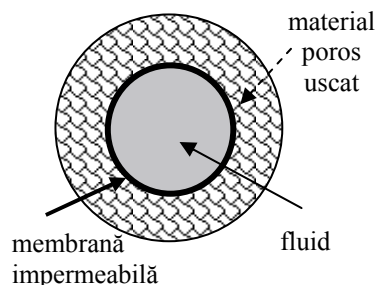


Fig. 2.6 SAC cu rezervor de fluid în membrană (vedere de sus)

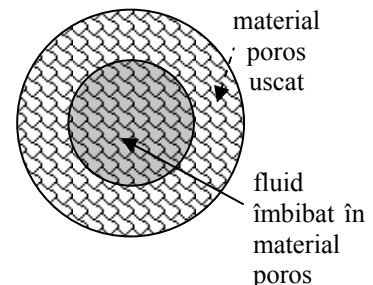


Fig. 2.7 SAC cu rezervor de fluid îmbibat (vedere de sus)

- b. Fluidul expulzat este acumulat într-o zonă tampon prevăzută la extremitatea SAC – *Soluția V1*. Incorporarea în SAC a unui rezervor capabil să capteze întregul fluid expulzat pare a fi soluția ideală pentru a asigura o expulzare eficientă a fluidului. Rezervorul poate fi predefinit și construit odată cu celula (Fig. 2.3) sau poate fi creat de fluidul expulzat în interiorul unei membrane deformabile (Fig. 2.4).

În cazul celulelor cu rezervor, fluidul folosit trebuie să-și mențină poziția centrală în interiorul unui disc de material poros uscat, ceea ce presupune două soluții constructive:

- a. Fluidul este sub formă de pastă sau gel cu prag de curgere care asigură portanță statică ridicată (Fig. 2.5) – *Soluția V2*. Avantajul utilizării acestui model de celulă de amortizare este faptul că materialul uscat asigură volumul necesar fluidului expulzat. Pe timpul comprimării, fluidul migrează din rezervorul central către exterior pe direcție radială. În felul acesta, aria protejată crește și efectul de amortizare este amplificat. Pentru fluide mai puțin vâscoase se poate utiliza o membrană impermeabilă dar cu rezistență mică la rupere sau casantă pentru a menține fluidul în rezervor înainte de impact.
- b. Fluidul este menținut în rezervorul central prin pre-îmbibarea într-un disc din material poros (același sau nu cu cel uscat). Această soluție, ca și cea precedentă, permite și utilizarea fluidelor care nu au prag de curgere sau care au vâscozitate mică.
- c. Celula 3x3 este construită din fragmente de material poros complet îmbibate și încapsulate așezate într-o structură de tip șah în care fragmentele alternează cu zone neprotejate (Fig. 2.8.a). Pentru celula unistrat există o zonă mare neprotejată dar care poate fi utilizată ca rezervor de evacuare a fluidului expulzat. Pentru a elimina zonele neprotejate se pot utiliza două straturi suprapuse cu fragmentele de material poros intercalate (Fig. 2.8.b).

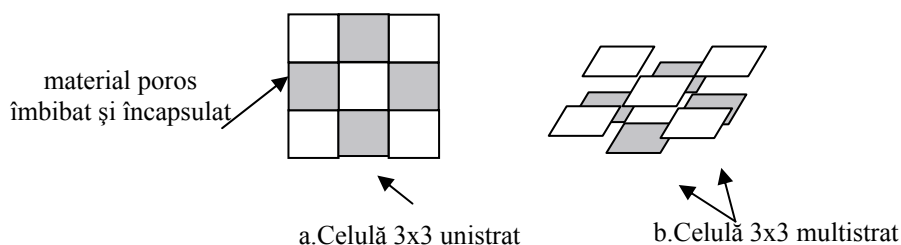


Fig. 2.8 Celula 3x3

2.2.2 Cupluri de material poros și fluid încapsulate

Pentru fabricarea celulei SAC au fost utilizate mai multe combinații de materiale poroase, fluide și membrane pentru încapsulare. În continuare vor fi prezentate combinațiile de material poros fluid:

- **Spumă poliuretanică F133 + glicerină.** Această combinație a fost folosită pentru fabricația celulelor cu material poros complet îmbibat cât și pentru fabricația celulelor cu rezervor de fluid. Spuma are o porozitate suficient de mare asociată cu o permeabilitate redusă, astfel încât fluidul să poată fi menținut în interior.
- **Spacer 3D + glicerină cu particule de zeosil (SiO_2 ultrafin) în suspensie.** Această configurație a fost folosită pentru fabricația celulelor cu material poros complet

îmbibat. 3D Spacer este un material cu porozitate foarte mare și cu o structură internă care poate menține la interior doar fluide cu vâscozitate ridicată precum glicerina cu particule în suspensie.

- **Spacer 3D + glicerină.** Datorită porozității mari a materialului spacer 3D există riscul ca fluidul să se scurgă în afara materialului poros sub influența gravitației. Consecința este că celula construită își pierde capacitatea de amortizare în timp înainte de a putea fi folosită. Acest inconvenient este eliminat prin încapsularea într-o celulă compactă și rezistentă la manipulare.
- **Spacer 3D + pastă cu suspensie de particule.** Pasta cu suspensie de particule este o soluție viabilă pentru a elimina efectele gravitației. Pragul de curgere al pastei nu va permite curgerea sub acțiunea eforturilor mai mici decât tensiunea de curgere.

