

Program PN III

Programul 2 - Creșterea competitivității economiei românești prin cercetare, dezvoltare și inovare,

Contract nr. 44PTE/2020

Căști de protecție echipate cu componente de amortizare din materiale poroase îmbibate cu nanofluid- DAMPCEL

Etapa de execuție 2021

INTRODUCERE

Etapa a doua a proiectului reprezintă un nou pas în vederea îndeplinirii obiectivului final de fabricare a produsului cască de protecție echipată cu componente de amortizare din materiale poroase îmbibate cu nanofluid ca prototip industrial de serie mică. Cu acest scop, activitățile desfășurate au urmărit continuarea testării celulelor flexibile în condițiile utilizării unei noi soluții tehnologice de fabricație pe bază de lipire a unei membrane de capsulare folosind curenți de înaltă frecvență.

Perechi de material și fluid au fost evaluate inițial din punctul de vedere al fabricației, pentru a evidenția eventuale incompatibilități, și apoi din punct de vedere experimental, pentru a determina capacitatea de amortizare. În analiză au fost incluse atât spume moi din poliuretan cât și textile tridimensionale (pe scurt Spacer 3D), cele din urmă prezentând un potențial mai mare datorită structurii mai rigide. Au fost testate atât celule independente cât și perechi de celule conectate printr-un canal de comunicare.

După testarea celulelor, a fost proiectat un sistem complet de protecție pentru cap, bazat pe membrana și textile tridimensionale îmbibate cu soluție de glicerină, care să echipeze o cască de protecție balistică din kevlar. Mai multe celule flexibile au fost asamblate pentru a forma o matrice de celule care să ofere atenuarea impactului cu un glonț.

ACTIVITATEA II.1 Realizarea de experimente pe un număr relevant de modele

În vederea evaluării experimentale a capacității de amortizare a celulelor flexibile, au fost fabricate o serie de șase tipuri de celule. Pentru fabricare a fost utilizată o nouă soluție tehnologică, bazată pe lipirea membranei cu curenți de înaltă frecvență.

Pentru fabricarea celulelor flexibile au fost utilizate atât textile tridimensionale -S3D- (doua modele abreviate cu S3D-1 și S3D-2) cât și spume din poliuretan. Pentru îmbibare a fost utilizată o soluție de glicerina și zeosil cu comportament ne-Newtonian.

Configurația aleasă pentru **celulele de amortizare** a presupus utilizarea unor seturi de celule interconectate prin canale de comunicare, astfel încât să se permită evacuarea fluidului expulzat la comprimarea unei celule către celula sau celulele situate în vecinătatea celei comprimate. Celulele de amortizare (fig. 1) constau dintr-un material poros îmbibat cu fluid, încapsulat în interiorul unui material impermeabil (membrana). S-au considerat pentru perechea material poros – fluid următoarele combinații:

- Spacer S3D-1 – glicerină;
- Spacer S3D 2 – glicerină;
- Filtren – glicerină.

Dintre cele 3 perechi de materiale candidate, cea care a prezentat cea mai bună comportare în urma încapsulării a fost perechea Spacer S3D-1– glicerina. Datorită structurii sale de tip „sandwich”, ranforsata cu fire de poliester țesute între cele două fete, materialul poros S 3D-1 a rezistat mai bine la compresiune, fără să sufere o deformare (aplatizare) vizibila în urma încapsulării.

În ceea ce privește utilitatea practica a glicerinei ($C_3H_8O_3$), aceasta s-a remarcat în urma unor serii de analize efectuate asupra mai multor fluide, testate atât în cadrul prezentului contract, cât și în cadrul activităților de cercetare derulate anterior. Glicerina reprezintă un candidat adecvat aplicațiilor din cadrul actualului contract, fiind un fluid non-toxic, ușor de procurat și avantajos din punct de vedere economic. Cu toate acestea, prezintă și un inconvenient: caracterul higroscopic, care face ca viscozitatea să scadă în timp sensibil, dacă este în contact cu atmosfera.

Efectul de amortizare al celulelor experimentale (fig.1.1) depinde în mod direct de viscozitatea fluidului utilizat la îmbibarea materialului poros. Este cunoscut faptul ca viscozitatea are o variație invers proporțională cu temperatura în cazul lichidelor (ajungând la aproximativ jumătate din valoarea inițială pe parcursul unei încălziri cu aproximativ 10°).

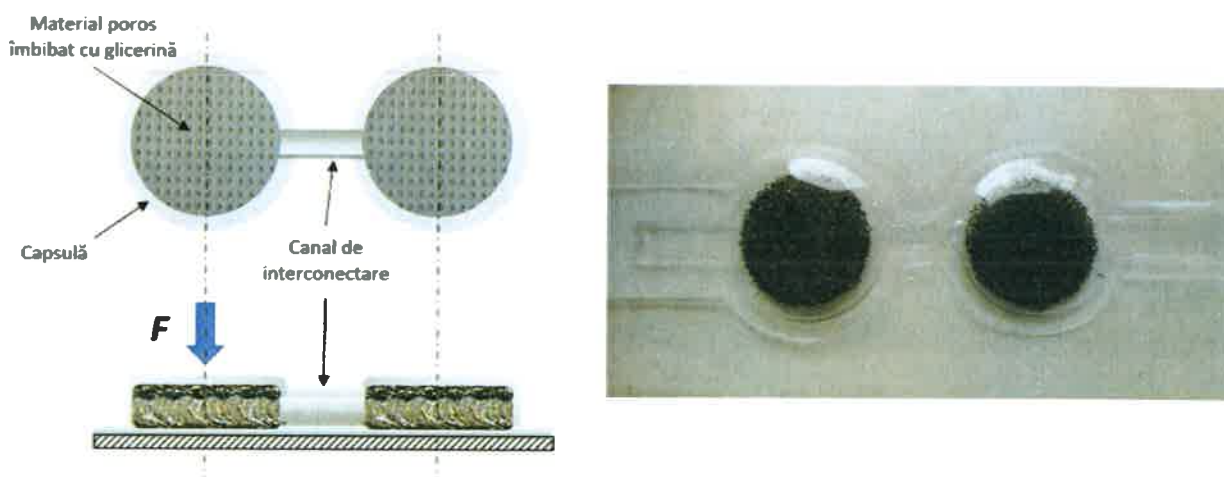


Fig. 1.1 *Celule de amortizare interconectate*

În cazul glicerinei, viscozitatea nu variaza doar cu temperatura, ci este puternic influentata și de continutul de apă din compozitia acesteia, care crește în timp pentru glicerina expusa în atmosfera. În acest scop, s-au efectuat masuratori pe infrastructura din cadrul Laboratorului de Tribologie al Departamentului Organe de Masini și Tribologie (OMT) din Universitatea Politehnica din București (UPB). Acestea au permis determinarea variației viscozității glicerinei cu temperatura, dar și a noului procent de apă din compozitia glicerinei. Cum dotarea actuala a laboratorului nu a permis masurarea exacta a continutului de apă din glicerina, studiul reologic a inclus și o analiza a unor serii de rezultate de referință din literatura de specialitate.

Procedura experimentală

1. S-au realizat o serie de masuratori pe doua viscozimetre rotative cu cilindri coaxiali – Anton Paar Visco QC300 și Ofite 900 – la temperaturi diferite și distante temporale semnificative.
2. S-a determinat densitatea glicerinei la temperatura camerei (26°C) cu ajutorul unui densimetru ROTH.
3. Comparand punctele obținute experimental pentru viscozități cu rezultatele din literatură (fig1.2), s-au estimat doua posibile procentaje ale apei continute de glicerina testata.

4. Ținând cont de temperaturile din timpul experimentelor, s-au selectat din tabelele cu date experimentale din literatura^{1 2} două temperaturi (T) corespunzătoare extremităților plajei de valori de interes ($20^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$) pentru glicerina, și viscozitățile dinamice (η) aferente acestora. S-a procedat în mod similar pentru densitate (ρ), acestea fiind ulterior necesare pentru calculele de la punctul 5.

5. S-au interpolat în baza standardului ASTM D341 valorile intermediare ale viscozităților cinematice (ν) aferente plajei de valori de interes pentru temperatura, și s-au trasat două curbe, corespunzătoare unor concentrații de 6%, respectiv, 7% apă. Viscozitățile cinematice au fost determinate cu ajutorul viscozităților dinamice și a densităților obținute anterior: $\nu = \frac{\eta}{\rho}$.

