

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. III - 2016

Raport științific și tehnic

DIRECTOR: Prof. dr. ing. Traian CICONE

REZUMAT

În fazele precedente ale Contractului (2014 și 2015) 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). Studiile au fost realizate pe **modele deschise**, adică pentru impactul unui corp rigid direct pe materialele poroase îmbibate, respectiv pe modele capsulate denumite în prezentul proiect **celule de amortizare a șocului (SAC)**.

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 propus. Studiile au urmărit, pe de o parte, analiza materialelor de capsulare posibil 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.

Activitățile prevăzute pentru faza din 2016 au fost realizate pe parcursul a mai multor etape care pot fi încadrate în următoarele trei categorii:

- (a) Concepția, proiectarea și realizarea de modele experimentale ale celulei de amortizare (SAC) respectiv a structurii multi-celulare (matricea M-SAC);
- (b) Investigarea capacității de amortizare la impact a Celulei de amortizare (SAC) pe standuri de laborator.
- (c) Evaluarea comportării la impact în poligon;

Activitățile de realizare a modelelor închise (încapsulate) de celule de amortizare au constituit o continuare a activităților similare realizate și raportate în faza precedentă (2015), în care au fost evaluate o mare varietate de combinații material poros + fluid + material de încapsulare (etanșare), analiză comparativă permițând selectarea unor combinații cu performanțe superioare. Astfel, materialul poros cu cea mai bună comportare s-a dovedit a fi structura compozită denumită spacer-3D, îmbibat cu glicerină pură sau amestecată cu particule de Zeosil. Pentru încapsulare s-au utilizat folii (membrane) din materiale plastice termoplastice de grosime relativ mare, lipite cu ultrasunete. Ca urmare, în actuala etapă au fost realizate studii de rafinare a soluțiilor celulei de amortizare, prin analiza comparativă a influenței gradului de îmbibare, a concentrației de Zeosil precum și a tipului de membrană plastică.

Concepția și proiectarea **modelului funcțional multicelular** a fost condiționată de soluțiile constructive utilizate pentru celulele de amortizare. Proiectarea structurii de celule SAC a avut în vedere utilizarea de folie (membrană) lipită astfel încât să se obțină o matrice liniară, care conferă protecție pe o suprafață mare și poate fi integrată în structurile de protecție existente. Pentru eliminarea zonelor neprotejate au fost propuse și structuri suprapuse de celule de amortizare, tip matrice respectiv cu solzi.

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

teste de tip "drop ball": teste de impact realizate cu bile în cădere liberă, care au permis atingerea unei viteze de impact de până la 10m/s. Aceste teste de laborator au continuat celor efectuate în faza precedentă (2015) dar în condiții de instrumentare superioară (a fost posibilă măsurarea variației forței de impact) și pe un stand la care căderea bilei este ghidată. Testele au urmărit evaluarea amortizării prin forța de impact maximă, în diferite configurații de plasare a celulei de amortizare. Energia maximă de impact a fost de 21J.

teste pe tunul Taylor: teste de impact preliminar realizate la viteze medii de până la 30m/s (108km/h), cu impactor de configurație plană (impactor disc), având o masă $M=0.52\text{kg}$. care au permis atingerea unor energii de impact de până la 210J. Trecerea la configurație plană de simulare a impactului este justificată de nevoia de a evalua capacitatea de amortizare în condițiile unui contact uniform distribuit. Ca și în cazul testelor precedente, impactul a fost evaluat prin măsurarea forței în timpul impactului, folosind același traductor piezo din experimentele de tip "drop-ball". În plus, toate încercările au fost înregistrate video, cu o cameră ultra-rapidă, iar imaginile au fost ulterior prelucrate.

În cadrul acestor teste, au fost realizate și primele încercări ale soluției propuse în asociație cu o vestă de protecție standard produsă la STIMPEX.S.A.

Testele în condiții de poligon au fost realizate pe matricea de celule în condiții de undă de șoc . Ele au avut un caracter exploratoriu privind configurația testată, instrumentarea adecvata, intensitatea exploziei și capacitatea de protecție la explozie. Un panou de protecție din Kevlar cu matrice de celule a fost supus efectelor unei unde de șoc generată de explozia a 100g de trotil. Testul a urmărit măsurarea influenței asupra unei incidente. Măsurarea suprapresiunii în frontul undei de șoc s-a făcut cu un traductor specializat tip stilou. Au fost evaluate două configurații de matrice: cu celule pătrate și cu celule tip disc.

În concluzie, rezultatele obținute în actuala etapă au adus noi argumente privind capacitatea de amortizare a soluției inovative care stă la baza proiectului, evidențiindu-se efectele pozitive și în cazul vitezelor și energiilor medii. Prin experimentele din faza actuală măsurarea forței în timpul impactului a evoluat de la energii de șoc de ordinul 4-5J la 21J iar mai apoi la 210J. În paralel au fost demarate acțiunile de testare finală, în condiții reale în poligon.

Activitățile desfășurate au urmărit întocmai planul de realizare propus și au condus la rezultate promițătoare pentru dezvoltarea ulterioară a soluției de amortizare propusă.

CAP. 1. CONCEPTIA, PROIECTAREA ȘI REALIZAREA DE MODELE EXPERIMENTALE ALE CELULEI DE AMORTIZARE (SAC)

Activitatea prezentată în acest raport este o continuare a proiectării celulei de amortizare desfășurată în etapa anterioară. Au fost rafinate soluții constructive ale căror performanțe a fost dovedite experimental. Reamintim ca celula de amortizare (SAC) este o structură compozită adaptabilă la diferite sisteme de protecție, creată prin încapsularea unei structuri poroase extrem de deformabile îmbibată total sau parțial cu un lichid.

1.1. Materiale utilizate

S-a demonstrat experimental în etapa anterioară că materialul care rezistă cel mai bine la presiunile extrem de mari generate de expulzarea fluidului prin impact a fost Spacer 3D (S3D). Fluidul de îmbibare care să remarcat anterior la testele de laborator a fost un amestec de glicerină cu 7,5%-10% zeosil. Acestea au fost folosite cu precădere pentru fabricarea celulelor SAC în actuala etapă. Totuși, din dorința de a explora capacitatea de amortizare și a unor geluri/paste cu comportare ne-Newtoniana, s-a optat pentru utilizarea în continuare a pastei pe bază de glicerină și parafină, dar și a unui gel pe baza de glicerină, apă, zeosil și jaguar (un polimer care crește viscozitatea fluidului și îi conferă un caracter ne-Newtonian de tip pseudo-plastic). Comportamentul fluidului poate fi caracterizat cu ajutorul modelului pentru fluidul Bingham în cazul pastei sau cu modelul Herschel-Bulkley pentru un fluid pseudo-plastic.

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

Pentru fabricarea celulelor de amortizare a fost utilizată doar **membrană multistrat polietilenă-poliamidă-polietilenă**, cu grosimea de 100 μm ce asigură rezistența mecanică și impermeabilitate. 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.

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

Îmbibarea prin scufundare a fost utilizată pentru îmbibarea cu glicerină a S3D (Figura 1.1). Pentru eliminarea bulelor de aer, materialul a fost comprimat ușor cu degetele. În cazul S3D gradul de îmbibare (măsurat prin cântărire) a fost de 75% -80% respectiv de 100%.

Impregnarea cu pastă s-a realizat cu ajutorul unui tub deformabil care expulzează pasta, aplicată pe suprafața cu perforații mari le S3D, printre porii materialului. Procedul a fost repetat pentru întreaga suprafață (Fig. 1.2).

1.3. Celule de amortizare fabricate



Fig. 1.1 Celula de amortizare S3D + glicerină cu zeosil



Fig. 1.2. Pastă dispersată în tot materialul poros



Fig. 1.3. Rezervor circular umplut cu gel

Trei soluții constructive ale celulei de amortizare SAC au fost reținute pentru dezvoltarea proiectului.

Soluția I este constituită dintr-un disc de S3D de 50mm, îmbibat în soluție de glicerină cu zeosil (Figura 1.1). Soluția de glicerină cu zeosil are o concentrație de 7.5%-10% zeosil cu scopul de a crește vâscozitatea și de îmbunătăți capacitatea de amortizare a celulei în acord cu teoria lubrificației ex-poro-hidrodinamice. Îmbibarea s-a făcut în proporție de 75%-80% iar ulterior, la fabricarea matricelor de amortizare, au fost utilizate și celule îmbibate complet 100%.

Soluția II este constituită dintr-un strat S3D de format pătrat cu latura de 65mm îmbibat cu pastă cu suspensie de particule (pastă de dinți)- Fig. 1.2.

Soluția III Fluidul este plasat liber într-un rezervor central, materialul poros nefiind îmbibat decât în urma comprimării celulei (Fig. 1.3). Aceasta soluție nu e potrivita în cazul impactului cu contact sferic, dar poate avea performante bune în cazul suprafețelor plane. Diametrul exterior al SAC este de 66mm iar diametrul rezervorului de 33mm.