2.3. Tehnologii de fabricație a celulelor de amortizare (îmbibare și încapsulare)

2.3.1 Materiale de încapsulare

Pentru fabricarea celulelor de amortizare este necesar să se țină cont de anumite aspecte în ceea ce privește tipul membranei folosite la încapsulare, porozitatea materialelor ce urmează a fi impregnate și gradul acestora de impregnare, cât și de caracteristicile fluidului cu care se face impregnarea.

Membrana poliuretanică permeabilă

Membrana elastică de compoziție poliuretanică este permeabilă pentru oxigen, azot și dioxid de carbon și impermeabilă pentru fluide. Etanșeitatea celulei este asigurată prin lipire cu ultrasunete sau la cald. Membrana este sensibilă la efectul radiației UV și căldură. Își păstrează însă proprietățile la temperaturi joase de până la -30 de grade și prezintă rezistență microbiologică. Are o rezistență ridicată la acțiunea lubrifianților, uleiurilor și a combustibililor. Rezistența la alungire este de 800% și rezistența la rupere este de 129-137kN/m.

Membrană multistrat poliamidă-polietilenă

Membrana are grosimea de 90 μm și asigură impermeabilitate din toate punctele de vedere. Asigură etanșeitate celulei prin lipire cu ultrasunete, dar și la cald, iar temperatura cu care se poate face sudarea/etanșarea poate urca până la aprox. 110°C. Prezintă rezistență ridicată la acțiunea substanțelor toxice, uleiurilor, combustibililor. Din punct de vedere al proprietăților mecanice, folia prezintă o rezistență la tracțiune de aproximativ 29N/mm² și rezistență la alungire de aproximativ 480%.

2.3.2 Tehnici de îmbibare

Pentru îmbibarea materialului poros cu fluid au fost utilizate mai multe tehnici adaptate la porozitatea materialului și vâscozitatea fluidului.

- a. **Îmbibarea prin scufundare.** Această metodă a fost utilizată pentru îmbibarea cu glicerină a spumei poliuretanică F133 și a spacer-ului 3D (Fig. 2.9). Pentru eliminarea aerului din spumă la îmbibare materialul a fost comprimat ușor cu degetele. În cazul spacer-ului 3D gradul de impregnare a fost de 50% și de 75%.



Fig. 2.9 Spacer-3D după impregnare cu glicerină

b. **Îmbibarea prin scufundare cu înghețare.** După îmbibare materialul poros a fost înghețat. Astfel pe timpul capsulării a fost menținut nivelul de îmbibare. Tehnica a fost utilizată pentru îmbibarea spumei poliuretanică utilizate la fabricarea celulelor 3x3.

c. **Impregnarea cu pastă.** Tehnica a fost utilizată pentru îmbibarea spacer-ului 3D cu pastă cu suspensie de particule. Materialul poros a fost impregnat local cu ajutorul unui tub deformabil. Tubul apăsat expulzează pasta, aplicată pe suprafața cu perforații mari a spacer-ului 3D, printre porii materialului. Procedul a fost repetat pentru întreaga suprafață (Fig. 3.8).

d. **Umplerea cu seringă gradată.** Tehnica a fost utilizată pentru umplerea rezervorului cu pastă cu suspensie de particule. Pasta stă liber în rezervor și trebuie turnată cu precizie pentru a umple întreg volumul.

2.3.3 Tehnici de încapsulare

Lipire cu ultrasunete

Această metodă a fost utilizată pentru sigilarea matricei. Lipitura este impermeabilă pe tot conturul și rezistă la presiunea exercitată de fluidul expulzat. Mașina utilizată pentru lipire este PFAFF 8310 (Fig. 2.10). Lipirea se face cu ultrasunete în linie dreaptă sau pe un contur. Lățimea lipiturii poate fi de 3 mm sau de 5 mm.



Fig. 2.10 PFAFF 8310



Fig. 2.11 Sudeză

Lipire la cald

Mașina utilizată în acest caz se numește sudeză (Fig. 2.11) și a fost utilizată pentru lipirea membranelor în care se face încapsularea. Acest tip de mașină permite sigilarea pungilor și lipirea a mai multor straturi de folie în linie dreaptă sau pe un contur poligonal.

3. Evaluarea experimentală a celulelor de amortizare

3.1. Teste pe standul pendular de impact (evaluarea impactului prin forța și accelerația corpului impactat)

Standul pendular de impact din cadrul UPB (Fig. 3.1) este compus dintr-un impactor (care poate avea diferite forme și greutate) lansat de la o înălțime H , și un suport rigid pe care se plasează celula de amortizare. Sistemul permite înregistrarea forței și accelerației în timpul impactului cu o placă de achiziție și un calculator. Încercările la impact ale celulelor de amortizare au fost realizate pentru configurația sferă/plan, sfera având o rază de 50mm.

