

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 2014

**Raport științific și tehnic**

DIRECTOR: Prof. dr. ing. Traian CICONE

## Cuprins

<b>1.</b>	<b>SOLUȚII CONCEPT PENTRU SAC .....</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>IDENTIFICAREA MATERIALE POROASE CANDIDATE .....</b>	<b>5</b>
2.1.	DEFINIREA CERINȚELOR MATERIALELEOR .....	5
2.2.	CARACTERIZAREA MATERIALELOR CANDIDATE .....	7
2.3.	DETERMINAREA PROPRIETĂȚILOR MATERIALELOR.....	9
<b>3.</b>	<b>IDENTIFICAREA FLUIDELE CANDIDATE.....</b>	<b>9</b>
3.1.	DEFINIREA CERINTELOR FLUIDELOR CANDIDATE .....	9
3.2.	CARACTERIZAREA FLUIDELOR CANDIDATE .....	9
3.3.	DETERMINAREA PROPRIETĂȚILOR FLUIDELOR CANDIDATE .....	10
<b>4.</b>	<b>EVALUAREA EXPERIMENTALĂ A CAPACITĂȚII DE AMORTIZARE LA VITEZĂ REDUSĂ .....</b>	<b>11</b>
4.1.	EXPERIMENTE REALIZATE LA COMPRESIUNE CU VITEZĂ CONSTANTĂ .....	11
4.2.	EXPERIMENTE LA IMPACT CU ENERGIE REDUSĂ.....	13
<b>5.</b>	<b>SIMULAREA CONDITIILOR EXPERIMENTALE DIN POLIGON .....</b>	<b>16</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUZII GENERALE .....</b>	<b>18</b>
	BIBLIOGRAFIE .....	18
	DISEMINAREA REZULTATELOR .....	18

## Notății

$F$  - forța;  
 $g$  - accelerația gravitațională;  
 $h$  - grosimea materialului;  
 $H$  - înălțimea de cădere a pendulului;  
 $R$  - raza eșantionului testat;  
 $v$  - viteză;  
 $\varepsilon$  - porozitatea materialului;  
 $\eta$  - viscozitate;  
 $\phi$  - permeabilitatea;  
 $\sigma$  - compactitatea;

### Indici :

$0$  - inițial;  
 $exp$  - experimental.

*REZUMAT*

Așa cum este prevăzut în planul de realizare pe anul 2014, activitățile din acest an au fost dirijate spre definirea nucleului celulei de amortizare (nucleul SAC). Din acest obiectiv principal, au fost derivate următoarele obiective:

1. Definirea unor soluții concept pentru celula de amortizare
2. Identificarea cuplurilor de materiale format din structură solidă poroasă și fluidul asociat din componența celulei SAC.
3. Definirea unor soluții de capsulare în interiorul celulei SAC;
4. Definirea unor modele de simulare numerică a experimentelor realizate prin impact de mare energie în condiții de poligon ("experimente numerice").

Pentru realizarea acestor obiective, au fost realizate următoarele activități:

- a) S-a analizat problematica impactului asupra echipamentelor de protecție (umană și a infrastructurii) definindu-se caracteristicile principale din punct de vedere ale energiei și vitezei la impact al suprafeței impactate precum și standardele de protecție și siguranță în vigoare.
- b) S-au propus două soluții concept diferite pentru SAC, pornind de la particularitățile diferitelor situații de protecție balistică; acestea au fost caracterizate și asociate cu aplicațiile posibile.
- c) S-au definit și analizat, din punct de vedere funcțional și tehnologic soluțiile de capsulare propuse, pentru fiecare dintre soluțiile concept de SAC.
- d) S-au identificat materialele poroase de interes:
  - S-au definit cerințele pentru materialele cu structură poroasă.
  - S-au identificat și definit structural materialele candidate pentru a fi testate.
  - S-au analizat materialele candidate din prisma aplicațiilor în protecția balistică.
  - S-au evaluat experimental principalele proprietăți fizico-chimice de interes, respectiv densitatea, porozitatea, compresibilitatea.
- e) S-au identificat fluidele de interes:
  - S-au definit cerințele pentru fluide.
  - S-au identificat și definit fluidele candidate pentru a fi testate.
  - S-au analizat fluidele din prisma aplicațiilor în protecția balistică.
  - S-au evaluat experimental și/sau teoretic principalele proprietăți fizico-chimice de interes, respectiv densitatea, vâscozitatea, comportamentul reologic și tensiunea superficială.
- f) S-au selecționat cupluri de materiale care au fost ulterior evaluate din punct de vedere al capacității de amortizare prin două experimente de laborator simple, rapide și nedistructive.
- g) S-au efectuat experimente de evaluare a permeabilității în condiții statice (la presiuni reduse) precum și în condiții dinamice (compresiune la viteze mici); s-a remarcat că porozitatea, și la rândul ei, permeabilitatea, variază cu compresiunea.
- h) S-a evaluat comparativ capacitatea de amortizare a cuplurilor de materiale candidate (structură poroasă + fluid) în condiții de viteză constantă (1-10 mm/s). Aceste experimente au permis evaluarea ambelor soluții concept de SAC.
- i) S-au evaluat cuplurile de materiale în condiții de impact cu viteze și suprafețe de contact reduse pe standul de încercări pendular la impact din Laboratul UPB.
- j) S-au dezvoltat și calibrat două modele de simulare numerică pentru impact cu un corp cilindric, respectiv cu undă de șoc. Această activitate premergătoare testelor finale din poligon a fost absolut necesară pentru reducerea eforturilor și a cheltuielilor în faza de experiment propriu-zis.

Prin aceste activități au fost îndeplinite în totalitate obiectivele propuse fiind identificate cuplurile de materiale care vor fi testate în continuare, soluțiile concept și de capsulare ale SAC, precum și modelele de simulare numerică ale experimentelor din poligon.

## INTRODUCERE

**Obiectivul final** al proiectului este realizarea unui **sistem de protecție suplimentar** împotriva impactului de mare energie, bazat pe efectul disipativ al structurilor poroase, deformabile, îmbibate cu fluide. Absorbția energiei de impact se datorează interacțiunii dintre fluidul îmbibat în porii structurii. Procesul a fost pus în evidență recent, atât experimental cât și teoretic, în urmă unor cercetări fundamentale dezvoltate în cadrul UPB. Experimentele realizate au demonstrat capacitatea de amortizare în condiții de impact cu forțe și energii reduse, pentru câteva materiale poroase și fluide.

În cadrul prezentului proiect se urmărește evoluția de la stadiul de cercetare fundamentală spre cea aplicativă, prin următorii pași:

- (i) determinarea unor cupluri de materiale (structură poroasă + fluid) care să asigure condiții de disipare maximă a energiei în condițiile cerințelor tehnologice, economice și de compatibilitate cu aplicațiile speciale;
- (ii) stabilirea unor soluții de capsulare a cuplului structură poroasă + fluid, compatibile cu diferitele aplicații, realizabile tehnologic în condiții de eficiență economică.

## 1. SOLUȚII CONCEPT PENTRU SAC

Sistemul de protecție suplimentar pentru atenuarea efectelor impactului de mare energie trebuie să răspundă unui număr mare de cerințe printre care: adaptarea la orice suprafață (conformabilitate), posibilitatea "croirii" în orice formă, rezistență mecanică, stabilitate termică și temporală etc. Multe alte cerințe sunt analizate separat la alegerea materialelor componente (structură poroasă + fluid).

Abordarea problematicii impactului de mare energie este extrem de diversă și cuprinde diverse forme de impactori, precum: gloanțele și schije, undă de șoc sau lovituri cu obiecte contondente. Dacă primele două forme au efect asupra personalului și infrastructurii, cea din urmă este specifică doar personalului. Din punct de vedere al formei impactului, distingem două cazuri diferite: contact dispersat pe o suprafață de impact relativ extinsă și contact concentrat. Primul caz este caracteristic impactului cu undă de șoc, iar cel de-al doilea este tipic impactului cu glonț, schijă sau obiect contondent.

**Modul de evaluare a efectului de amortizare** diferă de la o aplicație la alta, ca de exemplu:

- amprentarea - soluție utilizată la evaluarea protecției asupra corpului uman;
- măsurarea forței și accelerației la nivelul corpului impactat.

**Clasele de testare** a efectului amortizării pot fi definite în funcție de viteza de impact; se disting:

- (a)  $v \sim 1$  m/s - impact de energie redusă ("soft") realizat pe standul de încercări la impact din UPB;
- (b)  $v \sim 10$  m/s - impact de energie medie ("medium") realizat în UPB cu bile în cădere liberă;
- (c)  $v \sim 100$  m/s - impact de energie mare ("mild") realizat cu tunul Taylor sau bară Hopkinson;
- (d)  $v > 100$  m/s - impact de energie foarte mare ("extreme") realizat în poligon cu muniție reală.

După o analiză de amploare a unui set de soluții concept posibile, pentru prezentul proiect s-au reținut două dintre acestea, ambele bazate pe realizarea unui strat protector deformabil (comformabil) de grosime redusă (3-6 mm) format din asamblarea a mai multor celule elementare de amortizare (SAC) cu formă geometrică regulată (hexagon, pătrat, etc.) prezentat în Fig. 1. Fiecare SAC este formată din trei componente:

- (a) structură poroasă foarte deformabilă; (b) fluid; (c) membrană de protecție a celor două componente.