CAP. 2. CONCEPȚIA, PROIECTAREA ȘI REALIZAREA DE MODELE MATRICE CU CELULE DE AMORTIZARE (M-SAC)

În aceasta etapa au fost studiate diferite soluții constructive de matrice de tip M-SAC, implementate ulterior într-o soluție fizică în scopul de a fi testată atât la solicitări prin impact dar și prin undă de șoc . De asemenea, este analizat modul de integrare al soluției M-SAC într-un sistem de protecție individual.

2.1. Cerințe general aplicabile

Matricea trebuie să îndeplinească o serie de cerințe legate atât de compatibilitate cât și de funcționare în condiții speciale pentru a fi încorporată cu succes în sisteme de protecție:

- matricea trebuie să fie capabilă să ia forma corpului uman pe timpul purtării;
- matricea nu trebuie să diminueze elasticitatea sistemului în care este încorporată;
- matricea nu trebuie să reducă capacitatea de protecție balistică a sistemului în care este încorporată atât la nivel global cât și local;
- opțional: matricea trebuie să permită repararea locală a celulelor deteriorate.

Forma matricei se poate asigura prin includere în matrice a unor elemente de susținere rigide. Aceste elemente creează o rezistență suplimentară pe timpul purtării. La impact, toate elementele rigide suplimentare trebuie să se distrugă și să afecteze cât mai puțin capacitatea de amortizare a celulelor. Pot avea și rol funcțional, acestea pot înlesni evacuarea fluidului expulzat la exterior prin direcționare pe canale.

Un aspect foarte important în proiectarea unei matrice este modul în care aceasta poate fi încorporată în structura de protecție. Modalitățile de încorporare pot fi: lipire, coasere, prindere cu velcro, prindere cu capace/fermoar/nasturi. Toate aceste elemente de atașare trebuie să fie încorporate în membrana exterioară.

2.2. Soluții de construcție a matricii M-SAC

Matricea unistrat (Fig. 2.1) conține un singur strat de celule subțiri sub forma unor discuri aliniate și asamblate alăturat. Această configurație are dezavantajul că la granița dintre celule există o zonă fără amortizare, neacoperită de celulele de amortizare.

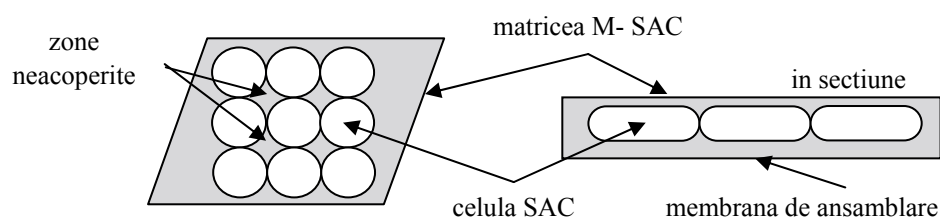


Fig. 2.1. Matrice unistrat cu SAC tip disc

În Fig. 2.2. este prezentată o matrice de concepție similară, formată din celule dreptunghiulare/pătrate. Comparativ cu configurația anterioară, apropierea a două celule pătrate este mai mare cu reducerea zonei

neprotejate. Această soluție este tehnologic mai simplă, deoarece sunt foarte ușor de fabricat segmentele de material și de încapsulat în membrane, lipirea realizându-se pe linii drepte. Forma celulelor poate fi hexagonală, realizându-se o structură fagure (Fig. 2.3). Dezavantajul îl constituie modul de asamblare complicat datorită numărului mare de laturi care trebuie conectate.

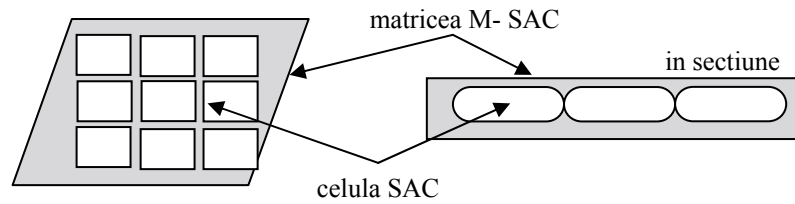


Fig. 2.2. Matrice unistrat cu SAC dreptunghiular

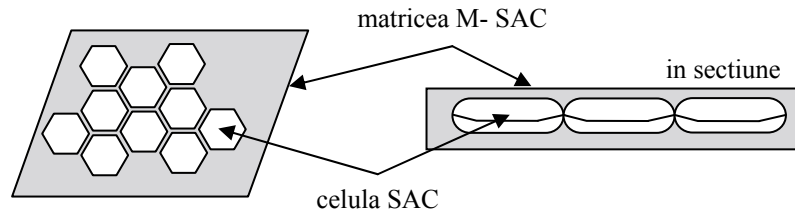


Fig. 2.3. Matrice unistrat cu SAC tip fagure

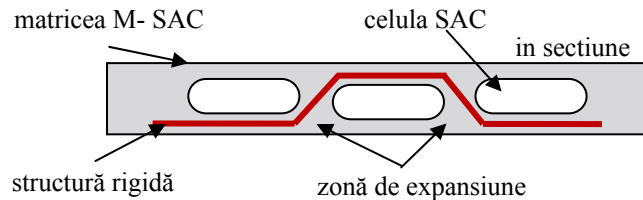


Fig. 2.4. Matrice unistrat cu structură rigidă

Pentru celulele cu membrană elastică, matricea trebuie să includă zone delimitate de expansiune a rezervorului care absoarbe fluidul expulzat, realizabil prin intermediul unei structuri rigide precum cea din Fig. 2.4.

Varianta de construcție a celulei de amortizare bazată pe un disc de material cu rezervor de fluid acceptă atât asamblarea celulelor conform soluțiilor de mai sus cât și o altă soluție particulară (Fig. 2.5) în care rezervoarele de fluid sunt decupate într-o formă ordonată din stratul de material poros. Cu galben a fost marcată limita de îmbibare până la care curge fluidul prin comprimare. Și această soluție prezintă zone (la granița dintre celule) în care amortizarea este redusă.

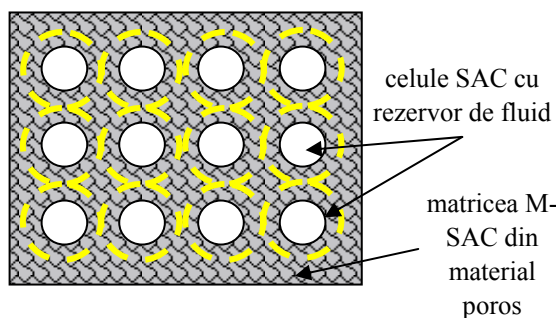


Fig. 2.5. Matrice din material poros cu celule cu rezervor de fluid

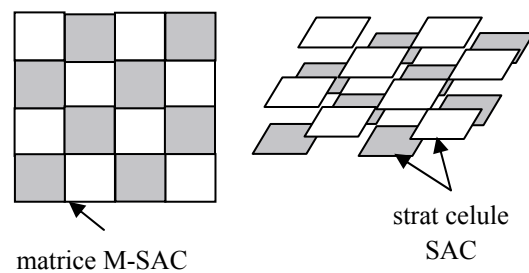


Fig. 2.6. Matrice multistrat cu straturi în structură de șah

Matricea multistrat (Fig. 2.6) este construită prin așezarea a cel puțin două straturi de celule. Configurația straturilor și așezarea celulelor permite reducerea zonelor fără amortizare, însă cu creșterea grosimii. Pentru eliminarea zonelor fără amortizare care apar la granița dintre celulele vecine, se pot utiliza straturi cu structură în tablă de șah.

Matricea solzi (Fig. 2.7) permite utilizarea celulelor de amortizare cu eliminarea zonelor neprotejate. Totuși această soluție duce la creșterea densității și a grosimii stratului de material și afectează raportul greutate

performanță, crucial în alegerea produsului.

Au fost identificate și soluțiile posibile de asamblare: așezarea în pungi vidate, lipirea celulelor ambalate individual sau lipirea celulelor de un fundal suport.

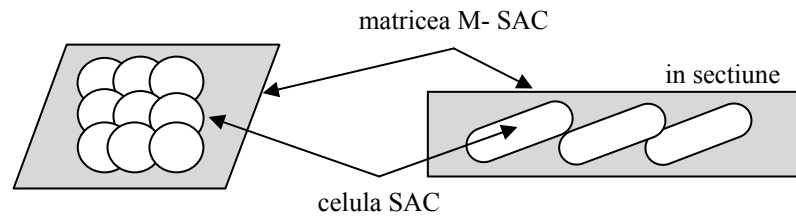


Fig. 2.7. Matrice solzi cu celule SAC tip disc

2.3. Matrice de celule fabricate

Pentru a asigura protecție pentru zone mai întinse, celulele SAC trebuie asamblate în configurații pentru a putea fi integrate în sistemele actuale de protecție balistică sau în sistemele protejate.

În **matricea liniară** asamblarea celulelor SAC s-a făcut pe linii și coloane, cât mai apropiat pentru a reduce aria neprotejată la granița de asamblare (Figura 2.8). Pentru creșterea capacității de amortizare s-au utilizat celule complet îmbibate însă cu soluție pe bază de glicerină și zeosil.