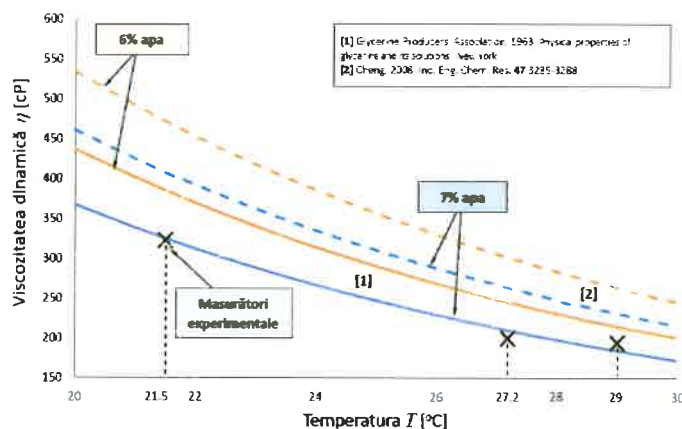


Fig.1.2 Variația viscozității cinematice a glicerinei cu temperatura

Fabricația celulelor interconectate

Într-o primă etapă, s-a considerat utilizarea unei configurații simple, de tip celule-pereche, interconectate prin intermediul unui canal care să asigure comunicarea între cele două celule. Formarea canalului necesită o atenție ridicată la realizarea ulterioară a lipiturilor. Astfel, pentru a asigura un debit controlat de lichid, s-au considerat două configurații pentru canalul de interconectare a celulelor: simplu (fig.1.3a), sau dotat cu un tub de comunicare (fig.1.3b).

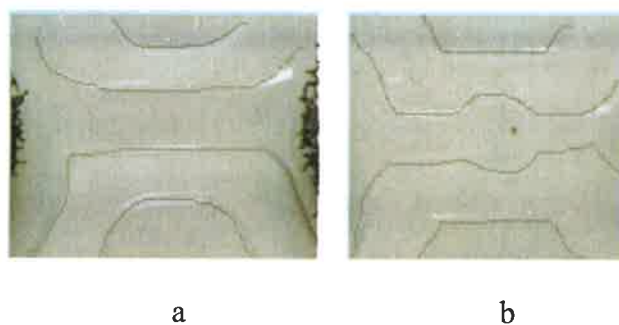


Fig.1.3 Variante constructive celule amortizare tip pereche

În scopul realizării fizice a celulelor de amortizare, a fost necesară proiectarea unei matrite (fig.1.4a). Matrita a fost creată pe baza unor desene 2D (fig.1.4b) realizate cu ajutorul unui software de proiectare asistată de calculator (CATIA V5), ținându-se cont de limitările dimensionale ($200 \times 700 \text{ mm}$) ale dispozitivului pentru lipit cu curenți de înaltă frecvență pe care matrita a fost montată ulterior.

¹ Glycerine Producer's Association, 1963, Physical properties of glycerine and its solutions, New York

² Cheng, 2008, Ind. Eng. Chem. Res. 47 3285-3288



a



b

Fig.1.4 *Matrița utilizată la fabricarea celulelor de amortizare*

Pentru crearea celulelor experimentale propriu-zise, matrița a fost inițial presată superficial pe unul dintre cele două straturi de material impermeabil, utilizate la încapsularea perechii material poros - fluid, atât cât să creeze o „amprentă” care să deservească la determinarea amplasamentului materialelor poroase din interiorul capsulei. După realizarea amprente, materialele poroase tăiate în prealabil pe dimensiunile corespunzătoare (s-a utilizat un dispozitiv de tăiere cu laser (fig.1.5) pentru a reduce distrugerea la margini a eșantioanelor) au fost plasate pe urmele fine lăsate de matriță pe primul strat al capsulei.



Fig.1.5 *Tăierea cu laser a eșantioanelor de material poros*

Următorul pas a constat în plasarea celui de-al doilea strat de material impermeabil peste cel deja existent, ținând cont că discurile poroase să nu se deplaseze din pozițiile corespunzătoare, și presarea completă a matriței asupra ansamblului format din cele două straturi de material plastic („capsula”) și discurile din material poros. Este important de menționat faptul că matrița a fost proiectată într-o manieră care să nu sigileze complet celulele, astfel încât să permită umplerea lor ulterioară cu fluid.

După eliminarea excesului de material plastic din jurul celulelor, acestea au fost umplute individual cu glicerina cu ajutorul unei seringi cu ac hipodermic (fig.1.6), nivelul de îmbibare fiind cuprins între 50-70%. După realizarea umplerii, celula a fost sigilată complet în zona canalului de umplere cu ajutorul unui dispozitiv cu ultra-sunete.



Fig.1.6 Umplerea cu fluid a celulelor

În vederea evaluării experimentale la impact a celulelor flexibile pentru identificarea perechii candidat de material poros și fluid, a fost planificată o serie de teste experimentale împărțite în trei faze, în acord cu desfășurarea proiectului:

- FAZA 1 – Testare perechilor de materiale candidate (material poros + fluid) pe standul de laborator cu cădere liberă
- FAZA 2 – Materiale candidate - Testarea pe Tun Taylor
- FAZA 3 – Prototip CASCĂ – Testarea pe Tun Taylor

Testare pe stand cu cădere liberă ("drop tower")

În această etapă de testarea a celulelor flexibile s-a urmărit evaluarea inițială a capacității de amortizare la impact pe standul din cadrul UPB tip "drop test" a unor perechi de materiale poroase și fluide compatibile cu tehnologia de fabricație utilizată și cu potențial ridicat de amortizare.

Testarea a urmărit evaluarea comparativă a celulelor pentru energii de impact relativ mici folosind o greutate de 482g (fig.1.7) și diferite înălțimi de cădere de sub 1m.

Standul experimental este de tip "drop tower". Acesta asigură o cădere liberă controlată a impactorului printr-un tub și se neglijează eventualele frecări la deplasarea în interiorul tubului. Tubul este transparent și orientat vertical. Impactorul are o configurație adecvată contactului cap-cască, respectiv o suprafață sferică, cu o rază mare de curbură și este format din corp de impact, disc de ghidare și un șurub care le assemblează. Masa impactorului poate fi modificată prin înlocuirea corpului sau a discului.



Fig.1.7 Celula impactată

Măsurarea forței la impact este realizată cu ajutorul unui senzor de forță piezoelectric prestrâns între doi cilindri groși, la rândul lor prinși de baza standului.

În configurația actuală, standul experimental este echipat cu un senzor de forță de 35kN, dar care are și o scară secundară de măsurare mică, în intervalul 0...3.5kN, aceasta fiind foarte utilă în cazul impacturilor de mică energie. Măsurarea forței se poate face corelat cu deplasarea/deformația corpului lovit cu ajutorul unui senzor laser de măsurare a distanțelor într-un domeniu îngust de 20mm dar cu o precizie de 20μm și o frecvență mare de achiziție a datelor (sampling rate de până la 2.55μs).

Testare pe tun "Taylor"

Această activitate experimentală (Faza 2) continuă testarea în condiții mai severe de impact pe un tun cu gaz (tun Taylor – fig.1.8) a perechilor de materiale candidate în două configurații:

-contact plan: impactul are loc pe celula testată folosind o suprafață plană (indentor plan/placa intermediară de kevlar plană). Această configurație va permite compararea calitativă a perechilor de material/fluid candidate și selectarea celei mai performante.

-contact sferic: impactul are loc pe o țință cu suprafață sferică echipată cu o celula de amortizare. Această configurație va permite compararea calitativă a perechilor de material/fluid candidate și rezolvarea problemelor de instrumentare a tunului în vederea unui contact pe o suprafață sferică.



Fig.1.8 Tunul pneumatic în faza de asamblare

Pentru imprimarea vitezei de impact a proiectilului s-a folosit un tun cu aer comprimat, declanșarea mișcării proiectilului fiind controlată cu ajutorul unei electrovalve. Prin încărcarea rezervorului la diferite presiuni inițiale s-a variat și viteza de impact a proiectilului. Proiectilul din aluminiu, cu masa de 0,76 kg, a fost prevăzut cu un cap plat/cilindric, detașabil.

Eșantioanele au fost prinse cu o bandă adezivă de un corp rigid cu suprafață plană/cilindrică, fiind așezate în dreptul gurii țevii tunului. Montura corpului rigid a fost astfel concepută, încât acesta s-a sprijinit pe durata testului pe un traductor de forță PCB model 200C20. Mișcarea traductorului pe timpul testului a fost blocată prin montarea sa pe un bloc port-țință masiv, care a fost la rândul său fixat cu șuruburi de profilul I, pe care era montat tunul. Configurația experimentală este prezentată în fig.1.9



Fig.1.9 Vedere de ansamblu cu pregătirea echipamentelor pentru teste



Fig.1.10 *Cap de impact și țintă pentru impactul plan*

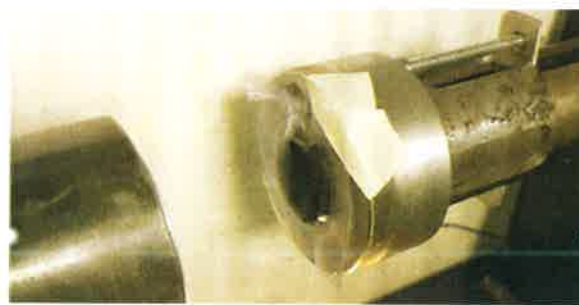


Fig.1.11 *Montarea celulei de atenuare pe ținta plană*

Pe durata fiecărui test s-a înregistrat forța măsurată de traductor cu ajutorul unei plăci de achiziție Picoscope seria 6000. Pentru determinarea vitezei de impact s-a folosit o cameră de filmare ultrarapidă marca PHOTRON, la o rată de filmare de 50.400 de cadre pe secundă. Pe lângă lumina naturală s-au folosit surse de lumină artificială de mare putere.