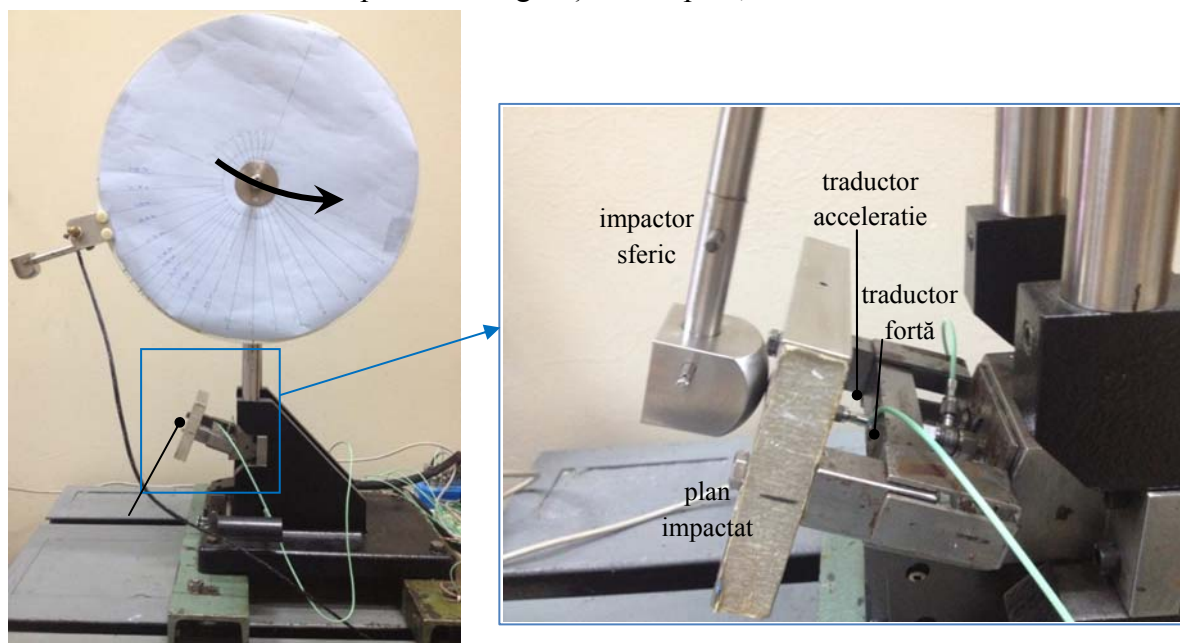


Fig. 3.1 Standul pendular de impact

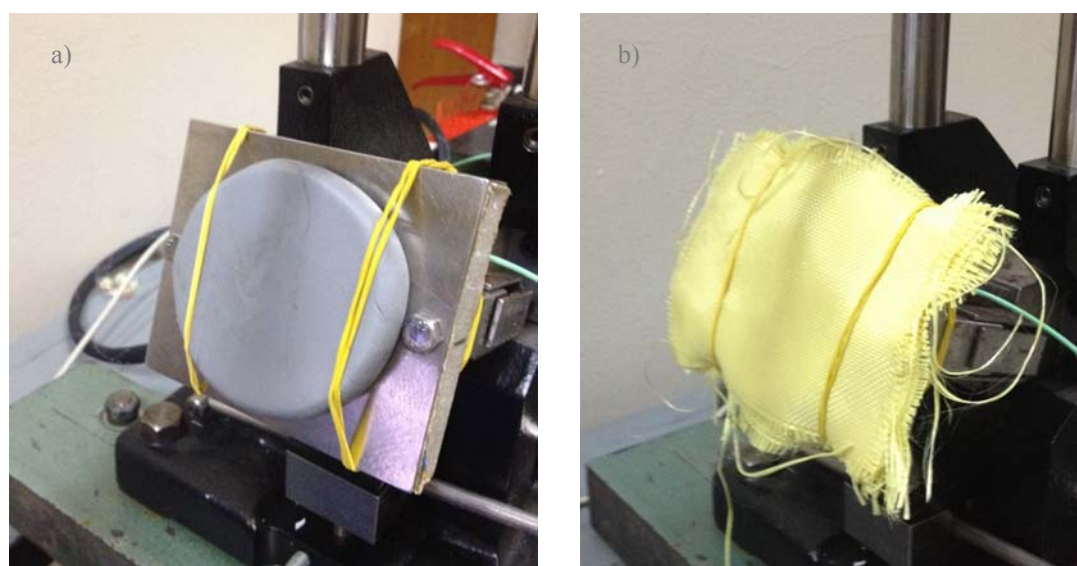


Fig. 3.2 Experimente folosind plastilină fără (a) și cu (b) strat suplimentar de Kevlar

3.1.1 Rezultate obținute

O primă serie de experimentele a avut ca interes, evaluarea efectului dimensiunilor plastilinei și a straturilor de Kevlar asupra mărimilor forței și accelerației măsurate în timpul impactului. În

acest sens, au fost efectuate teste de la diferite înălțimi pe suport de plastilină cu diferite grosimi și diametre. Rezultatele sunt sintetizate în Tab. 3.1. Rezultatele obținute au fost în același timp referința pentru evaluarea efectului de amortizare al celulelor, prin comparația testelor efectuate în condiții similare, fără și cu celula.

În urma acestor teste a rezultat că odată cu creșterea grosimii statului de plastilină, valorile parametrilor măsurați scad, ceea ce presupune o amortizare a impactului, pe când diametrul plastilinei nu influențează sensibil rezultatele obținute.