Fig. 2.8. Matrice de protecție liniară cu celule disc (stânga) sau pătrate (dreapta)

Pentru a se reduce la minim zona neprotejată asamblarea celulelor s-a făcut și sub formă de **matrice șah** (Fig. 2.9). O astfel de matrice se poate utiliza în cazul în care comprimarea se face cu un indenter mai mare decât spațiul dintre celule. Volumul gol din vecinătatea celulelor poate fi utilizat ca rezervor de acumulare a fluidului expulzat din materialul poros.



Fig. 2.9. Matrice șah multistrat



Fig. 2.10. Matrice solzi

Matricea șah multistrat elimină zona neprotejată specifică matricei șah prin utilizarea a două straturi suprapuse complementare (Fig. 2.9). Această soluție a fost parțial testată și în faza anterioară (2015).

Plasată într-o zonă intermediară din punct de vedere al grosimii, între matricea șah multistrat și matricele unistrat, **matricea solzi** (Fig. 2.10) reprezintă o soluție în ceea ce privește reducerea zonelor neprotejate.

Celulele se suprapun în proporție de minimum 10%. În Fig 2.10 este prezentată o matrice solzi la care asamblarea s-a realizat prin vidare în interiorul unei pungi. Suplimentar, celulele sunt poziționate prin lipire pe un suport. Această soluție este însă sensibilă chiar la manipulare; în momentul în care punga este perforată există un risc mare ca celulele să nu își mai păstreze poziția.

2.4. Încorporarea matricei în sisteme de protecție

Eficiența sistemului de protecție depinde de eficiența mecanismului de oprire și absorbția energie de impact. Matricea de celule este un sistem adițional de protecție în caz de expunere la unde de șoc (produse prin impact balistic sau explozii) sau la eforturi generate la perforare cu glonț. Matricea de celule trebuie să fie compatibilă cu sisteme de protecție utilizabile în diferite aplicații pentru protecția personalului uman existente, precum: veste de protecție, căști sau costume pentru pirotehniști. Plasarea matricei se face între corp și structura deformabilă de protecție (Fig. 2.11). De exemplu, în cazul unei veste de protecție balistică matricea va fi poziționată între placa de ceramică și corpul uman. Pentru poziționare se poate utiliza o vestă suport cu buzunare pentru susținere (Fig. 2.12).

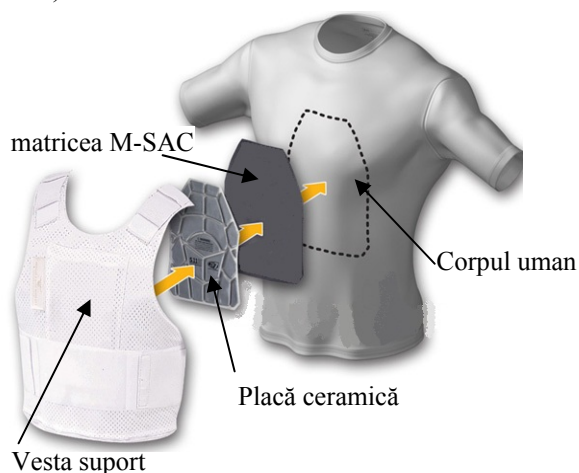


Fig. 2.11. Echiparea cu matricea M-SAC a unei veste de protecție Kevlar + placa ceramica

Matricea de celule poate fi utilizată și pentru aplicații în domeniul sistemelor de protecție balistică pentru vehicule sau clădiri, sub forma unor panouri de protecție.

În vederea testării experimentale au fost integrate matricea liniară cu celule disc și celule pătrate în veste de protecție balistică (Figura 2.12) și în panouri de protecție (Figura 2.13).



Fig. 2.12. Vestea de protecție. (a) - integrarea matricei cu celule disc. (b) – integrarea matricei cu celule pătrate



Fig. 2.13. Panouri de protecție. (a) integrarea matricei cu celule disc. (b)– integrarea matricei cu celule pătrate

CAP. 3. EXPERIMENTE DE LABORATOR

Activitatea experimentală de laborator s-a desfășurat în mai multe etape după cum urmează

- Amenajarea standului de încercări de tip "drop-ball" cu tuburi de ghidare pentru a permite înălțimi de lansare de până la 5 m.
- Realizarea traductorului de forță bazată pe senzorul de forță piezo Kistler 9051 și etalonarea acestuia.
- Experimente de tip "drop ball" cu lansare de la înălțimea $H=4.9\text{m}$ ($V=9.8\text{m/s}$) și amprentare pe plastilină balistică; aceste experimente, realizate cu aceleași mostre de celule de amortizare folosite și în experimentele din faza precedentă (dar cu înălțimea de lansare $H=2.15\text{m}$) au confirmat concluziile anterioare privind performanțele superioare ale materialului S3D îmbibat parțial cu glicerină și 7.5%-10% zeosil. Toate concluziile au rezultat din analize comparative ale amprentelor obținute *cu* respectiv *fără* celula de amortizare. În același timp evaluarea cantitativă s-a dovedit dificilă datorită dimensiunilor radiale reduse ale pastilei de plastilină, ceea ce face ca deformarea plastică să aibă o importantă componentă transversală.
- Experimente de tip "drop ball" cu lansare de la înălțimea $H=2.15\text{m}$ ($V=6.5\text{m/s}$) și amprentare pe plastilină balistică plasată deasupra traductorului de forță. Aceste experimente, cu caracter exploratoriu, au fost primele în care a fost utilizat traductorul de forță, ele având rolul de corelare a forței de impact măsurate, cu amprenta din pastila de plastilină. Rezultatele obținute au prezentat o mare împrăștiere explicată prin comportarea diferită a mostrelor de plastilină aparent identice. S-a dovedit că modul de pregătire al plastilinei, temperatura din timpul testelor și mai ales dimensiunile pastilelor de plastilină afectează major forța de impact măsurată. Concomitent, dificultatea pregătirii acestor mostre nu a permis un mare număr de experimente, astfel că nu a fost posibilă o evaluare solidă a repetabilității rezultatelor. Prin urmare s-a renunțat la această formă dublă de evaluare a impactului. S-a concluzionat necesitatea unor studii atente pentru evaluarea comportamentului elasto-plastic al plastilinei balistice utilizate, un subiect încă ne-cercetat pe plan mondial, așa cum rezultă din studiile noastre bibliografice.
- Experimente de tip "drop ball" cu lansare de la înălțimea $H=2.15\text{m}$ ($V=6.5\text{m/s}$) și impactarea unei structuri de amortizare plasată deasupra traductorului de forță. Aceste studii, cu rezultate valoroase, sunt descrise în cap. 3.1.
- Experimente la viteze medii de impact (până la 30m/s) efectuate pe tunul Taylor (realizate cu sprijinul Academiei Tehnice Militare - ATM) prezentate pe larg în cap. 3.2. Rezultatele acestora sunt extrem de concludente.

3.1. Experimente pe stand de tip "drop-ball"

Testele au fost efectuate în laboratoarele UPB, prin impactarea unor **structuri** formate din *straturi intermediare de protecție și/sau celule de amortizare*, dispuse pe un traductor de forță, la rândul lui așezat pe o nicovăla de circa 25kg, care asigură rigiditatea suportului. Senzorul piezo-electric Kistler 9051A (model șaibă) achiziționat pentru aceste teste în faza precedentă, este caracterizat printr-o excelentă liniaritate și permite funcționarea cu două domenii de calibrare liniare (0-9.6kN, respectiv 0-96kN). Traductorul de forță în care acesta este montat cu prestrângere a fost realizat în UPB, ca de altfel și etalonarea ulterioară.

Impactul este realizat cu o bilă de rulment de diametru de 63.5mm și masă $M=1028\text{g}$. Bila este lansată de la o înălțime controlabilă printr-un tub transparent cu diametrul interior de 64mm, ceea ce asigură o foarte bună ghidare. Prin aceasta up-gradare s-a reușit controlul mult mai exact al punctului de impact. Pentru a facilita analiza rezultatelor experimentale, înălțimea de lansare a bilei a fost permanent aceeași, respectiv $H=2.15\text{m}$, ceea ce conduce la o viteză a bilei în momentul impactului $V = \sqrt{2gH}=6.5\text{m/s}$. Viteza a fost estimată presupunând căderea liberă, neglijând deci frecarea sporadică cu pereții tubului de ghidare.

Fiecare experiment a fost filmat cu o camera cu viteza mărită (120fps), imaginile permițând determinarea înălțimii de respingere a bilei precum și comportarea structurii de amortizare testată.

Straturile intermediare de protecție au fost reprezentate de: spacer 3D (S3D) cu grosimea de 6.25mm, placă din sticloplast cu grosimea de 4mm, placă din PFL cu grosimea de 9mm, sau n ($n=2,4$ sau 6) straturi de țesătura de Kevlar. Utilizarea unor straturi intermediare rigide (PFL sau sticloplast) sunt justificate prin necesitatea de a transforma impactul concentrat (sfera/plan) într-un impact distribuit pe o suprafață plană extinsă, situație similară încărcărilor prin undă de șoc sau al vestei cu placa ceramică.