Conform studiilor antropometrice craniul uman la bărbați are o dimensiune medie pe direcția față-spate de 176 mm iar pe direcția stânga – dreapta de 145 mm, vezi Fig.1.12. Pentru testarea celulelor în condiții de funcționare pe suprafață curbă s-a adoptat dimensiunea minimă medie specificată anterior.

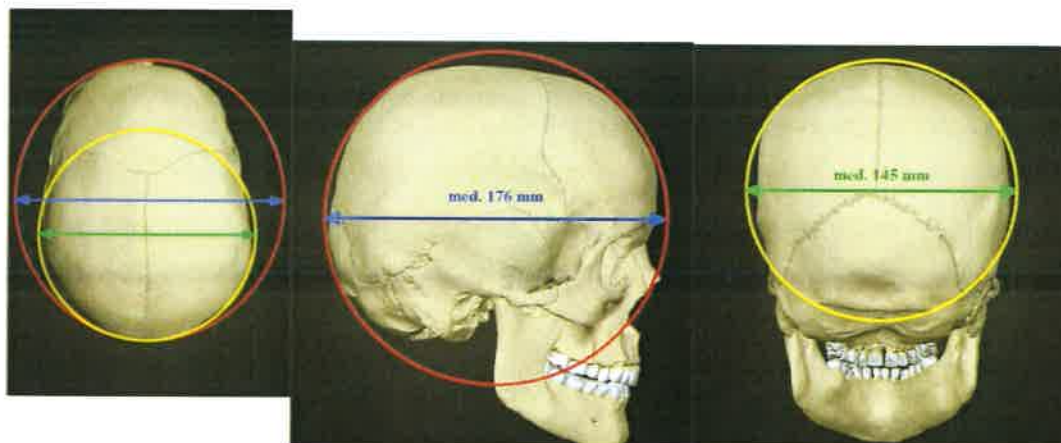


Fig.1.12 *Dimensiunile medii ale craniului (bărbați) pe direcțiile față-spate și stânga-dreapta*

Eșantionul s-a fost dispus pe o țintă rigidă în componența căreia s-a introdus un senzor de forță PCB 200C20 – 20000 LBF. Atât ținta rigidă cât și impactorul, propulsat prin mijloace pneumatice, au fost confecționate ca ansambluri realizate din componente interschimbabile pentru a permite trecerea facilă de set-up-ul de impact plan la set-up-ul de impact pe suprafață sferică (fig. 13 și 14). Capul de impact concav și ținta convexă sunt suprafețe sferice având o rază de 72,5 mm (fig. 13 și 14). Opțional impactorul poate fi prevăzut cu un accelerometru montat în partea posterioară. În vederea planificării activității de testare s-a întocmit o procedură operațională codificată POLTEDIN-07 în care s-a stabilit modul de utilizare a echipamentului de laborator pe durata efectuării testelor.



Fig.1.13 Proiectil cu cap sferic concav (stânga) și cu cap plan (dreapta)



Fig.1.14 Țintă plană (stânga) și cu suprafață sferică convexă (dreapta)

Activitatea II.2 Prelucrarea datelor experimentale si modelarea fenomenelor observate, compararea cu rezultate similare, evaluarea limitelor si a soluțiilor de îmbunătățire (dimensiunile si poziționarea capsulei, modul de fixare)

Rezultatele obținute la impact pe standul "drop tower"

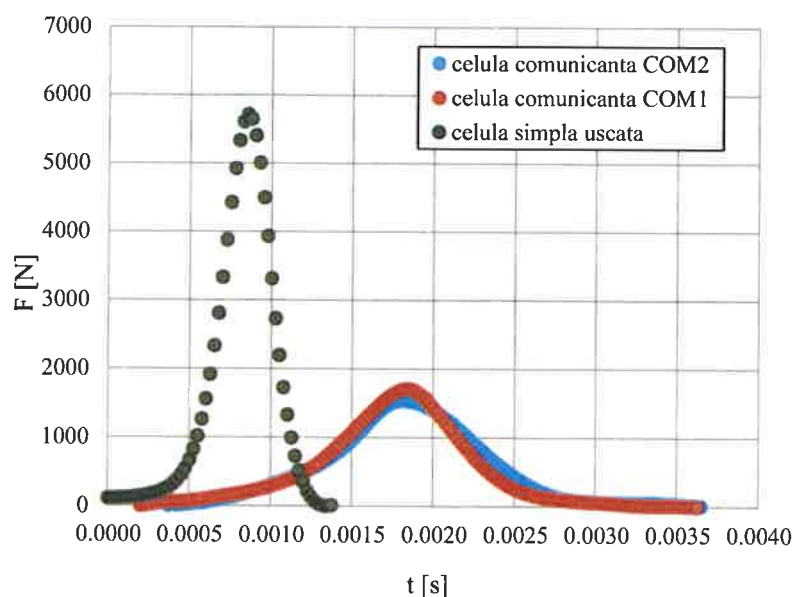


Fig.2.1 Forța generată la impact pentru o celulă uscată și celule comunicante cu canal simplu (COM1) și cu tub de comunicare (COM2)

Pe standul experimental "drop tower" din cadrul UPB au fost evaluate atât celule simple în stare uscată sau îmbibate cu soluție glicerină și zeosil, cât și celulele în configurațiile noi cu canal comunicant. Pentru celulele comunicante, impactul a fost realizat pe o singură celulă pentru a pune în evidență capacitatea acestora de a comunica cu cealaltă conectată. În fig. 2.1 de mai jos sunt

prezentate o serie de rezultate la impact și se poate observa că celulele cu canal comunicant au o capacitate ridicată de a reduce forța de impact, comparativ cu o celulă uscată.

Modelul teoretic pentru simularea comportamentului unei perechi de celule identice, interconectate în condițiile unui impact asupra unei celule

Pe baza soluțiilor numerice ale modelului propus este posibilă optimizarea gradului de îmbibare a celulelor. Modelul fizic (fig.2.2) presupune utilizarea unor celule de forma circulară, ermetizate cu o folie deformabilă, inelastică și rezistentă.

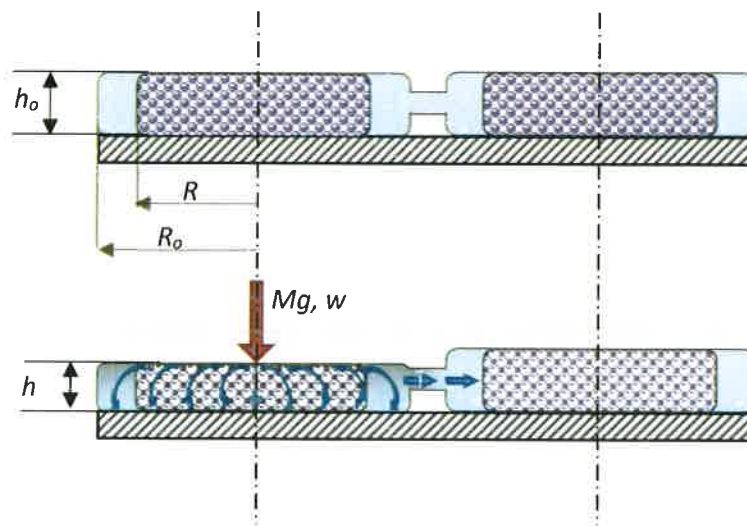


Fig.2.2 Modelul de principiu al mecanismului de reacție la impact al unei perechi de celule interconectate.

Se consideră că una dintre celule este impactată de o masă, M , cu viteza w , prin intermediul unei suprafețe plane (ipoteza susținută de situația reală, când casca rigidă acționează pe o suprafață desfășurată relativ plană). Fie R raza materialului cu porozitatea ε_0 și grosimea inițială h_0 , îmbibat complet cu un fluid de vâkozitate η . Se definește gradul de umplere al unei celule k_f ca fiind raportul dintre volumul materialului poros și volumul total al celulei, $k_f = (R/R_0)^2$, unde R_0 este raza exterioară a celulei. Cele 2 celule comunică printr-un canal de diametru d_0 și lungime l_0 .

Volumul inițial (total) de gaz din sistemul celor două celule (ambele celule + canalul de comunicare) se determină cu relația:

$$V_{gaz} = 2\pi h_0 (R_0^2 - R^2) + \frac{\pi d_0^2}{4} l_0 \quad (1)$$

Prezentul model se bazează pe ipotezele lubrificației XPHD³, respectiv:

- fluid ne-Newtonian, în curgere laminară și izotermă;
- suprafața transversală a materialului poros nu se modifică prin comprimare;
- variația permeabilității cu porozitatea este dată de legea Kozeny-Carman;
- aerul din celulă se comportă ca un gaz ideal, care în condiții izoterme, conduce la ecuația $pV=ct$, forma simplă a ecuației Boyle-Mariotte.