Tab. 3.1 Teste de impact pe plastilina fără celula de amortizare

Nr. crt	Strat suplimentar	H cădere [mm]	Valori maxime	
			a [m/s ²]	F [N]
(1)	Plastilina KOH 5mm, ϕ 80mm (liber)	200	88	557
(2)	Plastilina KOH 11mm, ϕ 80mm (liber)	200	40	377
(3)	Plastilina KOH 15mm, ϕ 80mm (liber)	200	30	421
(4)	Plastilina KOH 15mm, ϕ 80mm (liber)	100	58	282
(5)	Plastilina KOH 15mm, ϕ 80mm (liber)	300	52	500
(6)	Plastilina KOH 15mm, ϕ 60mm (liber)	200	41	320
(7)	Plastilina KOH 15mm, ϕ 40mm (liber)	200	52	314
(8)	Plastilina KOH 11mm, ϕ 80mm (liber) +4 Kevlar	200	46	412

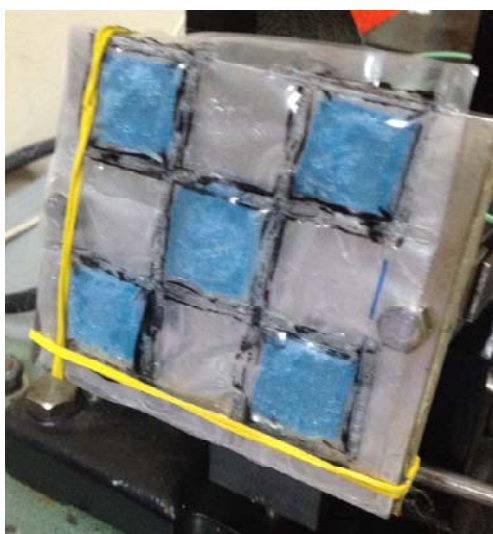


Fig. 3.3 Experimente folosind structura 3 x 3 de SAC

A doua serie de experimente a avut ca obiectiv determinarea efectul materialului de încapsulare, efectul diferitelor soluții constructive de încapsulare, influența gradului de îmbibare și influența prezenței straturilor de Kevlar sau a unei plăci de sticoplast (asemănătoare plăcii ceramice folosite la vestele antiglonț). Un rezumat al acestor teste și a valorilor parametrilor măsurați este prezentat în Tab. 3.2.

Experimentele (34) și (35) sunt realizate pe câte o configurație tip șah 3x3, aranjată astfel încât contactului impactorului să fie pe celula centrală a matricei:

Tab. 3.2 Parametrii testelor realizate pe standul pendular de impact

Nr. crt	Celula de amortizare			Strat suplimentar	$H_{\text{cădere}}$ [mm]	Valori maxime	
	Material poros	Fluid	Capsulare			a [m/s ²]	F [N]
(9)	F133		Membrana +protecție		200	7087	3376
(10)	F133		Membrana +protecție	1 Kevlar	200	8398	4110
(11)	F133	glicerină	Membrana +protecție	1 Kevlar	200	3316	2949
(12)	2 x F133	glicerină	Membrana +protecție	1 Kevlar	200	40	280
(13)	2 x F133	glicerină	Membrana +protecție		200	35	294
(14)	F133	glicerină (în rezervor)	Membrana +protecție	1 Kevlar	200	3247	3466
(15)	2 x F133	glicerină (în rezervor)	Membrana +protecție	2 Kevlar	200	598	1520
(16)	F133	glicerină	Membrana+protecție	2 Kevlar	200	1671	2606
(17)				sticloplast	200	5504	4822
(18)	F133	glicerină (în rezervor)	Membrana +protecție	sticloplast	200	229	639
(19)	F133	pastă (în rezervor)	Membrana +protecție	sticloplast	200	433	1567
(20)	F133	pastă (în rezervor)	Membrana +protecție	2 Kevlar	200	63	557
(21)	F133	pastă (în rezervor)	Membrana +protecție	4 Kevlar	200	244	674
(22)	F133	glicerină	Membrana +protecție	sticloplast	200	169	792
(23)				Plastilina KOH - 10mm (în cofraj)	200	53	493
(24)				Plastilina KOH - 10mm (liber)	200	53	493
(25)	F133	glicerină	Membrana +protecție	Plastilina KOH - 10mm (în cofraj)	200	39	367
(26)	F133	glicerină	Membrana +protecție	Plastilina KOH - 10mm (liber)	200	33	373
(27)	F133				200	20941	5040
(28)	F133			4 Kevlar	200	2294	3723
(29)	F133	glicerină			200	20935	4395
(30)	F133	glicerină		4 Kevlar	200	924	2521
(31)	F133	glicerină	Membrana +protecție		200	14169	3639
(32)	S3D	glicerină	Membrana +protecție		200	645	2088
(33)	S3D negru	glicerină			200	396	1333
(34)	F133	glicerină	3 x 3- membrana tare		200	782	2187
(35)	F133	glicerină	3 x 3 membrana tare cu ferestre		200	1369	2442
(36)	S3D	glicerină	Membrana+protecție		350	1161	3641
(37)	S3D	glicerină	Membrana +protecție	2 Kevlar	350	926	2907
(38)	S3D	glicerină	Membrana +protecție	4 Kevlar	350	977	3165
(39)	S3D	glicerină	Membrana +protecție	6 Kevlar	350	740	2364
(40)	S3D	glicerină	Membrana +protecție	8 Kevlar	350	761	2469

3.1.2 Concluzii

Din comparația experimentelor (9) și (10), în care o celula de amortizare ce conține materialul F133 uscat îmbrăcat într-o membrană poroasă și un strat suplimentar de protecție, este testată la impact cu și fără stratul suplimentar de Kevlar așezat deasupra, arată că prezența Kevlarului nu are efecte de amortizare și chiar poate afecta în sens negativ amortizarea impactului, obținându-se valori mai mari ale accelerației și forței. Cel mai probabil, acest efect nefavorabil se datorează rigidizării celulei prin frecarea cu stratul de Kevlar. La testarea materialului F133 îmbibat cu glicerină, într-un strat - în cazul experimentelor (11) și (29) sau în două straturi - în

cazul experimentelor (12) și (13), se observă o scădere a parametrilor mășurați odată cu creșterea straturilor de Kevlar. Același lucru poate fi remarcat din experimentele (36)-(40).