**Soluția V1 : SAC cu structură omogenă în care materialul poros este complet îmbibat cu lichid.** În această variantă, în timpul procesului de amortizare, comprimarea structurii în timpul impactului necesită expulzarea fluidului îmbibat în exteriorul acesteia în trei variante posibile:

- V1-a** - Fluidul expulzat produce deformarea membranei care este elastică și rezistentă;
- V1-b** - Fluidul expulzat este acumulat într-o zonă tampon prevăzută la extremitatea SAC (Fig. 2)
- V1-c** - Fluidul este expulzat în exterior printr-o serie de micro-supape prevăzute pe suprafața membranei.

În timp ce primele două variante pot fi utilizate repetat, cea de-a treia este o soluție de "unică folosință".

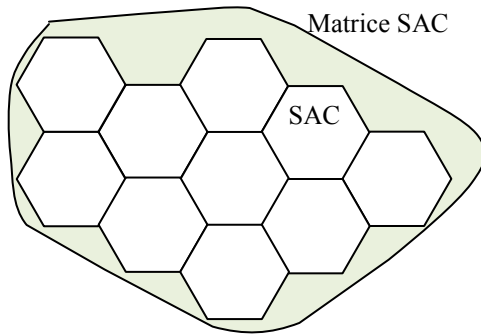


Fig. 1 Matricea SAC

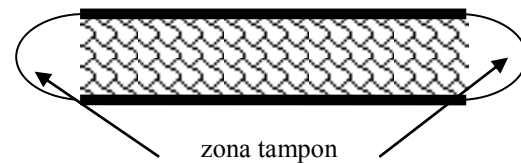


Fig. 2 Încapsularea SAC folosind zona tampon

**Soluția V2 : SAC cu structură formată din materialul poros uscat și un rezervor de fluid plasat în poziție centrală.** În această variantă de structură ne-omogenă la nivel macro (Fig. 3), fluidul folosit trebuie să-și mențină poziția centrală ceea ce presupune două soluții de principiu:

**V2-a** - Fluidul este sub formă de pastă sau gel cu prag de curgere care asigură portanță statică ridicată;

**V2-b** - Fluidul este menținut în zona centrală cu ajutorul unei membrane sensibile, care se distruge la inițierea impactului eliberând fluidul conținut. Fluidul poate fi introdus în zona centrală îmbibat în corpuri sau discuri dintr-un alt material poros.

Menționăm că cele două soluții de principiu (V1 și V2) sunt utilizabile în funcție de particularitățile aplicației dorite. De exemplu, în cazul unui impact cu o suprafață de contact redusă, variantă V2 necesită plasarea SAC între două suprafețe rigide care să asigure distribuția forței de impact pe o suprafață extinsă, compensând ne-omogenitatea structurală.

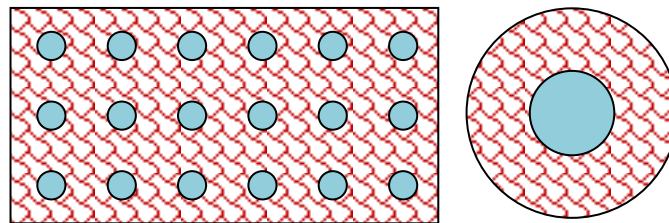


Fig. 3- SAC V2 - Material poros cu rezervoare de fluid

## 2. IDENTIFICAREA MATERIALE POROASE CANDIDATE

Echipamentele de protecție balistică sunt purtate de militari, polițiști, personalul care intervine în caz de urgență (ex: pompieri, personal ambulantă) sau personal civil precum agenți de pază. În contextul militar modern, echipamentul de protecție individual include: veste antiglonț (care în principal protejează toracele), căști balistice (acoperă craniul), protecție pentru față și ochi sub formă de ochelari sau vizoare, costume EOD pentru echipe de dezamorsare bombe sau scuturi balistice.

### 2.1. DEFINIREA CERINTELOR MATERIALELEOR

Materialele utilizate pentru amortizarea suplimentară a șocurilor în cazul unei veste antiglonț și a căștilor pentru protecție trebuie să poseze următoarele proprietăți:

- Pori deschiși (comunicanți);
- Maleabilitate (deformabile) - ușor de adaptat la suprafețe complexe;
- Greutate redusă;
- Asigurarea unei amortizări bune în cazul șocurilor;
- Neinflamabilitate;
- Rezistență mecanică a structurii , astfel încât expulzarea fluidului sa nu distrugă structura poroasă;

- Stabilitate în timp;
- Asigurarea unui confort termic optim pentru utilizator;
- Preț redus

Funcție de utilizare, pentru personalul uman sau vehicule militare, selecția materialelor utilizate în fabricarea echipamentelor ia în considerare o serie de proprietăți care trebuie să asigure mobilitate, durată de viață crescută, supraviețuire și capacitate ridicată de luptă în medii ostile. Echipamentele de protecție balistică trebuie să fie ușoare, compacte, durabile și performante. Cerințele pentru materialele de protecție balistică sunt complexe și prin urmare apar o serie de incompatibilități pe care cercetările în domeniu încearcă să le rezolve.

#### ○ **CARACTERISTICI FIZICE**

Caracteristicile fizice ale materialului fac referire la o listă de proprietăți selectate din punctul de vedere al echipamentelor de protecție balistică individuale sau pentru vehicule. Pentru că orice sistem de protecție înseamnă o greutate suplimentară pentru luptător/vehicul militar, masa materialelor îmbibate influențează direct mobilitatea și poate duce la reducerea capacității de luptă. Deoarece echipamentele intră în echiparea unui luptător, există limitări și asupra volumului.

Pentru echipamentele care intră în contact cu corpul uman este important ca acestea să fie confortabile și să nu limiteze mișcările luptătorului. Confortul trebuie asigurat și din punctul de vedere al transferului umidității și căldurii cu mediu înconjurător. Definirea acestor parametri se face în funcție de clima și domeniul de temperaturi în care se desfășoară misiunea de luptă. Legat de faptul că echipamentul se poate afla în contact intim cu pielea umană, este obligatoriu ca toate substanțele din compunere să nu fie toxice, nocive sau să pericliteze în orice fel sănătatea corpului uman.

Deoarece în echiparea luptătorilor sau a vehiculelor militare se găsesc sisteme care conțin substanțe inflamabile și explozive, foarte sensibile la descărcări electrice, materialele trebuie să fie antistatice și să fie conductoare slabe de curent electric.

#### ○ **CARACTERISTICI DE MEDIU**

Operațiunile de luptă, se pot desfășura în cele mai diferite locații, de la deșert uscat până în zone umede tropicale, și într-o paletă largă de temperaturi. Prin urmare, materialul trebuie să fie stabil dimensional și rezistent. Variația temperaturii poate afecta proprietățile balistice ale materialului prin variația densității și modificarea formei, permanentă sau nu, prin dilatare sau contractare. Materialele necapsulate, expuse în atmosferă cu vapori de apă pot suferi modificări ale structurii chimice prin intermediul proceselor de oxidare, iar prezența apei poate altera modul de desfășurare al fenomenelor care stau la baza amortizării impactului sau a undei de șoc. Pentru că aceste materiale, de obicei, intră în structura straturilor exterioare, expunerea la lumina solară poate duce la modificări fizico-chimice.

Pentru toate materialele utilizate, este necesară analizarea impactului asupra mediului. Tendințele actuale conduc la utilizarea de materiale biodegradabile. Acestea permit scoaterea din uz cu efecte nocive minime asupra mediului înconjurător dacă sunt îngropate sau aruncate pe câmpul de luptă.

#### ○ **CARACTERISTICI DE CAMUFLARE**

În contextul actual există o mulțime de sisteme de observare și detecție a inamicului care folosesc diferiți senzori capabili să capteze radiația electromagnetică pentru un domeniu larg. Materialele utilizate nu trebuie să producă zgomote atât pentru urechea inamicului cât și în fața sistemelor de detecție cu microfoane. În spectrul vizibil, problemele legate de camuflaj pot fi rezolvate prin vopsire. Totuși în spectrul termal, emisivitatea materialelor trebuie să fie cât mai apropiată de a elementelor din fundal. Cerințe suplimentare pot fi emise pentru sisteme care intră în dotarea vehiculelor militare privind spectrul radar.

#### ○ **CARACTERISTICI DE PROTECȚIE LA FOC, CĂLDURĂ ȘI ALTE PERICOLE**

Amenințările de tip balistic nu sunt singurele de pe câmpul de luptă. Luptătorul poate fi supus la atacuri chimice, cu flacără deschisă sau căldură intensă. Este de dorit ca sistemul de protecție să reprezinte un fel de scut în fața substanței chimice atacatoare sau a flăcărilor deschise. Materialul trebuie să fie neinflamabil și termo-izolant. Pentru materialele în contact cu pielea, aceste trebuie să fie rezistente la topire. Această proprietate se poate defini ca o rezistență la temperaturi înalte. Pentru echipamentele care se folosesc în spații

înguste, trebuie analizată emisiile de fum și toxicitatea produșilor de combustie. Suplimentar se mai poate solicita protecție la sisteme de arme cu energie direcționată sau radiație nucleară.