³ T. Cicone, et al., Optimal porosity for impact squeeze of soft layers imbibed with liquids, Tribology International, 138 (2019), 140–149

Efectul impactului asupra celulei 1 poate fi analizat in doua faze:

Faza 1: comprimarea celulei 1 conduce la expulzarea totala a gazului inspre celula 2, concomitent cu presurizarea acestuia.

Faza 2: comprimarea in continuare conduce la curgerea fluidului expulzat prin canalul de comunicare, concomitent cu comprimarea suplimentară a gazului în celula 2.

In timpul comprimării, presiunea gazului (aerului) creste; calculul volumului de gaz, $V(h)$, corespunzător unui nivel de comprimare h se poate face cu doua ipoteze:

(i) grosimea celulei impactate rămâne nemodificata in zona inelara din exteriorul discului poros

$$V(h) = V_{gaz} - \pi R^2 (h_0 - h) \quad (2')$$

(ii) impactul produce comprimarea celulei pe toata suprafața acesteia:

$$V(h) = V_{gaz} - \pi R_0^2 (h_0 - h) \quad (2'')$$

Având in vedere dimensiunea redusa a canalului de comunicare, o prima analiza neglijează contribuția acestuia la volumul de gaz.

Presupunând presiunea inițiala in celula p_0 si volumul de gaz din sistem se poate determina presiunea gazului din ambele celule, ținând cont de comprimarea materialului poros, pe baza legii gazului ideal:

$$p_g(h) \cdot V(h) = p_0 \cdot V_{gaz} \quad (3)$$

Daca se considera a doua ipoteza de comprimare, din combinarea ecuațiilor (2) cu (3) rezulta presiunea gazului:

$$p_g(h) = p_0 \frac{2(1 - \bar{R}^2)}{2 + (H - 3)\bar{R}^2} \quad (4')$$

$$p_g(h) = p_0 \frac{2(1 - \bar{R}^2)}{1 - 2\bar{R}^2 + H} \quad (4'')$$

unde $\bar{R} = R/R_0$ este raza relativa a celulei, care definește si gradul de umplere, iar $H = h/h_0$ este grosimea adimensională a stratului poros.

Din ecuațiile (4'), (4''), se poate determina limita maxima a razei relative in funcție de grosimea minima la care este comprimata celula:

$$\bar{R} \geq \sqrt{\frac{2}{3 - H_{\min}}} \quad (5')$$

$$\bar{R} \geq \sqrt{\frac{1 + H_{\min}}{2}} \quad (5'')$$

Pe baza unor modele dezvoltate anterior⁴ se poate calcula grosimea minima pana la care este comprimata celula in funcție de proprietățile materialului poros si amploarea impactului (definita prin impuls, respectiv masa de impact si viteza in momentul contactului), incluse intr-un parametru complex, denumit *impuls adimensional*:

⁴ T. Cicone, et al., Optimal porosity for impact squeeze of soft layers imbibed with liquids, Tribology International, 138 (2019), 140–149

$$\bar{M} = \frac{D w M}{\eta R^4}$$

unde D este constanta Kozeny din ecuația de variației a permeabilității cu porozitatea, η viscozitatea fluidului îmbibat iar w_0 viteza de impact.

Astfel, pentru un disc cu porozitatea inițială ε_0 grosimea minimă, în forma adimensională:

$$H_{\text{lim}} = 1 - \varepsilon_0 + \sqrt{\frac{5 \pi \varepsilon_0^2 (1 - \varepsilon_0)^2}{48 \bar{M} \varepsilon_0^2 + 3 \pi (1 - \varepsilon_0)^2}} \quad (6)$$

Combinând ecuațiile (5) și (6), se poate determina valoarea maximă a gradului de umplere pentru ca impactul să nu conducă la deteriorarea capsulei.

Pentru analiza numerică sunt necesare câteva precizări privind valorile impulsului adimensional. Astfel, în cazul utilizării materialului tridimensional S3D, constanta Kozeny are valori în intervalul $6 \cdot 10^{-10} \dots 12 \cdot 10^{-10}$, limite determinate prin experimente extensive realizate pe permeametrul aflat în dotarea laboratorului de Tribologie⁵. Considerând viscozitatea glicerinei dominantă în fluidul utilizat $\eta = 0.3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, un impact cu viteza $w = 20 \text{ m/s}$ cu o masă de 2 kg . (impuls 400 Nm/s) asupra unei celule în care discul din material poros are raza $R = 20 \text{ mm}$ se obține $\bar{M} = 0.5 \dots 1$, valorice sunt considerate maxime pentru impactul asupra unei căști.

Reprezentarea grafică a acestei limite pentru valori ale impulsului adimensional din jurul valorii mai sus calculate este prezentată în fig.2.3. Din această figură rezultă că pentru materialul S3D, care are o porozitate inițială de aproximativ 0.9, gradul de umplere trebuie să fie între 0.6 și 0.9, pentru valorile uzuale ale impactului posibil asupra căștii.

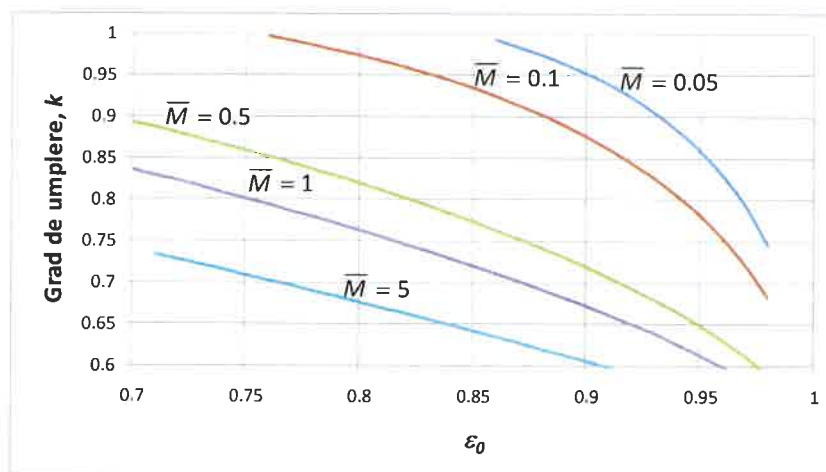


Fig.2.3 Variația gradului maxim de umplere cu porozitatea inițială și amplitudinea impactului

Rezultate impact tun Taylor

Testarea pe tunul Taylor a fost mai complexă și a implicat un număr mai mare de eșantioane. În tabelele 2.1 și 2.2 sunt centralizate datele relevante privind testele efectuate pe celule flexibile. Pe lângă testele pe celulele îmbigate s-au efectuat o serie de teste pe celule uscate și încă o serie de teste de impact liber, fără nicio celulă de atenuare. S-au avut în vedere trei viteze de impact obiectiv: I - 6 m/s, II - 9 m/s, III - 12 m/s. 24,9 21,2

⁵ C. Enescu, P. TURTOI, M. Stanciu, T. Cicone- Preliminary experimental assessment of radial flow permeability variation with the compression level of 3D fabrics- COMEC 2021, Brașov, ROMANIA, 21-23 October 2021

Tabel 2.1 Teste efectuate la impact pe suprafață plană

Nr.Test	Tip eșantion	Masă celulă [gram]	Viteză de impact
1	I	12,1	I
2	I	11,7	II
3	I	10,9	II
4	I	11,4	I
5	I	12,2	III
6	I	11,6	III
7	II	24,2	III
8	II	22,6	II
9	II	23,4	I
10	III	24,9	I
11	III	23,4	II
12	III	22,7	III
13	IV	12,2	I
14	IV	11,5	II
15	IV	11,3	III
16	IV	10,9	I
17	IV	11,1	III
18	IV	12,0	II
19	V	23,4	I
20	V	22,8	II
21	V	23,9	III
22	VI	22,2	I
23	VI	23,3	II
24	VI	24,1	III
25	I uscat	-	I
26	I uscat	-	II
27	IV uscat	-	I
28	IV uscat	-	II
29	Impact liber	-	I
30	Impact liber	-	II
31	Impact liber	-	II

Tabel 2.2 Teste efectuate la impact pe suprafață curba

Nr.Test	Tip eșantion	Masă celulă [gram]	Viteză de impact
1	I	11,8	III
2	I	12,3	II
3	I	11,7	II
4	I	11,3	I
5	IV	10,9	III
6	IV	10,6	II
7	IV	11,2	I
8	IV	12,2	III
9	VI	23,4	III
10	Impact liber	-	I
11	Impact liber	-	II
12	Impact liber	-	III
13	Impact liber	-	III
14	Impact liber	-	III

Folosind software-ul de analiză a imaginilor de la PHOTRON (PHOTRON FASTCAM Analysis) s-au determinat evoluțiile vitezelor proiectilelor pentru fiecare test în parte (fig.2.4...2.7). Deoarece curbele astfel determinate au o natură puternic oscilatorie, din cauza metodei de determinare bazată pe urmărirea unor grupuri de pixeli, a fost necesară realizarea unei filtrări suplimentare. În urma filtrării s-au determinat atât viteza de impact, cât și viteza de revenire a proiectilului, dacă a fost cazul (fig.2.8).