În urma experimentelor (10) și (11) se poate observa că **prezența glicerinei scade la jumătate efectul impactului**, dar și creșterea numărului de straturi de materiale poroase îmbibate reduce considerabil șocul (experimentele (11) și (12)).

Comparând experimentele (11) și (14), se poate observa că plasarea fluidului într-un rezervor central, în loc de îmbibarea în tot materialul nu schimbă semnificativ efectul de expulzare, deși fluidul nu este expulzat foarte mult. Și în acest caz **îmbibarea totală este soluția cu rezultate mai bune**, deoarece se asigură o curgere prin material poros la nivel foarte mic; acest rezultat era de așteptat având în vedere contactul punctiform al configurației testate.

Comparând experimentele (9) și (17), se poate observa ca placa de sticloplast reduce puțin din accelerația impact. Ea este folosită pentru comprimarea materialelor cu rezervor, dar fără rezultate spectaculoase.

Experimentele (23) - (26) au avut ca scop testarea comportamentului plastilinei și alegerea modului de fixare a acestuia (liber sau în cofraj). Rezultatele arată că plastilina amortizează foarte mult, nefiind diferențe majore în funcție de modul de fixare. S-a putut demonstra eficiența efectului stratului suplimentar din punct de vedere al forței de șoc resimțite, pe când, din punct de vedere al accelerației, ne aflăm în intervalul de sensibilitate al traductorului, astfel că nu se poate concluziona nimic.

Dacă analizăm efectul impactului din punctul de vedere al forței de impact, experimentul (33) demonstrează în mod evident eficiența materialului tip spacer 3D.

3.2. Teste pe standul cu cădere liberă /"drop-test"/ (evaluarea impactului prin amprentare)

3.2.1 Configurații experimentale și elemente constructive

Testele s-au efectuat folosind o bilă în cădere liberă care amprentează o bucată de plastilină ce are un comportament similar cu corpul uman. S-au efectuat experimente pentru două înălțimi de cădere diferite: înălțime de 4,91 metri și de 2,15 metri.

3.2.1.1 Amprentare pe plastilină de modelaj

În experimentele "drop-ball" de la înălțimea de 4,91 metri, bila de metal de diametru 30mm și masa de 0.11 kg, cade nehidată pe un strat de plastilină de diametru 88mm și gros de 50mm, introdus într-o formă din lemn masivă. Plastilina folosită la aceste experimente este pe bază de apă și pentru o singură utilizare, întărindu-se după 24 de ore.

Au fost efectuate trei teste, în care peste stratul de plastilină:

- A – nu s-a aplicat nici un material;
- B – s-a suprapus un strat de material poros F133 îmbibat cu glicerină capsulat în format celulă 3x3, și patru straturi de Kevlar (Fig. 3.4);
- C – s-au suprapus patru straturi de Kevlar;

Cele trei amprente au fost scanate folosind un scanner 3D, ultra performant, iar modelele 3D digitalizate sunt prezentate în Fig. 3.5.

Amprenta lăsată de bilă în urma impactului, a fost evaluată folosind trei metode :

- Prin măsurarea masei de apă turnate în adâncitura formată și calculul volumului acestuia folosind densitatea;

- Prin măsurarea masei de ceară care a fost turnată în amprență în adâncitura formată și calculul volumului acestuia folosind densitatea (ce a fost măsurată într-un volum calibrat);
- Prin analiza imaginii scanate 3D.

Rezultatele măsurătorilor sunt prezentate în Tab. 3.3.

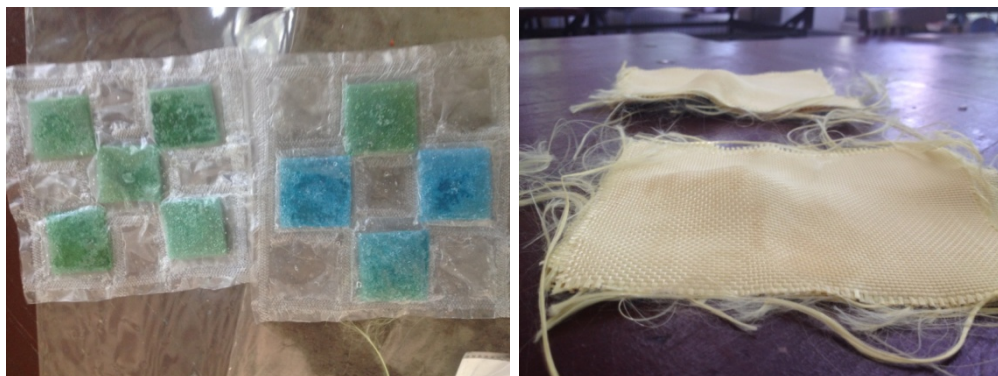


Fig. 3.4 Strat poros (F133) îmbibat cu glicerină (stânga) și straturi de KEVLAR (dreapta) - după utilizare

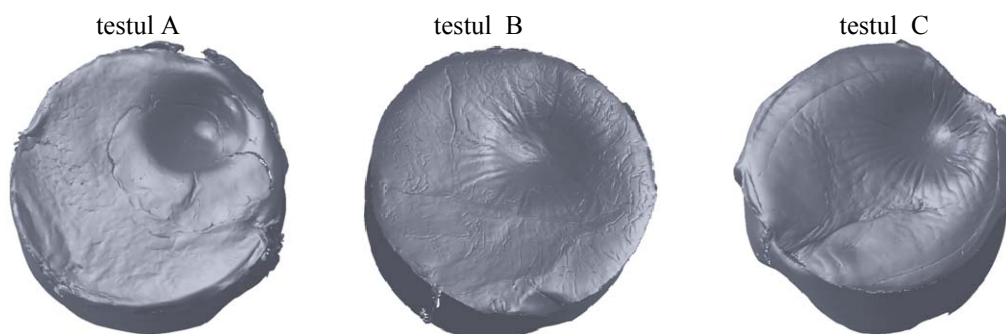


Fig. 3.5 Modelele 3D ale plastilinei amprențate în urma testelor realizate prin căderea liberă a unei bile de la 4,91m