#### ○ **CARACTERISTICI ECONOMICE**

Deoarece pe lângă performanțe, un alt criteriu care este determinant în selectarea unui sistem de protecție balistică este reprezentat de costuri, este necesară definirea caracteristicilor care influențează costul de achiziție și întreținere. Materialele trebuie să fie ușor de întreținut și reparat. Echipamentele aflate în dotarea forțelor armate trebuie să îndeplinească cerințe legate de stocarea pe termen lung și pregătire minimă înainte de utilizare.

#### ○ **CARACTERISTICI SPECIFICE PROTECȚIEI BALISTICE**

Un material utilizat în protecția balistică trebuie să fie capabil să oprească atacul unui fragment care se deplasează cu viteză mare, de tip schijă sau glonț, sau să reducă efectele distructive ale suprapresiunii generate de trecerea unei unde de șoc. Fragmentele se împart în trei categorii: fragmente balistice care rezultă din explozia bombelor, grenadelor, și a altor dispozitive explozive; gloanțe cu viteză mare trase de arme cu calibru cuprins între 5,56mm și 12,7 mm; gloanțe cu viteză mică trase de pistoale, revolvere sau puști de vânatoare. Suplimentar, echipamentele de protecție balistică individuale de tipul vestelor trebuie să asigure protecție și împotriva lamelor de cuțit, sabie și alte arme sau proiectile ascuțite. Sistemele care asigură protecție ridicată la toate categoriile de proiectile în general nu sunt performante din punctul de vedere al protecției la unde de șoc. Mecanismele implicate în oprirea fragmentelor și în atenuarea undelor de șoc sunt diferite și prin urmare este foarte dificil de proiectat un material care să fie capabil să funcționeze în ambele cazuri. Materialele pentru protecția balistică la unda de șoc sunt capabile să atenueze unda de șoc prin intermediul unor mecanisme care convertesc energia undei de șoc în căldură prin frecare vâscoasă sau deformare.

În acest context, partenerul P1 a analizat materialele candidate în raport cu caracteristicile precedente și le-a sintetizat comportamentul sub formă tabelară exprimate prin atribute/calificative.

## **2.2. CARACTERIZAREA MATERIALELOR CANDIDATE**

#### ○ **MATERIALE TEXTILE ȚESUTE**

Țesătura este un produs textil, realizat prin îmbinarea în unghi drept a cel puțin două sisteme de fire: un sistem dispus longitudinal denumit urzeală și un sistem dispus transversal denumit bătătură (Fig. 4: T01 - T04). Acestea sunt caracterizate de structuri ordonate.

#### ○ **MATERIALE TEXTILE NETESUTE**

Metodele clasice de obținere a produselor textile netesute sunt tricotajul, brodarea sau împâslirea. Acestea au ca suport un strat format din fibre scurte, filamente sau fire filamentare continue, consolidate prin diverse procedee mecanice, fizico-chimice sau o combinație a celor două. Consolidarea termică se aplică straturilor fibroase cu conținut de fibre termoadezive, care formează puncte de sudură între ele, precum și puncte de sudură între ele și celelalte fibre. Consolidarea prin curenți de înaltă frecvență se aplică straturilor fibroase cu conținut de fibre cu proprietăți dielectrice. Materialele alese sunt obținute prin presarea fibrelor de celuloză (Fig. 4: NT01-NT04).

#### ○ **SPUME POLIURETANICE RETICULATE**

Dintre spumele poliuretanică de interes sunt prezentate mai jos spumele poliuretanică pentru filtrare fluide comercializate de firma EUROFOAM (Fig. 4: F133, F280, F450). Familia FILTREN cuprinde spume poliuretanică reticulate, pe bază de polieteri, cu pori deschisi. Această structură este obținută printr-un proces de reticulare termică, prin care orice membrană care rămâne în urma formării spumei este topită. Obținută din polieteri, spumele din familia FILTREN rămân stabile în apă și nu sunt toxice. Proprietățile acestora sunt prezentate în Tabelul 1.

**Tabel 1: Caracteristicile spumelor conform caracteristicilor producătorului Eurofoam România**

Tip Spumă	SIMBOL	Densitate [Kg/m <sup>3</sup> ]	Rezistența la compresiune [kPa]	Alungirea la rupere [%]	Rezistența la rupere [kPa]	Dimensiunea porilor [micron]
FILTREN® TM 25133	F133	20-24	2,5-4,5	100	80	1060-1600
FILTREN® TM 25280	F280	20-24	2,5-4,5	90	70	2200-3400
FILTREN® TM 25450	F450	20-24	2,5-4,5	70	60	3400-5600

### ○ MATERIALE SANDWICH

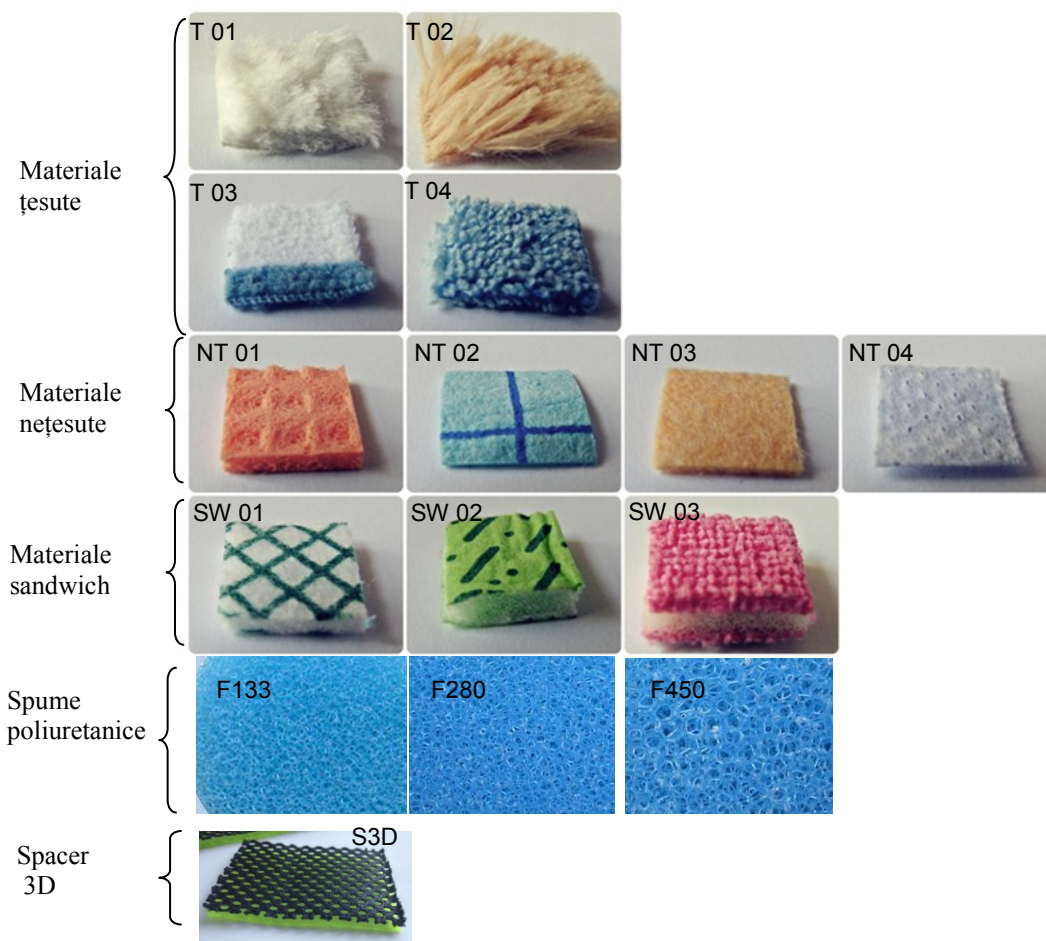
Materialele denumite Sandwich (Fig. 4: SW01-03) sunt formate din combinații de materiale țesute, nețesute și spume și au fost eliminate din studiile ulterioare datorită dificultății stabilirii unor parametrii globali ai structurii.

### ○ ȚESĂTURĂ DIN MICROFIBRĂ POLIARAMIDICĂ TWARON CT

Acest tip de țesătură produsă din microfibre poliaramidice este larg utilizată în protecția balistică pentru producerea căștilor și a plăcilor de protecție balistică. De obicei este îmbibată cu rășini organice și supusă la presiune și temperatură în scopul rigidizării. Structura de microfibre permite înglobarea de fluide și deplasarea acestora în cazul impacturilor mecanice. Există semnalări în literatura de specialitate privind cercetarea sistemelor din țesătură poliaramidică, lichid și pulbere micronizată la vestele antiglonț.

### ○ SPACER 3D

Materialele de acest tip sunt folosite ca și căptușeală la diverse articole de îmbrăcăminte, ajutând la eliminarea transpirației produsă de corp. Acestea sunt formate din 3 straturi diferite, stratul mijlociu având o porozitate mare (Fig. 4: S3D).



**Fig. 4 Materiale poroase utilizate în experimente**

### 2.3. DETERMINAREA PROPRIETĂȚILOR MATERIALELOR

În urma experimentelor preliminare la impact, în care s-au testat un spectru larg de materiale de acest tip, s-au evidențiat câteva materiale ce au prezentat caracteristici bune de amortizare la șoc. Din cele prezentate, numai câteva au fost selecționate pentru caracterizarea acestora.