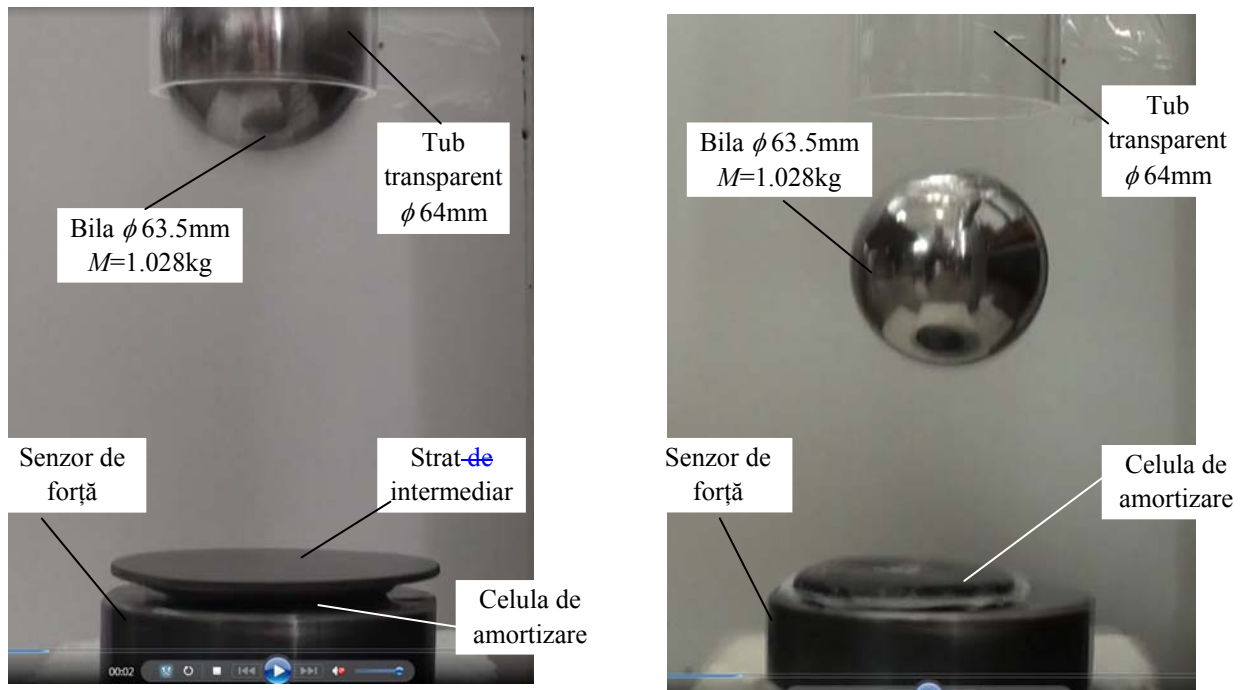


Fig. 3.1. Detaliu al condițiilor de testare la impact ("drop-ball test")

Celule de amortizare au fost realizate în două versiuni (v. cap. 1):

- disc din material S3D îmbibat cu glicerină în amestec cu 7.5% zeosil (denumit mai departe *S3D+glicerină*)
- inel din material S3D cu zona centrală (denumită "rezervor") umplută cu un gel compus din glicerină, apă, zeosil și jaguar (denumit mai departe *S3DRez+gel*); pe ambele suprafețe ale inelului s-a introdus câte un disc flexibil, transparent, de grosime 0.05mm din acetat de celuloză.

Detalii privind dimensiunile și tehnologia de realizare a celulelor au fost prezentate în capitolul anterior. Imagini de detaliu ale configurațiilor experimentale în cele două variante (impact *cu* respectiv *fără strat intermediar de protecție*) sunt prezentate în Fig. 3.1. În Tab. 3.1 sunt sintetizate o parte dintre testele realizate, care stau la baza concluziilor de mai jos. Ultima coloană conține valorile impulsului calculat prin integrarea numerică a semnalului de la senzorul de forță. Se observă valori mai mari față de impulsul bilei înainte de impact (estimat ca $H_0=6.7$ Ns) explicabile prin faptul că după ciocnire, bila este respinsă la o înălțime ce variază de la 20mm până la aproape 300mm. De asemenea, o creștere a impulsului înregistrat se datorează și mișcării senzorului în urma impactului sever.

Analizând rezultatele se poate observa că în prezența celulelor de amortizare forțele maxime din impact sunt substanțial reduse. Astfel, în Fig. 3.2 este redată variația forței la impactul direct pe o suprafață din PFL (T9) respectiv la impactul atenuat cu o celulă S3d+glicerină (T8); se constată o reducere de aproape 4 ori a forței maxime înregistrate, în cazul impactului distribuit pe suprafață. Aceleași concluzii favorabile rezultă și în cazul contactului concentrat, din analiza comparativă prezentată în Fig. 3.3. În testul T15 bila impactează un pachet de 4 straturi de Kevlar, în timp ce în testul T5, sub același pachet de 4 straturi de Kevlar este plasată o celulă de amortizare (S3D+glicerină). De aceasta dată forța maximă se reduce la jumătate prin plasarea celulei de amortizare; efectul de amortizare mai redus este de așteptat având în vedere că prin contactul concentrat nu toată celula de amortizare contribuie la preluarea șocului. Din această cauză forțele maxime sunt aproape duble față de cazul utilizării unui strat intermediar rigid așa cum rezulta imediat din compararea Fig. 3.2 cu Fig. 3.3. Un rezultat similar s-a obținut și în cazul folosirii sticloplastului ca strat intermediar de protecție (Fig. 3.4): forța maximă în cazul utilizării unei celule S3D+glicerină (T3) are o valoare apropiată de cea obținută

în testul similar (T8) în care PFL-ul este folosit în loc de sticloplast. Diferențele dintre valorile maxime ale forței de impact precum și alurile curbelor în cazul utilizării PFL-ului respectiv al sticloplastului, sunt explicabile prin proprietățile elastice și dimensiunile diferite ale acestora. Contribuția PFL-ului la amortizare este mai mare deoarece este mai puțin rigid iar grosimea acestuia este mai mult decât dublă față de a sticloplastului. Din același grafic (Fig. 3.4) rezultă superioritatea netă a celulei S3D+glicerina (T3) față de celula cu rezervor umplut cu gel (T4).