Fig.2.4 Captură cu proiectilul înainte de impactul plan



Fig.2.5 Captură de pe durata procesului de impact plan



Fig.2.6 Captură cu proiectilul înainte de impact curb

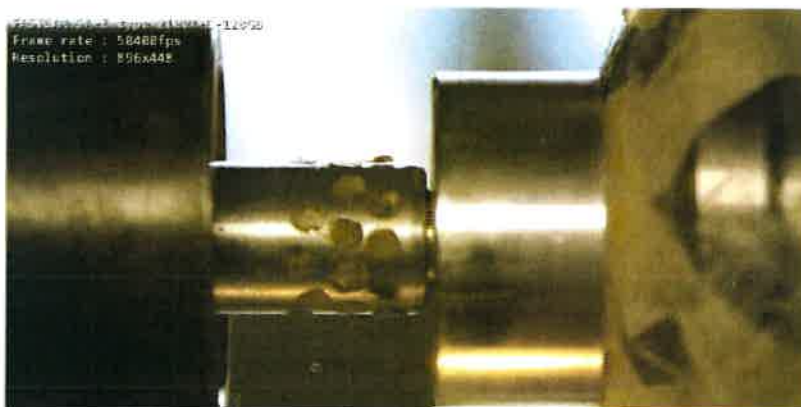


Fig.2.7 Captură de pe durata procesului de impact curb

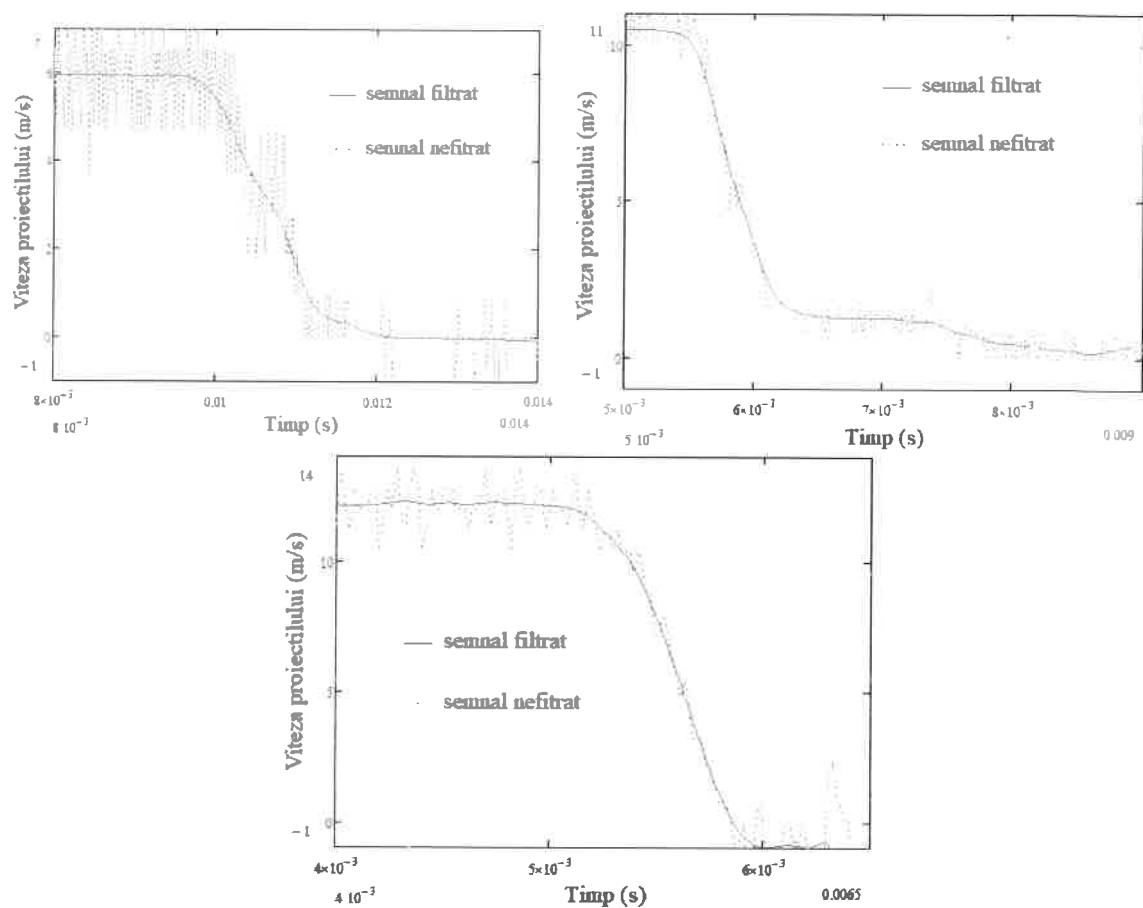
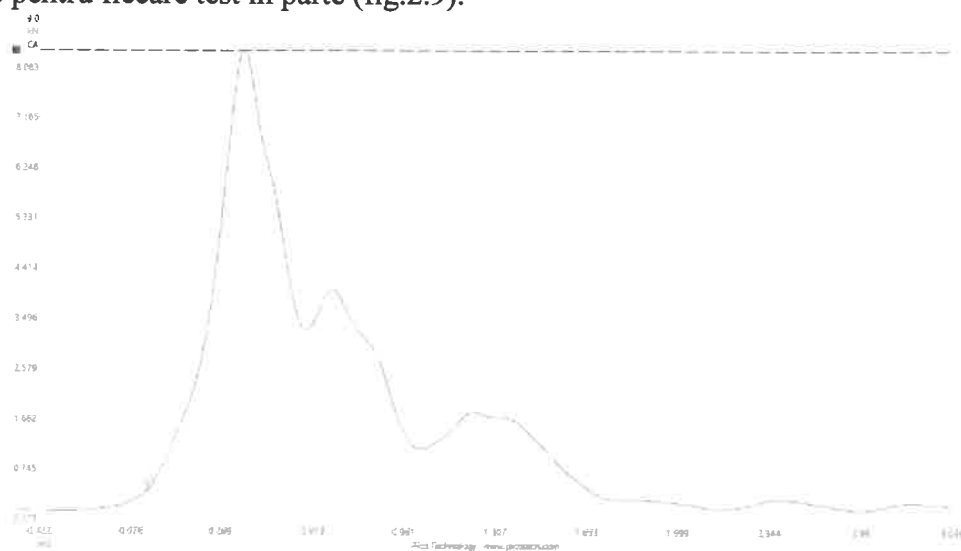


Fig.2.8 Exemple de filtrare a semnalelor achiziționate cu camera

Datele obținute cu traductorul de forță au fost folosite pentru determinarea valorilor maxime înregistrate pentru fiecare test în parte (fig.2.9).



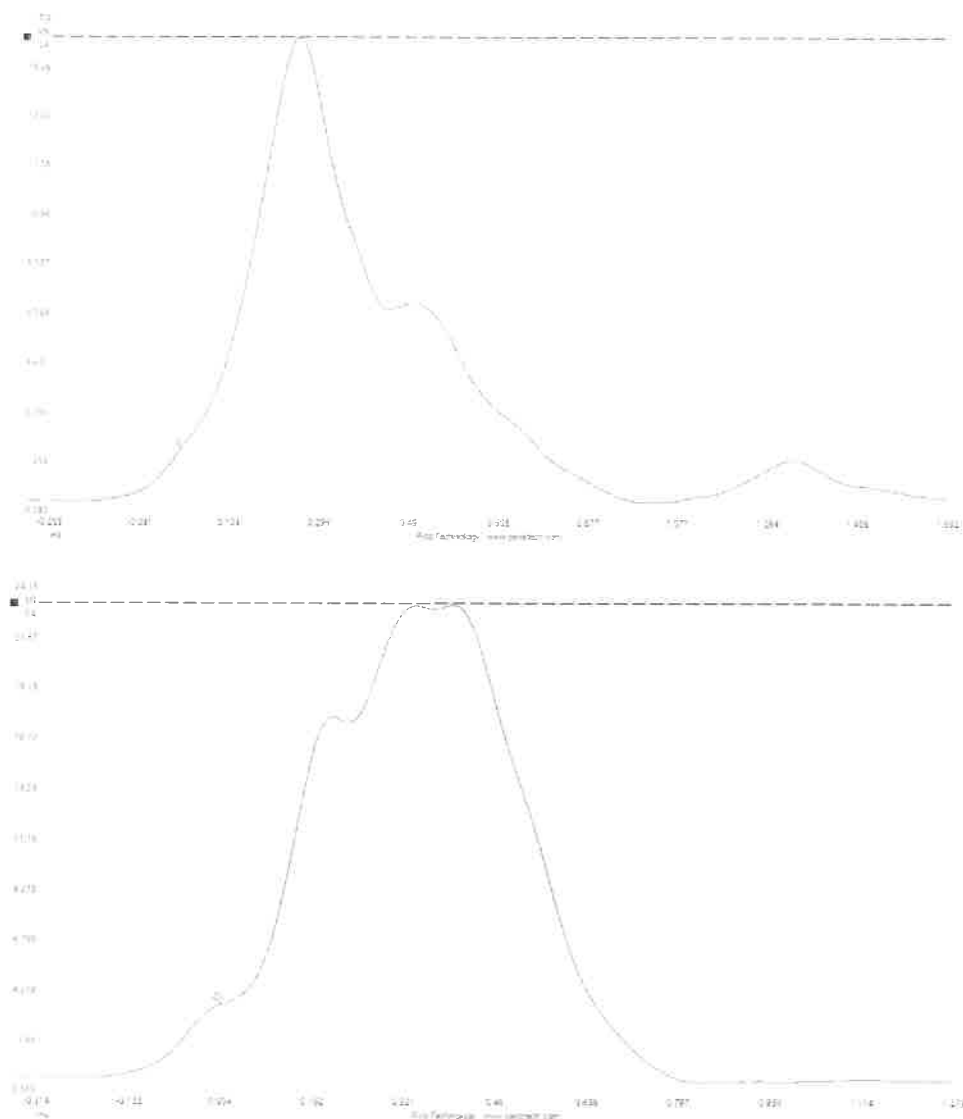


Fig.2.9 Exemple de semnale achiziționate cu senzorul de forță

În tabelele 2.3 și 2.4 sunt centralizate datele cele mai relevante legate de testele efectuate.