#### DETERMINAREA POROZITĂȚII MATERIALELOR POROASE

La baza experimentului de măsurare a porozității materialelor candidate stă ipoteza că porii materialului vor fi complet umpluți de fluidul îmbibat în acesta. Volumul poate fi determinat direct cu vase gradate de precizie, sau în cazul apă carei densitate este cunoscută, prin cântărire. Apa este folosită ca fluid dedicat acestei operațiuni deoarece materialele sunt ușor de îmbibat complet cu apa, iar proprietățile acestora sunt cunoscute.

Având în vedere caracterul subiectiv al gradului de îmbibare, aceste măsurători pot fi afectate de erori de aproximativ 5%. Rezultate măsurătorilor sunt prezentate în Tabelul 2.

#### DETERMINAREA DENSITĂȚII MATERIALELOR POROASE

În cadrul UPB, au fost măsurate densitățile materialelor testate prin cântărire. Rezultate măsurătorilor sunt prezentate în Tabelul 2.

Tabel 2: Caracteristicile materialelor poroase testate

Material	Densitate material uscat [kg/m <sup>3</sup> ]	Densitate material îmbibat cu apă [kg/m <sup>3</sup> ]	Greutate specifică a materialului îmbibat cu apă [kg/m <sup>3</sup> ]	Grosime material îmbibat $h_0$ [mm]	Porozitate $\varepsilon_0$ [-]
T03	67	884	2,7	2,95	0,81
T04	118	1040	2,4	2,3	0,91
NT01	95	1015	5,2	5	0,92
NT03	141	1116	1,4	1,2	0,95
NT04	137	1121	1,4	1,3	0,98
F133	22	1001	11,8	11,75	0,96
F280	24	998	10,5	10,5	0,97
F450	23	1019	10,2	10	0,96
S3D	113	1018	4,7	4,7	0,99

## 3. IDENTIFICAREA FLUIDELE CANDIDATE

### 3.1. DEFINIREA CERINTELOR FLUIDELOR CANDIDATE

Ca și în cazul materialelor poroase, fluidele candidate au fost evaluate în raport cu caracteristicile impuse de aplicațiile balistice, definite în Capitolul precedent.

### 3.2. CARACTERIZAREA FLUIDELOR CANDIDATE

Fluidele candidate trebuie alese în compatibilitate cu un material anume, curgerea depinzând de conexiunea dintre mărimea porilor și vâscozitatea fluidului ce curge prin aceștia. Aceste fluide trebuie caracterizate din punct de vedere reologic (Newtonian/ne-Newtonian), definind vâscozitatea, densitatea, tensiunea superficială, stabilitatea în timp etc. De asemenea, pentru fluidele candidate se va stabili disponibilitatea, prețul și adaptarea la procesul de fabricație.

Dintre fluidele evaluate, următoarele merită menționate în cele ce urmează.

#### ○ POLIETILEN GLICOLUL (GLICERINĂ)

Polietilen glicolul (PEG) este un polietier cu formula chimică  $H-(O-CH_2-CH_2)_n-OH$ , cunoscut și ca polietilen oxid (PEO) sau polioxi etilenă în funcție de masa moleculară. PEG este solubil în apă și practic lipsit de toxicitate. Poate fi utilizat pentru a crea presiuni osmotice foarte mari de până la 10 atmosfere. Este folosit ca

dispersant pentru mai multe paste de dinți. Caracterul polar al moleculelor de PEG permite o bună înglobare a microparticulelor oxidice.

#### ○ ULEIUL SILICONIC

Prin ulei siliconic se înțelege un polimer lichid pe bază de siloxan. Cel mai cunoscut este polidimetilsiloxanul. Acești polimeri sunt remarcabili prin stabilitatea termică relativ ridicată și proprietățile de lubrifiere.

Pentru modificarea comportamentului reologic al glicerinei se pot folosi diverse micropulberi:

- **Aerosil** (pulberi de bioxid de siliciu) este caracterizat de densitatea aparentă foarte mică de 50 g/l și de suprafața specifică relativ mare a granulelor 110 m<sup>2</sup>/g. Dimensiunea medie a particulelor este de 16 nm. Aerosilul este compatibil cu polietilenul glicol cât și cu uleiul siliconic.
- **Alumina** (trioxidul de aluminiu) are masa molară 102 g/mol și densitatea de 3,94 g/cm<sup>3</sup>. Este un material cunoscut ca refractar și foarte dur.
- **Talc** (silicatul de magneziu- Mg<sub>3</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>) este un material larg disponibil și ușor de prelucrat și micronizat având în vedere duritatea foarte redusă.
- **Cenușa de termocentrală** este un deșeu pulverulent cu compoziție și granulometrie variabile. Datorită cantităților mari disponibile și a prețului redus merită să fie testat în fazele inițiale ale proiectului.

### 3.3. DETERMINAREA PROPRIETĂȚILOR FLUIDELOR CANDIDATE

Pentru această fază a proiectului au fost evaluate caracteristicile materialelor uleiului siliconic, a unei paste, a unui gel cosmetic și a glicerinei în Tabelul 3. Glicerina a fost testată atât în varianta pură dar și cu zeosil, cu talc și cu cenușă reziduală de centrală termică. Prin amestecarea cu aceste particule, se obțin fluide ne-Newtoniene.

#### DETERMINAREA VÎSCOZITĂȚII

Determinările au fost efectuate în labortaul de Lubrificație din UPB cu un vîscozimetru BROOKFIELD CAP 2000+. Având în vedere caracterul ne-Newtonian al unor fluide utilizate, pe lângă variația vîscozității cu temperatura, a fost determinată și variația eforturilor de forfecare cu viteza de forfecare (pentru definirea comportării reologice). Rezultatele sunt prezentate în Tabelul 3.

**Tabel 3: Lista de lichide testate**

	DENUMIRE	COMPOZITIE	SIMBOL	Densitate [kg/m <sup>3</sup> ]	Viscozitate [Pa·s]	Tensiune superficială [N/m]
MATERIALE LICHIDE	APĂ	-	APA	1000	1.005 10 <sup>-3</sup> @ 20°C	0.072
	GLICERINĂ	H-(O-CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> -OH	GLIC	1261	1.24 @ 20°C	0.064
	ULEI SILICONIC	-	USIL	800	10.24 @ 20°C	0.022
	GEL	apă, PVP/VA copolimer, carbomel, 2-bromo-2-nitropropan-1, 3-diol+, CI 19140, CI 42053, CI 16035, parfum	GEL	1040	0.545 @ 20°C	
	PASTĂ	apă, silice hidratată, sorbitol, propilenglicol, pirofosfat tetrapotasic, C14-16 de sodiu Olefin, sulfonat, gumă xantam, aromă, oxid de titan, fluorura de sodiu, zaharină sodică, allatoin, gel, clorură de zinc, limonen, CI 74160	PASTA	1540	0.835 @ 20°C	

## 4. EVALUAREA EXPERIMENTALĂ A CAPACITĂȚII DE AMORTIZARE LA VITEZĂ REDUSĂ

### 4.1. EXPERIMENTE REALIZATE LA COMPRESIUNE CU VITEZĂ CONSTANTĂ

Obiectivul acestor experimente este orientat în două direcții:

- Determinarea permeabilității dinamice a spumelor poliuretanicе;
- Determinarea performanțelor cuplului material poros - fluid.

Experimentele au fost realizate pe un stand UMT2 (Universal Material Tester - CETR – BRUKER) [1], cu soft performant de achiziție a datelor (Fig. 5).

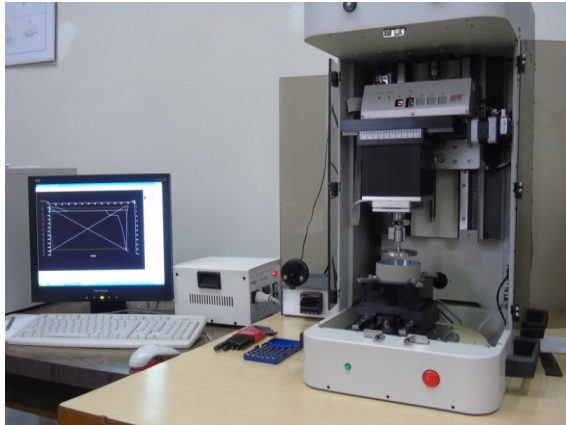


Fig.5 Standul UMT2

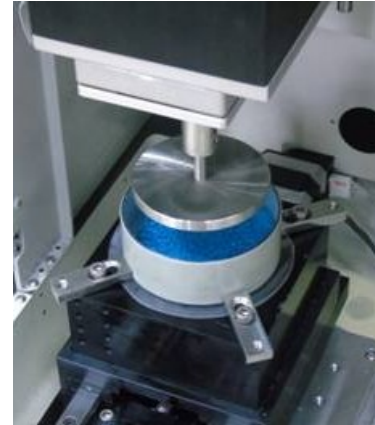


Fig.6 Detaliu al dispozitivului experimental

Au fost realizate testele de expulzare cu viteză constantă conform schemei din Fig. 6, pe două configurații geometrice de materiale poroase (spume reticulate), de formă cilindrică (plină sau inelară – Fig. 7), corespunzătoare celor două soluții concept propuse:

- Disc plin imersat în cilindrul de lucru
- Disc inelar cu rezervor central de fluid (În acest caz au fost folosite fluide cu comportament ne-Newtonian cu prag de curgere ridicat care au permis menținerea fluidului în zona centrală.