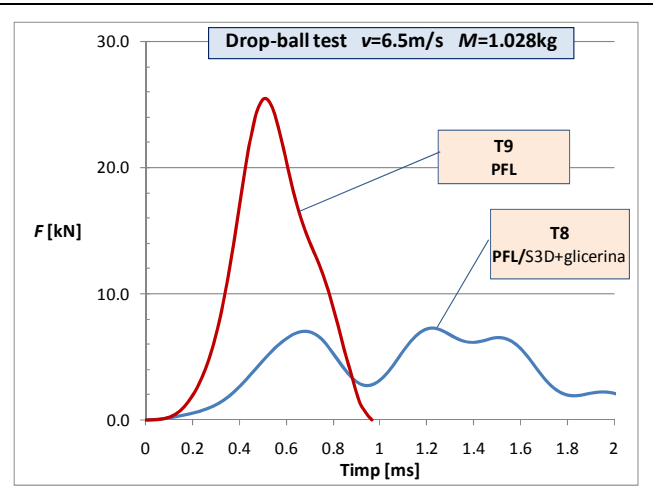


Fig. 3.2

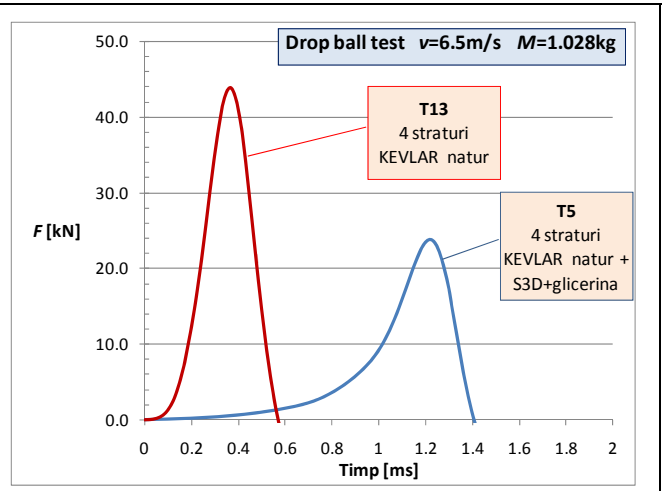


Fig. 3.3

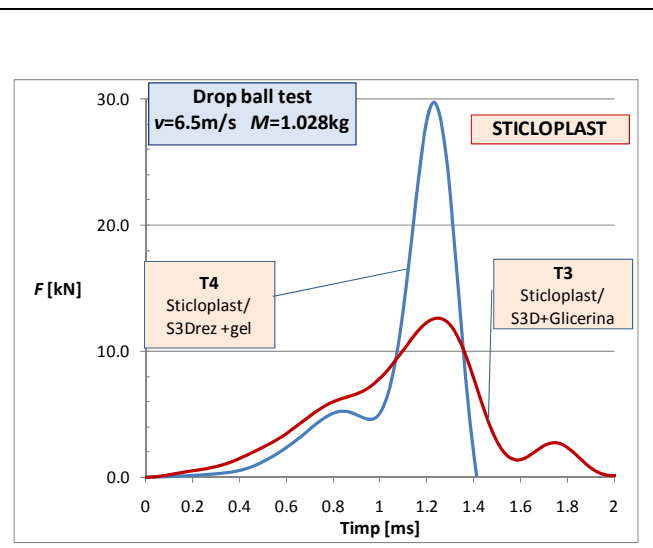


Fig. 3.4

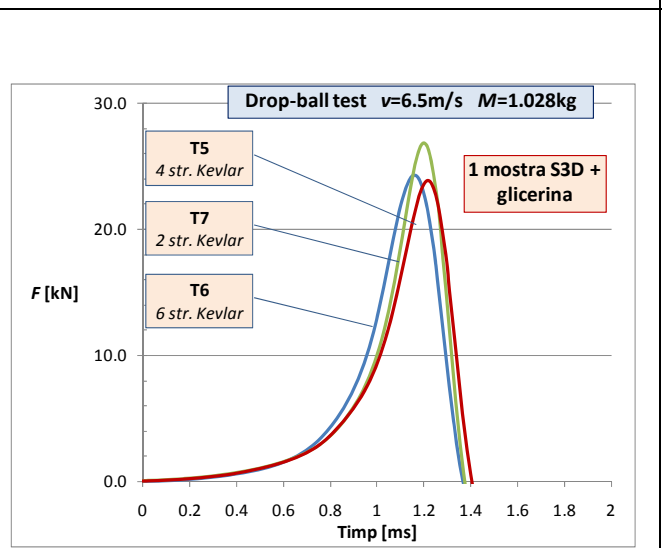


Fig. 3.5



Fig. 3.6 - 2 straturi S3D, uscate, sudate dupa impact fara strat intermediar (față-stânga - spate-dreapta)

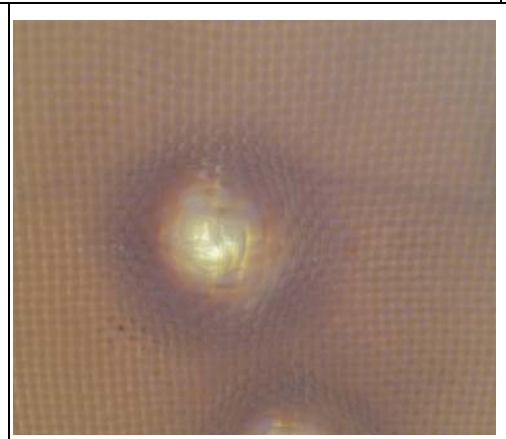


Fig. 3.7 - Pachet de 4 straturi de Kevlar după impact direct cu bila

Rezultatele prezentate în Fig. 3.5 demonstrează și efectul nesemnificativ al umărului de straturi de Kevlar, utilizat ca material intermediar de protecție. Intensitatea impactului poate fi apreciată din Fig. 3.6 și 3.7 în care se remarcă consecința fizică a impactului direct (în absența celei de amortizare) asupra materialelor uscate. În Fig. 3.6 se observă lipirea fermă a celor două bucăți de material S3D la impactul direct (test T2), iar în Fig. 3.7 este prezentată zona de impact cu 4 straturi de Kevlar (testul T13) a căror țesătura este serios distrămată.

Tab. 3.1. Situație sintetică a rezultatelor experimentale de interes major obținute pe standul de tip "drop-ball"

| Test No. | Descriere | Observatii | Forta max [kN] | Recul Bila Impuls | IMPULS Total/redus [Ns] |
|----------|---|---|----------------|-----------------------|-------------------------|
| 2 | S3D / S3D (disc mic/patrat) USCAT | Lipite complet. | 31.0 | | |
| 3 | STP/S3D+G No. 5 | Placa de sticloplast s-a deformat ușor. Lipite ușor | 12.6 | 18cm $H_s=1.88Ns$ | <u>8.66</u> 6.78 |
| 4 | STP/ S3DRez+J A1 | A sărit placa de sticloplast 10cm în sus. | 29.7 | 25 cm $H_s=2.42Ns$ | <u>9.01</u> 6.59 |
| 5 | 4straturi KEV/S3D+G No. 6 | | 23.8 | 7cm $H_s=1.17Ns$ | <u>8.25</u> 7.08 |
| 6 | 6straturi KEV/S3D+G No. 7 | | 24.2 | 11cm $H_s=1.47Ns$ | <u>8.40</u> 6.93 |
| 7 | 2straturi KEV/S3D+G No. 8 | | 26.8 | 11cm $H_s=1.25Ns$ | <u>8.51</u> 7.26 |
| 8 | PFL/S3D+G No. 9 | Bila se lovește de buza tubului | 7.3 | ~18cm $H_s=1.88Ns$ | <u>8.40</u> 6.52 |
| 9 | PFL | S-a mișcat traductorul | 28.0 | ~25cm $H_s=2.21Ns$ | <u>10.01</u> 7.79 |
| 10 | PFL/Folie/4straturi KEV impregnate cu Jaguar/Folie | | 13.0 | ~19cm $H_s=1.93$ | <u>9.83</u> 6.90 |
| 11 | PFL/Folie/4straturi KEV uscat /Folie | | 25.4 | 30cm $H_s=2.42Ns$ | <u>9.20</u> 6.78 |
| 12 | Folie/4straturi KEV impregnate cu Jaguar/Folie | S-au mișcat traductorul și nicovala | 50.1 | ~19cm $H_s=1.93$ | |
| 13 | Folie/4straturi KEV uscat /Folie | S-au mișcat traductorul și nicovala | 42.5 | ~6cm $H_s=0.88$ | <u>10.42</u> 9.54 |
| 14 | Folie/4straturi KEV uscat /Folie | S-au mișcat traductorul și nicovala | 43.9 | ~7cm $H_s=1.17$ | <u>9.07</u> 6.90 |
| 15 | Folie/4straturi KEV impregnate MAI MULT cu Jaguar/Folie | S-au mișcat traductorul și nicovala | 43.2 | ~5cm $H_s=0.99$ | <u>9.78</u> 8.79 |
| 16 | S3D+G No. 10/ S3D+G No. 11/ S3D+G No. 12/ | | 4.1 | ~3cm $H_s=0.76$ | |
| 18 | S3D+G No. 10 | S-au mișcat traductorul și nicovala | 31.5 | ~1.5cm $H_s=0.54$ | |
| 20 | PFL/ S3DRez+J A4/S3DRez+J A3 | Bila se lovește de marginea tubului PFL- sare 1 cm în sus | 6.2 | ~17cm $H_s=1.83Ns$ | |

3.2. Experimente pe tunul Taylor

Pentru a testa comportarea celulelor de amortizare în condiții de viteză de impact medie s-au efectuat experimente pe un stand de impact cu acționare pneumatică (cunoscut sub denumirea de tun Taylor)- Fig. 3.8. Standul constă dintr-o țevă de tun în care este accelerat la diferite viteze impactorul cilindric plan cu diametrul $\phi 60mm$ și masa $m=521g$. Impactorul lovește ținta formată din structura de amortizare analizată montată pe traductorul de forță, la rândul lui fixat pe suportul rigid atașat de batiul standului. Pentru fiecare test de impact s-a înregistrat forța de impact și în paralel au fost înregistrate imagini cu o viteză de 20.000fps cu camera Photron din dotarea ACTTM. Testele au fost efectuate în diferite configurații și la diferite viteze de impact în scopul verificării sistemului de măsurare, dar și de a confrunța concluziile obținute în condiții de viteze mici (testele de tip "drop-ball"). Controlul vitezei de impact se realizează prin reglajul presiunii din cilindrul pneumatic, fără însă a fi posibil un reglaj fin al acestei viteze.

Prelucrarea ulterioară a imaginilor video a permis calculul vitezei de impact (cu o precizie de circa 3%). Pe de altă parte, din prelucrarea datelor înregistrate cu traductorul de forță s-a putut calcula (prin integrare numerică) impulsul total la nivelul acestuia (impulsul corpului impactat). Celulele de amortizare testate au fost aparent identice, respectiv material poros S3D îmbibat în proporție de 75%-80% cu glicerină amestecată cu zeosil (7.5%). S-au efectuat teste pe o singură celulă, respectiv pe un pachet format din două celule suprapuse. În toate cazurile celulele testate au fost acoperite cu un pachet format din 4 sau 8 straturi de Kevlar respectiv cu o vestă din Kevlar (compusă din 19 de straturi) - Fig. 3.9.