Tab. 3.3 Volumul amprențelor în urma testelor realizate prin căderea liberă a unei bile de la 4,91m

Metoda folosită pentru măsurare	Volumul amprenței [cm ³]		
	testul A	testul B	testul C
Apă	2,5	1,8	3,02
Ceară	3,0	2,4	3,32
Scanare 3D	3,15	2,4	3,36

Copierea amprenței cu ceară s-a dovedit a fi extrem de delicată datorită, datorită faptului că ceara se rupe ușor când este manipulată. Din acest motiv, în experimentele ulterioare (descrise în Cap. 3.2.1.2) ceara s-a înlocuit cu ipsosul.

În ceea ce privește scanarea 3D aceasta oferă un model extrem de exact al amprenței dar cu costuri relativ ridicate și după prelucrări digitale complexe care necesită timp. Rezultatele obținute, chiar dacă sunt mai exacte, depind, ca și în cazul celorlalte metode, de planul de referință la care se raportează amprența.

Se poate constata că volumul amprenței B este mai mic decât volumul amprenței A, ceea ce demonstrează capacitatea de amortizare a materialului poros îmbibat cu glicerină. Volumul amprenței C este cel mai mare, straturile de Kevlar neavând nici o capacitate de amortizare, ba chiar, prin grosimea țesăturii, crescând volumul amprenței.

3.2.1.2 Amprentare pe plastilină balistică

Pentru acest experiment a fost folosită o bilă de 63mm și masă de 1,028kg lansată printr-un tub cu diametrul de 64mm de la înălțimea $H=2,15m$. Plastilina pe bază de ulei, a fost modelată în forme cilindrice de diametru 95-100mm și grosime 27mm. Temperatura plastilinei în toate experimentele (la momentul utilizării) a fost de 24°C.

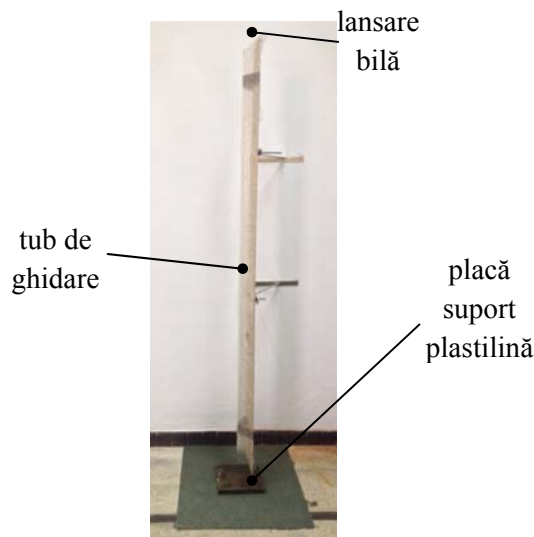


Fig. 3.6 Stand experimental pentru căderea ghidată a unei bile de la o înălțime de 2,15m

O prima serie de teste a avut ca scop comparația între diferitele configurații de celula SAC; pentru evidențierea efectului de amortizare, un prim test a fost realizat fără nici un material suprapus pe plastilina.

În urma rezultatelor obținute, s-a evidențiat prin performanțe materialul spacer 3D negru ce a devenit materialul utilizat pentru următorul set de experimente, realizându-se următoarele modele experimentale de celula SAC:

- Proba numărul 1-12 (12 probe identice) : spacer 3D negru îmbibat cu glicerină 50% zeosil 7,5% - greutate 36,63 si 37,17 g;
- Proba numărul 13-14 (2 probe identice) : spacer 3D negru îmbibat cu glicerină 75% zeosil 7,5% - greutate 50,59 si 50,36 g;
- Proba numărul 15-17 (2 probe identice) : spacer 3D negru neîmbibat - greutate 7 g.

Aceste probe au fost testate în seria a doua de experimente.

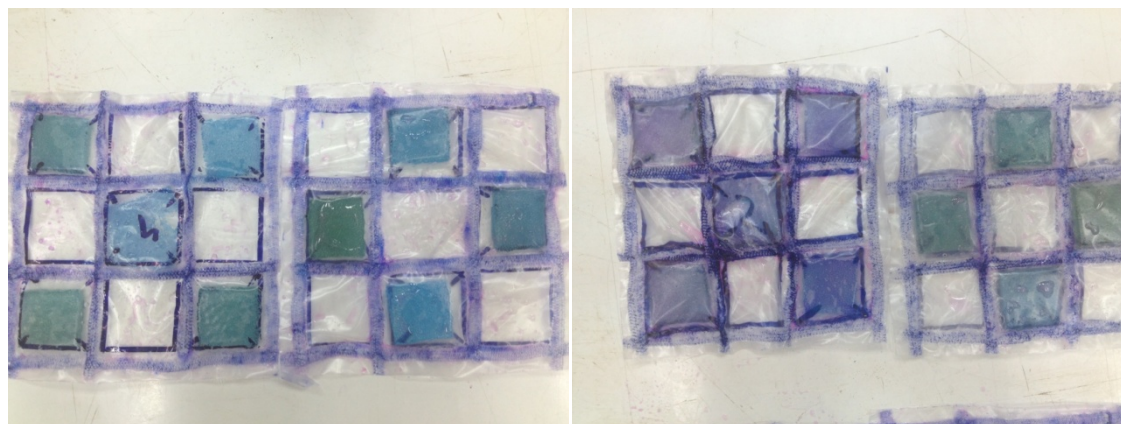


Fig. 3.7 Material poros F133 îmbibat cu glicerină , capsulat în format celulă 3 x 3 , a) acoperit cu membrană poroasă și membrană de protecție; b) acoperit cu două membrane poroase și membrană de protecție