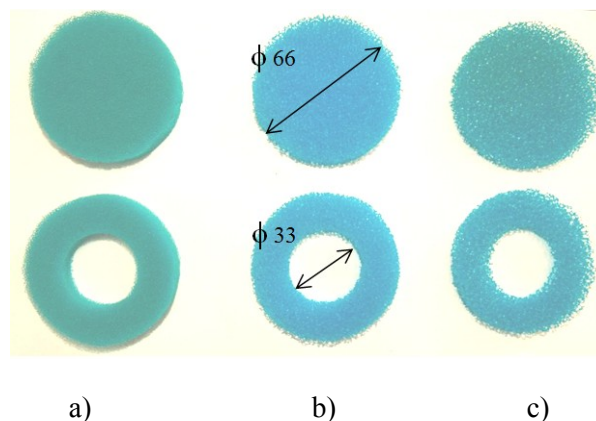


Fig.7 Geometria și aspectul materialelor poroase, a) F133, b) F280, c) F450

În timpul testelor au fost înregistrați trei parametri: forța pe direcție verticală, poziția dispozitivului care asigură deplasarea (rezultând implicit grosimea materialului poros) și implicit timpul.

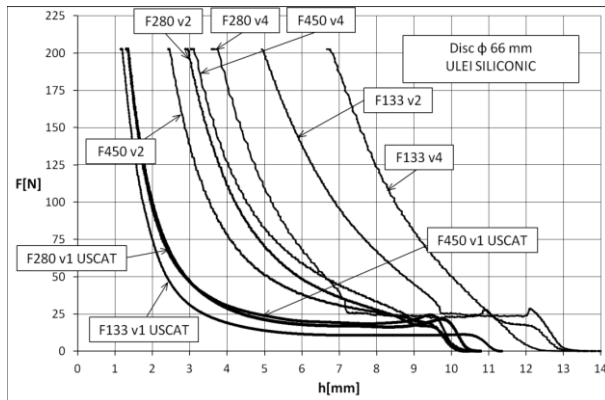
Pentru cele trei configurații au fost selectate cinci viteze, ale căror valori au fost limitate de domeniul de reglare al aparatului, și anume:  $v=1;2;4;8;10 \text{ mm/s}$ .

Testele preliminare s-au realizat cu ulei silionic, pe o configurație geometrică fără rezervor, deoarece fluiditatea acestuia nu permitea retenția în rezervor. Cunoscând vâscozitatea fluidului, rezultatele obținute

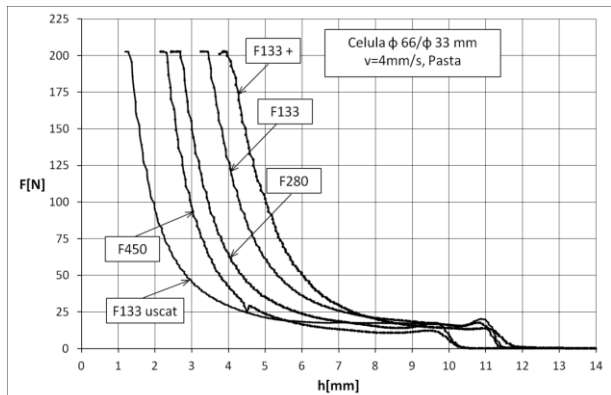
permit determinarea preliminară a permeabilității dinamice a materialelor testate. Rezultatele sunt prezentate în Fig. 8. Pentru o reprezentare mai clară s-a adoptat un cod al vitezelor  $v_1 \dots v_{10}$ , unde cifrele arată viteza în mm/s.

În setul următor de încercări s-au utilizat spumele poliuretanică imbibate cu **pasta**, ale cărei caracteristici sunt prezentate în Tabelul 3, iar geometria a fost de tip disc inelar (cu rezervor). Viteza utilizată a fost de  $v=4\text{mm/s}$  iar materialul folosit a fost F450. Pentru comparație s-au făcut și încercări cu materialul neîmbibat (uscat).

În al doilea set de încercări s-a dublat valoarea vitezei și s-au încercat succesiv cele trei materiale F133, F280, F450. Rezultatele în acest caz mult mai concludente, fiind prezentate în Fig. 9.



**Fig. 8** Compresiune la viteză constantă pentru discuri pline spume + ulei siliconic



**Fig. 9** Compresiune la viteză constantă pt discuri inelare+pasta

Se poate observa că materialul cu rezervor F133 are cea mai mare rezistență la expulzare, existând și rezervă în acest sens, deoarece la valoarea maximă a forței suportată de traductor (200N), pasta nu a traversat întreaga lățime a inelului. Asemenea rezultate vor permite configurarea optimă a celulelor pentru aplicația dată.

### EVALUAREA PERMEABILITĂȚII DINAMICE

Intenția noastră a fost de a achiziționa un permeamtru performant - soluție abandonată din lipsă finanțării suficiente. În consecință, s-a recurs la utilizarea unor soluții alternative:

(i) măsurare directă cu permeametrul axial construit în Laboratorul de Lubrificație din UPB care poate fi folosit doar cu apă sau soluții apoase și doar la diferențe mici de presiune (sub 0.3 bar); dacă presiunea redusă nu e un impediment serios, știind că permeabilitatea nu variază mult cu diferența de presiune, în schimb limitarea la fluide de vâscozitate redusă reduce mult din utilitatea dispozitivului. Experimentele pe acest dispozitiv au fost realizate doar cu apă.

(ii) măsurare indirectă prin adaptarea mașinii de testare tribologică universală (CETR UMT-2) pentru efectuarea unor teste de expulzare.

**Obiectivul** analizei experimentale a constat în determinarea comportamentului unor materiale de proase, cu două configurații geometrice de bază, supuse la compresiune și îmbibate cu mai multe tipuri de fluide. Acest studiu are la bază mecanismul de lubrificație autoportantă denumit de profesorul Pascovici ex –poro-hidrodinamic (XPHD). Acest mod de lubrificație este puternic dependent de variația porozității și permeabilității materialelor testate. Structurile utilizate în cazul de față, cu valori relative reduse ale permeabilității, pot fi approximate, pentru o modelare matematică, cu medii Darcy [2].

Pentru evaluarea permeabilității dinamice a materialelor utilizate s-a utilizat ecuația [3]:

Se utilizează valorile compactităților inițiale

și grosimile de material din Tabelul 2, și

valorile determinate experimental și sunt rezultate din experiment (Fig. 8). Rezultatele sunt prezentate în Fig. 10.

În Fig. 11 sunt prezentate comparativ rezultatele obținute cu cele patru fluide testate, în două configurații geometrice (deoarece așa cum am mai arătat uleiul siliconic și PEG nu pot fi menținute în configurația inelară). Se remarcă performanțele spumei reticulare F133, îmbibată cu pastă (V2) sau cu ulei siliconic (V1).

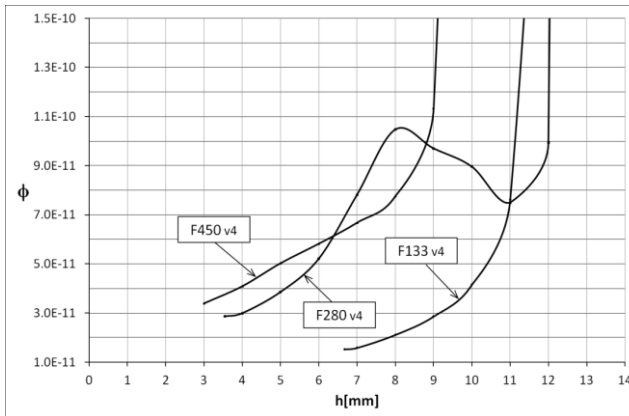


Fig. 10 Valorile permeabilității dinamice

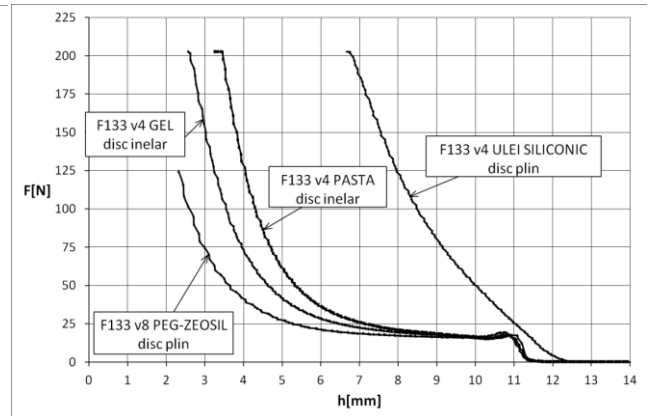


Fig. 11 Analiza comparativă a comportării fluidelor

#### 4.2. EXPERIMENTE LA IMPACT CU ENERGIE REDUSĂ

**Scopul** acestor experimente este evaluarea rapidă a cuplurilor de materiale solicitate prin șoc și determinarea combinațiilor mai avantajoase dintre materiale poroase + fluide existente. Pentru aceasta, s-au folosit un număr de materiale cu compoziții și proprietăți diferite, îmbibate cu diverse fluide, în vederea stabilirii tipului de cuplu de material ce se comportă cel mai bine la impact din punct de vedere al capacității de amortizare.