Impactul pe suprafață plană

O analiză a rezultatelor arată că pentru viteze de impact între 6 și 9 m/s cele două tipuri de țesături produc efecte similare. După depășirea acestor valori țesătura utilizată pentru seturile I-III se dovedește mai utilă în reducerea intensității șocului deoarece forțele maxime înregistrate rămân mai mici iar vitezele de revenire sunt de asemenea mai mici decât în cazul seturilor IV-VI.

Acest fapt se explică prin densitățile diferite ale celor două țesături, cea mai ușoară fiind cea folosită pentru I-III. Aparent, densitatea crescută împiedică mișcarea radială a lichidului newtonian și transferul de impuls de pe direcție axială pe direcție radială.

Forța medie la care celulele se sparg este de 6,5 N, în toate testele acest fenomen producându-se.

În legătură cu testele efectuate cu celule de amortizare legate între ele prin canal, s-a observat că doar în cazul celor cu canal lat s-a produs transferul de lichide între celule.

Testele efectuate pentru capsulele uscate, fără glicerină, au arătat că țesătura 3D nu contribuie decât marginal la atenuarea șocului prin deformarea suferită.

În ceea ce privește atenuarea măsurată prin comparație cu valorile maxime ale forței la impactul liber se asigură o reducere a șocului de 70-50%, în funcție de viteza de impact. Se remarcă o reducere a eficienței pe măsură ce viteza de impact crește.

Tabel 2.3 Rezultate experimentale pentru impactul pe suprafață plană

Nr. test	Tip celulă	Maximul forței de impact [kN]	Viteza de impact [m/s]	Viteza de revenire [m/s]
1	I	8,41	5,99	0
2	I	neînregistrat	10,44	0
3	I	16,36	10,59	0
4	I	8,94	6,79	0
5	I	neînregistrat	12,69	-0,48
6	I	23,38	12,25	-0,99
7	II	29,38	neînregistrat	-
8	II	14,8	9,2	-0,1
9	II	7,36	6,55	0
10	III	9,68	7,74	0
11	III	15,19	9,10	-0,1
12	III	28,24	12,12	-0,22
13	IV	9,94	7,59	0
14	IV	17,03	9,38	-0,1
15	IV	27,86	12,56	-0,55
16	IV	9,37	7,44	0
17	IV	28,71	12,1	-1,35
18	IV	10,39	8,0	-0,08
19	V	8,03	6,50	0
20	V	19,73	9,75	-0,85
21	V	27,70	11,55	-1,5
22	VI	9,92	7,42	0
23	VI	14,66	9,05	-0,2
24	VI	35,00	11,66	-1,9
25	I uscat	28,75	6,55	-1,45
26	I uscat	38,16	9,42	-1,75
27	IV uscat	25,02	6,2	-1,2
28	IV uscat	38,82	9,62	-1,73
29	Impact liber	28,52	7,01	-1,57
30	Impact liber	42,37	9,78	-2,91
31	Impact liber	34,59	9,00	-2,35

Impactul pe suprafață curbă

În cazul impactului pe suprafață curbă s-a remarcat obținerea unor valori ale forțelor maxime mai mici decât la impactul plan. De asemenea, reducerea șocului este mai mare și mai puțin dependentă de viteza de impact, valorile încadrându-se în intervalul 25-35% (fig.2.10-2.11).

Tabel 2.4 Rezultate experimentale pentru impactul pe suprafață curbă

Nr. test	Tip celulă	Maximul forței de impact [kN]	Viteza de impact [m/s]	Viteza de revenire [m/s]
1	I	14,64	11,69	-0,3
2	I	10,17	9,55	-0,3
3	I	7,73	8,26	-0,4
4	I	6,49	6,4	0
5	IV	13,09	11,9	-0,35
6	IV	7,65	8,78	-0,35
7	IV	3,81	5,45	0
8	IV	25,33	13,85	-0,4
9	VI	19,15	11,5	-0,35
10	Impact liber	26,94	6,85	-0,35
11	Impact liber	39,84	9,95	-2
12	Impact liber	neînregistrat	11,99	-2,1
13	Impact liber	41,82	11,7	-2
14	Impact liber	45,97	11,85	-1,9

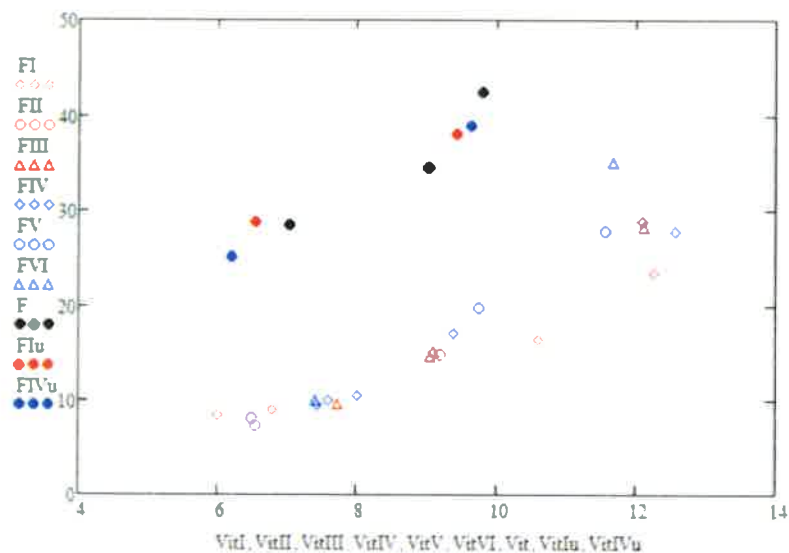


Fig.2.10 Tabloul de ansamblu cu valorile maxime ale forțelor în funcție de viteza de impact la impactul plan

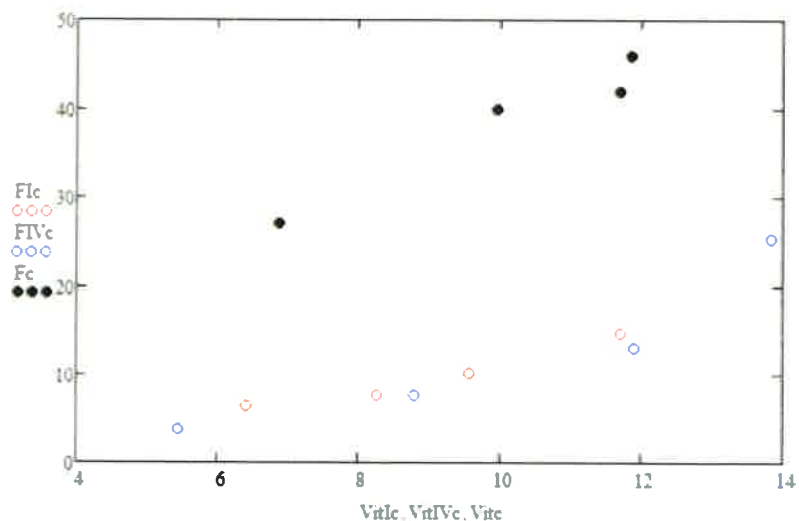


Fig.2.11 Tabloul de ansamblu cu valorile maxime ale forțelor în funcție de viteza de impact la impactul plan

Activitatea II.3 Stabilirea tehnologiei de fabricație pentru elementele de amortizare de tip capsule flexibile

În cadrul activității s-au analizat posibilitățile de așezare a capsulelor de formă rotundă pe interiorul unei căști de protecție balistică. Cele două variante analizate au avut la bază moduri de distribuire diferite, o configurație pătratică în prima variantă și o configurație hexagonală în a doua variantă. Configurația hexagonală are avantajul acoperirii mai bune a interiorului căștii.