Fig. 3.8 Material poros spacer 3D negru îmbibat cu pastă de dinți inițial pe o arie de 60x60mm (stânga) ce s-a extins după impact până la 70 x 70mm (dreapta)



Fig. 3.9 Două straturi de material poros F133 îmbibate cu pastă de dinți îmbibat cu pastă de dinți inițial pe o arie de 60x60mm (stânga) ce nu s-a extins după impact (dreapta)

3.2.2 Metode de evaluarea a amprentei

Pentru a evalua urma lăsată în plastilină s-au folosit mai multe metode.

Metoda 1: constă în folosirea unui ac cu un palpator ce alunecă ușor prin gaura unei suprafețe plane din plexiglas (Fig. 3.10). Această măsurătoare permite măsurarea adâncimii amprentei dar și a diametrului maxim al amprentei.



Fig. 3.10 Măsurarea adâncimii amprentei prin Metoda 1

Metoda 2: A doua metodă presupune turnarea de ipsos în cavitatea amprenteii pentru copierea negativului acesteia (Fig. 3.11). Ipsosul necesită 1-2 zile pentru solidificare și prelucrări ulterioare de șlefuire pentru obținerea unei suprafețe plane.



Fig. 3.11 Copierea negativului amprenteii cu ipsos

Pentru determinarea volumului amprenteii s-a cântărit ipsosul după întărire, calculându-se volumului acestuia folosind densitatea $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ (ce a fost măsurată într-un volum calibrat), după care s-a scăzut volumul de surplus de ipsos de la bază. Adâncimea amprenteii și diametrul maxim este măsurat cu un sistem comparator cu șubler (Fig. 3.12).



Fig. 3.12 Măsurarea negativului amprenteii din ipsos

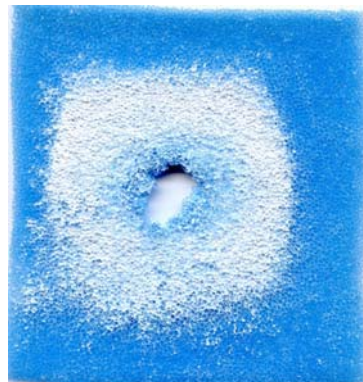


Fig. 3.13 Material F133 îmbibat cu pastă, distrus după impact

3.2.3 Rezultate obținute

Rezultatele măsurătorilor efectuate pe amprentele din plastilina sunt prezentate în Tab. 3.4.

Tab. 3.4 Rezultatele experimentelor de cădere liberă a unei bile de la 2,15m

Testul	Materialul impactat	Dimensiunile amprenteii				
		Adâncime [mm]		Diam maxim [mm]		Volum [cm ³]
		Metoda 1	Metoda 2	Metoda 1	Metoda 2	Metoda 2
T1	impact direct pe plastilina	10,3	8,6	45	45	8,1
T2	F133 îmbibat cu glicerină, capsulat în format celulă 3x3, acoperit cu membrană poroasă și membrană de protecție (Fig. 3.7a)	9,8	9,6	50	48	8,4
T3	F133 îmbibat cu glicerină, capsulat în format celulă 3x3, acoperit cu două membrane poroase și membrană de protecție (Fig. 3.7 b)	9,9	9,8	46	54	8,2
T4	S3D îmbibat cu glicerină, capsulat în format celulă 3x3, acoperit cu o membrană poroasă și membrană de protecție	10,3	10,3	48	52	8,2
T5	S3D negru îmbibat cu pastă de dinți și protejate cu folie alimentară (Fig. 3.8)	8,4	7,9	57	60	5,2
T6	două straturi de material poros F133 îmbibate cu pastă de dinți și protejate cu folie alimentară (Fig. 3.9)	9,3	8,1	43	43	4,6
T7	S3D negru (proba °15)	11,3	-	59	-	-
T8	S3D negru îmbibat cu glicerină 50 % zeosil 7,5% (proba no °11)	10,2	-	56	-	-
T9	S3D negru îmbibat cu glicerină 50 % zeosil 7,5% (proba no °12)	10,2	-	47	-	-
T10	S3D negru îmbibat cu glicerină 75% zeosil 7,5% (proba no °13)	9,4	-	52	-	-
T11	S3D negru îmbibat cu glicerină 75% zeosil 7,5% (proba no °14)	9,6	-	49	-	-
T12	S3D negru îmbibat cu glicerină 50 % zeosil 7,5% (proba no °10) și 2 straturi de Kevlar	10	-	48	-	-
T13	S3D negru îmbibat cu glicerină 50 % zeosil 7,5% (proba no °9) și 4 straturi de Kevlar	9,5	-	48	-	-
T14	S3D negru îmbibat cu glicerină 50 % zeosil 7,5% (proba no °8) cu marginile laterale ale foliei de protecție tăiate pentru a permite circulația fluidului	10,9	-	47	-	-

▪ NOTĂ: În urma impactului materialul poros (F133) a fost distrus (Fig. 3.13).