Încercările la impact a materialelor SPEC îmbibate cu fluide, au fost realizate pe standul experimental pendular de încercări la impact existent în laboratorul de Lubrificație din UPB. Experimentele preliminare au fost efectuate pe o configurație de contact cu *doi cilindri cu axele încrucișate*. În a doua serie de experimente, s-a utilizat configurațiile *sferă pe plan* (Fig. 12) și *cilindru pe plan*. În toate configurațiile, piesa impactată a fost acoperită cu un strat poros îmbibat cu un lichid.

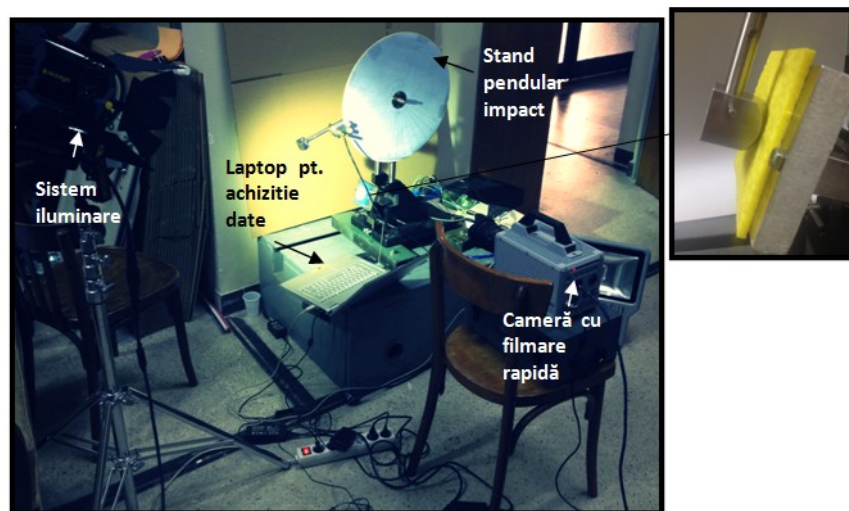


Fig. 12 Schemă aranjament experiment pentru configurația sferă / plan

Experimentul constă în măsurarea forței de impact și accelerației în timpul impactului produs de impactorul lansat de la o înălțime  $H$ , reglabilă. Traductorul de forță, solicitat la compresiune, este montat între o prisma rigidă și furca de susținere a corpului impactat. Traductorul de accelerație poate fi plasat fie pe impactor (montat perpendicular pe axul pendular deci tangent la traiectoria de cădere), fie pe corpul impactat, centrat pe placa suport. În cele ce urmează vor fi prezentate rezultatele obținute pentru configurația sferă pe plan. Scopul fiind acela de protecție al corpului impactat, s-a decis ca parametrii mășurați să fie pe corpul impactat, deci accelerometrul a fost montat, ca și traductorul de forță, în spatele plăcii. Achiziția de date s-a făcut în paralel cu filmarea cu o cameră rapidă, cu posibilitatea de a înregistra cu 5400 fps la o rezoluție de 1024x1024 pixeli. Programul de achiziție a datelor, dezvoltat în LABVIEW, oferă posibilitate de vizualizare în timp real a parametrilor mășurați și scriere acestora în fișier cu o viteză de 80000 înregistrări/s.

Alegerea testelor a fost făcută în funcție de testele preliminare realizate în perioada de raportare. În tabelul 4 sunt bifate experimentele realizate pe standul pendular de impact pentru configurația cilindrică.

**Tabel 4: Perechea material-fluid utilizate în experimentele la impact**

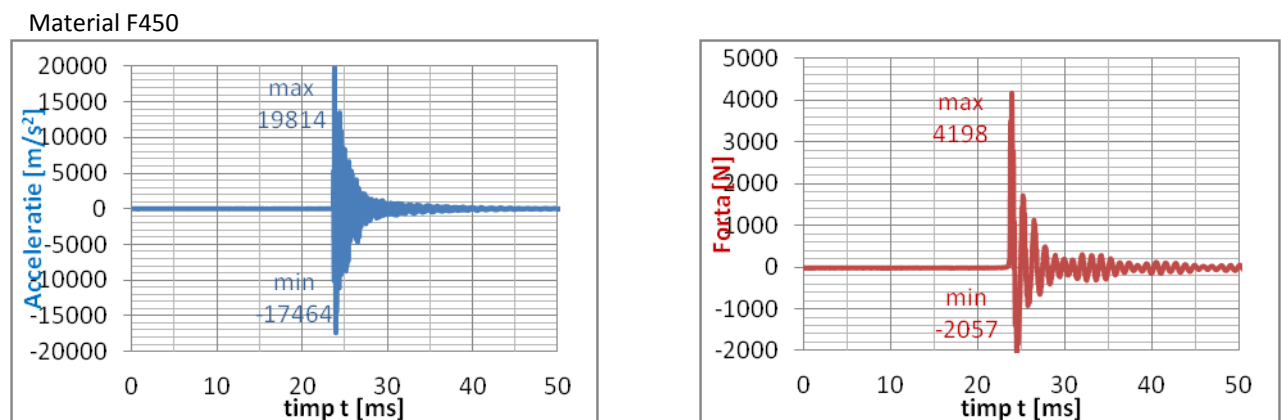
Material \ Fluid	fară fluid	apă	glicerină	ulei siliconic	gel	pastă
T03		x				
T04		x				
NT01		x	x	x	x	x
NT03		x				
NT04		x				
F133	x					x
F280						x
F450						x
S3D						x
cauciuc	x					

Materialele au fost îmbibate cu o zi înainte pentru a asigura absorția fluidului în pori. Toate testele au fost efectuate de la înălțimea  $H=200\text{mm}$ , parcurgând un arc definit de un unghi la centru de  $50^\circ$ . Viteza la impact este  $v_0 = \sqrt{2gH} = 1.98 \text{ lm/s}$ ,

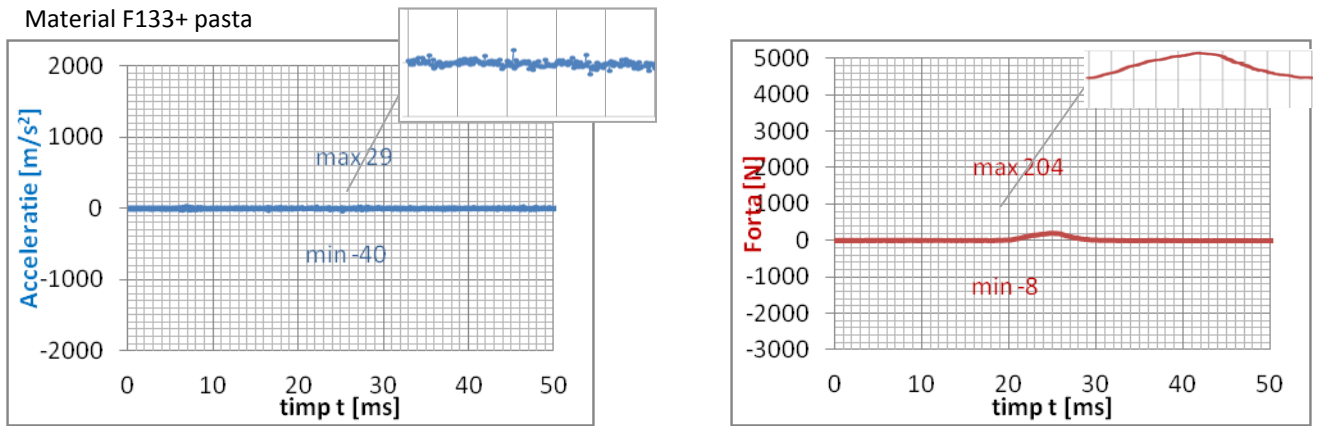
Procesarea datelor experimentale s-a dovedit a fi un proces ce necesită resurse hardware performante și totodată laborios datorită numărului mare de date experimentare (160000 citiri).

Impactul rigid, fără nici un fel de strat protector nu poate fi mășurat deoarece depășește limite maxime ale ambelor traductoare. Pentru comparație sunt prezentate rezultate obținute cu spuma F450, uscată (Fig. 13) pentru care s-au obținut cele mai mari rezultate ale accelerației și forței, arătând că un material poros neîmbibat nu se comportă deloc ca un amortizor de șocuri, rezultatele fiind nefericite.

Pentru exemplificarea capacității de amortizare, în Fig.14, este prezentat testul realizat cu materialul F133 ce a înregistrat o amortizare completă a șocului cu o amplitudă maximă a accelerației de  $69\text{m/s}^2$  (aproape insesizabilă) și a forței de 212N.