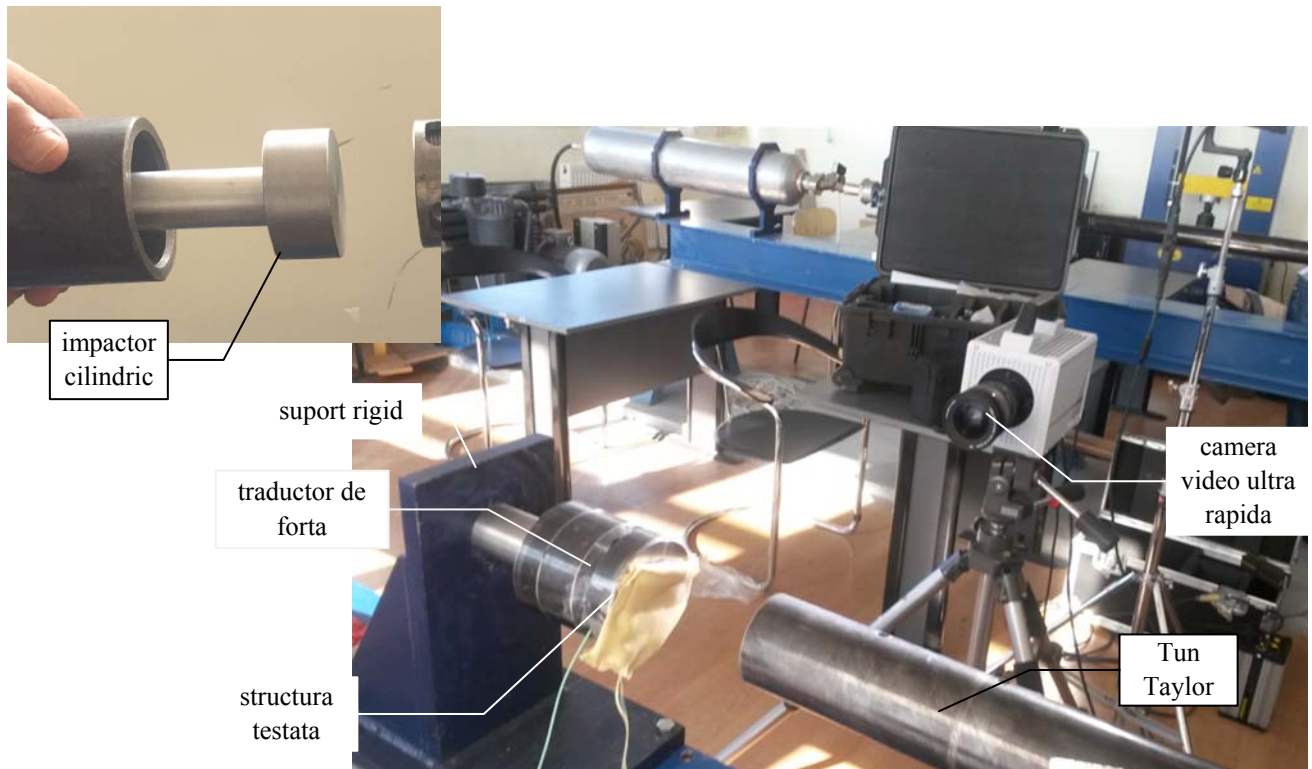
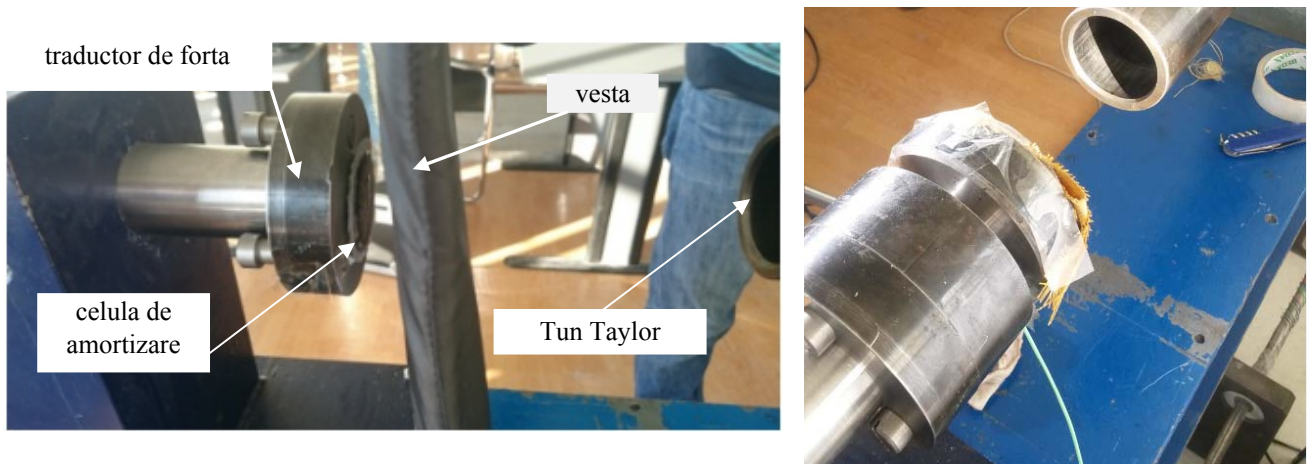


Fig. 3.8 Tunul Taylor - Configurația experimentală

Tab. 3.2. Rezultate obținute la impact pe tun Taylor

| Test | Nr. mostre | Viteza (video) [m/s] | F_{max} [kN] | Impuls (video) [Ns] | Impuls (senzor) [Ns] |
|------|------------|----------------------|----------------|---------------------|----------------------|
| T1 | 1+8 str. K | 19.7 | 33.7 | 10.3 | 11.0 |
| T2 | 1+8 str. K | 22.5 | 35.0 | 11.7 | 11.9 |
| T3 | 2+8 str. K | 23.2 | 25.6 | 12.1 | 12.4 |
| T4 | 2+1 str.K | 23.2 | 25.9 | 12.1 | 12.3 |
| T5 | 2+4 str.K | 23.9 | 27.1 | 12.5 | 12.6 |
| T6 | 1+4 str.K | 22.1 | 38.2 | 11.5 | 12.2 |
| T7 | 1+4 str.K | 25.4 | 43.9 | 13.2 | 14.2 |
| T8 | 1+4 str.K | 24.8 | 46.5 | 12.9 | 14.9 |
| T9 | 2+4 str.K | 25.4 | 28.9 | 13.2 | 11.9 |
| T10 | 1+4 str.K | 14.3 | 24.9 | 7.5 | 8.9 |
| T11 | 1+4 str.K | 11.2 | 16.0 | 5.8 | 6.8 |
| T12 | 1+4 str.K | 12.0 | 17.0 | 6.3 | 7.0 |
| T13 | 1+4 str.K | 14.1 | 22.6 | 7.3 | 8.4 |
| T14 | 0 + Vesta | 25.6 | 80.0 | 13.3 | 14.7 |
| T15 | 1 + Vesta | 24.4 | 40.4 | 12.7 | 13.7 |
| T16 | 1 + Vesta | 23.2 | 37.1 | 12.1 | 13.4 |
| T17 | 2+ Vesta | 23.4 | 27.5 | 12.2 | 12.7 |

În tabelul 3.2 sunt prezentate configurațiile testate cele mai reprezentative alături de valorile măsurate respectiv calculate. Se observă o diferență între impulsul calculat pe baza vitezei evaluate video și cea rezultată din integrarea variației forței, explicabilă prin faptul că prima valoare reprezintă impulsul înainte de impact, pe când a doua valoare reprezintă impulsul de după impact, care conține și o componentă corespunzătoare unui mic recul al impactorului.