Pentru asigurarea unei protecții suplimentare, elementele de amortizare plasate la interiorul unei căști au fost dispuse astfel încât să formeze o matrice de celule interconectate. Pentru alegerea dispunerii ideale a celulelor de amortizare în interiorul căștii, s-au studiat mai multe configurații geometrice (prezentate în forma desfășurată în fig.3.1). Spre deosebire de celulele prezentate anterior, dispuse în perechi, pentru forma finală a sistemului cu celule de amortizare, au fost luate în considerare configurații alcătuite din două jumătăți dispuse simetric, corespunzător celor două emisfere cerebrale.

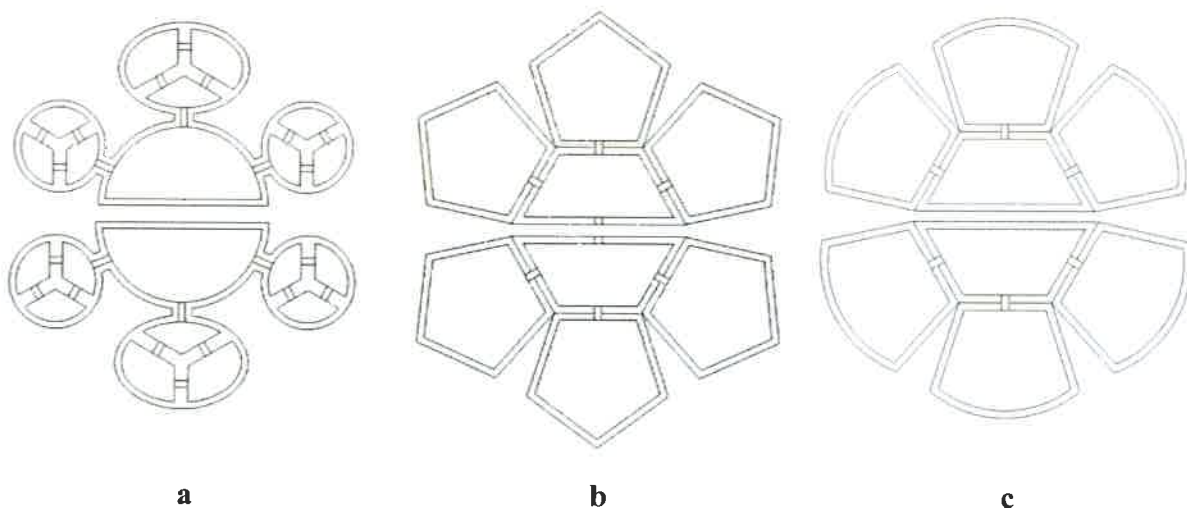


Fig. 3.1 Configurații pentru celulele de amortizare plasate în interiorul căștii

Activitatea II.4 Proiectarea și execuția prototipului industrial de serie mică pentru casca de protecție care înglobează un sistem de capsule de amortizare interconectate

Pornind de la configurația prezentată în fig. 3.1c, pentru forma finală a sistemului cu celule de amortizare, s-a optat pentru proiectarea unor celule de amortizare formate dintr-un element central și trei lobi inegali, astfel încât să asigure o acoperire cât mai mare (într-o proporție de minimum 70%) a suprafeței interioare a căștii, aflate în contact cu capul (fig.3.2).



Fig.3.2 Dispunerea matricei celulelor de amortizare în interiorul căștii

Pentru realizarea fizică a noii configurații de celule de amortizare, au fost necesare proiectarea și fabricarea unei noi matrițe (fig.3.3). În acest scop, s-au urmat pașii prezentați în etapa 3.2.

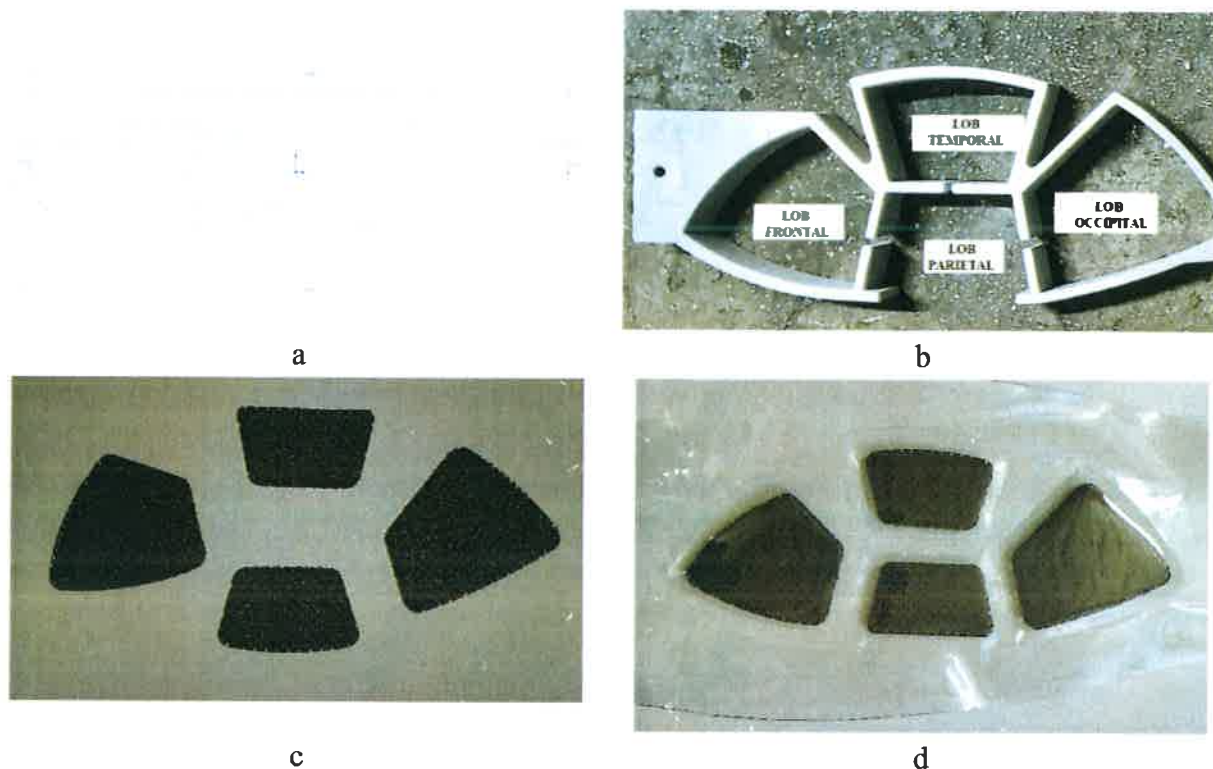


Fig.3.3 Etapele realizării matriței pentru configurația finală a sistemului de amortizare

- | | |
|---|-------------------------------------|
| a – Proiectarea schiței 2D a matriței | b – Fabricarea matriței |
| c – Decuparea eşantioanelor de material poros | d – Lipirea celulelor de amortizare |

Activitatea II.5 Proiectarea, execuția și instrumentarea unui dispozitiv experimental pentru prinderea căștilor ("head rig") cf. standardelor aplicabile

În prezent în testarea balistică a căștilor militare există standarde și metode care tratează în mod diferit răspunsul mecanic al ansamblului cap-gât pe gât impactat de un proiectil cu masă mică și viteză mare. Pe de-o parte există surrogate de cap care pot culisa împreună cu o bază de așezare pe o direcție paralelă cu direcția de deplasare a proiectilului (NIJ Standard for Ballistic Helmets c). O a doua variantă de surrogate de cap sunt montate pe suport fix dar care are în componența sa un subansamblu elastic ce reproduce flexibilitatea caracteristică gâtului uman. De asemenea, interpretarea rezultatelor testelor diferă în funcție de abordarea asumată, ca instrumente de analiză regăsindu-se clasicele plăci martor sau plastilina balistică, dar și senzori precum accelerometre sau traductorii de presiune și forță.

În cadrul proiectului s-au confecționat două tipuri de surrogat, pentru ambele variante de reproducere a răspunsului biomecanic a capului.

Pentru varianta ce culisează împreună cu baza de așezare surrogatul a fost conceput pe principiul modularității, partea superioară fiind interschimbabilă, în funcție de direcția din care vine proiectilul, stânga-dreapta sau față-spate. Pieseile au fost realizate pe baza desenelor de execuție printr-un procedeu de tipărire 3D (fig.4.1). În această configurație se pot folosi plăcile martor, plastilina balistică și traductorii de presiune.



Fig.4.1 Imagini cu surogatul pentru cap conceput conform prevederilor NIJ NIJ-STD-0106.01

Pentru varianta fixă, dar cu un element elastic, s-a integrat un mulaj de craniu, cu cutie craniană goală, ce poate fi încărcată cu material stimulant pentru țesutul moale specific creierului. În interiorul cutiei craniene s-a introdus un subansamblu ce conține un traductor de forță. Mulajul a fost achiziționat din comerț (fig.4.2).

Standurile concepute pot fi folosite atât în studii experimentale în care se execută trageri balistice cu muniție reală dar și în studii experimentale de laborator în care se folosesc proiectile de altă natură, precum proiectilele cu masă mare și viteză redusă.