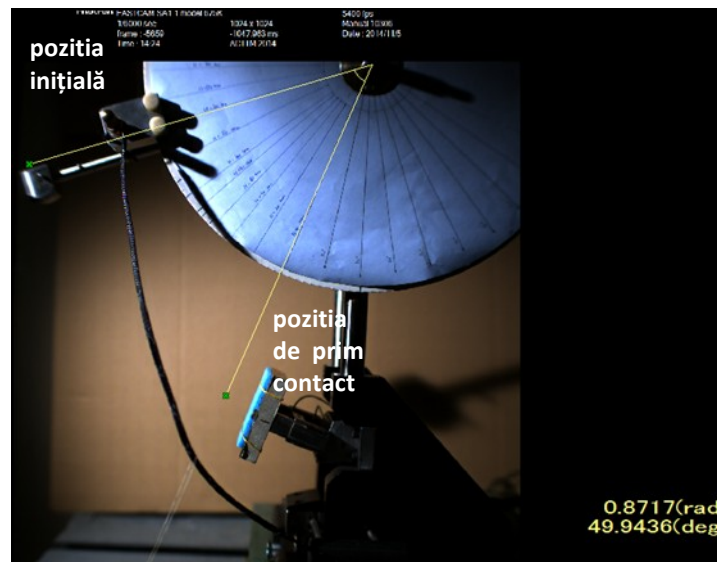
**Fig. 13 Variația accelerației și a forței la impact pentru un plan acoperit de un strat de F450 și impactat de o sferă ce cade de la  $H=200 \text{ mm}$**



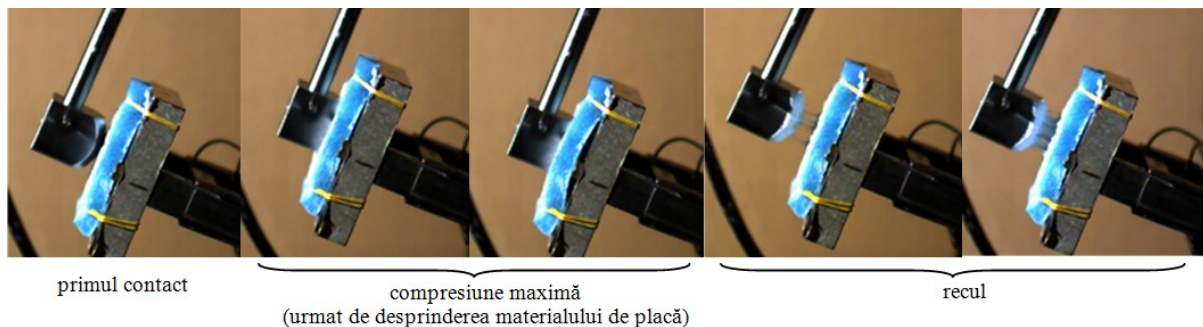
**Fig. 14 Variația accelerației și a forței la impact pentru un plan acoperit de un strat de F133 îmbibat cu pastă și impactat de o sferă ce cade de la H=200 mm**

Filmarea rapidă ne oferă posibilitatea măsurării parametrilor dimensionali și de timp ce au loc în timpul impactului, dar oferă și posibilitatea de vizualizare a impactului și evaluarea amortizării.

Din procesarea filmărilor rapide, spuma F133, îmbibată cu pastă, are un recul semnificativ (Fig. 16). Compresiunea durează aproximativ 7s, iar reculul aproximativ 100ms. Se poate observa cum pasta se lipește de pendul, fiind extrasă din material. Materialul se desprinde de pe placă datorită impactului puternic absorbit.



**Fig.15 Poziția inițială a impactorului și reprezentarea unghiului de cădere**



**Fig. 16 Impactul amortizat folosind materialul F133 îmbibat cu pastă**

Testarea unor materiale necunoscute din punct de vedere al porozității, permeabilității sau elasticității s-a dovedit a fi o abordare cu rezultate rapide privind capacitatea de amortizare a materialelor poroase datorită simplității standului experimental și al timpului necesar pentru experimente. Astfel, se poate continua cu

studierea mai în detaliu a materialelor țesute, nețesute și spume ce au prezentat capacitatea cea mai mare de amortizare.

În Fig. 17 sunt prezentate valorile accelerației și forței maxime înregistrate pentru toate testele efectuate. Pentru a înlătura influența grosimii stratului și a porozității materialului, doi indicatori relativi au fost propusi, folosind grosimea inițială  $h_0$  și porțiunea solidă  $h_0 \cdot \varepsilon_0$ . Spumele F280 și F450, datorită rezultatelor proaste au fost scoase din comparație. În funcție de aceste criterii de selecție, s-au remarcat cupluri materiale - fluide, în ordinea performanțelor:

- $a_{max}$ : F133+pastă, S3D+pastă, NT01+ulei siliconic;
- $F_{max}$ : F133+pastă;
- $F_{max} \cdot h_0 \cdot \varepsilon_0$ : NT01+ulei siliconic, F133+pastă, S3D+pastă, NT01+apă+glicerină;

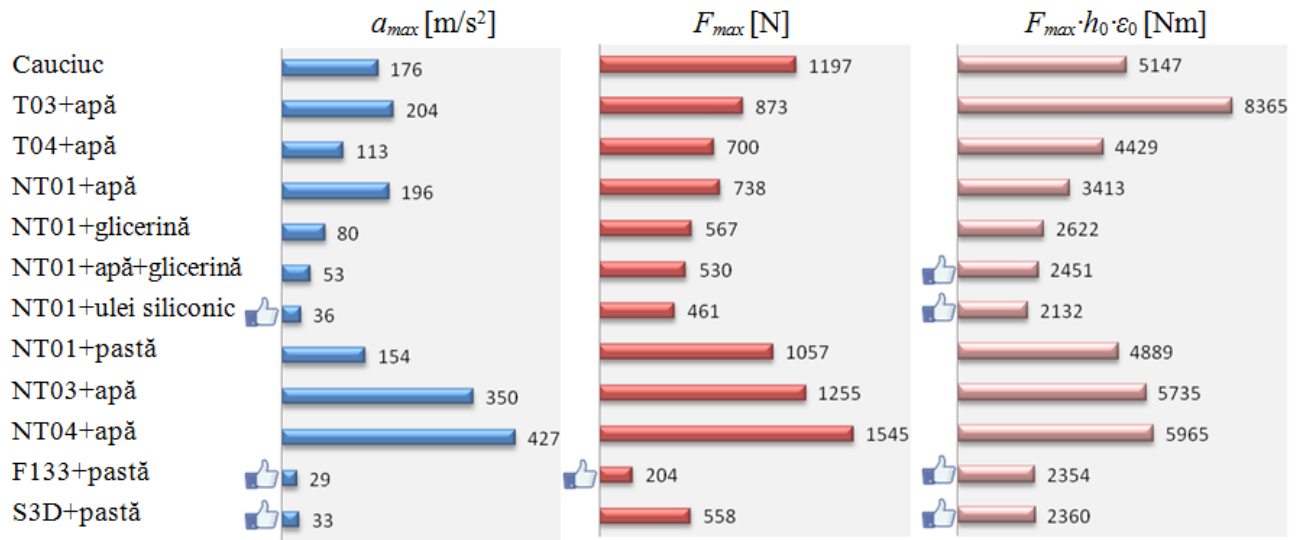


Fig. 17 Grafic comparativ al valorilor maxime obținute în urma testelor la impact

## 5. SIMULAREA CONDITIILOR EXPERIMENTALE DIN POLIGON

Deoarece experimentele în condiții reale (în poligon) sunt dificile și foarte costisitoare sunt necesare simulări numerice pentru definirea unor "experimente numerice" și în vederea dezvoltării unei metode eficiente pentru evaluarea performanței. Utilizarea materialelor poroase în sisteme de protecție la unde de șoc este o soluție inovativă a cărei potențial va fi evaluat cu ocazia activităților de cercetare desfășurate pe durata acestui proiect.

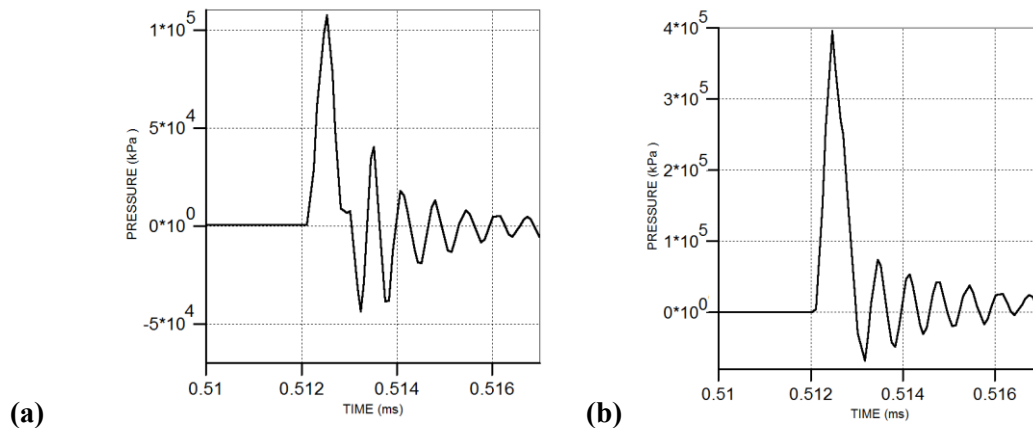
Modelul numeric la explozie a fost dezvoltat pentru cazul a două plăci plan paralele de 60mm lățime și 2 mm grosime supuse efectelor unei explozii în aer și este bidimensional. Modelul analizat la impact, inspirat de standuri de impact de tip tun Taylor sau bară Hopkinson, este compus din două plăci circulare (una incidentă și cealaltă martor) din Al cu diametrul  $\varphi=200\text{mm}$  și grosimea  $g=5\text{ mm}$ . Plăcile au 3 grade de libertate. Experimentele numerice la explozie au fost realizate pentru 5 configurații apropiate de soluțiile concept propuse pentru SAC care prevăd includerea unor straturi protectoare formate din medii poroase imbibate cu fluide, în structuri funcționale de protecție balistică: (i) plăci separate doar de un strat de aer – model etalon; (ii) plăci separate de un strat de apă; (iii) plăci separate de un strat de spuma poliuretanică uscată, (iv) model cu fire intercalate și aer și (v) model cu fire intercalate și apă. La impact au fost făcute determinări pentru primele trei configurații.