(a) cu vesta din Kevlar și o celula de amortizare

(b) cu 4 straturi de Kevlar și o celulă de amortizare

Fig. 3.9 Aranjamentul experimental

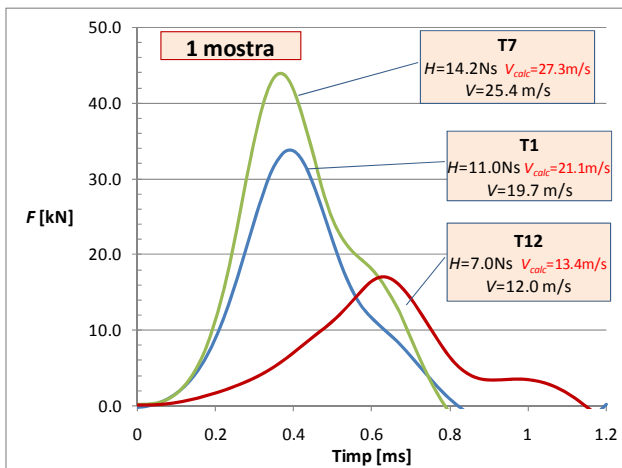


Fig. 3.10

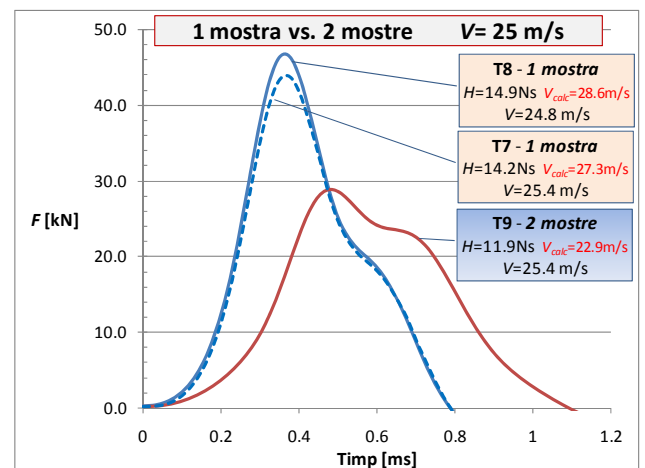


Fig. 3.11

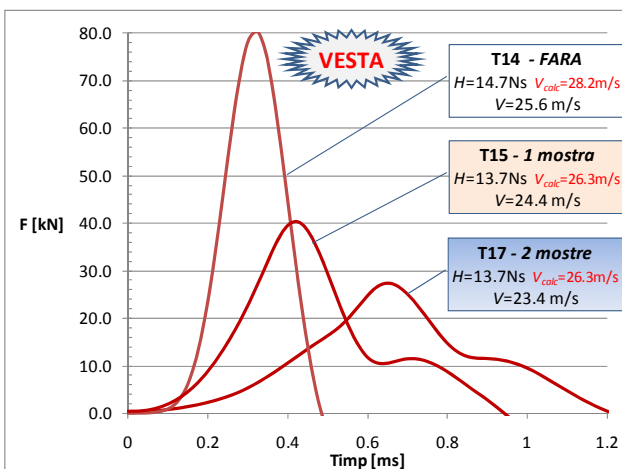


Fig. 3.12

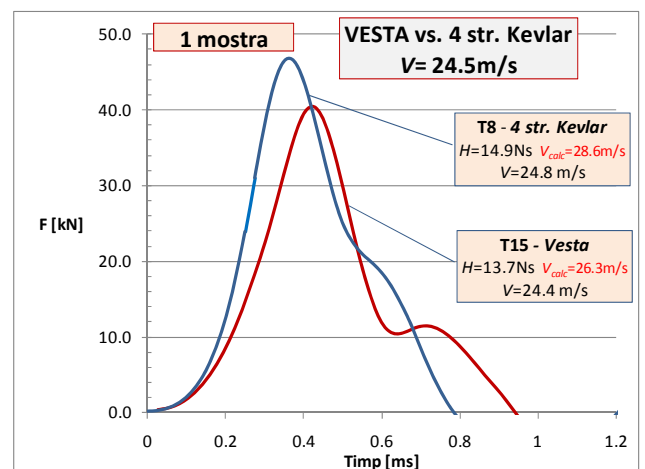


Fig. 3.13

Rezultatele comparative semnificative ale variației forței în timpul impactului, sunt reprezentate în Fig. 3.10-3.13. Astfel, în Fig. 3.10 este prezentată comparativ variația forței de impact în cazul unei singure celule de amortizare (mostra) pentru trei viteze diferite de impact. Se poate observa imediat o variație aproape liniară a forței maxime cu viteza de impact. Prin inspectarea celulelor impactate se constată că materialul S3D rămâne

aproape intact la viteze mici - Fig. 3.14 și 3.15 (test T12) în timp ce la vitezele mari distrugerea este aproape completă (Fig. 3.16- test T7).

În cazul suprapunerii a două celule se obține o reducere semnificativă a forței maxime, așa cum era de așteptat, însă contribuția celei de-a doua celule este mai redusă: efectul de amortizare nu se dublează prin înserierea a două celule concluzie evidentă din Fig. 3.11 și 3.12.

Figura 3.11 demonstrează o buna repetabilitate a rezultatelor: testele T7 și T8 au fost efectuate la viteze aproximativ egale iar forțele maxime corespunzătoare sunt și ele foarte apropiate.

Cele mai remarcabile rezultate sunt sintetizate în Fig. 3.12 și corespund testelor în care o vestă de protecție balistică este impactată în 3 cazuri: fără nici o celula cu o celula în spatele ei, respectiv cu două celule suprapuse. Se observă reducerea practic cu 50% a forței maxime prin prezența unei celule iar două celule reduc forța maximă cu 66% (2/3 !).



(a)



(b)

Fig. 3.14 Materialul S3D înainte (a) și după (b) impact (test T12)



Fig. 3.15 Materialul S3D înainte (a) și după (b) impact (test T12)



Fig. 3.16



Fig. 3.17

În Fig. 3.13 s-a comparat variația forței de impact în cazul unei celule acoperite cu vestă, respectiv cu un pachet de 4 straturi de Kevlar, la aproximativ aceeași viteză. Se observă o mica diferență între forțele maxime înregistrate, de unde concluzia că efectul de amortizare al Kevlarului este extrem de redus. Această concluzie este în concordanță cu cele observate și la testele la viteze mici (v. cap. 3.1). Totuși, în cazul impactului cu

vesta, aspectul materialului S3D după impact este mult mai bun (Fig. 3.17) decât arată acesta în Fig. 3.16 (impact pe 4 straturi de Kevlar), chiar dacă viteza de impact a fost aproape de cea maxim testată.

3.3. Compararea rezultatelor experimentale cu cele teoretice

O parte dintre rezultatele experimentale obținute pot fi utilizate pentru comparația cu modelele Lubrificației XPHD publicate de echipa din UPB în ultimii ani. Conform modelului de calcul corespunzător configurației disc/plan publicat în 2008[1] și îmbunătățit în 2015 [2] forța maximă de impact se calculează cu formula:

$$F_{max} = \frac{\eta w R^4 [48\bar{M}(1 - \sigma_0)^2 + 3\pi\sigma_0^2]^{\frac{5}{2}}}{D h_0 4800\sqrt{5\pi}\bar{M}\sigma_0(1 - \sigma_0)^5}$$

$$\text{unde } \bar{M} = \frac{Dw_0M}{\eta R^4}$$

Pentru comparație s-au ales acele experimente la care structura materialului poros (S3D) nu a fost complet distrusă, ceea ce confirmă că forța a fost transmisă prin mecanismul de expulzare pe toată durata procesului de impact (fundamentul Lubrificației XPHD). În acest scop au fost selectate experimentele T11 și T12.

Dacă se consideră valorile experimentale medii aproximative pentru testul T12

- masa impactorului $M=0.52\text{kg}$
- viteza de impact $w_0=12\text{m/s}$
- porozitatea inițială $\varepsilon=0.95$ (și corespunzător compactitatea inițială $\sigma_0=0.05$)
- vâscozitatea fluidului $\eta=1\text{Pa}\cdot\text{s}$
- parametrul complex $D = \frac{d^2}{16k} = 1.225 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$ (corespunzător dimensiunii medii a fibrelor $d=150\mu\text{m}$ și $k=10$)

din ecuația forței rezultă forța maximă de $F_{max} = 16.4 \text{ kN}$ valoare extrem de apropiată de cea măsurată experimental: $F_{max_exp} = 17\text{kN}$.

Aceeași procedură pentru testul T11 (unde viteza a fost $w_0=11.2 \text{ m/s}$) conduce la o forță maximă teoretică $F_{max} = 14.2 \text{ kN}$ și ea foarte apropiată de valoarea experimentală $F_{max_exp} = 16\text{kN}$. Rezultate similare se obțin și în cazul testelor T10 respectiv T13.

Pe de altă parte, în cazul vitezelor mai mari de 20m/s care au condus la distrugerea materialului S3D este evident că procesul XPHD nu s-a desfășurat pe întreaga durată a contactului și în consecință rezultatele teoretice conduc la forțe mult mai mari decât cele măsurate. Alte efecte de contact decât cele XPHD stau la baza preluării impactului.

CAP. 4. EVALUAREA EXPERIMENTALA, IN POLIGON, A MATRICEI DE AMORTIZARE

Matricele multicelulare M-SAC fabricate au fost testate în poligon la unde de șoc generate de încărcături explozive. Evaluarea s-a realizat pe un model experimental panou Kevlar + matrice M-SAC. Au fost utilizate cele două matrice liniare prezentate anterior (cap. 2-Fig 2.13)

În Fig. 4.1. este prezentat aranjamentul experimental care cuprinde structura suport pentru modelul experimental, panoul pachet Kevlar + matrice de celule, suportul încărcăturii de trotil și cele două sisteme de înregistrare a datelor experimentale: traductorul de presiune (PCB Piezotronics - 137B24B ICP capabil să măsoare suprapresiunea în frontul de undă de până la 1.72 MPa) și camera de filmare ultrarapidă (PHOTRON Fast Cam SA1.1).