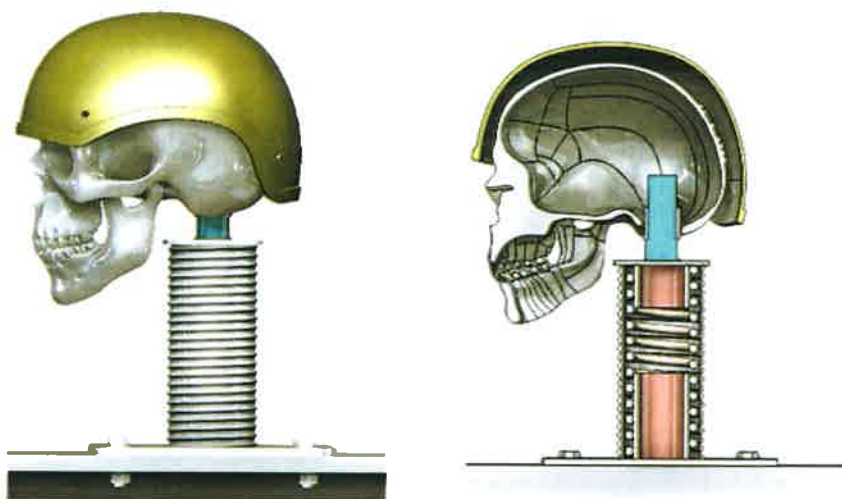


Fig.4.2 Conceptul surogatului pentru cap cu element flexibil

Activitatea II.6 Realizarea de experimente preliminare pe căști

Experimentele preliminare pe căști s-au efectuat conform procedurii operaționale codificate PO-LTEDIN-08, în care s-a stabilit modul de utilizare a echipamentului de propulsie pneumatic dezvoltat în cadrul ATM.

Pentru imprimarea vitezei de impact a proiectilului s-a folosit un tun cu aer comprimat, declanșarea mișcării proiectilului fiind controlată cu ajutorul unei electrovalve. Prin încărcarea rezervorului la diferite presiuni inițiale s-a variat și viteza de impact a proiectilului. Proiectilul modular, din aluminiu, cu masa de 0,76 kg, a fost prevăzut cu un cap sferic, detașabil, cu diametru de 28 mm și cu un accelerometru montat pe fundul proiectilului. Accelerometrul transmite datele la

placa de achiziție prin intermediul unui cablu ce este protejat pe durata testului de un furtun elicoidal fixat la unul dintre capete de fundul proiectilului printr-o mufă rapidă iar la celălalt capăt este fixat de peretele țevii (fig.5.1).



Fig.5.1 Cablu restrâns (stânga) înainte de tragere și întins (dreapta) după tragere

Testele s-au efectuat pe surogatul fix cu element flexibil, pe interiorul căștii de protecție fiind atașat câte o capsulă de amortizare (fig.5.2). S-au folosit următoarele echipamente: accelerometrul, sistemul de achiziție și măsurare a datelor PICOSCOPE seria 6000 și sistemul de filmare ultrarapidă PHOTRON FASTCAM SA3 model 120K-C2. Sistemul de filmare ultrarapid PHOTRON FASTCAM SA3 model 120K-C2 cuprinde o cameră de filmare de mare viteză FASTCAM SA 3, care conține un senzor CMOS ce permite funcționarea în regim de declanșare a dublei expunerii, facilitând înregistrarea mișcării la viteze foarte ridicate. Senzorul furnizează imagini digitale color cu o rezoluție de 1,3 milioane de pixeli (1280Hx1024V). Prin reducerea ferestrei de înregistrare, rata de achiziție a imaginilor poate să crească până la 100.000 cadre/secundă.

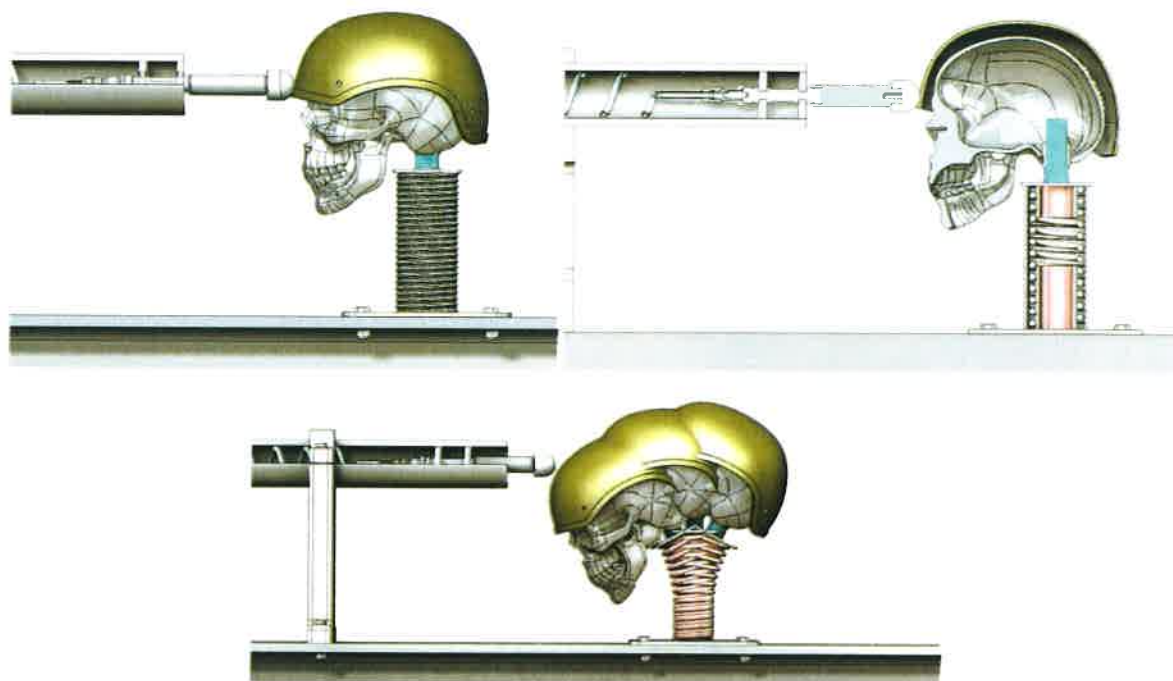


Fig.5.2 Concepția testului

Activitatea II.7 Diseminarea rezultatelor preliminare

În perioada 06-09.10.2020 o delegație a ATM a participat la lucrările conferinței Defense Technology Forum 2021, Shumen, Bulgaria, unde s-au prezentat rezultate ale cercetării desfășurate în cadrul proiectului în lucrarea intitulată *PRACTICAL ASPECTS OF DYNAMIC TESTING OF THE SHOCK ABSORBING MATERIALS INCORPORABLE INTO INDIVIDUAL COMBAT*

EQUIPMENT (Rotariu Adrian-Nicolae, Trană Eugen, Bucur Florina, Matache Liviu, Turtoi Petrică).

Alte două lucrări care conțin parțial rezultate obținute în cursul activităților desfășurate în cadrul acestui contract au fost prezentate la două conferințe desfășurate on-line:



Fig. 6.1 *Delegația ATM care a participat la conferință*

C. Enescu, P. Turtoi, A. Marinescu, T. Cicone- *Squeeze flow through a compressible multilayered porous structure* - 10th International Conference on Tribology – BALKANTRIB '20 Belgrade, Serbia, 20 – 22 May 2021.

C. Enescu, P. Turtoi, M. Stanciu, T. Cicone- *Preliminary experimental assessment of radial flow permeability variation with the compression level of 3D fabrics*- COMEC 2021, Brașov, ROMANIA, 21-23 October 2021 - lucrare in curs de publicare in International Journal on Interactive Design and Manufacturing, revista indexata WOS a editurii Springer.

CONCLUZII

Perechi de material și fluid au fost evaluate inițial din punctul de vedere al fabricației și testate experimental pentru a determina capacitatea de amortizare la impact pe standurile "drop tower" (UPB) și tun Taylor (ATM). Analiza a arătat o capacitate ridicată la amortizare pentru materialul textil tridimensional Spacer 3D.

Testarea inițială a celulelor flexibile a evidențiat performanțele soluțiilor de fabricație și prin urmare a fost proiectat un sistem complet de protecție pentru cap care să echipeze o cască de protecție balistică din kevlar bazat pe membrana și textile tridimensionale îmbibate cu soluție de glicerină. Celule flexibile cu geometrie adaptată au fost asamblate pentru a fi montate în interiorul unei căști balistice.

Pentru testarea la impact a căștilor a fost luat în calcul răspunsul dinamic al ansamblului cap-gât pe gât impactat de un proiectil. În acest scop tunul Taylor a fost instrumentat pentru a permite montarea unui surogat de cap care pot culisa împreună cu o bază de așezare pe o direcție paralelă cu direcția de deplasare a proiectilului și surogat de cap sunt montate pe suport fix dar care are în componența sa un subansamblu elastic ce reproduce flexibilitatea caracteristică gâtului uman.

Director proiect
Achim Veronica