Testele au fost realizate în două variante de impact:

- impact cu unda de șoc, obținută cu o detonație produsă de 0,1 kg de exploziv plasat la o distanță de  $D=700\text{ mm}$  de plăci; s-a ales explozia în aer pentru a reduce intensitatea presiunii reflectate.
- impact pe direcția normală la placă cu impactor cilindric de diametru  $\varphi=60\text{mm}$  și viteza  $v=30\text{m/s}$ .

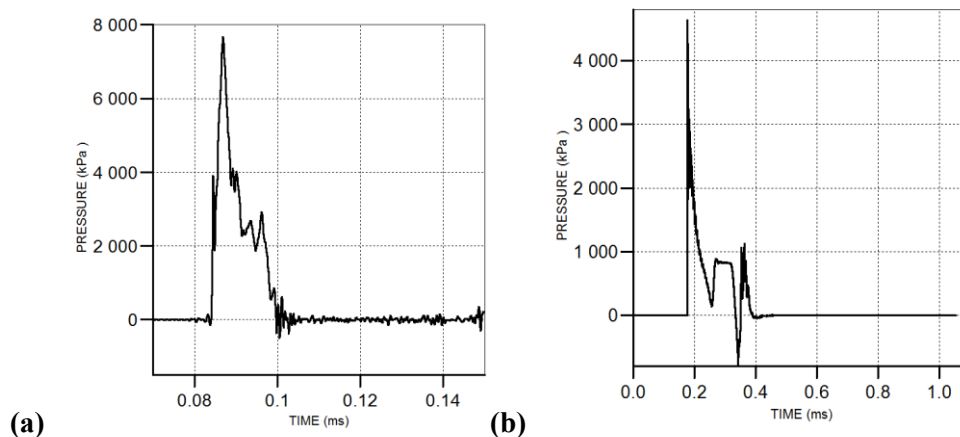
Scopul simulărilor numerice, realizate cu pachetul software AUTODIN este evaluarea capacității de amortizare pentru unda incidentă neperturbată generată de explozie prin intermediul variației suprapresiunii calculate.

Efectul de amortizare al celor două modele analizate –(ii) și (iii) -este pus în evidență prin analiza comparativă cu modelul etalon -(i). În graficul din Fig. 18 se poate observa unda de suprapresiune incidentă măsurată în placa martor în zona centrală și la extremitate pentru interstițiul de aer. Aceste determinări vor fi folosite ca referință.



**Fig. 18 Rezultate numerice la explozie - placi parale cu strat de aer, (a)- placa incidentă (b)placa martor**

Fig. 19 prezintă variația suprapresiunii generată de unda de soc asupra plăcii martor, în condițiile unui strat de amortizare plasat între plăci din (a) apă, respectiv (b) spumă poliuretanică. Rezultatele arată că aceste materiale au proprietăți intrinseci de amortizare, care conduc la reducerea presiunii maxime de 50 de ori (în cazul apei) respectiv de circa 100 de ori în cazul spumei. Pentru spuma poroasă, valoarea maximă a suprapresiunii la impact a suferit o amplificarea comparativ cu valorile etalon.



**Fig. 19 Suprapresiune la explozie determinată pentru placa martor pentru apă (a) și spumă (b)**

Ținând cond de rezultatele prezentate mai sus, se poate intui că o combinație de material poros și apă poate diminua cumulat intensitatea suprapresiunii la explozie. În acest sens a fost construit un model cu interstițiu din straturi succesive de fire intercalate [4] care simulează un model simplu de material poros îmbibat cu aer și altul cu apă. Rezultatele sunt prezentate în Fig. 20. Se observa atenuarea suplimentară a presiunii maxime.

Din analiza rezultatelor experimentelor numerice se pot extrage următoarele concluzii. Materialul poros de tip spumă a modificat atât valoarea maximă a suprapresiunii cât și durata impulsului. Pentru comportamentul undei de suprapresiune la trecerea prin apă s-a putut observa că efectele sunt asemănătoare. Rezultatele determinate pentru modelul cu straturi de fire și apă, reprezentativ pentru un material poros îmbibat cu lichid, evidențiază rezultatul efectelor cumulate pentru spumă poroasă și apă. Suprapresiunea măsurată în placa martor suferă atenuări atât în intensitate cât și în durata impulsului. Simularea numerică a evidențiat o modificare a profilului curbei suprapresiunii funcție de tipul materialului plasat în interstițiul dintre placi. Modelul numeric necesită îmbunătățiri în zona de modelare a mediului poros îmbibat prin folosirea datelor

experimentale obținute în condiții de laborator în cadrul UPB. Puterea redusă de calcul a sistemelor hardware utilizate necesită identificarea de noi soluții în cea ce privește construcția mediului poros utilizând modele bidimensionale cu structuri simplificate de tip canale de diametre mici sau microsferice.

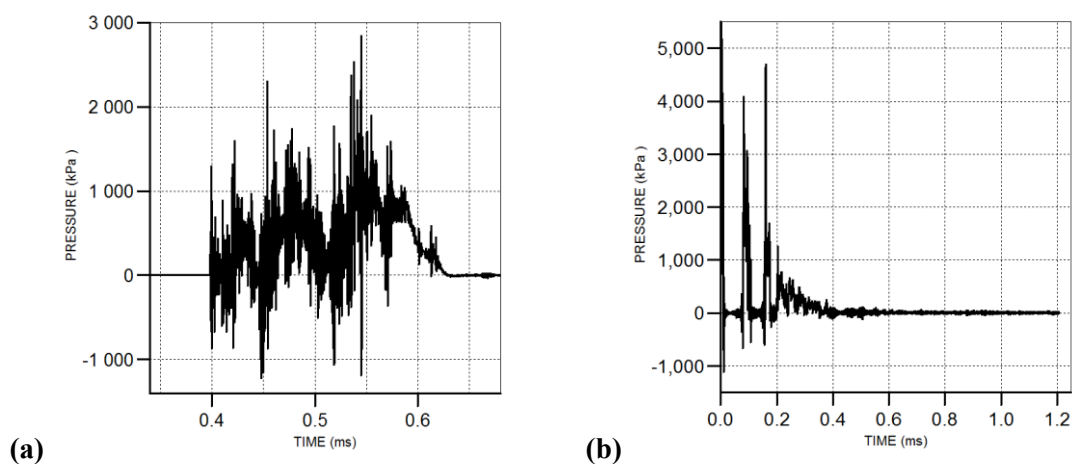


Fig. 20 Suprapresiunea determinată la explozie pentru strat de fire cu aer (a) și cu apă (b)

## 6. CONCLUZII GENERALE

- 1) Materialele selecționate pentru experimentele viitoare sunt spumele reticulate cu permeabilitate redusă.
- 2) Fluidele cu vâscozitate ridicată, precum uleiul silionic, pot fi utilizate pentru soluțiile SAC-V1.
- 3) Fluidele utilizabile la soluțiile SAC-V2 (cu rezervor) trebuie să fie de tip viscoplastic (pastă sau gel) cu valoare ridicată a pragului de curgere.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] \*\*\* UMT User's Manual, Center For Tribology 1715 Dell Ave, Campbell CA 95008, USA
- [2] Scheidegger A.E., 1974, „The physics of flow through porous media”, a 3-a editie, University of Toronto Press;
- [3] Ilie, M., B., Capacitatea de amortizare a straturilor poroase, foarte compresibile, îmbibate cu lichide, pentru configurații cilindrice, teză de doctorat, București, 2011.
- [4] Dawson, M.A., 2009, Composite plates with a layer of fluid-filled, reticulated foam for blast protection of infrastructure, Int. J. of Impact Engng., 36, 1288-1295;

## DISEMINAREA REZULTATELOR

O parte din rezultatele experimentale realizate pe standul pendular de impact au fost diseminate în cadrul a celei de a 8-a Conferințe de Tribologie BALKANTRIB '14, ce a avut loc în perioada 30.10-1.11.2014 la Sinaia, România, prin lucrarea "Experimental determination of the damping capacity of highly compressible porous materials imbibed with water" (Determinarea experimentală a capacității de amortizare a materialelor poroase extrem de compresibile îmbibate cu apă), autori - Mihaela Radu și Traian Cicone.