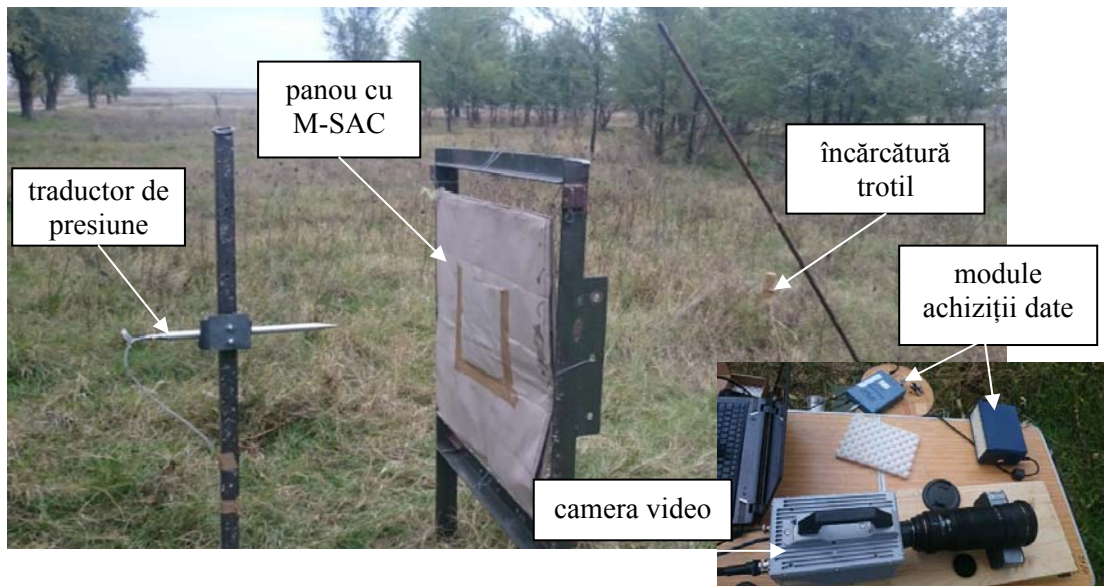


Fig. 4.1 Dispozitivul experimental pentru testul la undă de șoc prin explozie

S-a utilizat o încărcătură explozivă de 100g trotil plasata la 1 m în fata panoului. Distanța dintre vârful senzorului și panou a fost de 0,5 m. Panoul tip vesta din Kevlar a avut dimensiunile de 1m x 1m și un număr de 40 de straturi de țesătură de Kevlar. Matricea de celule a avut dimensiunea de 270mm x 320mm.

Aceste prime experimente de laborator au avut ca scop calibrarea condițiilor experimentale în absența unor teste standard și a utilizării noului sistem de măsurare a presiunii din frontul de unda. Au fost realizate experimente în patru variante: *detonație în aer* fără nici un obstacol între încărcătura explozivă și senzor; explozie cu *40 straturi de Kevlar* între încărcătura și senzor; explozie cu *40 straturi de Kevlar + matrice cu celule disc*; explozie cu *40 straturi de Kevlar + matrice cu celule pătrate*. Rezultatele sunt sintetizate grafic în forma variației presiunii undei de șoc în Fig. 4.2.

Graficul arată o scădere a valorii maxime a suprapresiunii și a impulsului (aria de sub grafic) doar prin utilizarea Kevlarului. Pentru evidențierea capacității de amortizare trebuie realizată o comparație între rezultatele obținute cu și fără matricea de celule. În Tab. 4.1 sunt prezentate structurat date extrase din grafic.

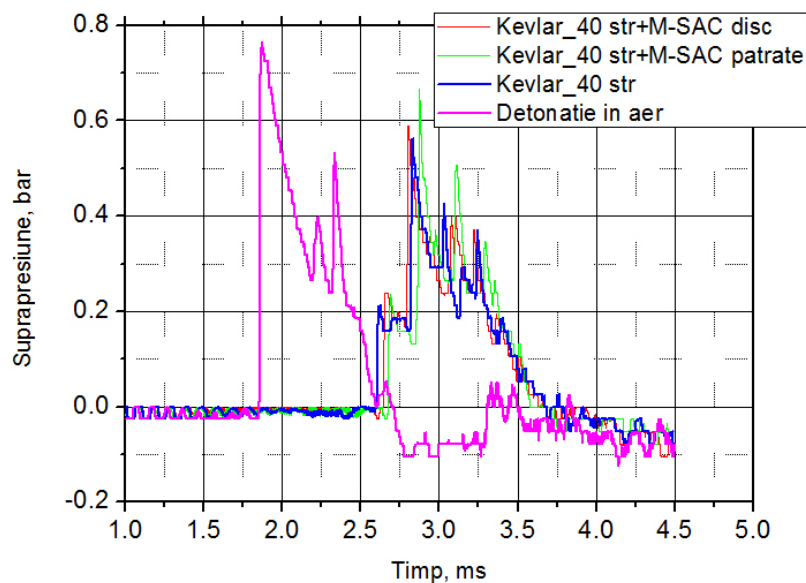


Fig. 4.2. Variația suprapresiunii în frontul undei de șoc



Fig. 4.3 Filmare rapidă a undei de șoc generate de încărcătura de trotil. Sunt prezentate comparativ în același moment de timp deplasările undei de șoc pentru cele 4 teste comparative.

Se poate observa că valoarea cea mai mică a suprapresiunii a fost atinsă pentru testul cu Kevlar. Este cunoscut faptul că prezența unui lichid facilitează transportul undei de șoc. Prin urmare suprapresiunea ridicată poate fi anticipată. Cel mai mic impuls a fost obținut pentru încercarea Kevlar + matrice cu celule pătrate. Totuși, structura specifică materialelor poroase bazată pe o multitudine de interfețe de contact între solid și lichid poate reduce impulsul undei de șoc. Analiza graficului și a imaginilor captate cu camera ultrarapidă din Fig. 4.3 evidențiază o scădere a vitezei de deplasare datorită efectului multitudinii de medii în contact: Kevlar-aer, Kevlar-Kevlar, membrană-aer, material poros-fluid. Scăderea vitezei are loc deși viteza de deplasare a undei în materialele constituente ale panoului este mai mare decât viteza de deplasare a undei în aer.

Performanțele scăzute pot fi puse pe seama dimensiunii mici a matricei utilizate. Pentru a evidenția influența matricei asupra undei de șoc este necesară utilizarea unei matrice cu o suprafață mai mare. Aceste teste au fost însă preliminare și au avut ca rol stabilirea unei proceduri experimentale.

Tabelul 4.1 Date comparative privind variația suprapresiunii în frontul undei de șoc pentru cazurile studiate

| Cazul experimental | Impuls specific [bar·s] | Presiunea maximă [bar] | Timp sosire a undei incidente [s] |
|---|-------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| Detonație în aer | 0,2490 | 0,76 | 1,88 |
| 40 str. Kevlar | 0,1413 | 0,56 | 2,82 |
| 40 str. Kevlar cu matrice cu celule disc | 0,1557 | 0,58 | 2,80 |
| 40 str. Kevlar cu matrice cu celule pătrate | 0,1408 | 0,66 | 2,87 |

CAP. 4. CONCLUZII

Experimentele de laborator realizate în actuala etapă la viteze medii, au confirmat buna comportare a materialelor alese pentru celula de amortizare (S3D + soluții ameliorate de glicerină). S-a dovedit atât la viteze mici cât și la viteze medii (până la 30m/s) că prezenta celulelor de amortizare propuse reduce forța maximă de impact cu până la 50% distribuind energia de impact pe o perioadă mai mare de timp. Efectul este evident atât în cazul impactului cu corpuri sferice (impact concentrat) asimilat aplicației pentru veste de protecție, cât și atunci când impactul are loc pe o suprafață rigidă, similar protecției la explozii (undă de șoc).

Analiza detaliată, post impact, a aspectului celulelor impactate arată clar că distrugerea matricei poroase are loc datorită generării locale a unor presiuni extrem de mari, acesta fiind efectul benefic al amortizării. Este necesară identificarea unor materiale poroase cu rezistență mecanică sporită.

Experimentele au dovedit de asemenea că utilizarea mai multor straturi de celule, suprapuse, nu apare a fi eficientă; se mărește efectul pozitiv dar nu în aceeași măsură în care se îngreunează sistemul de protecție.

S-a dovedit de asemenea, că îmbibarea parțială produce efecte mai bune decât îmbibarea totală și va fi preferată în continuare, până la găsirea unor soluții practice eficiente de acumulare a fluidului expulzat.

Din punct de vedere tehnologic, rămâne o problema modul de lipire a celulelor de amortizare, experimentele arătând ca fluidul este expulzat întotdeauna prin zona de îmbinare a membranei de protecție.

Comparația rezultatelor obținute în condiții de viteză medie de impact cu rezultatele prezise cu modelele teoretice arată că, în condițiile în care forța a fost transmisă prin mecanismul de expulzare pe toată durata procesului de impact modelul lubrificației XPHD poate fi folosit cu încredere pentru evaluarea efectelor de amortizare.

Experimentele preliminare din poligon au validat sistemul complex de instrumentare și au demonstrat necesitatea stabilirii unei proceduri standard de testare, adecvată aplicației propuse.

BIBLIOGRAFIE

1. Pascovici, M.D., Popescu, C.S., Marian, V.G., 2010. *Impact of a rigid sphere on a highly compressible porous layer imbibed with a Newtonian liquid*. Proceed. of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology 224, 789–795;
2. Radu, M., *A Modified Approach of Squeeze Effects in Porous Media Imbibed with Newtonian Fluids*, Proceed. of 6th Intern. Conf. in Computational Mechanics and Virtual Engineering, Brasov, Romania, nov. 2015