▪

3.2.4 Concluzii

Se poate remarca că forma 5 (cădere pe o bucată de plastilina cu spacer 3D negru îmbibat cu pastă de dinți) prezintă cea mai mică adâncime. Din analiza adâncimii de penetrare reiese că pentru proba numărul 5 (spacer 3D negru îmbibat cu pastă de dinți) adâncimea de penetrare este minimă. În afara pastei de dinți, reiese că cea mai eficientă soluție spacer 3D îmbibat cu

glicerina 75 % și zeosil 7,5% (proba numărul 10). Din comparația testelor T8-T13 (realizate pe spacer-3D îmbibat) cu testul T7 (realizat pe spacer-3D uscat) se observă o reducere a adâncimii amprenteii cu 1-2mm ceea ce în procente revine la circa 9% - 17%. Rezultate și mai spectaculoase sunt evidente în cazul îmbibării cu pastă (T5), caz în care volumul, respectiv adâncimea amprenteii se reduce cu până la 25%.

O analiză comparativă aproximativă a volumului mediu al amprentelor obținute prin cele două serii de teste cu bile în cădere liberă au condus la observația extrem de interesantă că raportul volumelor celor două amprente este același cu raportul energiilor de impact din cele două teste

4. Concluzii generale

Materialul de bază al structurii poroase (fibrele, etc.) trebuie să prezinte o rezistență mecanică ridicată pentru a evita distrugerea imediat după impact prin efecte hidrostactice și pierderea corespunzătoare a capacității de amortizare. Din acest punct de vedere utilizarea materialelor cu structura complexă de tip "spacer 3D" s-a dovedit a fi cea mai eficientă. Menționăm că spumele poliuretanică îmbibate cu pastă sau cu glicerină (celule 3x3) s-au distrus după impact. Experimentele comparative realizate au arătat o reducere cu 10%-15% a adâncimii amprenteii prin adăugarea fluidului în celula de amortizare, comparație necesară pentru a elimina efectul de amortizare al materialului poros neîmbibat.

Tot pentru ca efectul disipativ produs de curgerea printre pori să fie cât mai mare este recomandat ca fluidele să fie cu comportare "pseudo-plastică" (care se fluidizează la creșterea tensiunii de forfecare). Pastele sau fluidele dilatante prezintă inconvenientul creșterii vâscozității imediat după impact ceea ce reduce capacitatea acestora de a penetra prin structura poroasă.

Dacă în testele pe structuri deschise materialele poroase cu performanțe foarte bune au fost spumele poliuretanică, în cazul celulei de amortizare, **materialele poroase cu structura cu rezistență mare la comprimare, din categoria spacer 3D, sunt cele mai performante.** În cazul SAC cu membrană de înaltă rezistență, presiunile extrem de mari care se generează în timpul impactului distrug structura fibroasă a materialelor textile sau spumelor. Spacer-ul 3D permite preluarea parțială a socului prin capacitatea proprie de amortizare și are o structură din fibre rezistente la presiunea fluidului. Testele realizate la viteze de până la 10m/s au dovedit refacerea formei inițiale a SAC după impact fără urme macroscopice de alterare a structurii SAC.

Dintre soluțiile de materiale plastice de încapsulare, varianta de **folie multistrat poliamidă-polietilenă de înaltă rezistență, impermeabilă** s-a dovedit cea mai potrivită. Aceasta presupune umplerea parțială a materialului poros cu fluid, pentru a permite expulzarea acestuia din zona de contact. La testele realizate prin impact cu bile în cădere liberă, cele mai bune rezultate au fost obținute cu eșantioanele umplute cu 75% glicerină. Dintre fluidele testate, amestecul de glicerina cu 7,5% Zeosil s-a dovedit cu cele mai bune performanțe. Menționăm însă că și utilizarea unei paste cu comportare ne-Newtoniană rămâne o varianta de interes.

Evaluat prin prisma adâncimii amprenteii, efectul de amortizare a spacer-ului 3D îmbibat cu 75% glicerină + 7.5% Zeosil au condus la o scădere a adâncimii amprenteii (o metoda care e în

acord cu metoda standard de evaluare a efectului protectiv al vestelor antiglonț) cu aproximativ 25%.

Pentru o evaluare științifică cât mai exactă este necesară analiza complexă a amprentei, respectiv pe lângă adâncimea ei, să fie cuantificat și volumul și forma. În acest scop va fi utilă o simulare numerică a procesului de impact în condițiile prezenței stratului de plastilină.

În condițiile în care scanarea 3D este prohibitiv de scumpă la ora actuală, metodele de realizare a negativului amprentei ("amprentarea amprentei") propuse și testate în cadrul acestor activități, s-au dovedit suficient de exacte.

Validarea completă a eficienței sistemului de amortizare propus necesită creșterea vitezei de impact la valori medii (~100m/s pe stand de laborator tun pneumatic folosind modele experimentale scalate) și mari (~400m/s în poligon, pe produse reale).

5. Bibliografie

- [1] C. Hernandez, M.F. Buchely, A. Maranon, Dynamic Characterization of Roma Plastilina No.1 from Drop Test and Inverse Analysis – Intern. J.of Mechanical Sciences 100(2015) 158–168
- [2] NIJ Standard-0101.06 - Ballistic Resistance of Body Armor U.S. Department of Justice Office of Justice Programs *National Institute of Justice*